

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Сибирский федеральный университет»

На правах рукописи



ПЕТРОВ Павел Владимирович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УТЕПЛЕНИЯ  
ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ СТЕН ЗДАНИЙ**

2.4.6 – теоретическая и прикладная теплотехника

ДИССЕРТАЦИЯ  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, профессор  
Кулагин Владимир Алексеевич

Красноярск– 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>РАЗДЕЛ 1. Методология теплового режима и теплозащиты зданий</b> .....	9
1.1. Особенности конструкций и работы теплового режима зданий .....	9
1.1.1. Характеристика объекта исследования .....	9
1.1.2. Тепловой режим зданий .....	14
1.2. Существующие методы, технические решения по повышению тепловой эффективности и экономичности зданий .....	18
1.2.1. Способы расчета и нормирования .....	18
1.2.2. Современные направления развития .....	24
1.3. Основные выводы и постановка задач исследования .....	31
<b>РАЗДЕЛ 2. Методические основы исследования оптимальных показателей теплозащиты и теплового режима зданий</b> .....	33
2.1. Основные положения по оптимизации теплозащиты и теплового режима зданий .....	33
2.1.1. Задача нахождения оптимальных решений .....	33
2.1.2. Критерии оптимизации .....	37
2.2. Методологические основы построения алгоритма определения оптимальных теплотехнических параметров .....	42
2.2.1. Структура теплового потребления здания .....	42
2.2.2. Математическая модель процессов теплообмена здания .....	44
2.3. Основные выводы по второму разделу .....	49
<b>РАЗДЕЛ 3. Методика и алгоритм технико-экономической оптимизации утепления наружных ограждающих конструкций стен зданий</b> .....	51
3.1. Расчет величины дисконтированных затрат системой теплового потребления здания при утеплении стен .....	51
3.1.1. Эксплуатационные затраты системой теплопотребления здания ...	51
3.1.2. Приведенные дисконтированные затраты на утепление тепловой изоляцией наружных ограждающих конструкций стен здания .....	53
3.2. Определение оптимальной толщины утепления тепловой изоляцией наружных ограждающих конструкций стен зданий ...	59
3.2.1. Оптимальная толщина утепляющего слоя наружных стен здания	59
3.2.2. Структура оптимизации утепления стен зданий .....	64

3.3. Основные выводы по третьему разделу.....	69
<b>РАЗДЕЛ 4. Исследование адекватности и анализ эффективности разработанной методики технико-экономической оптимизации утепления наружных ограждающих конструкций стен зданий .....</b>	<b>73</b>
4.1. Описание экспериментального исследования и анализ теплопотребления здания .....	73
4.1.1. Описание объекта экспериментального исследования .....	73
4.1.2. Анализ теплопотребления здания на основе рассчитанных и измеренных значений .....	81
4.2. Результаты численного исследования влияния основных факторов на теплозащиту здания и оценка технико-экономического эффекта от использования предложенной разработки .....	88
4.2.1. Результаты численного исследования теплозащиты здания, с учётом регулирования отпускаемой тепловой энергии .....	88
4.2.2. Оценка технико-экономического эффекта от использования предложенных разработок .....	101
4.3. Основные выводы по четвертому разделу .....	103
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>105</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>107</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Акт использования научно-технической разработки.....</b>	<b>121</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Акт передачи научно-технической разработки.....</b>	<b>122</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.....</b>	<b>123</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Выписка из технического паспорта на здание .....</b>	<b>124</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Перечень основного оборудования крышной котельной .</b>	<b>126</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 6. Счетчики потребляемых энергоресурсов .....</b>	<b>127</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 7. Основные характеристики жилого здания .....</b>	<b>131</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 8. Расчет производственного здания с административно-бытовыми помещениями по предложенной разработке ...</b>	<b>140</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью усовершенствования новых методов эффективного сбережения энергоресурсов за счет модернизации утепления существующих зданий, т. е. реконструкции жилищного фонда морально и физически устаревшей застройки.

При отсутствии методологического положения об эффективности реконструкции зданий и сооружений будут непрерывно увеличиваться затраты на энергетические ресурсы, среди которых основную долю затрат составляют тепловая и электрическая энергия, затраченные на отопление, вентиляцию зданий. Согласно федеральному закону «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности» от 23.11.2009 № 261-ФЗ (ред. от 14.07.2022) промышленные предприятия должны принять меры по эффективному и рациональному использованию энергетических ресурсов с учетом ресурсных, производственно-технологических, экологических и социальных условий.

**Степень разработанности темы диссертации** в областях математического моделирования, энергосбережения, повышения эффективности теплозащиты и теплового режима зданий отражена в трудах авторов: Самарина О.Д., Шербакова В.В., Мунца В.А., Береговой А.М., Шихалиева С.С., Шахина В.П., Горячева С.В., Ватина Н.И., Афанасьева А.А., Матвеева Е.П., Еремкина А.И., Сигачева Н.П., Матросова Ю.А., Фролова А.А., Hong T., Crawley D.B., Hoes P., Fabi V., Alajmi A., Lubina P.

и др. Однако современные нормы сбережения тепловой энергии и теплозащиты при капитальном ремонте зданий ориентированы на применение весьма ограниченного набора решений по снижению энергопотребления и не всегда учитывают конкретные условия эксплуатации. В настоящее время отсутствует теоретически обоснованная методология в области теплосбережения при модернизации зданий, позволяющая подобрать наиболее целесообразные теплотехнические параметры утепления ограждающих конструкций.

В связи с этим актуальной задачей является усовершенствование теоретических методов определения эффективных теплотехнических параметров утепления ограждающих конструкций стен зданий, учитывающих процессы регулирования энергетических ресурсов.

**Объект исследования** – системы теплового потребления зданий жилого, административного, общественного и производственного назначения.

**Предмет исследования** – характеристики утепления ограждающих конструкций зданий.

**Целью диссертационной работы** является повышение эффективности утепления ограждающих конструкций зданий с учетом регулирования потребления тепловой энергии.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

- 1) выполнен анализ существующих методов и технических решений по повышению эффективности теплозащиты и теплового режима зданий;
- 2) предложены алгоритм и программное обеспечение для определения оптимальной толщины утепляющего слоя тепловой изоляции;
- 3) обоснована и реализована математическая модель процессов теплообмена в системе теплоснабжения для верификации влияния оптимальных теплотехнических параметров утепления стен на теплозащиту и тепловой режим здания;
- 4) создана методика оценки целесообразности и эффективности практического использования предложенной разработки.

**Методы исследований** сочетают в себе методы математического моделирования теплообмена, теплового баланса и численного решения оптимизационных задач, нелинейного программирования, современные методы технико-экономических расчетов эффективности энергосберегающих мероприятий. Верификация полученных результатов подтверждена методом «пассивного эксперимента».

**Соответствие паспорту специальности 2.4.6** – теоретическая и прикладная теплотехника и направлениям исследований: п. 6. «Научные основы повышения эффективности использования энергетических ресурсов в теплотехническом оборудовании и использующих теплоту системах и установках»; п. 7. – «Совершенствование методов расчета ... систем теплоснабжения с целью повышения их энергоэффективности»; п. 9. «Системы обеспечения теплового режима теплоэнергетических, промышленных и коммунальных объектов, теплоснабжающего и тепловыделяющего оборудования, методы их совершенствования. Математическое моделирование и оптимизация

энерготехнологических систем промышленных предприятий и систем теплоснабжения зданий, районов и городов».

**Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:**

1. Усовершенствована математическая модель теплообмена зданий, отличающаяся тем, что учитывает тепловые потери трубопроводной системой «отопление – вентиляция», проходящей через неотапливаемые помещения.

2. Разработана методика определения эффективного утепления ограждающих конструкций стен зданий, отличающаяся тем, что учитывает взаимосвязь конструктивных, теплотехнических, режимных параметров и экономических показателей с учетом регулирования отпускаемой тепловой энергии.

3. Предложены алгоритм и программное обеспечение, которые, в отличие от существующих, позволяют рассчитывать оптимальную толщину тепловой изоляции стен зданий с учётом реального изменения условий отпускаемой тепловой энергии в зависимости от регулирования системы, конструкции стен, дисконтных затрат и срока службы.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Предложенная математическая модель процессов теплообмена в ограждающих строительных конструкциях зданий учитывает тепловые потери трубопроводной системой «отопление – вентиляция», проходящей через неотапливаемые помещения.

2. В ходе проведенного исследования выявлены методические подходы к повышению эффективности утепления наружных ограждающих конструкций стен зданий за счет регулирования отпускаемой тепловой энергии.

3. Предложенный алгоритм позволил определить оптимальную толщину тепловой изоляции стен зданий с учётом реального изменения условий отпускаемой тепловой энергии в зависимости от регулирования, конструкции, стоимости и срока службы.

4. Полученные результаты исследований по оптимизации параметров теплозащиты и теплового режима зданий позволяют сократить расходы потребляемых энергетических ресурсов.

5. Выявленные факторы, влияющие на оценку технико-экономической эффективности разработанных решений, способствуют повышению точности выбора оптимальных параметров утепления ограждающих конструкций стен здания.

**Значение для теории.** Предложена методика определения технико-экономических показателей теплозащиты зданий с учетом регулирования тепловой энергии и найденного оптимального параметра, позволяющего сократить расходы потребляемых энергетических ресурсов.

**Практическая значимость результатов работы.** Созданные методика, алгоритм и программное обеспечение позволили решить задачу повышения технико-экономической эффективности теплозащиты здания и обеспечить сбережение энергетических ресурсов в тепловых технологических системах, что позволяет для исследуемого объекта: повысить точность выбора оптимальных параметров утепления ограждающих конструкций стен здания, и класс энергосбережения; снизить удельный годовой расход электрической и тепловой энергии на отопление, вентиляцию; повысить экономичность проведения реконструкции.

**Использование полученных результатов.** Научные и практические результаты работы применяются при проектировании и проведении энергетического обследования зданий в ООО «Сибирская проектная компания», ООО «Инком-Энерго», СРО НП «Энергоаудиторы Сибири», ФГУП «ФНПЦ «Прогресс» (Омск); разработанные методика и алгоритм расчета используются в учебном процессе кафедры «Теплоэнергетика» ФГБОУ ВО «ОмГУПС» и кафедры теплотехники и гидрогазодинамики ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (Красноярск).

**Достоверность научных положений и выводов.** Достоверность результатов исследований базируется на фундаментальных положениях теплофизики, теплового баланса, общей теории технико-экономических расчетов и математического моделирования с обработкой результатов на ЭВМ. Выводы достаточно хорошо коррелируют с результатами, полученными другими исследователями, и не противоречат физическим закономерностям в смежных областях знаний.

**Личный вклад автора** заключается в формировании основных предпосылок исследования, в разработке технических решений и методики технико-экономической оптимизации утепления наружных ограждающих конструкций стен зданий с учетом отпускаемой тепловой энергией, в создании математической модели процессов теплообмена и теплового режима здания, алгоритма определения оптимальной толщины утепления ограждающих конструкций стен зданий, в проведении эксперимента и оценке технико-экономической эффективности реализации предложенной разработки.

**Апробация результатов.** Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на: Первой Всероссийской конференции с международным участием «Енисейская ТеплоФизика» (Красноярск, 2023); Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Актуальные вопросы энергетики» (Омск, 2018); Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Повышение энергоэффективности объектов энергетики и систем теплоснабжения» (Омск, 2017); Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы энергетики» (Омск, 2017); IV Международная научно-практическая конференция «Современные концепции научных исследований» (Нижний Новгород, 2015).

**Публикации.** По результатам диссертации опубликовано 16 научных работ, из них: 9 публикаций в журналах из Перечня ВАКа; одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ; 6 статей в материалах научных конференций различного уровня.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованных источников из 114 наименований, перечня сокращений и условных обозначений, восьми приложений, содержит 156 страниц основного текста, 33 рисунка и восемь таблиц.



## **РАЗДЕЛ 1. Методология теплового режима и теплозащиты зданий**

### **1.1. Особенности конструкций и работы теплового режима зданий**

#### **1.1.1. Характеристика объекта исследования**

Результатом длительного совершенствования конструктивных решений является огромный опыт в области строительства зданий и сооружений.

Жилищный фонд Российской Федерации характеризуется разнообразием застройки, сериями и периодичностью возведения зданий: дореволюционные постройки – 4 %; постройки 1917-1960 годов – 18 %; с 1961 года по настоящее время – 78 % [14].

Зданиями называют наземные сооружения, имеющие внутреннее пространство, которое предназначено для удовлетворения различных потребностей общества. К «зданиям» относят жилые дома, школы, театры, больницы и др.

Наземные сооружения, не имеющие внутреннего пространства, а также подземные сооружения, считаются инженерными сооружениями (мосты, резервуары, плотины, набережные, станции метро и др.), где строительные конструкции требуют специальных расчетов.

Типы зданий по назначению классифицируют как гражданские (жилые и общественные), промышленные (производственные, обслуживающие, вспомогательные) и сельскохозяйственные.

Промышленные (химические, металлургические, машиностроительные, транспортные и др.) и сельскохозяйственные здания (животноводческие фермы, теплицы, птицефермы и др.) подразделяются по характеру выполняемых в них производственных процессов и обслуживают различные отрасли.

Гражданские здания, жилые дома, гостиницы, общежития, и общественные (школы, магазины, театры, спортивные комплексы и др.), в зависимости от местоположения бывают городского и сельского типа.

Общественные здания, к которым относят административные, детские учреждения, учебные, культурно-просветительные, торговые, коммунальные,

учреждения здравоохранения и др., обладают своими конструктивными особенностями. Данные объекты могут сооружать в комплексе с различными по назначению помещениями.

Здания культурно-бытового назначения по принципу удобства обслуживания делят на четыре группы:

- первичного обслуживания (детские комнаты, прачечные), их располагают в непосредственной близости от жилого дома или в нем;

- учреждения повседневного обслуживания (детские ясли, сады, школы, продуктовые магазины, кулинарии, приемные пункты, парикмахерские, мастерские по ремонту обуви и одежды и т.п.) размещают в удалении от жилищ не более чем на 400-500 м, а детские учреждения – 250-300 м;

- здания периодического пользования могут находиться вне микрорайона;

- общегородские учреждения (административные учреждения, театры, музеи, большие стадионы и т. п.) располагают из расчета на определенное число жителей.

Промышленные здания (заводы, фабрики, электростанции и др.) создают с использованием новейших достижений техники, прогрессивных инженерных конструкций, новых строительных материалов. Крупные промышленные комплексы занимают территорию протяженностью в несколько километров. Промышленные предприятия проектируют, как правило, в отдалении от населенных пунктов с учетом ветров и вблизи железных дорог.

Небольшие бытовые и торговые предприятия объединяют в одно здание – общественно-торговый центр микрорайона. Детские дошкольные учреждения и общеобразовательные школы – в отдельно стоящих зданиях, строятся по типовым проектам.

К основным сериям типовых проектов зданий относят 1-464 (1-464А), 1-335, 1-468 (1-468 БНЧ), 1-438, 1-439, 1-447, 1-467, 1-510, 1-511, 1-515, К-7, ОД, П-32, Г (ГИ), 1-ЛГ-507 [15].

На конструкцию зданий в конце девятнадцатого и начале двадцатого веков оказывало основное влияние, выраженное в стоимости земельного участка и

удаленности от центральной части города. Так же получили распространение доходные дома, в которых проживало более 70 % городского населения. Этот период характеризуется возведением зданий с высокой плотностью застройки. Ее форма способна интегрировать в высокоорганизованное городское пространство с максимальным экономическим эффектом, многообразными функциональными и социальными составляющими городской среды.

Здания указанного периода подразделяются по уровню планировочных решений на четыре группы.

К первой группе относят здания, построенные в предреволюционное десятилетие. Они состоят из квартир повышенного качества, рассчитанных на наиболее состоятельные слои населения. В планировке квартир используется принцип зонирования на три группы помещений: парадную, группу спален и хозяйственных помещений. При этом парадные и черные лестницы расположены по одной поперечной оси. Они отличаются большой шириной корпуса, которая достигает 15-17 м, большой толщиной кирпичных стен.

Во вторую группу входят секционные дома дореволюционной постройки и первых десятилетий Советской власти. Квартиры этой группы предназначались для покомнатного заселения. Площадь квартир достигала 80-100 м<sup>2</sup> с высотой этажа 3,0-3,5 м. Ширина корпусов находилась в пределах 10-16 м.

В третьей группе включены дома «коридорной» и «галерейной» систем. В «коридорных» домах старой постройки комнаты составляли площадь 20-35 м<sup>2</sup> и располагались с двух сторон коридора. Дома для дешевых гостиниц имели комнаты площадью 10-12 м<sup>2</sup>, высота этажей составляла 3-3,5 м.

К четвертой группе домов относятся здания со смешанной планировкой, которые имеют ширину корпусов 10-16 м, с расположением комнат смешанной ориентацией и лестничными клетками различных конструктивных решений.

Несмотря на различия, между зданиями разного назначения, как во внешнем виде, так и во внутренней структуре, все они состоят из ограниченного числа основных взаимосвязанных архитектурно-конструктивных элементов,

выполняющих вполне определенные функции.

Основные элементы здания подразделяются на следующие группы:

- 1) несущие, воспринимающие основные нагрузки, возникающие в здании;
- 2) ограждающие, разделяющие помещения, а также защищающие их от атмосферных воздействий и обеспечивающие сохранение в здании определенной температуры;
- 3) элементы, которые совмещают несущие и ограждающие функции.

Основа структуры здания состоит из фундамента, стен, перекрытий, опор, крыши, перегородок, лестниц, окон и дверей.

Несущие конструкции зданий старой постройки выполнялись с использованием кирпича. Очень часто фасады этих зданий украшались лепниной, мозаикой.

Фундамент – это подземная конструкция, основным назначением которой является восприятие нагрузки от здания и передача ее основанию.

Стены отделяют помещения от внешнего пространства (наружные стены) или от других помещений (внутренние стены), выполняя ограждающую функцию. Кроме того, стены могут нести нагрузку не только от собственного веса, но и от вышележащих частей здания (перекрытий, крыши и др.), осуществляя несущую функцию.

Разделение стен:

- «несущие», которые кроме собственного веса, воспринимают нагрузку от других конструкций и передают ее фундаменту;
- «самонесущие», опирающиеся на фундамент и несущие нагрузку от собственного веса по всей высоте, но не воспринимающие нагрузки от других частей здания;
- «ненесущие», служат только ограждениями, свой собственный вес несут в пределах одного этажа, опираясь на другие элементы здания.

Перекрытия – это конструкции, разделяющие внутреннее пространство здания на этажи. Они ограничивают этажи и расположенные в них помещения сверху и снизу и несут, кроме собственного веса, полезную нагрузку – вес людей,

оборудования и предметов, находящихся в помещениях.

Перекрытия играют существенную роль в обеспечении пространственной жесткости здания, неизменяемости его конструктивной схемы под действием всех возможных нагрузок. В зависимости от их расположения в здании, бывают: междуэтажные, разделяющие смежные по высоте этажи; чердачные, отделяющие верхний этаж от чердака; нижние, отделяющие нижний этаж от грунта; над подвальные, отделяющие первый этаж от подвала.

По верху междуэтажных перекрытий настилают полы в зависимости от назначения и режима эксплуатации помещения. А нижняя поверхность перекрытия образует потолок для нижележащего помещения.

Отдельными опорами называют стойки (столбы или колонны), предназначенные для поддержания перекрытий, крыши, а иногда и стен, передачи нагрузки от них непосредственно на фундамент.

Перекрытия могут опираться на колонны или уложенные по ним мощные балки, называемые «прогон». Колонны и прогоны образуют внутренний каркас здания.

Крыша является конструкцией, защищающей здание сверху от атмосферных осадков, солнечных лучей и ветра. Верхняя водонепроницаемая оболочка крыши называется «кровля». Вместе с чердачным перекрытием «крыша» образует покрытие здания. Мансардным этажом называется этаж в чердачном пространстве, фасад которого полностью или частично образован поверхностью наклонной или ломаной крыши.

В том случае, если в здании отсутствует чердак, функции чердачного перекрытия и крыши совмещаются в одной конструкции, которая называется «бесчердачным покрытием».

Перегородками называют сравнительно тонкие стены, служащие для разделения внутреннего пространства в пределах одного этажа на отдельные помещения. Перегородки опираются в каждом этаже на перекрытия и никакой нагрузки, кроме собственного веса, не несут.

Лестницы служат для сообщения между этажами. Из противопожарных

соображений лестницы заключают в специальные, огражденные стенами, помещения, которые называют «лестничные клетки».

Помещения в здании изолированы от внешней среды, что позволяет создать в них определенный микроклимат. Наружные ограждения защищают от непосредственных климатических воздействий, специальные системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха поддерживают в помещениях в течение всего года определенные параметры внутренней среды.

### 1.1.2. Тепловой режим зданий

Тепловым режимом здания называется совокупность всех факторов и процессов, определяющих тепловую обстановку в его помещениях [16].

В холодный период года под влиянием низкой температуры и ветра через наружные ограждения происходит потеря тепла, и внутренние поверхности, обращенные в помещение, оказываются относительно холодными. В то же время через поверхности отопительных устройств в помещение непрерывно подается тепло, вследствие чего повышается температура. Таким образом, определенное постоянство температурной обстановки в помещении должно быть выдержано при наличии в нем холодных внутренних поверхностей наружных ограждений и нагретых поверхностей приборов системы отопления.

При наличии холодных и нагретых поверхностей в помещении возникают конвективные потоки воздуха, которые тем интенсивнее, чем больше температура поверхностей отличается от температуры внутреннего воздуха. Ниспадающие холодные потоки от наружных ограждений могут заметно переохладить нижнюю зону помещения, а восходящие потоки нагретого у горячих поверхностей воздуха создают тепловую подушку под потолком помещения.

Инфильтрация наружного воздуха через ограждения и действие нагретых или охлажденных струй воздуха, подаваемых в помещение вентиляционными системами, также вызывает движение воздуха в помещении. Нагретые и холодные поверхности являются источниками радиационного нагрева и охлаждения в здании.

Остальные поверхности внутренних ограждений, оборудование, мебель и воздух являются пассивными участниками процессов теплообмена и образования конвективных потоков.

Интенсивные потоки холодного воздуха и потеря тепла излучением, а также чрезмерное количество излучаемого тепла создают у людей, находящихся в помещении, ощущение неприятного переохлаждения или перегревания. При определенных условиях такая обстановка может привести к простудным и другим заболеваниям.

Температура наружного воздуха непрерывно изменяется, в связи, с чем изменяются температура поверхностей ограждений и нагревательных приборов, интенсивность конвективных токов. Наибольшие разности температуры в помещении наблюдаются в суровые периоды зимы. Если защита наружных ограждений и тепловая мощность системы отопления обеспечат удовлетворительные внутренние условия в этот отрезок времени, то они смогут при соответствующем регулировании поддержать необходимые условия в помещении и в течение всего остального холодного периода года. Поэтому, для систем отопления зданий, необходимо рассчитывать ограждения и обогревающие устройства так, чтобы они обеспечили требуемые тепловые условия в обслуживаемой зоне помещений, прежде всего в наиболее суровый период зимы, который в связи с этим считается расчетным.

Основное требование, предъявляемое к зданию – это функциональная целесообразность, т. е. полное соответствие своему назначению. Этому требованию должно соответствовать как объемно-планировочное решение (состав и размеры помещений, их взаимосвязь), так и конструктивное решение (конструктивная схема здания, материал основных конструкций, отделочные материалы). Функциональное назначение определяет требования к освещенности, температуре, звукоизоляции, вентиляции, отоплению и др.

Исследования тепловых режимов зданий показали, что большинство изменений в этой области в течение последних двадцати лет обусловлены повышением требований к теплозащитным качествам ограждающих

конструкций. Введение в действие изменений к СНиП II-3-79\* «Строительная теплотехника» [68], регламентировавших поэтапное увеличение требований к приведённому сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций зданий в два раза, кардинальным образом изменили подходы к выбору применяемых материалов, конструкций и их проектированию. Однослойные стены из кирпича, керамзитобетона, ячеистых бетонов, стали практически неприемлемыми как с технической, так и экономической точки зрения.

Высокие требования к тепловой защите ограждающих конструкций обусловили переход на многослойные конструкции с применением эффективных утеплителей, что способствовало изменению конструктивной схемы зданий, передачи нагрузки от наружных стен на межэтажные перекрытия, применение фасадных систем тепловой изоляции.

Прошедшее десятилетие охарактеризовалось как период крупномасштабного эксперимента в области энергосбережения по контролю и оценки эффективности показателя тепловой защиты зданий.

Определяющим показателем тепловой защиты и энергетической эффективности зданий принят удельный годовой расход тепловой энергии на отопление и вентиляцию. Данное решение определено постановлением Правительства РФ № 18 «Об утверждении Правил установления требований энергетической эффективности для зданий, строений, сооружений и требований к правилам определения класса энергетической эффективности многоквартирных домов» от 25.01.2011 года [74] и приказом Министерства регионального развития РФ № 224 «Об утверждении требований энергетической эффективности зданий, строений, сооружений» от 17.05.2011 года [75]. Данный подход представляется абсолютно правильным, поскольку с точки зрения потребителя не столь важно, какое сопротивление теплопередаче имеют наружные стены, окна и покрытия в здании. Важен конечный результат – затраты на отопление и вентиляцию. Но конечные требования для ограждающих конструкции должны обеспечивать выполнение требуемых санитарно-гигиенических условий эксплуатации зданий.



Следует отметить, что вышеупомянутыми документами предусмотрено дальнейшее поэтапное снижение нормативных значений удельного расхода тепловой энергии. В качестве дополнительных технических требований, вводятся требования по интеграции в энергетический баланс зданий, строений, сооружений нетрадиционных источников энергии и вторичных энергоресурсов.

Анализ структуры тепловых потерь жилых зданий после капитального ремонта показывает, что доля потерь тепла через стены, чердачные перекрытия, окна и пол составляет в сумме 30-45 %, подогрев приточного вентиляционного воздуха 70-55 %, от суммарных тепловых потерь [6, 15, 17].

Температура внутреннего воздуха в помещении зависит непосредственно от температуры внутренних поверхностей ограждающих конструкций здания. Поэтому высокая температура наружного воздуха, жаркое продолжительное лето и значительная интенсивность солнечной радиации, приводят к перегреву ограждающих конструкций зданий.

Наиболее подвержены перегреву в теплый период года невентилируемые совмещенные крыши жилых и общественных зданий, в том числе детских дошкольных и общеобразовательных учреждений. При этом перегрев внутренней поверхности совмещенной крыши значительно влияет на микроклимат в помещениях, в результате чего для поддержания комфортных условий вынуждены использовать системы кондиционирования воздуха и вентиляции.

При проектировании и анализе функционирования систем кондиционирования и вентиляции используется детерминированная модель системы или принцип пошаговой оптимизации [76]. В многошаговой операции происходит выбор действия на каждом этапе с учетом всех его будущих последствий на еще предстоящих шагах. Данные способы еще требуют доработки. В результате чего практика показывает, что большинство решений остаются далеко не эффективными и зачастую ведут к снижению уровня тепловой защиты зданий.

В настоящее время одной из главных проблем жизнеобеспечения

населения является создание оптимального теплового режима в зданиях различного назначения. Устойчивость такого режима является важным развитием всей социально-экономической сферы.

Разработка и реализация методов качественного анализа исследуемых тепловых режимов при капитальном ремонте зданий и сооружений, подготовка на их основе специализированных способов и методов строительства, является, безусловно, актуальной задачей.

Выполнение данной задаче предшествует рассмотрение существующих методов и способов оценки тепловых режимов при проектировании, строительстве и капитальном ремонте зданий и сооружений.

1.2.Существующие методы, технические решения по повышению тепловой эффективности и экономичности зданий

#### 1.2.1. Способы расчета и нормирования

Направление «тепловая эффективность зданий» имеет широкое распространение в отечественной и зарубежной практике, начиная в период «энергетического кризиса» (середина 70-х годов XX века), когда начались интенсивные исследования по снижению затрат на теплоснабжение населенных пунктов.

Тепловая эффективность зданий состоит из основных требований, к которым относят нормирование теплозащитных свойств ограждающих конструкций, систем отопления, вентиляции, кондиционирования и автоматизации.

Требования тепловой защиты ограждающих конструкций зданий являются основным фактором, способствующим комфорту в помещениях и эффективности использования энергоресурсов.

Основные параметры энергоносителей, расчетные и нормативные требования тепловой защиты зданий сформулированы в СП 23-101-2004 «Проектирование тепловой защиты зданий» [77], СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий» [78] и СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» [79], СНиП

23-01-99 «Строительная климатология» [80] и СП 131.13330.2012 «Строительная климатология» [81]. Они являются составляющими законодательства и предусматривают обеспечение нормальных санитарно-гигиенических условий в помещениях различного назначения. При этом необходимо соблюдать требуемые сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций, с учетом температурного перепада между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности.

Основным направлением энергоресурсосбережения Российской Федерации определен переход к эффективным энергосберегающим архитектурно-строительным системам и инженерному оборудованию в жилищно-коммунальном строительстве.

В основу политики нормирования энергосбережения в зданиях был положен принцип поэтапного снижения расходов тепловой энергии на отопление зданий с тем, чтобы снизить уровень энергопотребления строящихся и реконструируемых зданий.

Исторически сложилось так, что нормирование теплозащитных параметров ограждающих конструкций проводилось поэлементно. При этом с увеличением показаний, полученных при проведении исследований, повышалась детализация требований к отдельным конструкциям. Изменения СНиП «Строительная теплотехника» повысила требуемые величины сопротивлений теплопередаче, оставив без изменения принятую концепцию поэлементного нормирования. Однако поэлементное нормирование, усложняя и удорожая строительство здания, является недостаточным для обеспечения эффективного сбережения энергоресурсов. Поэтому в СНиП 23.02-2003 «Тепловая защита зданий» [78] было введено дополнительное требование, ограничивающее удельный расход тепловой энергии на отопление здания за отопительный период, составляющее так называемый потребительский подход. Одновременно была введена возможность понижения до 40 % поэлементных требований к ограждающим конструкциям. Комплексное нормирование теплозащитных характеристик всей оболочки здания является оптимальным, оно

крайне необходимо в условиях современного строительства.

Количественным показателем тепловой эффективности зданий являются затраты на его обогрев и охлаждение. Соответственно для сопоставления между собой различных объектов по назначению, конструкции и т.д., эти затраты относят к общей полезной площади или объему. Таким образом, в нормативных документах применяют показатель, называемый «удельная тепловая характеристика здания». Данный показатель характеризует здание или сооружение. Поэтому в зависимости от времени года, температур окружающей среды, удельная тепловая характеристика используется для оценки тепловой защиты здания, определения нагрузки на систему отопления и расхода потребления тепловой энергии за отопительный период.

Удельная тепловая характеристика здания определяется из выражения [13-82], Вт/(м<sup>3</sup>·°C):

$$q = \frac{Q}{V \cdot \Delta t}, \quad (1)$$

где  $Q$  – тепловая нагрузка здания, Вт;

$V$  – объем здания по наружному периметру, м<sup>3</sup>;

$\Delta t$  – средняя расчетная разность температур в помещении и наружного воздуха, °C.

При расчете удельного расхода тепловой энергии на отопление, вентиляцию здания за отопительный период используется множество дополнительных величин, которые не производят анализ оболочки здания. После учета потерь теплоты на вентиляцию, бытовых тепловыделений, поступлений от солнечной радиации, регулируемость отопления, рекуперацию вентиляции и т. д., влияние теплозащитных свойств отдельной ограждающей конструкции приближается к высокой погрешности расчета. Сложная методика расчета, приводит к тому, что проектировщики и строители не видят влияние отдельных изменений проекта на нормируемую величину в целом.

Оболочка здания должна иметь свою меру комплексной тепловой защиты. Методика ее определения должна быть максимально простой и проработанной.

Проектировщику должны быть предоставлены методические возможности быстро определить, какая из конструкций привела к ухудшению оптимальной характеристики и как эту конструкцию нужно изменить.

Развитие нормирования тепловой защиты ограждающих конструкций зданий в России за последнее десятилетие заключается в переходе на системный подход, и процесс перехода разделяется по времени на три этапа.

На первом этапе произошла начальная интеграция в нормирование системного подхода. Нормировался средний трансмиссионный коэффициент теплопередаче совокупности ограждающих конструкций здания в условиях стационарной теплопередачи. Вместо нормирования каждого элемента было достаточно дать одно значение для совокупности ограждающих конструкций.

Приведенный (средний) коэффициент теплопередаче совокупности ограждающих конструкций здания в виде нормы был впервые в России введен в Московские городские нормы по энергосбережению в зданиях в 1994 году [83]. Эти нормы представляли собой первый шаг в направлении энергосбережения – они предусматривали 20% снижение энергопотребления по сравнению с уровнем, существовавшим до введения норм. В них впервые был введен расчет удельной потребности в тепловой энергии на отопление здания за отопительный период и требование по энергетическому паспорту.

На втором этапе нормируется значение потребности в тепловой энергии на отопление за отопительный период. Структура норм – по потребителскому принципу. На этом этапе учитываются трансмиссионные теплотери через наружные ограждающие конструкции, вентиляционные и инфильтрационные тепловые потери, а также теплопоступления от солнечной радиации и внутренние теплопоступления от людей и оборудования, позволяя варьировать системой «теплозащита – отопление, вентиляция». Потребовалось ввести в нормирование понятие градусо-сутки отопительного периода, примененное впервые в нормах прежнего СССР в 1937 году.

Под потребностью в тепловой энергии на отопление здания понимают количество теплоты за отопительный период, необходимое для поддержания в

здании нормируемых параметров теплового климата. Снижение потребности в тепловой энергии на отопление на этом этапе достигается не только за счет ограждающих конструкций зданий, а также за счет улучшения систем вентиляции.

С целью решения проблемы энергосбережения были разработаны и введены в действие принципиальные изменения в федеральные нормы по строительной теплотехнике. По результатам расчетов теплового баланса зданий была установлена зависимость нормируемого сопротивления теплопередаче для отдельных элементов наружных ограждений от градусо-суток отопительного периода и повышены эти значения приблизительно в три раза, обеспечившие с 2000 года 40% снижение энергопотребления для вновь возводимых и реконструируемых зданий по сравнению с нормами 1995 года. Несмотря на то, что при подготовке этих изменений была использована методология второго этапа, сами нормы построены по предписывающему принципу и системный подход в них отсутствует.

Однако по методологии второго этапа, установление норм по удельному энергопотреблению, была разработана новая редакция московских городских норм по энергосбережению в зданиях [83], по которым был утвержден СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий» [78]. В этих нормах разработан энергетический паспорт здания, методология расчета энергозатрат на горячее водоснабжение, нормы по искусственному освещению, а также новый раздел проекта «Энергоэффективность зданий».

На третьем этапе интеграции в нормирование системного подхода произошло объединение тепловой защиты и систем теплоснабжения. Аналогичная методология была апробирована в нормах Великобритании, Франции, Италии, Германии и в регионах России в виде территориальных строительных норм по энергетической эффективности зданий [18]. По этой методологии в 2003 году были утверждены новые федеральные нормы Российской Федерации по тепловой защите зданий. Они по своей структуре содержат только нормируемые показатели тепловой защиты зданий без

указаний, как проектировать ее. Поэтому в дополнение к новым нормам был разработан свод правил [77], содержащий указания по выбору конструктивных решений и методов расчета с примерами, следуя которым при проектировании будет обеспечено соблюдение нормируемых показателей.

По основополагающим принципам [77-79] совершенно новые документы по своей структуре и области применения и по устанавливаемым ими критериям теплозащиты, методам контроля, характеру и уровню энергоаудита, согласованны с европейскими стандартами. В новых нормах установлены: численные значения нормируемых показателей энергоэффективности зданий, даны правила проектирования тепловой защиты зданий при использовании, как поэлементного нормирования, так и показателей энергоэффективности; дана классификация новых и эксплуатируемых зданий по энергетической эффективности; создана возможность выявлять эксплуатируемые здания, которые необходимо срочно реконструировать с точки зрения энергоэффективности; даны методы контроля соответствия нормируемым показателям тепловой защиты и энергетической эффективности как при проектировании и строительстве, так и в дальнейшем при эксплуатации зданий.

Эти нормы направлены на установление технически достижимого, социально и экономически оправданного уровня энергетической эффективности зданий с учетом регионального энергетического баланса, строительной конъюнктуры и защиты окружающей среды.

Использование данных норм включает: повышение тепловой эффективности ограждающей оболочки здания; улучшение теплового комфорта помещений; повышение уровня регулирования систем отопления и теплоснабжения зданий; повышение эффективности систем теплоснабжения, в том числе применение децентрализованного теплоснабжения; рекуперация тепла вытяжного воздуха.

Основным критерием для новых норм является удельная потребность тепловой энергии, приходящаяся на один квадратный метр отапливаемой площади (или один кубический метр отапливаемого объема) и одни градусо-

сутки отопительного периода на отопление здания, устанавливаемое в местах подключения здания к системам теплоснабжения или другим источникам энергии. Этот показатель является основной нормой для теплотехнического проектирования и не зависит от климата региона, поскольку отнесен к градусо-суткам отопительного периода.

В настоящее время существует значительный резерв энергосбережения за счет нормализации выбора оптимальных параметров, применение современных направлений по тепловой защите зданий при капитальном ремонте.

### 1.2.2. Современные направления развития

Энергосбережение в строительстве развивается с 70-х годов прошлого века в рамках общей концепции экономии энергоресурсов. Энергоэффективные здания, как новое направление в экспериментальном строительстве, появились после мирового энергетического кризиса 1974 года.

Главным направлением энергосбережения в зданиях является повышение теплозащитных свойств ограждающих конструкций [19]. Данные тепловизионных обследований зданий показывают: на наружные стены приходится до 30 % потерь тепловой энергии, на светопрозрачные ограждения – 25 %, на пол и потолок – 5 % и 40 % – расход тепла на нагрев инфильтруемого наружного воздуха в объеме, необходимом для вентиляции.

При исполнении нормативной базы применяют новые эффективные теплоизоляционные материалы и конструкции [84]. Использование устаревших теплоизоляционных материалов приводит к увеличению толщины наружных ограждающих конструкций и их стоимости. Например, при сохранении однослойной конструкции стен из полнотелого кирпича толщина составляет около двух метров. Соответственно для обеспечения требуемых показателей внешние ограждающие конструкции зданий проектируют многослойными, содержащими несущий и теплоизоляционный слой.

Применение трехслойных конструкций значительно снизило количество и размер мостиков холода, которые образовывались при устройстве теплоизоляционного слоя между железобетонными элементами ограждающей



конструкции. Между утеплителем и наружной стеной по конструктивным особенностям проходило железобетонное ребро, имевшее очень высокий коэффициент теплопроводности. Теперь в конструкциях используют металлические и стеклопластиковые дискретные связи, что приводит к повышению теплотехнической однородности конструкции и повышению приведенного сопротивления теплопередаче [20].

В структуру применяемых теплоизоляционных материалов в настоящее время входят минераловатные изделия, стекловатные материалы, пенопласты, теплоизоляционные бетоны, вспученный перлит, вермикулит и изделий на их основе. При использовании эффективных теплоизоляционных материалов по периметру здания с каждого его метра за счет уменьшения толщины наружных ограждающих конструкций высвобождается примерно по 0,25 м<sup>2</sup> полезной площади. Также многослойные системы наружного утепления позволяют снизить нагрузку на фундамент, сократить расходы на возведение.

Одним из наиболее динамично развивающихся теплоизоляционных материалов считается сегмент экструдированного пенополистирола. Он отличается самым низким коэффициентом теплопроводности 0,03 Вт/м<sup>2</sup>·К и практически нулевым показателем влагопоглощения [21, 85].

Основной проблемой является вопрос долговечности теплоизоляционного материала при эксплуатации в ограждающих конструкциях. В первую очередь это относится к волокнистым утеплителям и пенопластам. Имеющиеся результаты свидетельствуют о том, что срок службы теплоизоляционного материала из стекловолокна или на основе минеральной ваты составляет 25-30 лет, по истечению этого срока начинает возрастать коэффициент теплопроводности [86].

Помимо применения утеплителей повышение теплоизоляции достигается за счет материалов на минеральной основе: газо- и пенобетонов, полистирол бетона, а также пустотелых крупноформатных керамических материалов из пористой керамики. Легкие ячеистые бетоны позволяют экономить тепло и снижать энергозатраты примерно на 20% [22, 23]. Так же использование

конструкционного легкого бетона позволяет экономить 30-50 % массы при строительстве высотных зданий. Такие легкие бетоны применяются для производства однослойных наружных стен.

При использовании вторичных энергетических ресурсов легкие бетоны можно производить с использованием пористых заполнителей из технологических отходов (шлаки, шламы, золы, осадки сточных вод, бытовой мусор и т. д.), что удешевляет их стоимость.

В последние годы в строительстве для обеспечения теплозащиты применяют наружные стены с фасадными системами. Наружное расположение теплоизоляции в общем балансе тепловых потерь значительно более эффективно. Во-первых, очередь из-за существенного превышения суммарной длины теплопроводных включений примыканий внутренних стен и перекрытий по фасадам зданий, длины теплопроводных включений в углах. В случае устройства теплоизоляции снаружи толщина слоя утеплителя может быть на 25-35 % меньше, чем при внутренней теплоизоляции. Еще одним преимуществом наружной теплоизоляции является возрастание теплоаккумулирующей способности массивной части стены. Наружная теплоизоляция кирпичных стен при отключении источника тепла остывает медленнее, чем внутренняя теплоизоляция, при одной и той же толщине слоя утеплителя.

Применяемые в настоящее время фасадные системы подразделяются [87]:

1) системы со штукатурными слоями, предусматривают клеевое или механическое закрепление утеплителя с помощью анкеров, дюбелей и каркасов к несущей части стены с последующим оштукатуриванием;

2) системы с облицовкой кирпичом или другими мелкоштучными материалами;

3) системы с защитно-декоративными экранами, выполняются с воздушным вентилируемым зазором между утеплителем и экраном, называемые «навесные системы».

В настоящее время в отечественной практике используется более 40 вариантов навесных систем.

Второе по значимости направление энергосбережения в зданиях является замена устаревших окон.

Окна остаются наиболее уязвимым местом в ограждающих конструкциях, несмотря на постоянное совершенствование. В обычных деревянных окнах с двойным остеклением через не плотности ограждающих конструкций в комнату поступает наружный воздух в количестве, при котором за один час заменяется половина объема помещения. Однако со временем в таких окнах могут образовываться различные щели, в результате чего возникает излишняя инфильтрация. Это приводит к увеличению годовых потерь до 40% тепловой энергии. Сегодня современные оконные конструкции с трехслойным остеклением предлагает целый ряд отечественных и зарубежных фирм. Вместе с тем следует учитывать, что такие окна удорожают строительство на 8-15 %. Надо также иметь в виду, что следствием установки герметичных пластиковых окон в большинстве случаев становится нарушение воздухообмена в помещениях зданий, где традиционно проектируется система естественной вентиляции. Из-за пониженной воздухопроницаемости в пластмассовых переплетах и высокой герметизации примыкания окон к стенам происходит недостаточный воздухообмен и, как следствие, возникает повышенная влажность в помещениях. Увеличение влажности воздуха в помещении вынуждает к частому открыванию форточек, а это снижает заложенный эффект повышения теплозащитных качеств окон.

Современные оконные конструкции уже оснащаются регулируемыми приборами вентилирования (шумозащитными клапанами, специально организованными отверстиями в оконном профиле, поворотными-откидными устройствами, фиксаторами), которые могут обеспечить проветривания помещения по желанию потребителя [88].

Внедрение энергоэффективных окон без конструктивного решения всего оконного проема с учетом конвекции и организации воздухообмена зачастую приводит к обратному эффекту, т. е. к снижению теплозащитных качеств окон в условиях эксплуатации и ухудшению условий для проживания. Решение вопроса

адекватного воздухообмена потребует применения систем механической вентиляции.

К новым возможностям модернизации окон относится нанесение на стекло теплоотражающего покрытия, которое прозрачно для видимой части спектра дневного света, но в то же время характеризуется высоким коэффициентом отражения в тепловом диапазоне излучения, направленного изнутри наружу. Применение в стеклопакетах селективных покрытий увеличивает сопротивление теплопередаче оконных блоков до 0,6-0,8 м<sup>2</sup>С/Вт [89]. Покрытие теплосберегающего стекла может быть твердым или мягким. Твердое покрытие отличает стойкость к любым климатическим воздействиям, и наносится оно в процессе производства стекла пиролитическим способом, или высокотемпературным пиролизом. Мягкое покрытие отличает меньшая стойкость к атмосферным воздействиям, оно наносится в вакуумных камерах методом напыления

В большинстве зданий предусмотрены системы вентиляции с естественной циркуляцией воздуха. То есть движение происходит за счет естественной тяги, возникающей в результате разницы давлений и температур. При этом наружный воздух поступает через открытые форточки жилых комнат и удаляется через вытяжные решетки, установленные в кухнях, ванных комнатах и туалетах. Преимущество систем с естественной тягой в том, что они дешевы, не создают шума и не требуют затрат на свою эксплуатацию. Однако вытяжные системы рассчитаны на выполнение функций в полном объеме при температуре наружного воздуха не выше 5 °С, т. е. только когда включена отопительная система здания. А в теплое время года, когда выключена отопительная система, выполнение вытяжной системы в полном объеме не предусмотрено. В этот период воздухообмен помещений может быть обеспечен только при открывании окон и наличии ветра на улице.

Недостаток естественной вентиляции является потери тепловой энергии от 30 до 50 % [24]. Энергосбережение было бы наиболее эффективным, если бы вентиляция могла работать с переменным расходом воздуха, в согласовании с

режимом работы тепловой системы. Организовать такое регулирование при естественной вентиляции практически невозможно. Для этого в здании должны применяться вентиляционные системы механической вытяжной вентиляции с естественным притоком воздуха или системы механической приточно-вытяжной вентиляции с рекуперацией тепла [29]. Вытяжные системы могут быть центральными, с общим вытяжным вентилятором, или с индивидуальными вентиляторами у каждой вентиляционной решетки. Оборудование жилых зданий приточными системами вентиляции происходит значительно реже, чем механическими вытяжными, так как это существенно удорожает проект за счет стоимости самой системы. Преимуществом механических приточных систем является гарантированная подача расчетного расхода приточного воздуха в каждое помещение, возможность обеспыливания приточного воздуха и уменьшения аллергических заболеваний, возможность воздухораспределения, исключая дутье вне зависимости от погодных условий на улице.

Кроме экономии энергозатрат с помощью механической вентиляции можно экономить за счет нагрева приточного воздуха вытяжным путем теплопередачи (рекуперация). Рекуператоры состоят из рекуперативных пластинчатых теплообменников, в которых происходит передача теплоты между разделенными металлическими пластинами потоками воздуха с различной температурой. Вытяжной воздух проходит через каждый второй канал теплообменника и нагревает пластины, его образующие. Приточный воздух проходит через остальные каналы и нагревается при соприкосновении с нагретыми вытяжным воздухом стенками каналов. Степень эффективности рекуператоров в зависимости от их принципа действия составляет от 40 до 80 % [25].

В настоящее время в новом строительстве обязательным является установка термостатов перед каждым отопительным прибором. Хотя это решение связано со значительными затратами, оно позволяет повысить комфортность и сократить теплопотребление на отопление за счет учета теплопоступлений с солнечной радиацией и от бытовых тепловыделений.

Однако за рубежом одновременно с термостатом устанавливают на отопительный прибор тепло измеритель, испарительного типа, позволяющий платить меньше за отопление, если потребление тепла уменьшается.

Во многих зданиях теплоноситель распределен неравномерно по всему зданию. Очень часто на верхних этажах и посередине дома жарко, а в угловых комнатах и на нижних этажах очень холодно. Для решения этой проблемы существуют балансировочные вентили, позволяющие отрегулировать отопление дома, сделать его сбалансированным и равномерным [90].

При эксплуатации зданий с такими регулирующими приборами надо иметь в виду, что в однотрубных системах отопления с термостатами при закрытии термостатов растет температура обратной воды, вследствие чего возрастает температура воды в подающем трубопроводе и, соответственно, получается нерегулируемая теплоотдача трубопроводов стояков системы отопления, что снижает эффективность авторегулирования. В двухтрубных системах закрытие термостатов приводит к сокращению расхода воды, циркулирующей в системе, но расход сетевой воды, остается неизменным, что также приводит к росту температуры воды в подающем трубопроводе системы отопления, а соответственно, и к нерегулируемой теплоотдаче стояков.

Немаловажным значением в настоящее время является отпуск тепловой энергии (подключение) системе «отопление, вентиляция и кондиционирование» здания от магистральной теплосети или источника тепловой энергии.

Подключение может быть зависимым (теплоноситель поступает в систему «отопление, вентиляция и кондиционирование» непосредственно) и независимым (поступлением теплоносителя от источника или магистральной теплосети в подогреватель, в котором нагревается теплоноситель системы «отопление, вентиляция и кондиционирование» здания). Зависимое подключение, в свою очередь может быть непосредственное (с подачей внешнего теплоносителя прямо в отопительные приборы) или с элеваторным или насосным узлом смешивания (с подмешивающим насосом на перемычке или с циркуляционным насосом на трубопроводе системы отопления).

Для любой подключенной системы «отопление, вентиляция и кондиционирование» здания, регулирование может быть качественным (изменение температуры теплоносителя), количественным (изменение расхода теплоносителя) или качественно-количественным (изменение температуры и расхода теплоносителя). Все эти процессы корректирования отпуска энергоресурсов в системе теплоснабжения здания влияют на расходы тепловой и электрической энергии, что необходимо учитывать при технико-экономическом обосновании.

Важным направлением энергосбережения тепловой энергии является организация учета потребления [91]. Сами по себе счетчики тепловой энергии ничего не экономят, но могут побудить к энергосбережению.

Энергосбережению способствует грамотные решения планировки зданий с выбором максимальной ширины корпуса [26, 92]. Техничко-экономические показатели здания улучшаются с его шириной: чем шире здание, тем меньше площадь ограждающих конструкций на один квадратный метр общей площади, эффективнее используются ограждающие конструкции, удерживающие больший строительный объем. В этом случае сокращаются удельные затраты по строительству, тепловые потери через ограждающие конструкции и уменьшается кратность воздухообмена. В широких зданиях жилые комнаты освобождаются от функций кладовых, гардеробных и других вспомогательных помещений.

### 1.3. Основные выводы и постановка задач исследования

В настоящее время научно-исследовательские организации и промышленные производители предлагают технологические решения, обеспечивающие рост энергоэффективности зданий: теплоизоляционные фасады, легкие бетоны, оконные конструкции, системы вентиляции с рекуперацией тепловой энергии, широко корпусные конструкции зданий, системы учета и регулирования тепла и т.д. Эти решения в достаточной степени известны специалистам и при наличии достаточных стимулов могут быть внедрены в практику строительства. Главным фактором применения и выбора

энергетически эффективных технологических решений является отсутствие скоординированной и целенаправленной политики.

Основной задачей остается формирование грамотного технико-экономического выбора теплосберегающих технологий при капитальном ремонте зданий с соблюдением нормативной базы.

Внедрение теплосберегающих решений в строительство должно быть экономически обосновано. В противном случае вложение средств в реконструкцию и модернизацию зданий при капитальном ремонте не целесообразно. Поэтому возникает необходимость в разработке методики, позволяющей оценивать эффективность применения энергосберегающих мероприятий с технико-экономических позиций.

Рассмотренные существующие методы теплового расчета ограждающих конструкций стен зданий при капитальном ремонте основаны на эмпирических закономерностях и отражают свойственный им характер теплообмена, не учитывая влияние технико-экономического обоснования регулирования отпускаемой тепловой энергии.

Для исследования применения и выбора теплосберегающих мероприятий в зданиях, необходимо разработать соответствующую технико-экономическую методику определения оптимальных теплотехнических параметров теплозащиты, с учетом влияния отпускаемой тепловой энергии.

Для достижения поставленной цели исследования сформулированы следующие направления:

1. Выполнить анализ основной методологии оптимизации теплозащиты и теплового режима зданий.
2. Выбрать критерий технико-экономической эффективности.
3. Предложить математическую модель процессов теплопотребления здания.
4. Определить построение алгоритма нахождения оптимальных теплотехнических параметров, с учетом влияния отпускаемой тепловой энергии.



## **РАЗДЕЛ 2. Методические основы исследования оптимальных показателей теплозащиты и теплового режима зданий**

В данном разделе основной задачей рассматривается анализ и выбор критерия технико-экономической эффективности. Целью является подбор наиболее эффективного критерия оптимизации утепления зданий, отражающий как экономические показатели, так и физические процессы теплоснабжения, и регулирования отпуска тепловой энергии.

### **2.1. Основные положения по оптимизации теплозащиты и теплового режима зданий**

Повышению эффективности теплового режима здания и его интенсификации при внедрении теплосберегающих мероприятий в полной мере отвечают методы оптимизации, обеспечивающие нахождение наиболее выгодных технических решений, достижение максимального технико-экономического эффекта при наименьших затратах денежных средств. Методы оптимизации в настоящее время широко распространены. Развитие методологии, совершенствование методов и алгоритмов оптимизации имеют большое научное и практическое значение для решения проблем проектирования [3].

#### **2.1.1. Задача нахождения оптимальных решений**

Задача принятия оптимального решения возникает на этапе проектирования и формируется математически, как задача нелинейной оптимизации. Для математической модели проектируемого объекта подбирают значения варьируемых параметров, чтобы они обеспечивали экстремальное значение одной из наиболее важных технико-экономических характеристик, при условии, что другие характеристики удовлетворяют заданной совокупности поставленных требований и норм. Оптимизация математической модели теплового режима здания значительно сокращает объем трудоемких и дорогостоящих экспериментов, на долю которых остается проверка адекватности и внедрение результатов моделирования. Использование

оптимальных параметров позволяет более эффективно решить задачи управления и проектирования теплового режима здания.

Основной задачей оптимизации параметров зданий при капитальном ремонте является достижение высоких технико-экономических показателей их теплового режима, экономии тепла, электроэнергии, снижение капитальных затрат и эксплуатационных расходов. Данная задача может быть решена различными путями. В связи с этим возникает необходимость сопоставления ряда вариантов для выбора экономически наиболее целесообразного решения [27].

Постановку задачи оптимизации следует начинать с выявления условий теплового режима здания в общем тепло технологическом процессе и целей оптимизации. Для этого правильно определить требования и нормы к теплообмену ограждающих конструкций, тепловому режиму здания и сформулировать цель оптимизации. При постановке задачи оптимизации необходимо выявить наличие у оптимизируемой модели свободных варьируемых параметров, которые позволили бы изменять тепловой режим, конструкцию, не нарушая нормативных требований, выбрать критерий оптимальности.

Задача оптимизации параметров здания при капитальном ремонте решается на основе математического моделирования процесса теплообмена ограждающих конструкций и теплового режима системы «отопление-вентиляция-кондиционирование». Существует ряд возможных математических моделей здания, потенциально приемлемых для осуществления различных вариантов теплового режима [26-55]. На основе какой-либо из математических моделей проводится сопоставление различных вариантов теплового режима здания с целью выбора наилучшего.

Объектами оптимизации являются обычно параметры и показатели теплообмена ограждающих конструкций, систем отопления и вентиляции: размеры тепловой изоляции, объемы помещений, система «отопление-вентиляция», степень рекуперации тепловой энергии. При этом оптимизация

какого-нибудь одного параметра или характеристики какого-либо элемента может обеспечить незначительную экономию средств или тепла. Однако если учесть большие расходы и размеры объекта, то за длительные периоды эксплуатации фактическая экономия затрат оказывается весьма существенной.

Главной задачей оптимизации теплового режима здания при капитальном ремонте является выбор оптимальных значений расчетных параметров ограждающих конструкций и системы «отопление-вентиляция-кондиционирование», при котором каждый имеет действительно наилучшие показатели и наивыгоднейшее соотношение этих параметров в заданных технологических условиях эксплуатации с учетом требований и норм.

Большая сложность взаимозависимостей отдельных параметров, процессов и характеристик является отличительной чертой современных технологий сбережения тепловой энергии в зданиях. Поэтому для любого здания выбор его оптимальных параметров должен предусматривать по возможности полный охват всех совокупных факторов и взаимосвязей, влияющих на выбор параметров, конструктивных размеров и показателей, которые можно разграничить как внешние и внутренние.

Внешние факторы характеризуют влияние внешних условий на функционирование проектируемого здания. К этой группе относят экономические условия. Под экономическими факторами понимаются издержки, находящие отражение в изменении стоимости тепловой энергии, электрической, материалов ограждающих конструкций, проводимых работ и обслуживании.

В соответствии с поставленной задачей, внешние факторы, определяющие работу теплового режима здания задаются и предварительно определяются. Каждый из указанных выше факторов влияет на все элементы, благодаря тесной внутренней взаимосвязи, которая и передает «неявное» влияние внешних факторов на эксплуатационные затраты [27].

Внутренние факторы включают в себя технологические и конструктивные условия. Технологические условия характеризуют основные исходные

параметры: температуру помещений по назначению, нормативные сопротивления и удельные тепловые характеристики, динамику движения воздуха, теплофизические свойства теплоносителей и т.д.

Конструктивные факторы включают размеры здания, материал и толщину ограждающих конструкций, параметры конструкций отдельных узлов, расположение и типы отопительных приборов, вентиляции. Конструктивные параметры имеют в основном дискретный характер, то есть могут принимать только какие-то определенные значения, например, толщина ограждающих конструкций здания должна быть кратной размерам применяемых теплоизоляционных изделий, а ее теплофизические свойства, технико-экономические характеристики будут определяться материалом ограждения [17]. Дискретность изменения параметров для отдельных групп может иметь весьма различный вид. Характер изменения параметров является существенным, так как этим определяется применимость того или иного метода решения задачи оптимизации. Для оптимизации параметров, имеющих непрерывный характер изменения, могут быть использованы достаточно разработанные численные методы нелинейного программирования.

Поэтому при анализе факторов, подлежащих оптимизации, необходимо, учитывая инженерную специфику задачи, иметь в виду возможность перевода параметров, имеющих дискретный характер изменения, в класс непрерывных параметров.

Внутренние параметры, которые являются независимыми друг от друга, имеют определенную степень свободы в пределах заданной области изменения их значений и могут варьироваться в этих пределах, называются управляемыми параметрами. Остальные внутренние параметры, численные значения которых не варьируются в процессе решения задачи проектирования, являются неуправляемыми параметрами. В зависимости от цели проектирования неуправляемые параметры могут быть постоянными или случайными величинами.

Свойства, характеризующие количественные значения технико-

экономических показателей здания и определяющие ее функциональное назначение, называются выходными параметрами. Выходные параметры проектируемого объекта можно только контролировать.

В наиболее полной постановке задачи оптимизации все внутренние факторы необходимо отнести к категории оптимизируемых параметров, значение которых определяются для заданной совокупности внешних факторов.

Часть внутренних параметров можно отнести как к варьируемым, так и задаваемым в зависимости от полноты постановки задачи оптимизации и требуемым нормам проектирования.

Многообразие конкретных задач и условий оптимизации должно подчиняться единым, общим для многих задач принципам. Согласно действующим методикам определения экономической эффективности капитальных вложений и технико-экономических расчетов [93] при сравнении вариантов с целью выбора оптимального должны рассматриваться только взаимозаменяемые варианты, обеспечивающие одинаковое удовлетворение определенных потребностей.

Принципиально важным методическим положением является выбор сопоставимых условий оптимизации: соблюдение заданных параметров в помещении здания, выходных параметров, надежности работы систем и т.п., определяемые характерными особенностями конкретной задачи.

### 2.1.2. Критерии оптимизации

Оценку эффективности того или иного решения производят по критерию оптимальности. Формирование критериев эффективности является актуальным и перспективным направлением в области технико-экономического анализа.

Критерий оптимальности (функция цели) является выражением результата действия процесса. Экстремальное значение критерия оптимальности численным образом характеризует свойство одного из наиболее важных технико-экономических показателей проектируемого объекта. Этот критерий, показывающий относительное предпочтение одного варианта по отношению к другим, определяет цель проектирования и вместе с управляемыми параметрами

и описанием допустимой области их изменения образует математическую модель принятия решений в задаче оптимального проектирования здания при капитальном ремонте. При математическом моделировании критерий оптимальности должен быть выражен математически, как функция внешних и внутренних параметров. Нахождение ее оптимального значения является сутью задачи оптимизации. Критерий оптимальности должен быть количественным, иметь ясный физический смысл, должен быть эффективным с точки зрения достижения цели. Это совокупность требований приводит к тому, что выбор критерия оптимальности для конкретных условий представляет собой достаточно сложную комплексную задачу и оказывает влияние на структуру математической модели и конечные результаты расчета.

В настоящее время находят применение технические, экономические и технико-экономические критерии. К техническим критериям выбора оптимальных вариантов можно отнести такие, как количественная оценка показателей (удельный расход тепловой энергии и т.п.), структура построения объекта, конструктивные параметры, вид управления режимом и другие. Улучшение технических характеристик является следствием совершенствования экономических и социальных показателей.

Анализ эффективности новых технических разработок при экономическом подходе строится на принципах экономии совокупности затрат труда. Эффект от внедрения новой техники оценивается критерием минимума дисконтированных затрат [94]. Экономический критерий является глобальным и обобщает ряд локальных показателей, связанных со снижением потерь энергоносителей, материальных ресурсов, увеличением срока службы оборудования, снижением амортизационных отчислений.

Технико-экономический анализ строится на использовании как технических (теплотехнических), так и экономических критериев. Предполагается, что варианты технических решений сопоставимы по достижению цели. Анализ различных по природе критериев позволяет сделать вывод, что понятие эффективности отражает широкий спектр технических,

экономических и социальных аспектов.

Анализ проблемы эффективности внедрения теплоосберегающих мероприятий позволяет определить круг вопросов, связанных с разработкой методологических основ выбора адекватности критериев технико-экономической эффективности, с анализом способов решения однокритериальных и многокритериальных задач с учетом экономического ущерба от затрат на данные мероприятия.

Часто рассматривают отдельно критерии технические и экономические. Такой подход затрудняет разработку оптимальных критериев и порождает еще один вид неопределенности в принятии целесообразных решений. Технико-экономические критерии эффективности формируются на основных положениях теории сложных систем. Рецептным элементом этой теории является системный анализ, который используется при разработке методологических основ выбора критериев эффективности.

К предъявляемым требованиям адекватности критериев относят: сопоставимость эффекта и затрат, обоснование альтернативных систем, выделение наиболее важных компонентов, сопоставимость ряда показателей из множества рассмотренных. Соблюдение этих требований позволяет перейти к выбору формирования критериев.

Сравнительная эффективность инноваций, согласно положениям методики определения экономической прибыли материальных вложений, при капитальном ремонте зданий, служит в системе технико-экономических расчетов основной количественной оценкой при выборе оптимального варианта, характеризуемого наименьшими затратами труда. Они учитывают эффект инвестиций, эксплуатационные расходы и капитальные вложения [27, 45, 93, 94]:

$$И = С + Е \cdot К, \quad (2.1)$$

где  $И$  – приведенные дисконтированные затраты, р./год;  $С$  – изменяющиеся ежегодные эксплуатационные расходы, р./год;  $Е$  – коэффициент эффективности инвестиций, 1/год;  $К$  – инвестиции в энергосберегающие мероприятия (единовременные капитальные вложения), р.;

Соизмерение капитальных вложений и годовых эксплуатационных расходов путем подсчета сравнительной эффективности инноваций производится в простейшем случае при сроке строительства рассматриваемых вариантов не превышающим одного года. При сроке строительства больше одного года, обязательно должен учитываться ущерб от замораживания капитальных вложений.

Для математического решения задачи оптимизации критерий оптимальности может быть выражен в общем виде как функция параметров теплозащиты, влияющая на тепловой режим здания [95]:

$$I = I(i), \quad (2.2)$$

где  $i = (i_1, i_2, \dots, i_n)$  – вектор оптимизируемых варьируемых параметров.

Если вид соотношения известен, то известна математическая модель оптимизируемого процесса теплоснабжения здания. Однако получение зависимости в явном аналитическом виде из уравнения математического описания представляется возможным только в случаях упрощенного математического описания процессов, происходящих в зданиях.

Между величиной расчетных затрат, связанных с сооружением и эксплуатацией, внешними влияющими факторами и оптимизируемыми параметрами, имеют место сложные взаимосвязи и зависимости. Математическое решение задачи оптимизации предполагает учет динамики некоторых внешних факторов, то есть необходимость отображения зависимостей коэффициентов минимизируемой функции.

Для оптимизации важен обоснованный критерий. В настоящей работе в качестве итогового показателя основной количественной оценки эффективности того или иного варианта принята величина суммарных затрат, учитывающая процессы отпуска тепловой энергии. Минимум дисконтированных затрат принят за критерий оптимальности при решении задачи оптимизации.

Поэтому рассмотрим известные методы выбора оптимального варианта с применением указанного критерия оптимальности.

При выборе оптимального варианта используют методы расчета [96]:



- 1) «экстремальный» и «вариантный» и их сочетание;
- 2) «разностный»;
- 3) «обобщенной разности».

Для использования «экспериментального» метода необходимо предварительно выразить в аналитической форме составляющие критерия оптимальности от искомого параметра. Величина оптимального параметра может быть найдена, если продифференцировать выражение дисконтированных затрат по искомому параметру и приравнять первую производную нулю. При этом необходимо убедиться, что вторая производная положительна. Экстремальный метод позволяет без перебора решить поставленную задачу. В этом заключается основное преимущество данного метода – непосредственное нахождение оптимального варианта (параметра), а также простота анализа влияния отдельных факторов на искомую зависимость и показатели оптимального варианта. Для множества задач кривая изменения затрат вблизи точки минимума имеет весьма пологий характер, то есть проявляется устойчивость экономической характеристики. В этом случае можно установить зону, в пределах которой может быть выбран оптимальный вариант.

При «вариантном» методе необходимо по каждому из рассматриваемых вариантов установить затраты, а затем сравнить между собой для выбора оптимального. Если при сравнении не обнаруживается точка минимума, то необходимо расширить круг рассматриваемых вариантов (в пределах технически возможных). Недостатками является отсутствие явно выраженной зависимости между отдельными параметрами, большой объем вычислительных работ и неточность соотношений между отдельными параметрами.

Наиболее рациональным является сочетание «экстремального» и «вариантного» методов. В этом случае вначале «экстремальным» методом устанавливается приближение искомого параметра, находящегося в области минимума затрат. Затем определяя затраты по ограниченному количеству вариантов, находящихся в области минимума, можно установить оптимальную зону, внутри которой на основе анализа стоимостных и натуральных показателей

выбирается оптимальный вариант.

«Разностный» метод заключается в определении разности затрат по сравниваемым вариантам, учитывающей только те затраты, по которым различаются варианты. Это позволяет упростить установление величины экономии.

Необходимо отметить, что требования к выбору критериев, их анализ определяют основные направления формирования методологии технико-экономической эффективности. Использование принципов минимума дисконтированных затрат и максимума эффекта является важнейшим направлением в области процесса построения математических моделей. В научной литературе рекомендуется процесс исследований условно подразделять на этапы. Первый этап связан с анализом проблемы и постановкой задачи, второй этап – с методологическими основами и принципами построения математических моделей, на третьем этапе обсуждается область применения и методы анализа технико-экономических моделей.

## 2.2. Методологические основы построения алгоритма определения оптимальных теплотехнических параметров

### 2.2.1. Структура теплового потребления здания

Оптимизация теплового режима зданий (теплообмен ограждающих конструкций и системы «отопление-вентиляция-кондиционирование») сопутствует выбору математического аппарата нахождения экстремального значения функции нескольких переменных. Поэтому решение задачи оптимизации связано, с выполнением значительного объема расчетов, сочетающихся с серьезными вычислительными трудностями, большое значение приобретает выбор математического метода поиска минимума сложной функции из числа существующих. Обоснованный его выбор позволяет значительно облегчить труд исследователя, осуществить вычислительный процесс наиболее эффективным способом с учетом инженерной специфики, возможностей, используемых электронных вычислительных машин, получить наибольший

объем информации об искомом решении. Задача оптимизации параметров и показателей здания может быть решена различными известными математическими методами поиска экстремума многих переменных. Выбор метода в значительной степени определяется постановкой задачи оптимизации, используемой математической моделью объекта оптимизации.

Тепловой режим зданий относится к сложным системам энергопотребления, так как им присущи главные отличительные черты: наличие большого числа элементов; сложный характер связей между отдельными элементами; сложность функций, выполняемых системой; наличие сложного организованного управления; необходимость учета взаимодействия с окружающей средой и воздействия случайных факторов.

В соответствии с системным принципом взаимосвязи структуры и функции сложной системы более строгим подходом к моделированию процессов функционирования является системотехнический, предполагающий преобразование конструктивной модели из системной и основанный на цепочке «общесистемная модель – системная модель – конструктивная модель».

Для выполнения методологически обоснованного выбора системной модели функционирования теплопотребления зданием в течение отопительного периода обратимся к функциональной его схеме как наиболее общей и современной (рис. 2.1).

Тепловой режима здания состоит из взаимодействия систем теплообмена «отопление – вентиляция – кондиционирование – бытовые тепловыделения» и «телопоступление от солнечной радиации – тепловыделение от ограждающих конструкций». В системе «отопление – вентиляция – кондиционирование – бытовые тепловыделения» происходит теплообмен внутри здания. В системе «телопоступление от солнечной радиации – тепловыделение от ограждающих конструкций» происходит теплообмен снаружи здания. В процессе теплообмена этих систем преобладает передача тепла излучением и конвекцией, а между системами преобладает передача тепловой энергии теплопроводностью.

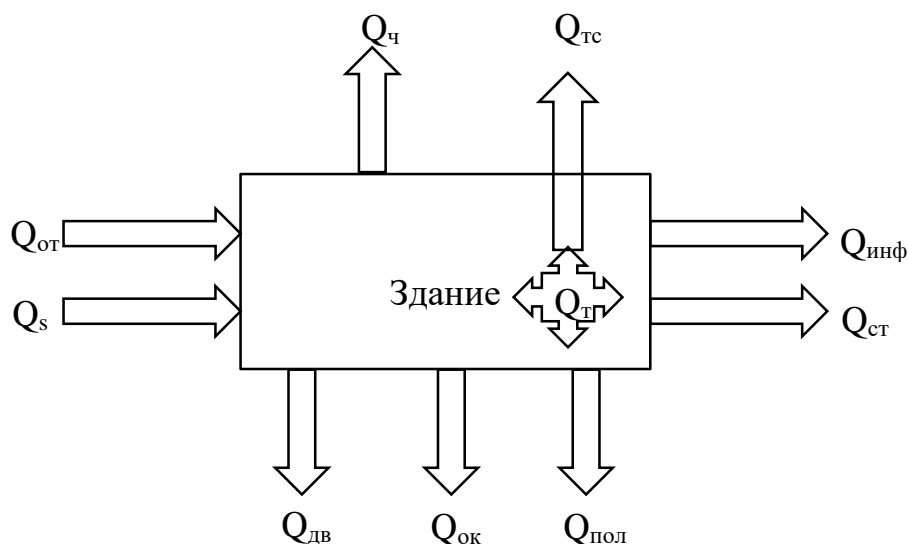


Рисунок 2.1 – Функциональная схема теплотребления зданием:  $Q_{от}$  – расход тепловой энергии здания на отопление, вентиляцию и кондиционирование, Вт;  $Q_s$  – тепловые поступления от солнечной радиации, Вт;  $Q_t$  – бытовые тепловыделения в здании, Вт;  $Q_{ст}$  – тепловые потери через наружные стены, Вт;  $Q_ч$  – тепловые потери через чердачные перекрытия (покрытия);  $Q_{ок}$  – тепловые потери через оконные блоки, зенитные фонари и витражи, Вт;  $Q_{дв}$  – тепловые потери через наружные двери и ворота, Вт;  $Q_{пол}$  – тепловые потери через пол, Вт;  $Q_{инф}$  – тепловые потери за счет инфильтрации и вентиляции, Вт;  $Q_{тс}$  – тепловые потери трубопроводной системой «отопление, вентиляция и кондиционирование», проходящей через неотапливаемые помещения, Вт

### 2.2.2. Математическая модель процессов теплообмена здания

Функциональную модель рассмотрим на основе уравнений теплообмена и баланса тепловой энергии для зданий при следующих допущениях: процессы теплообмена и передачи энергии стационарны; плотности теплового потока на поверхностях теплообмена постоянны; передача тепловой энергии в системах теплообмена осуществляется при постоянной температуре.

Условия однозначности:

- 1) геометрические условия: заданы точные размеры и геометрия здания;
- 2) физические условия: физические свойства (плотность, теплоемкость, теплопроводность);
- 3) начальные условия: определяются нормативные требования по тепловой защите и тепловому режиму зданий;
- 4) граничные условия третьего рода для теплотребления зданиями.

Тогда тепловой баланс системы теплового потребления зданием можно записать [27, 45], Вт:

$$Q_{от} + Q_s + Q_T = Q_{ст} + Q_{ч} + Q_{ок} + Q_{дв} + Q_{пол} + Q_{инф} + Q_{тс}. \quad (2.2)$$

Расход при регулировании отпускаемой тепловой энергии зданию на отопление, вентиляцию и кондиционирование согласно [37, 42, 97, 98], можно определить из выражения, Вт:

$$Q_{от} = G_B \cdot \rho_B \cdot C_B \cdot (\tau_3 - \tau_2), \quad (2.3)$$

где  $G_B$  – расход перекачиваемой жидкости в системе «отопление, вентиляция и кондиционирование», м<sup>3</sup>/с;  $\rho_B$  – плотность перекачиваемой жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $C_B$  – теплоемкость перекачиваемой жидкости, Дж/кг·°С;  $\tau_3$  – текущая температура перекачиваемой жидкости в подающем трубопроводе системы «отопление, вентиляция и кондиционирование», °С;  $\tau_2$  – текущая температура перекачиваемой жидкости в обратном трубопроводе системы «отопление, вентиляция и кондиционирование», °С.

Тепловые поступления от солнечной радиации [79, 98], Вт:

$$Q_s = (\tau_{ок}^1 \cdot \tau_{ок}^2 \cdot \sum_{j=1}^n A_j^{ок} \cdot I_j^{ок} + \tau_{зф}^1 \cdot \tau_{зф}^2 \cdot \sum_{j=1}^n A_j^{зф} \cdot I_j^{зф}) \cdot v \cdot \zeta, \quad (2.4)$$

где  $\tau_{ок}^1, \tau_{зф}^1$  – коэффициенты относительного проникания солнечной радиации для светопропускающих заполнений окон (витражей) и зенитных фонарей;  $\tau_{ок}^2, \tau_{зф}^2$  – коэффициенты, учитывающие затенение светового проема окон (витражей) и зенитных фонарей непрозрачными элементами заполнения;  $A_j^{ок}, A_j^{зф}$  – площадь j-го светопроема здания ориентированного по сторонам света окон (витражей) и зенитных фонарей, м<sup>2</sup>;  $I_j^{ок}, I_j^{зф}$  – величина солнечной радиации j-от поверхности окон (витражей) и зенитных фонарей ориентированная по направлениям света, Вт/м<sup>2</sup>;  $v$  – коэффициент, учитывающий регулирование теплоступлений за счет тепловой инерции ограждающих конструкций здания;  $\zeta$  – коэффициент, учитывающий эффективность автоматического регулирования

отпуска и потребления теплоты в системе «отопление, вентиляция и кондиционирование».

Бытовые тепловыделения в здании можно определить из выражения, Вт:

$$Q_T = q_T \cdot F_{от} \cdot v \cdot \zeta, \quad (2.5)$$

где  $q_T$  – удельная величина бытовых тепловыделений на 1 м<sup>2</sup> отапливаемой площади [79], Вт/м<sup>2</sup>;  $F_{от}$  – отапливаемая площадь здания, м<sup>2</sup>;

Тепловые потери через ограждающие конструкции здания, можно выразить уравнением, Вт:

$$Q_k^{ог} = Q_{ст} + Q_{ч} + Q_{ок} + Q_{дв} + Q_{пол} = \sum_{k=1}^n \frac{\eta_k \cdot F_k \cdot (t_k^B - t_H)}{R_k^{пр}}, \quad (2.6)$$

где  $\eta_k$  – коэффициент, зависящей от положения k-ой наружной поверхности ограждающей конструкции здания по отношению к наружному воздуху [74];  $F_k$  – площадь k-ой наружной поверхности ограждающей конструкции здания, м<sup>2</sup>;  $t_k^B$  – температура внутреннего воздуха k-ой зоны помещения здания, °С;  $t_H$  – температура наружного воздуха, °С;  $R_k^{пр}$  – приведенное сопротивление теплопередаче теплозащитной оболочки k-ой наружной поверхности ограждающей конструкции здания, (м<sup>2</sup>·°С)/Вт.

Тепловые потери за счет инфильтрации и вентиляции, на основании [79], можно представить в виде, Вт:

$$Q_{инф} = 0,28 \cdot c_B \cdot \eta_B \cdot \beta_V \cdot \rho_B^{вент} \cdot V_{от} \cdot (t_B - t_H) \cdot (1 - k_{эф}), \quad (2.11)$$

где  $c_B$  – средняя удельная теплоёмкость воздуха, Дж/кг·°С;  $\eta_B$  – кратность воздухообмена здания, с<sup>-1</sup>;  $\beta_V$  – коэффициент снижения объема воздуха в здании, учитывающий наличие внутренних ограждающих конструкций;  $\rho_B^{вент}$  – средняя плотность приточного воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $V_{от}$  – отапливаемый объём здания, м<sup>3</sup>;  $t_B$  – средняя температура внутреннего воздуха помещений здания, °С;  $k_{эф}$  – коэффициент эффективности применяемого рекуператора при утилизации вентилируемого воздуха.

Тепловые потери трубопроводной системой «отопление, вентиляция и кондиционирование», проходящей через неотапливаемые помещения, Вт:

$$Q_{\text{тс}} = F_{\text{тс}} \cdot \alpha_{\text{тс}} \cdot (t_{\text{тс}} - t_{\text{окр}}), \quad (2.12)$$

где  $F_{\text{тс}}$  – площадь поверхности трубопроводной системы «отопление, вентиляция и кондиционирование», проходящей через неотапливаемые помещения,  $\text{м}^2$ ;  $\alpha_{\text{тс}}$  – средний суммарный коэффициент теплоотдачи внешней поверхности трубопроводной системы «отопление, вентиляция и кондиционирование», проходящей через неотапливаемые помещения,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $t_{\text{тс}}$  – средняя температура наружной поверхности трубопроводной системы «отопление, вентиляция и кондиционирование», проходящей через неотапливаемые помещения,  $^\circ\text{C}$ ;  $t_{\text{окр}}$  – средняя температура окружающего воздуха неотапливаемых помещений здания,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

С учетом приведенных положений по структуре параметров связей теплового режима здания и характеру их взаимосвязей математическая формулировка задачи оптимизации параметров может быть записана следующим образом:

необходимо минимизировать нелинейную функцию цели

$$И = И[X, Y, Z]_{N = N_0}$$

при ограничениях в виде неравенств на независимые параметры

$$X^* < X < X^{**},$$

$$Y^* < Y < Y^{**},$$

$$Z^* < Z < Z^{**},$$

где  $N$  – совокупность характеристик внешних влияющих факторов.

То есть необходимо найти такие независимые параметры  $X$ ,  $Y$  и такие конструктивные параметры  $Z$ , для которых функция этих параметров достигает минимума при соблюдении условий указанных ограничений.

Поставленная задача относится к классу задач нахождения экстремума функции переменных, связанных нелинейными уравнениями и неравенствами при наличии ограничений.

В данной работе использовался один из классических математических методов решения экстремальных задач – метод поиска оптимума путем решения

системы нелинейных уравнений, полученных при приравнении нулю частных производных минимизируемой функции по оптимизируемым параметрам.

Если функция цели  $I$  ( $X_1, X_2, \dots, X_n$ ) выражается аналитически и ее экстремум находится внутри области изменения параметров, то экстремальное значение функции можно найти, приравняв нулю ее частные производные и решив уравнения:

$$\frac{\partial I}{\partial x_1} = 0; \quad \frac{\partial I}{\partial x_2} = 0; \quad \dots, \quad \frac{\partial I}{\partial x_n} = 0, \quad (2.13)$$

то есть непрерывная функция  $I(X_1, X_2, \dots, X_n)$  от независимых переменных  $X_1, X_2, \dots, X_n$  достигает максимума или минимума внутри области только при таких значениях переменных  $X_i$  для которых  $n$  частных производных (2.1) одновременно обращаются в нуль.

Если критерий оптимальности является функцией одной переменной, то необходимое условие минимума запишется в виде одного уравнения:

$$\frac{\partial I}{\partial x} = 0. \quad (2.14)$$

При комплексной аналитической оптимизации нескольких параметров ( $X_1, X_2, X_3, X_4$  и т.д.) выбранный критерий оптимума дифференцируется отдельно по каждому независимому от других параметрам. Так экономически наиболее выгодное решение при  $n$  независимых параметрах дает система, состоящая из  $n$  уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \left( \frac{\partial I}{\partial x_1} \right)_{x_2, x_3, \dots, x_n} &= 0, \\ \left( \frac{\partial I}{\partial x_2} \right)_{x_2, x_3, \dots, x_n} &= 0, \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ \left( \frac{\partial I}{\partial x_n} \right)_{x_1, x_2, \dots, x_{n-1}} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.15)$$



Данная система уравнений обеспечивает учет взаимосвязи оптимумов искомым параметрам. Основная трудность при решении оптимальной задачи указанным методом исследования функций классического анализа возникает вследствие того, что система уравнений (2.13) или уравнение (2.14), получаемые в результате их применения, обеспечивает лишь необходимые условия оптимальности. Поэтому данные решения должны быть проверены на достаточность. Для этого нужно или найти вторую производную от целевой функции по оптимизируемому параметру и убедиться, что она положительна, или провести дополнительные расчеты в окрестностях экстремальной точки. В результате такой проверки сначала отбрасывают решения, которые не определяют экстремальные, а затем среди остающихся экстремальных решений выбирают решение, удовлетворяющее условиям оптимальной задачи, то есть наибольшему или наименьшему значению критерия оптимальности в зависимости от постановки задачи.

### 2.3. Основные выводы по второму разделу

Выбранный критерий (2.1) является наиболее эффективным с точки зрения технико-экономической оптимизации.

Выражения (2.2)–(2.12) отражают математическую модель процессов теплообмена теплового потребления зданием.

Уравнения (2.13)–(2.15) определяют построение алгоритма нахождения оптимальных теплотехнических параметров.

При разработке проектов оптимальные параметры во многих случаях осуществить невозможно по конструктивным или техническим ограничениям. В таких случаях необходимо определять величину перерасхода общих затрат, вызванных отклонениями искомого параметра от его оптимального значения.

Для нахождения оптимального параметра утепления тепловой изоляцией стен зданий необходимо решить следующие задачи:

1. Определить функцию цели на основании выбранного критерия оптимальности при утеплении ограждающих конструкций стен зданий с учетом отпускаемой тепловой энергии системе потребления.

2. Разработать алгоритм расчета оптимальной величины, позволяющей находить минимум заданной функции, в зависимости от режимов регулирования отопительной системы.

3. Разработать методику технико-экономической оптимизации утепления тепловой изоляцией наружных ограждающих конструкций стен зданий, в целях прогнозирования и оценки параметров.

### РАЗДЕЛ 3. Методика и алгоритм технико-экономической оптимизации утепления наружных ограждающих конструкций стен зданий

В данном разделе решается задача технико-экономической оптимизации системы теплового потребления зданий. Целью является разработка методики определения наивыгоднейших параметров теплозащиты зданий, позволяющей определять оптимальную толщину утеплителя стены, с учетом регулирования отпускаемой тепловой энергии.

В качестве критерия оптимальности принята оценка капитальных вложений по величине сравнительной эффективности инноваций, так как данный критерий отвечает решению поставленной задачи технико-экономической оптимизации по всему комплексу определяющих параметров с учетом вложений и эксплуатационных расходов в строительство, реконструкцию, модернизацию и эксплуатацию зданий (2.1).

3.1. Расчет величины дисконтированных затрат системой теплового потребления здания при утеплении стен

#### 3.1.1. Эксплуатационные затраты системой теплоснабжения здания

Годовые эксплуатационные затраты системой теплоснабжения здания  $C_3$  обусловлены расходами теплоты, электрической энергии системой «отопление, вентиляция и кондиционирование», обслуживанием и амортизационными отчислениями на реновацию, и определяются из уравнения [27, 45], р./год:

$$C_3 = Z_{от} + Z_{эл} + Z_a + Z_o, \quad (3.1)$$

где  $Z_{от}$  – затраты, обусловленные потреблением теплоты, р./год;  $Z_{эл}$  – затраты на потребление электроэнергии системой «отопления-вентиляция-кондиционирование», р./год;  $Z_a$  – амортизационные отчисления на реновацию, р./год;  $Z_o$  – стоимость ежегодного обслуживания, р./год.

Затраты, расходуемые на потребление отпускаемой тепловой энергии зданием [27], можно рассчитать из выражения, р./год:

$$Z_{от} = 86400 \cdot z_{от} \cdot Q_{от} \cdot Ц_t, \quad (3.2)$$

где 86400 – число секунд в сутках, с/сут.;  $z_{от}$  – продолжительность отопительного периода, сут./год;  $Q_{от}$  определяется при  $t_{от}$ ;  $t_{от}$  – среднесуточная температура наружного воздуха за отопительный период, °C;  $C_T$  – средняя годовая стоимость тепловой энергии, р./Дж.

Расход тепловой энергии, отпускаемой зданию на отопление, вентиляцию и кондиционирование, можно выразить из теплового баланса (2.2), представив его в виде, Вт:

$$Q_{от} = Q_{ст} + Q_{ч} + Q_{ок} + Q_{дв} + Q_{пол} + Q_{инф} + Q_{тс} - (Q_T + Q_S). \quad (3.3)$$

Затраты на потребление электроэнергии системой «отопление, вентиляция и кондиционирование», можно представить в виде [45], р./год:

$$Z_{эл} = \sum_{i=1}^n Z_i \cdot N_i^{раб} \cdot P_i \cdot C_i^{эл}, \quad (3.4)$$

где  $Z_i$  – продолжительность работы  $i$ -го оборудования (насосы, кондиционеры, рекуператоры и т.д.) в течение суток, ч;  $N_i^{раб}$  – число рабочих дней в году  $i$ -го оборудования, 1/год;  $P_i$  – средняя мощность  $i$ -го оборудования, Вт;  $C_i^{эл}$  – средняя годовая стоимость электрической энергии потребления  $i$ -ым оборудованием, р./Вт·ч.

Рассматривая отпуск тепловой энергии в систему здания «отопление, вентиляция и кондиционирование» [42, 97, 98], можно представить среднюю мощность насосного оборудования в виде выражения, Вт:

$$P_H = \frac{k \cdot Q_{от} \cdot H_H \cdot \gamma}{\rho_B \cdot C_B \cdot (\tau_3 - \tau_2) \cdot \eta_{п} \cdot \eta_p}, \quad (3.5)$$

где  $k$  – коэффициент запаса;  $H_H$  – напор, развиваемый насосом, м;  $\gamma$  – удельный вес перекачиваемой жидкости, Н/м<sup>3</sup>;  $\eta_{п}$  – коэффициент полезного действия передачи;  $\eta_p$  – коэффициент полезного действия насоса.

Амортизационные отчисления на реновацию и стоимость ежегодного обслуживания системой теплового потребления здания нормируются в виде определенного процента от капитальных вложений [27, 45], тогда, р./год:

$$Z_a + Z_o = H \cdot K = 1,5 \cdot (K/T_{ам}) + 12 \cdot C_{ср} \cdot N_{чел} \cdot n_{см}, \quad (3.6)$$

где  $H$  – норма отчислений в относительных единицах на амортизацию и ежегодное обслуживание системы теплового потребления здания, 1/год;  $T_{ам}$  – срок амортизационных инвестиций (срок полезного использования объекта), год; 12 – число месяцев в году, мес./год;  $C_{ср}$  – средняя заработная платы рабочих, р./мес.;  $N_{чел}$  – численность рабочих;  $n_{см}$  – количество смен обслуживания в сутки.

Капитальные вложения в теплосберегающие мероприятия определяются согласно [45], р.:

$$K = K_{огр} + K_{об} + K_{пр}, \quad (3.7)$$

где  $K_{огр}$  – теплосберегающие мероприятия по утеплению тепловой изоляцией ограждающих конструкций зданий, р.;  $K_{об}$  – стоимость оборудования на отопление, рекуперацию и охлаждение помещений, р.;  $K_{пр}$  – стоимость условий присоединения систем отопления, рекуперации и охлаждения, р.

**3.1.2. Приведенные дисконтированные затраты на утепление тепловой изоляцией наружных ограждающих конструкций стен здания.** Подставим выражения (3.2)–(3.7) в уравнение (2.1) и учитывая, что  $K_{об} = K_{пр} = 0$ , можно получить, приведенные дисконтированные затраты на утепление тепловой изоляцией наружных ограждающих конструкций стен зданий  $I_{ст}$  [67], р./год:

$$I_{ст} = Q_{ст} \cdot (86400 \cdot z_{от} \cdot \zeta_T + b) + K_{ст} \cdot (E_{ст} + H) + Z_{эл.х} + a \cdot (86400 \cdot z_{от} \cdot \zeta_T + b), \quad (3.8)$$

где 
$$a = Q_{ч} + Q_{ок} + Q_{дв} + Q_{пол} + Q_{инф} + Q_{тс} - (Q_T + Q_s), \quad (3.9);$$

$$b = \frac{\zeta_H^{эл} \cdot k \cdot H_H \cdot \gamma \cdot Z_H \cdot N_H^{раб}}{\rho_B \cdot C_B \cdot (\tau_3 - \tau_2) \cdot \eta_{п} \cdot \eta_p}, \quad (3.10);$$

$K_{ст}$  – теплосберегающие мероприятия по утеплению тепловой изоляцией ограждающих конструкций стен зданий, р.;  $E_{ст}$  – коэффициент эффективности инвестиций в утепление тепловой изоляцией ограждающих конструкций стен зданий, 1/год;  $\zeta_H^{эл}$  – средняя годовая стоимость электрической энергии потребления перекачивающим насосом, р./Вт·ч;  $Z_{эл.х}$  – затраты на потребление электроэнергии системой «вентиляция-кондиционирование», определяемые согласно (3.4), р./год;  $Z_H$  – продолжительность работы насоса в течение суток, ч;

$N_n^{\text{раб}}$  – число рабочих дней в году насосного оборудования, 1/год.

Капитальные вложения финансируются за счет инвестиционных средств, а эффективность инвестиций в утепление тепловой изоляцией ограждающих конструкций стен зданий определяется из выражения [27]:

$$E_{\text{ст}} = \frac{r}{[1 - \exp(-r \cdot T_{\text{ок}})]}, \quad (3.11)$$

где  $r$  – расчетная норма дисконта [71];  $T_{\text{ок}}$  – срок окупаемости инвестиций, приравненный к сроку окупаемости при условии наращивания поступающих доходов, за счет экономии энергоресурсов, год.

Срок окупаемости инвестиций определяется из выражения [27], год:

$$T_{\text{ок}} = \frac{\ln(1 + T_0 \cdot r)}{\ln(1 + r)}, \quad (3.12)$$

где  $T_0$  – бездисконтный срок окупаемости инвестиций за счет номинальной величины дохода, лет.

Бездисконтный срок окупаемости инвестиций за счет номинальной величины дохода можно определить по формуле [27], лет:

$$T_0 = \frac{K_{\text{ст}}}{\Delta \mathcal{E}_{\text{ст}}}, \quad (3.13)$$

где  $\Delta \mathcal{E}_{\text{ст}}$  – доход за счет экономии энергоресурсов в течение срока эксплуатации проведенного мероприятия (экономический эффект за счет утепления тепловой изоляцией ограждающих конструкций стен здания), р./год.

Экономический эффект за счет утепления тепловой изоляцией ограждающих конструкций стен здания можно определить по выражению, р./год:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{ст}} = C_T \cdot \Delta Q_{\text{ст}}, \quad (3.14)$$

где  $\Delta Q_{\text{ст}}$  – экономия тепловой энергии за счет утепления ограждающих конструкций стен здания, Дж/год.

Экономия тепловой энергии за счет утепления ограждающих конструкций стен здания можно определить по уравнению, Дж/год:

$$\Delta Q_{\text{ст}} = 86400 \cdot z_{\text{от}} \cdot \left[ \sum F_{\text{ст},i} \cdot (t_{\text{в},i} - t_{\text{от}}) \cdot n_i \right] \cdot (k_1 - k_2), \quad (3.15)$$

где  $F_{\text{ст},i}$  – площадь поверхности наружных ограждающих конструкций стен здания  $i$ -ой зоны помещения,  $\text{м}^2$ ;  $t_{\text{в},i}$  – расчетная температура внутреннего воздуха  $i$ -ой зоны помещения здания [100, 101],  $^{\circ}\text{C}$ ;  $n_i$  – коэффициент, зависящей от положения наружной поверхности ограждающей конструкции стен здания по отношению к наружному воздуху [98];  $k_1$  – приведенный коэффициент теплопередачи ограждающих конструкций стен здания до внедрения мероприятия,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;  $k_2$  – приведенный коэффициент теплопередачи ограждающих конструкций стен здания после внедрения мероприятия,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ .

Приведенный коэффициент теплопередачи через ограждающие конструкции стен здания можно определить по формуле [79, 102],  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ :

$$k = \frac{1}{R_o^{\text{пр}}}, \quad (3.16)$$

где  $R_o^{\text{пр}}$  – приведенное сопротивление теплопередаче теплозащитной оболочки стен здания,  $(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})/\text{Вт}$ .

Приведенное сопротивление теплопередаче теплозащитной оболочки стен здания определяется из уравнения [79],  $(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})/\text{Вт}$ :

$$R_o^{\text{пр}} = r_o \cdot R_o^{\text{усл}} = \frac{1}{\frac{1}{R_o^{\text{усл}}} + \sum l_j \cdot \psi_j + \sum n_k \cdot \chi_k}, \quad (3.17)$$

где  $r_o$  – коэффициент теплотехнической однородности ограждающей конструкции, учитывающий влияние стыков, откосов проемов, обрамляющих ребер, гибких связей и других теплопроводных включений;  $R_o^{\text{усл}}$  – осредненное по площади условное сопротивление теплопередаче фрагмента теплозащитной оболочки стен здания,  $(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})/\text{Вт}$ ;  $l_j$  – протяженность линейной неоднородности  $j$ -го вида, приходящаяся на  $1 \text{ м}^2$  фрагмента теплозащитной оболочки стен здания [79, 103, 104],  $\text{м}/\text{м}^2$ ;  $\psi_j$  – удельные потери тепловой энергии через линейную неоднородность  $j$ -ого вида [79, 103, 104],  $\text{Вт}/\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ;  $n_k$  – количество точечных неоднородностей  $k$ -го вида, приходящихся на  $1 \text{ м}^2$  фрагмента теплозащитной

оболочки здания [79, 103, 104], шт./м<sup>2</sup>;  $\chi_k$  – удельные потери тепловой энергии через точечную неоднородность k-го вида [79, 103, 104], Вт/°С.

Осредненное по площади условное сопротивление теплопередаче фрагмента теплозащитной оболочки стен здания, при утеплении его снаружи теплоизоляционным материалом, можно определить из уравнения, (м<sup>2</sup>·°С)/Вт:

$$R_o^{усл} = \frac{\sum F_i}{\sum \left( \frac{F_i}{R_{o,i}^{усл}} \right)} = (R_{усл} + \frac{\delta_{ут}}{\lambda_{ут}}) \cdot \eta, \quad (3.18)$$

где  $F_i$  – площадь i-го фрагмента ограждающей конструкции стен здания после утепления его тепловой изоляцией, м<sup>2</sup>;  $R_{o,i}^{усл}$  – условное сопротивление теплопередаче однородной части фрагмента теплозащитной оболочки стен здания i-го вида, после утепления его тепловой изоляцией, (м<sup>2</sup>·°С)/Вт:

$$R_{o,i}^{усл} = \frac{1}{\alpha_1} + \sum R_s + \frac{\delta_{ут}}{\lambda_{ут}} + \frac{1}{\alpha_2}, \quad (3.19);$$

$\alpha_1$  – коэффициенты теплоотдачи внутренней поверхности ограждающих конструкций [79, 101–104], Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $\alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи внешней поверхности ограждающих конструкций [79, 101-104], Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $\delta_{ут}$  – толщина утепляющего слоя теплоизоляционного материала ограждающей конструкции стен здания, м;  $\lambda_{ут}$  – теплопроводность утепляющего слоя теплоизоляционного материала ограждающей конструкции стен здания, Вт/(м·°С);  $R_s$  – термическое сопротивление слоя однородной части фрагмента стен здания, (м<sup>2</sup>·°С)/Вт:

$$R_s = \frac{\delta_s}{\lambda_s}, \quad (3.20);$$

$\delta_s$  – толщина установленного слоя ограждающей конструкции стен здания, м;  $\lambda_s$  – теплопроводность материала установленного слоя ограждающей конструкции стен здания, Вт/(м·°С);  $\eta$  – коэффициент расхождения осредненности по площади условного сопротивления теплопередаче фрагмента теплозащитной оболочки стен здания, при утеплении его снаружи теплоизоляционным материалом:



$$\eta = \frac{\sum F_i}{\sum \left( \frac{F_i}{R_{o,i}^{уст}} \right) \cdot \left( R_{уст} + \frac{\delta_{ут}}{\lambda_{ут}} \right)}, \quad (3.21);$$

$R_{уст}$  – осредненное по площади установленное сопротивление теплопередаче фрагмента ограждающей конструкции стен здания,  $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$ :

$$R_{уст} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\sum F'_i}{\sum \left( \frac{F'_i}{(\sum R_s)} \right)} + \frac{1}{\alpha_2}, \quad (3.22);$$

$F'_i$  – площадь  $i$ -го фрагмента ограждающей конструкции стен здания до утепления его тепловой изоляцией,  $\text{м}^2$ .

Из выражений (3.17) и (3.18) можно определить коэффициент теплотехнической однородности ограждающих конструкций стен здания при утеплении его тепловой изоляцией:

$$r_0 = \frac{1}{1 + \left( R_{уст} + \frac{\delta_{ут}}{\lambda_{ут}} \right) \cdot \eta \cdot \left[ \sum l_j \cdot \psi_j + \sum n_k \cdot \chi_k \right]}. \quad (3.23)$$

Выражение для капитальных вложений в теплосберегающие мероприятия по утеплению тепловой изоляцией ограждающих конструкций стен зданий можно представить в виде,  $\text{р.}$ :

$$K_{ст} = C_{ут} \cdot \delta_{ут} \cdot F_{ст} + C_{раб} \cdot F_{ст}, \quad (3.24)$$

где  $C_{ут}$  – стоимость  $1 \text{ м}^3$  утепляющего теплоизоляционного материала,  $\text{р./м}^3$ ;  $F_{ст}$  – общая площадь поверхности наружных ограждающих конструкций стен здания после утепления его тепловой изоляцией,  $\text{м}^2$ ;  $C_{раб}$  – стоимость  $1 \text{ м}^2$  работ по утеплению ограждающих конструкций стен здания теплоизоляционным материалом, с учетом прочих расходов (стоимость трудозатрат, креплений и т.д.),  $\text{р./м}^2$ .

Подставив выражения (3.14)–(3.18) и (3.24) в уравнение (3.13), учитывая проведенное энергосберегающее мероприятие, получим бездисконтный срок окупаемости инвестиций в утепление тепловой изоляцией ограждающих конструкций стен здания, лет:

$$T_0 = \frac{(\Pi_{\text{ут}} \cdot \delta_{\text{ут}} + \Pi_{\text{раб}}) \cdot F_{\text{ст}} \cdot \left( R_{\text{уст}} + \frac{\delta_{\text{ут}}}{\lambda_{\text{ут}}} \right) \cdot \eta \cdot r_0 \cdot R_{0,\text{уст}}^{\text{пр}}}{\Pi_{\text{т}} \cdot 86400 \cdot z_{\text{от}} \cdot \left[ \sum F_{\text{ст},i} \cdot (t_{\text{в},i} - t_{\text{от}}) \cdot n_i \right] \cdot \left\{ \left( R_{\text{уст}} + \frac{\delta_{\text{ут}}}{\lambda_{\text{ут}}} \right) \cdot \eta \cdot r_0 - R_{0,\text{уст}}^{\text{пр}} \right\}}, \quad (3.25)$$

где  $R_{0,\text{уст}}^{\text{пр}}$  – установленное приведенное сопротивление теплопередаче фрагмента теплозащитной оболочки стен здания,  $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ :

$$R_{0,\text{уст}}^{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{R_{0,\text{уст}}^{\text{усл}}} + \sum l_j^{\text{уст}} \cdot \psi_j^{\text{уст}} + \sum n_k^{\text{уст}} \cdot \chi_k^{\text{уст}}}, \quad (3.26);$$

$R_{0,\text{уст}}^{\text{усл}}$  – осредненное по площади установленное условное сопротивление теплопередаче фрагмента теплозащитной оболочки стен здания,  $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ :

$$R_{0,\text{уст}}^{\text{усл}} = \frac{\sum F_i'}{\sum \left( \frac{F_i'}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum R_s + \frac{1}{\alpha_2}} \right)}, \quad (3.27);$$

$l_j^{\text{уст}}$  – установленная протяженность линейной неоднородности  $j$ -го вида, приходящаяся на  $1 \text{ м}^2$  фрагмента теплозащитной оболочки стен здания,  $\text{м}/\text{м}^2$ ;  $\psi_j^{\text{уст}}$  – установленные удельные потери тепловой энергии через линейную неоднородность  $j$ -ого вида,  $\text{Вт}/\text{м} \cdot ^\circ\text{C}$ ;  $n_k^{\text{уст}}$  – установленное количество точечных неоднородностей  $k$ -го вида, приходящихся на  $1 \text{ м}^2$  фрагмента теплозащитной оболочки здания,  $\text{шт.}/\text{м}^2$ ;  $\chi_k^{\text{уст}}$  – установленные удельные потери тепловой энергии через точечную неоднородность  $k$ -го вида,  $\text{Вт}/^\circ\text{C}$ .

Полученные выражения (3.8)–(3.27) позволяют определять приведенные дисконтированные затраты по утеплению ограждающих конструкций стен зданий, с учетом отпускаемой тепловой энергии.

Окончательное решение принимается на основе анализа стоимостных и натуральных показателей. Вариант требующий меньших капитальных затрат и годовых эксплуатационных расходов по стоимостным характеристикам, при

соблюдении нормативных требований тепловой защиты зданий, является наиболее выгодным.

### 3.2. Определение оптимальной толщины утепления тепловой изоляцией наружных ограждающих конструкций стен зданий

Потери тепловой энергии в зданиях снижаются при сочетании мероприятий по обеспечению утепления его ограждающих конструкций стен тепловой изоляцией. Использование теплоизоляционных материалов – основное мероприятие по энергосбережению, позволяющее повысить сопротивление теплопередаче, снизить удельный расход тепловой энергии на отопление и вентиляцию зданий. Однако при разной стоимости теплоизоляционных материалов, производимых работ по утеплению фасадов, тарифах на тепловую и электрическую энергию, могут увеличиваться приведенные дисконтированные затраты на утепление тепловой изоляцией ограждающих конструкций стен зданий, потребляемые энергетические ресурсы. Поэтому целесообразно получить оправданную (оптимальную) толщину утепления ограждающих конструкций стен зданий, с учетом отпускаемой тепловой энергии.

#### 3.2.1. Оптимальная толщина утепляющего слоя наружных стен здания

Значение оптимальной толщины утепления тепловой изоляцией можно найти, исходя из минимума суммарных приведенных дисконтированных затрат на ограждающие конструкции стен зданий (3.8), при приравнении к нулю частных зависимых от  $\delta_{yt}$  производных функции по оптимизируемому параметру, р./год:

$$\frac{dI_{ct}}{d\delta_{yt}} = (86400 \cdot z_{от} \cdot \Pi_{т} + b) \cdot \frac{dQ_{ct}}{d\delta_{yt}} + (E_{ct} + H) \cdot \frac{dK_{ct}}{d\delta_{yt}} = 0. \quad (3.28)$$

Средний объем тепловой энергии рассеиваемой в окружающую среду от ограждающих конструкций стен зданий, после утепления, можно определить из выражения, Вт:

$$Q_{\text{ст}} = \frac{(\sum F_{\text{ст},i} \cdot (t_{\text{в},i} - t_{\text{от}}) \cdot n_i)}{r_0 \cdot \eta \cdot (R_{\text{уст}} + \frac{\delta_{\text{ут}}}{\lambda_{\text{ут}}}}. \quad (3.29)$$

Взяв первые производные по толщине утепляющего слоя теплоизоляционного материала  $\delta_{\text{ут}}$  из выражений для капитальных вложений в теплосберегающие мероприятия (3.24) и годового объема тепловой энергии, рассеиваемой в окружающую среду от стен (3.29), получим:

$$\begin{aligned} \frac{dK_{\text{ст}}}{d\delta_{\text{ут}}} &= (\Pi_{\text{ут}} \cdot \delta_{\text{ут}} \cdot F_{\text{ст}} + \Pi_{\text{раб}} \cdot F_{\text{ст}})' = \Pi_{\text{ут}} \cdot F_{\text{ст}}, \quad (3.30) \\ \frac{dQ_{\text{ст}}}{d\delta_{\text{ут}}} &= \frac{((\sum F_{\text{ст},i} \cdot (t_{\text{в},i} - t_{\text{от}}) \cdot n_i))' \cdot (r_0 \cdot \eta \cdot (R_{\text{уст}} + \frac{\delta_{\text{ут}}}{\lambda_{\text{ут}}}))}{r_0 \cdot \eta \cdot (R_{\text{уст}} + \frac{\delta_{\text{ут}}}{\lambda_{\text{ут}}})} - \\ &= \frac{((\sum F_{\text{ст},i} \cdot (t_{\text{в},i} - t_{\text{от}}) \cdot n_i))' \cdot (r_0 \cdot \eta \cdot (R_{\text{уст}} + \frac{\delta_{\text{ут}}}{\lambda_{\text{ут}}}))'}{r_0 \cdot \eta \cdot (R_{\text{уст}} + \frac{\delta_{\text{ут}}}{\lambda_{\text{ут}}})} = - \frac{(\sum F_{\text{ст},i} \cdot (t_{\text{в},i} - t_{\text{от}}) \cdot n_i) \cdot \lambda_{\text{ут}}}{r_0 \cdot \eta \cdot (R_{\text{уст}} \cdot \lambda_{\text{ут}} + \delta_{\text{ут}})^2}. \quad (3.31) \end{aligned}$$

Подставив выражения (3.30) и (3.31) в уравнение (3.28), получим после некоторых преобразований:

$$\delta_{\text{ут}}^{\text{опт}} = -R_{\text{уст}} \cdot \lambda_{\text{ут}} \pm \sqrt{\frac{(86400 \cdot z_{\text{от}} \cdot \Pi_{\text{т}} + b) \cdot \lambda_{\text{ут}} \cdot (\sum F_{\text{ст},i} \cdot (t_{\text{в},i} - t_{\text{от}}) \cdot n_i)}{r_0 \cdot \eta \cdot (E_{\text{ст}} + H) \cdot \Pi_{\text{ут}} \cdot F_{\text{ст}}}}. \quad (3.32)$$

Из (3.32) принимаем выражение:

$$\delta_{\text{ут}}^{\text{опт}} = -R_{\text{уст}} \cdot \lambda_{\text{ут}} + \sqrt{\frac{(86400 \cdot z_{\text{от}} \cdot \Pi_{\text{т}} + b) \cdot \lambda_{\text{ут}} \cdot (\sum F_{\text{ст},i} \cdot (t_{\text{в},i} - t_{\text{от}}) \cdot n_i)}{r_0 \cdot \eta \cdot (E_{\text{ст}} + H) \cdot \Pi_{\text{ут}} \cdot F_{\text{ст}}}}, \quad (3.33)$$

поскольку значения величины толщины утепляющего слоя теплоизоляционного материала  $\delta_{\text{ут}}^{\text{опт}}$ , вычисленные по выражению

$$\delta_{\text{ут}}^{\text{опт}} = -R_{\text{уст}} \cdot \lambda_{\text{ут}} - \sqrt{\frac{(86400 \cdot z_{\text{от}} \cdot \Pi_{\text{т}} + b) \cdot \lambda_{\text{ут}} \cdot (\sum F_{\text{ст},i} \cdot (t_{\text{в},i} - t_{\text{от}}) \cdot n_i)}{r_0 \cdot \eta \cdot (E_{\text{ст}} + H) \cdot \Pi_{\text{ут}} \cdot F_{\text{ст}}}} \quad (3.34)$$

всегда отрицательно, что не имеет физического смысла.

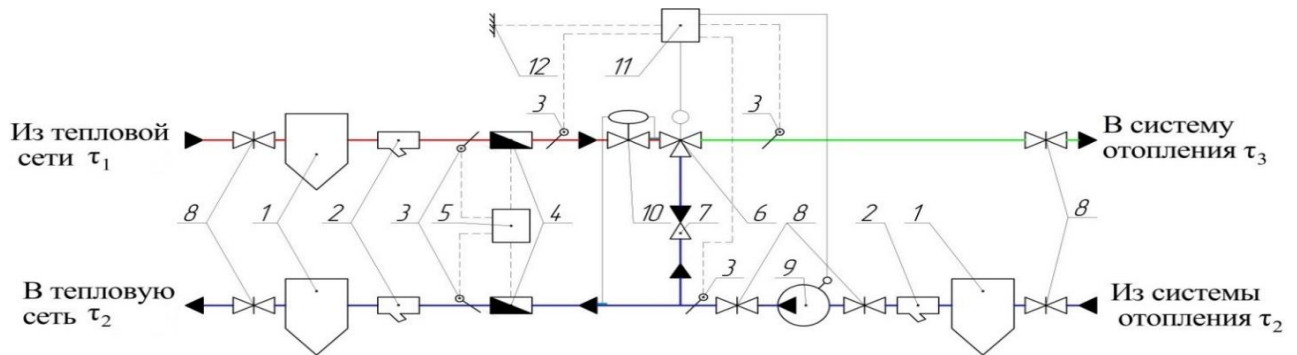


Рисунок 3 – Принципиальная схема узла регулирования отпускаемой тепловой энергии системы «отопление, вентиляция» здания: 1 – грязевик; 2 – фильтр; 3 – датчик температуры; 4 – расходомер; 5 – тепловой вычислитель; 6 – трехходовой регулирующий клапан; 7 – обратный клапан; 8 – отключающая арматура; 9 – насос; 10 – регулятор перепада давления; 11 – регулятор по температурам; 12 – датчик температуры наружного воздуха

Текущая температуры воды при любом режиме регулирования, для нахождения комплексной величины  $b$ , определяют из системы уравнений [42, 97-101]:

$$\tau_1 = t_b + \Delta t \cdot \bar{Q}_0^{0,8} + (\delta \tau - 0,5 \cdot \Theta) \cdot \frac{\bar{Q}_0}{G_0}, \quad (3.35)$$

$$\tau_2 = t_b + \Delta t \cdot \bar{Q}_0^{0,8} - 0,5 \cdot \Theta \cdot \frac{\bar{Q}_0}{G_0}, \quad (3.36)$$

$$\tau_3 = t_b + \Delta t \cdot \bar{Q}_0^{0,8} + 0,5 \cdot \Theta \cdot \frac{\bar{Q}_0}{G_0}, \quad (3.37)$$

где  $\tau_1$  – текущая температура жидкости в подающем трубопроводе тепловой сети, °С;  $\Delta t = 0,5 \cdot (\tau_{03} + \tau_{02}) - t_b$  – расчетный температурный напор в нагревательных приборах отопительной системы, °С;  $\tau_{03}$  – расчетная температура перекачиваемой жидкости в подающем трубопроводе системы «отопление, вентиляция и кондиционирование», °С;  $\tau_{02}$  – расчетная температура перекачиваемой жидкости в обратном трубопроводе системы «отопление, вентиляция и кондиционирование», °С;  $\bar{Q}_0 = \left( \frac{t_b - t_{от}}{t_b - t_{нх}} \right)$  – относительная

нагрузка системы отопления;  $t_{нх}$  – температура наружного воздуха в холодный период года, °С;  $\delta \tau = \tau_{01} - \tau_{02}$  – расчетный температурный перепад в сети, °С;  $\tau_{01}$  – расчетная температура жидкости в подающем трубопроводе тепловой сети, °С;  $\Theta = \tau_{03} - \tau_{02}$  – расчетный температурный перепад в отопительной системе, °С;

$\bar{G}_0$  – относительный расход воды на систему «отопление, вентиляция и кондиционирование»:

- при качественном регулировании  $\bar{G}_0 = 1$ ,
- при количественном регулировании

$$\bar{G}_0 = \frac{\bar{Q}_0}{1 + \frac{\Delta t}{\delta\tau - 0,5 \cdot \Theta} \cdot (1 - \bar{Q}_0^{0,8})}, \quad (3.38)$$

- при качественно-количественном регулировании  $\bar{G}_0 = \bar{Q}_0^{0,33}$ .

Само по себе выполнение условия (3.33) не гарантирует минимума функции  $I_{ст}(\delta_{ут}^{opt})$ . Для того чтобы убедиться в достоверности полученного решения, нужно проверить условие (3.33) на достаточность, то есть провести исследования на существование (или отсутствие) экстремума в испытуемой стационарной точке.

Проверим выполнение условия положительной определенности квадратичной формы второго дифференциала от целевой функции  $I_{ст}(\delta_{ут})$ . С этой целью возьмем вторую производную от выражения (3.8) по  $\delta_{ут}$ . После некоторых преобразований имеем:

$$\frac{d^2 I_{ст}}{d\delta_{ут}^2} = 2 \cdot \delta_{ут} + 2 \cdot R_{уст} \cdot \lambda_{ут}. \quad (3.39)$$

Многочисленные вычисления выражения (3.39) при различных расчетных значениях толщины утепляющего слоя ограждающих конструкций стен зданий, полученных путем решения уравнения (3.32) в точке (3.33), показали, что во всех рассмотренных случаях решения данного уравнения, вторая производная от выражения (3.8) по  $\delta_{ут}$  положительна. Следовательно, одновременно выполняются необходимые и достаточные условия существования экстремума функции  $I_{ст}(\delta_{ут})$ .

Следует отметить также, что при определении экономически наиболее выгодной толщины утепления тепловой изоляцией ограждающих конструкций стен зданий из выражения (3.34), достаточные условия существования экстремума функции не выполняются, так как производная

$\frac{d^2 I_{\text{ст}}}{d\delta_{\text{ут}}^2}$  отрицательна. Это еще раз показывает, что определение  $\delta_{\text{ут}}^{\text{опт}}$  нужно вести по выражению (3.33).

Проверка достаточности условия (3.28) производилась также предварительным исследованием целевой функции при отладочных расчетах на ЭВМ посредством выдачи на печать результата каждого шага поиска. В процессе проведения многочисленных расчетов по определению значения экономически наиболее выгодной толщины утепления тепловой изоляцией ограждающих конструкций стен зданий находилась величина дисконтированных затрат в окрестности экстремальной точки, для основных процессов регулирования отпускаемой тепловой энергии. Одновременно отыскивались все внутренние точки, «подозрительные» по экстремуму, для которых также вычислялась величина дисконтированных затрат и сравнивалась с величиной дисконтированных затрат для полученных значений  $\delta_{\text{ут}}^{\text{опт}}$ . При этом решение имеется только тогда, когда выполняется неравенство

$$I_{\text{ст}1} > I_{\text{ст}}^{\text{мин}} < I_{\text{ст}2},$$

где  $I_{\text{ст}}^{\text{мин}}$  – величина дисконтированных затрат при оптимальном значении толщины  $\delta_{\text{ут}}^{\text{опт}}$ ;  $I_{\text{ст}1}$ ,  $I_{\text{ст}2}$  – величины дисконтированных затрат в окрестности экстремальной точки.

Проведенные расчеты показали, что значение оптимальной толщины утепления тепловой изоляцией ограждающих конструкций стен зданий  $\delta_{\text{ут}}^{\text{опт}}$  определенное по выражению (3.33), отвечают минимуму целевой функции (рисунок 3.1).

На рисунке 3.1 показан характер зависимости переменной части дисконтированных расчетных затрат  $I_{\text{ст}}(\delta_{\text{ут}})$  от толщины утепления тепловой изоляцией ограждающих конструкций стен здания, для трех процессов регулирования отпускаемой тепловой энергии. При отклонении параметра  $\delta_{\text{ут}}$  от его оптимального значения  $\delta_{\text{ут}}^{\text{опт}}$  на величину  $\Delta\delta_{\text{ут}}^{\text{опт}}$ , дисконтированные затраты возрастают от  $I_{\text{ст}}^{\text{мин}}$  до  $I_{\text{ст}}^{\text{р}}$ , причем  $I_{\text{ст}}^{\text{р}} > I_{\text{ст}}^{\text{мин}}$  на величину  $\Delta I_{\text{ст}}$ .

Таким образом, можно сделать вывод, что решение полученного уравнения (3.32) существует и выражение (3.33) единственно. Это и является доказательством достаточности условия (3.28).

### 3.2.2. Структура оптимизации утепления стен зданий

Полученное значение оптимальной толщины утепляющего слоя теплоизоляционного материала наружных ограждающих конструкций стен, влияет на тепловую защиту и работу теплового режима здания. Данное влияние ограничено требованиями согласно [79]: температура на внутренних поверхностях ограждающих конструкций должна быть не ниже минимально допустимых значений; приведенные сопротивления теплопередаче отдельных ограждающих конструкций должны быть не меньше нормируемых значений; удельная теплозащитная характеристика здания должна быть не больше нормируемого значения; требуемая степень долговечности ограждающих конструкций должна обеспечиваться применением материалов, имеющих надлежащую стойкость.



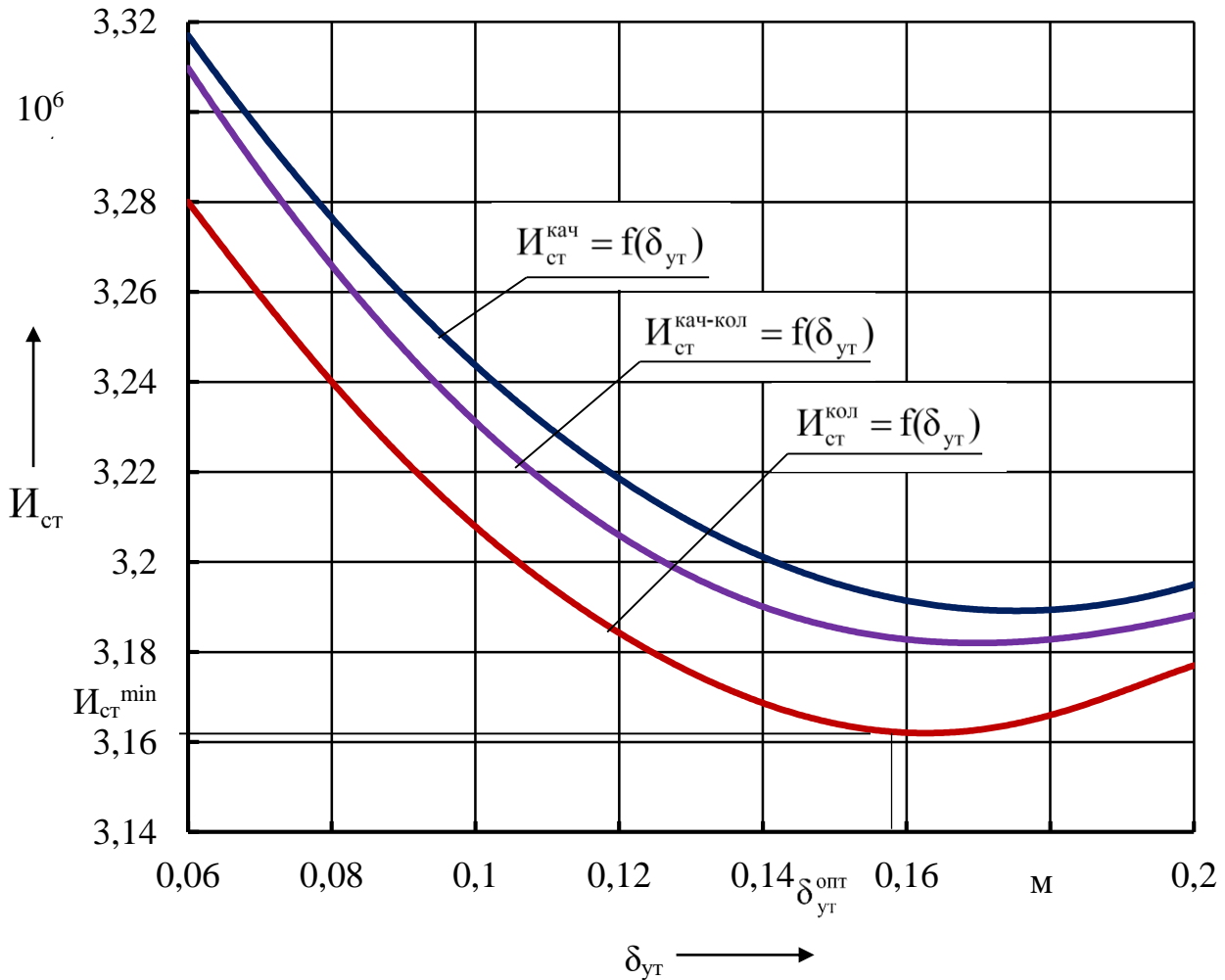


Рисунок 3.1 – Зависимость приведенных дисконтированных затрат от толщины утепляющего слоя тепловой изоляцией ограждающих конструкций стен здания

$I_{ст}^{кач}$  – приведенные дисконтированные затраты по утеплению наружных ограждающих конструкций стен при качественном регулировании отпускаемой тепловой энергии, р./год;  
 $I_{ст}^{кач-кол}$  – приведенные дисконтированные затраты по утеплению наружных ограждающих конструкций стен при качественно-количественном регулировании отпускаемой тепловой энергии, р./год;  $I_{ст}^{кол}$  – приведенные дисконтированные затраты по утеплению наружных ограждающих конструкций стен при количественном регулировании отпускаемой тепловой энергии, р./год

Температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающих конструкций стен здания можно определить из выражения [74], °C:

$$\Delta t = \frac{(t_{в} - t_{н})}{R_{о}^{пр} \cdot \alpha_1} \quad (3.40)$$

Нормируемое значение приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций стен здания определяется согласно [79],  $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$ :

$$R_o^{\text{норм}} = m_p \cdot R_o^{\text{тп}}, \quad (3.41)$$

где  $m_p$  – коэффициент, учитывающий особенности региона строительства, равен 0,63 для стен в случае если выполняется условие, что расчетная удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания не больше нормируемого значения;  $R_o^{\text{тп}}$  – базовое значение требуемого сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций стен здания, принимается в зависимости от градусо-суток отопительного периода, определяется по таблице 3 [79],  $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$ .

Определяющим показателем энергетической эффективности тепловой защиты и теплового режима зданий, при проведении капитального ремонта, является класс энергетической эффективности и энергосбережения, удельный годовой расход тепловой энергии на отопление, вентиляцию и кондиционирование. Данное решение определено постановлением Правительства РФ №18 от 25.01.2011 года [74].

Класс энергосбережения здания рассчитывается как отклонение расчетной удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания от нормируемой (базовой) величины [68]:

$$КЭ = \left( \frac{q_{\text{от}}^{\text{р}} - q_{\text{от}}^{\text{тп}}}{q_{\text{от}}^{\text{тп}}} \right) \cdot 100, \quad (3.42)$$

где  $КЭ$  – отклонения расчетной удельной характеристики расхода тепловой энергии на теплотребление здания от нормируемой (базовой) величины, %;

$q_{\text{от}}^{\text{р}}$  – расчетная удельная характеристика расхода тепловой энергии на теплотребление здания, определяется согласно [79] с поправкой на (2.2),  $\text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C})$ ;  $q_{\text{от}}^{\text{тп}}$  – нормируемая удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания, определяется для различных типов зданий согласно таблицам 13, 14 [79],  $\text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C})$ .

При эксплуатации существующих зданий с  $КЭ$  больше +15 % необходимо

проводить реконструкцию при соответствующем экономическом обосновании, если  $-15 \% \leq КЭ \leq +15 \%$  – мероприятия по энергосбережению не разрабатываются, а где КЭ ниже  $-15 \%$  – «экономическое стимулирование» [79].

Выполнение требований по степени долговечности выбранной ограждающей конструкции стен здания сводится к определению его прогнозируемого срока службы и допустимого срока эксплуатации [105, 106].

Согласно методике, представленной в [105], время до выхода из строя теплоизоляционного слоя по критерию потери теплозащитных свойств определяются из выражения, год:

$$\tau' = \frac{\Delta\lambda_{кр} \cdot \sum_{i=1}^n \exp\left[\frac{E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_{экр,i}} - \frac{1}{T_{и}}\right)\right]}{n_c}, \quad (3.43)$$

где  $\Delta\lambda_{кр}$  – критическое приращение коэффициента теплопроводности материала теплоизоляционного слоя, Вт/(м·°С);  $K_\lambda$  – показатель долговечности при тепловом старении, определенный на основании лабораторных испытаний теплового старения материала теплоизоляции [105], Вт/м·°С·год;  $E_a$  – энергия активации процесса разрушения, определенная на основании лабораторных испытаний [105], Дж/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная, равна 8,314 Дж/(К·моль);  $T_{и}$  – температура при изотермических испытаниях, К;  $T_{экр,i}$  – эквивалентная эксплуатационная температура в  $i$ -том слое теплоизоляционного материала, К;  $n_c$  – количество расчетных слоев в слое теплоизоляционного материала.

Критическое значение коэффициента теплопроводности материала теплоизоляционного слоя можно определить по формуле [105], Вт/(м·°С):

$$\Delta\lambda_{кр} = \lambda_{ут}^{max} - \lambda_{ут}, \quad (3.44)$$

где  $\lambda_{ут}^{max}$  – коэффициент теплопроводности изоляционного материала, которому соответствует нормируемое значение приведенного сопротивления теплопередаче при граничном значении требуемого класса энергосбережения здания, Вт/(м·°С).

Эквивалентная эксплуатационная температура в  $i$ -том слое теплоизоляционного материала определяется по формуле [105], К:

$$T_{\text{экв},i} = T_{\text{эквн},i} - T_{\text{эквусл},i}, \quad (3.45)$$

где  $T_{\text{эквн},i}$  – эквивалентная температура  $i$ -го элементарного слоя теплоизоляционного материала от действия наружного воздуха, К;  $T_{\text{эквусл},i}$  – эквивалентная температура  $i$ -го элементарного слоя теплоизоляционного материала от действия солнечной радиации для фасада определенной ориентации, К.

Эквивалентная температура  $i$ -го элементарного слоя теплоизоляционного материала от действия наружного воздуха рассчитывается согласно [105], К:

$$T_{\text{эквн},i} = -\frac{E_a}{R} \cdot \left\{ \ln \left[ \frac{1}{\tau_0} \cdot \sum_{j=1} \Delta\tau_j \cdot \exp \left( -\frac{E_a}{R \cdot \left( (t_1 + 273) - \left( \frac{(t_1 + 273) - T_{н,j}}{R_o^{\text{пр}}} \right) \cdot R_{\text{уст}}} \right)} \right) \right] \right\}^{-1}, \quad (3.46)$$

где  $\tau_0$  – количество часов в году, ч;  $\Delta\tau_j$  – продолжительность действия температуры наружного воздуха  $T_{н,j}$ , ч;  $T_{н,j}$  – температура  $j$ -го сечения при температуре наружного воздуха, К.

Эквивалентная температура  $i$ -го элементарного слоя теплоизоляционного материала от действия солнечной радиации для фасада определенной ориентации определится как [105], К:

$$T_{\text{эквусл},i} = -\frac{E_a}{R} \cdot \left\{ \ln \left[ \frac{1}{\tau_{\text{сиян}}} \cdot \sum_{k=1}^{12} \Delta\tau_{\text{сиян},k} \cdot \exp \left( -\frac{E_a}{R \cdot \left( \frac{\rho \cdot S_k}{\alpha_2 \cdot v_i} \right)} \right) \right] \right\}^{-1}, \quad (3.47)$$

где  $\tau_{\text{сиян}}$  – суммарная продолжительность солнечного сияния в течение года на соответствующий фасад, ч;  $\Delta\tau_{\text{сиян},k}$  – продолжительность солнечного сияния в месяце, ч;  $\rho$  – коэффициент поглощения поверхности наружной стены;  $S_k$  – интенсивность солнечной радиации, Вт/м<sup>2</sup>.

Допустимый срок эксплуатации утепляющего материала, по критерию нормируемого процентного ресурса материала, можно определить из выражения

[106], год:

$$T_d = 100 \cdot \frac{\lambda_{ут}}{\lambda_{ут}^{max}}. \quad (3.48)$$

Вышеизложенный способ оптимизации теплозащиты здания, с учетом отпускаемой тепловой энергии, для анализа его эффективности на ЭВМ, отобразим структурной схемой (рисунок 3.2).

Коэффициент теплопроводности изоляционного материала, которому соответствует нормируемое значение приведенного сопротивления теплопередаче при граничном значении требуемого класса энергосбережения здания, можно на основании (3.42), СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» [79], представить в виде, Вт/(м·°С):

$$\lambda_{ут}^{max} = \frac{\delta_{ут}^{opt}}{\left[ \frac{R_o^{norm}}{\eta \cdot r_0} \right] - R_{уст}}. \quad (3.49)$$

### 3.3. Основные выводы по третьему разделу

Получена функция цели (3.8) на основании выбранного критерия оптимальности (2.1) при утеплении наружных ограждающих конструкций стен зданий, с учетом отпускаемой тепловой энергии.

На основании полученных выражений (3.8)-(3.48) разработан алгоритм и программа (приложение 3) определения оптимальной толщины утепляющего слоя наружных ограждающих конструкций стен зданий  $\delta_{ут}^{opt}$ , с учетом отпускаемой тепловой энергии. Для нахождения решения задачи определения  $\delta_{ут}^{opt}$  составлена целевая функция, аргументом которой является искомая  $\delta_{ут}^{opt}$ . Решение целевой функции производилось методом наискорейшего спуска. Так как целевая функция является линейной относительно одного аргумента, то решение производилось за малое время, вычисления  $\delta_{ут}^{opt}$  были устойчивы, не наблюдалось ни одного случая «срыва» решения.

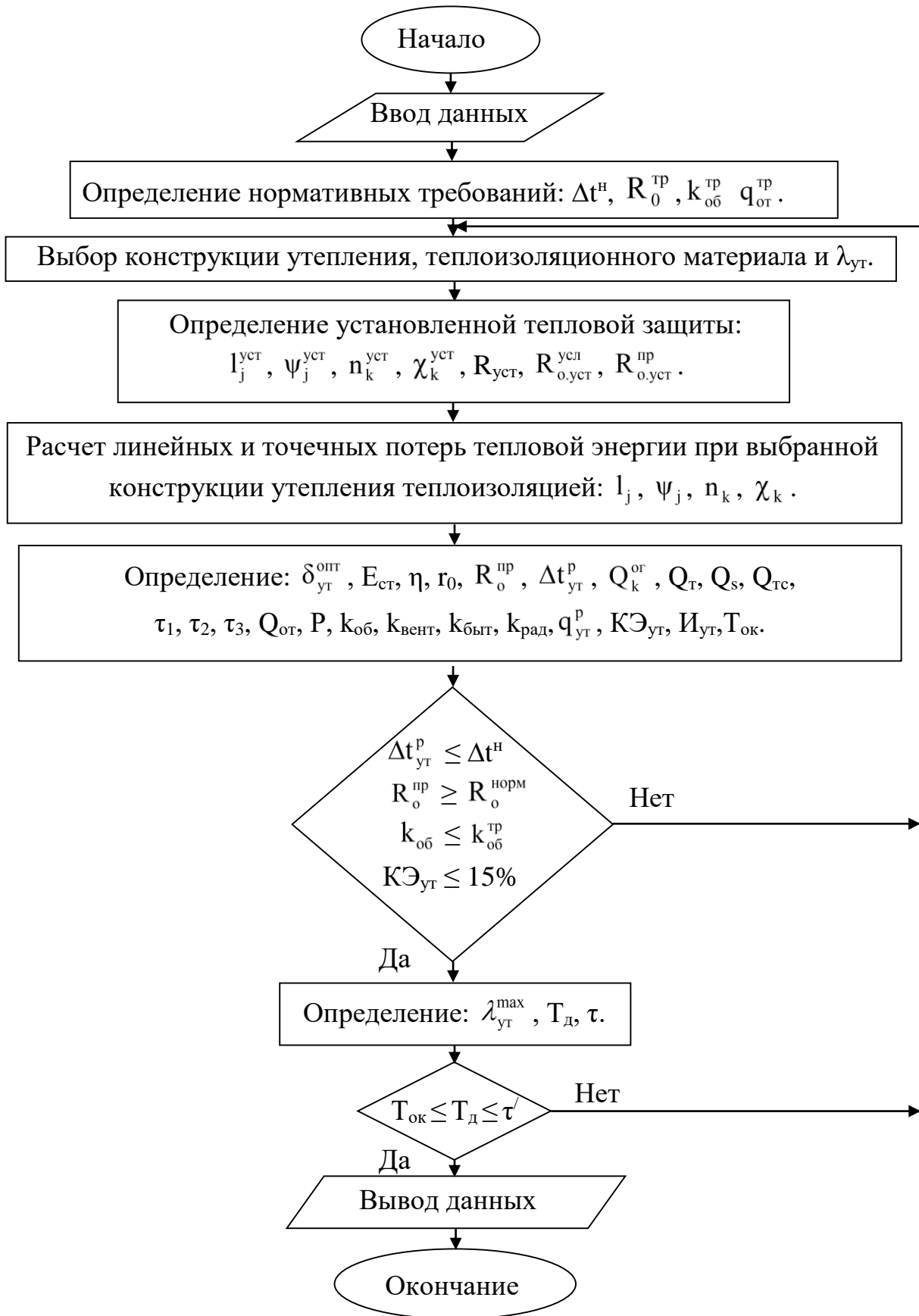


Рисунок 3.2 – Структурная схема методики технико-экономической оптимизации утепления стен зданий, с учетом отпускаемой тепловой энергии

Структурная схема, приведенная на рисунке 3.2, имеет следующие данные:  $k_{об}$  – расчетная удельная теплозащитная характеристика здания, определяется согласно [79], Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $k_{об}^{тп}$  – требуемая удельная теплозащитная характеристика здания, определяется согласно [79], Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $k_{вент}$  – расчетная удельная вентиляционная характеристика здания, определяется согласно [74] [79], Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $k_{быт}$  – расчетная удельная характеристика бытовых тепловыделений здания, определяется согласно [79], Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $k_{рад}$  – расчетная удельная характеристика теплопоступлений в здание от солнечной радиации, определяется согласно [79], Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $\Delta_{тн}$  – нормируемый температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающих конструкций стен здания, определяется согласно [79], °C;  $\Delta t_{ут}^p$  – расчетный температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающих конструкций стен здания, °C;  $q_{ут}^p$  – расчетная удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление, вентиляцию и кондиционирование здания после утепления, определяется согласно приложению Г [79], Вт/(м<sup>3</sup>·°C);  $KЭ_{ут}$  – расчетный класс энергосбережения здания после утепления, %

Разработанный в разделе 3 материал (рисунок 3.2), отражает методику технико-экономической оптимизации утепления стен зданий с учетом отпускаемой тепловой энергии, необходимую для прогнозирования и оценки эффективных параметров.

Следует сказать, что метод, выбранный для определения оптимальной толщины утепляющего слоя наружных ограждающих конструкций стен зданий, реализованной на ЭВМ, дал хорошие результаты. Он относительно прост в реализации, применительно к полученному решению задачи, требует небольшой предварительной подготовки и затрат машинного времени. И, что существенно, позволяет провести широкий круг аналитических исследований.

Разработанная компьютерная программа может быть использована специалистами (энергоаудиторами) и проектировщиками, по основным

направлениям: прогнозирование теплотребления зданий на отопление, вентиляцию в суточном и годовом циклах и продолжительности периодов отопления и охлаждения; определение теплозащиты здания, подбор оборудования на отпуск тепловой энергии и выбор целесообразного режима его функционирования; анализ и обоснование целесообразного применения в проектах зданий архитектурных, инженерных, энергосберегающих и других решений, влияющих на теплотребление здания; выполнение требований класса энергосбережения и энергоэффективности зданий.

Для подтверждения адекватности и применимости разработанной методики необходимо проанализировать и решить следующие задачи:

1. Провести эксперимент и расчет, сделать анализ статистических данных посуточных и годовых значений теплотребления здания. Дать оценку сопоставления результатов эксперимента и расчета.

2. Выполнить численные исследования влияния основных факторов на теплозащиту, с учетом регулирования теплового режима здания.

3. Дать оценку технико-экономического эффекта от использования предложенных разработок.



#### **РАЗДЕЛ 4. Исследование адекватности и анализ эффективности разработанной методики технико-экономической оптимизации утепления наружных ограждающих конструкций стен зданий**

В четвертом разделе представлено исследование адекватности и анализ эффективности предложенной методики оценки эффективности утепления стен зданий. Для этого был проведен эксперимент целью которого была оценка возможности применения разработанной математической модели и алгоритма определения оптимальной толщины изоляции стен для прогнозирования теплопотребления зданий на основе сопоставления измеренных (статистических), рассчитанных среднесуточных и годовых значений расхода на отопление вентиляция (ОВ).

Методом эксперимента выбран «пассивный эксперимент», подразумевает наблюдение и сбор необходимой статистической информации об исследуемом объекте при его нормальном режиме эксплуатации и сопоставление с рассчитанными данными.

Продолжительность временного периода, в течение которого длился эксперимент, составляет недельный (посуточный) и годовой циклы.

Исследование выполнялось при проведении энергетического обследования (энергоаудита), совместно с ООО «Инком-Энерго» (приложение 1), жилых комплексов в Ханты-Мансийском автономном округе – Югра, город Ханты-Мансийск. Период проведения с 16 по 22 января 2017 года.

4.1. Описание экспериментального исследования и анализ теплопотребления здания

##### 4.1.1. Описание объекта экспериментального исследования

Объект, принятый для «пассивного эксперимента», представляет собой многофункциональное жилое здание с собственной крышной котельной, расположен по адресу Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, город Ханты-Мансийск, улица Гагарина, дом 141(рисунок 4.1). Здание постройки 2015

года, количество квартир 77, проживающих (зарегистрированных) жильцов 100 человек [107, 108] (приложение 4).



Рисунок 4.1 – Фотография исследуемого жилого здания

Функциональные группы помещений здания: этаж ниже отметки 0,000 – общественные помещения; с первого по девятый этаж – жилые и общественные помещения; десятый этаж – технические помещения.

В таблице 4.1 приведены основные архитектурно-планировочные решения здания [107, 108] (приложение 4).

Таблица 4.1

Архитектурно-планировочные решения здания

Наименование	Ед. измерения	Количество
1	2	3
Этажность здания	шт	11
Этажей ниже отм. 0,0000	шт	1
Технические этажи	шт	1
Высота этажа (средняя)	м	3,06
Площадь застройки	м <sup>2</sup>	923,00
Общая площадь здания (с учетом лодж)	м <sup>2</sup>	7264,60
Общая площадь квартир (жилая)	м <sup>2</sup>	2133,4

Продолжение таблицы 4.1

Общая площадь общественного назначения	м <sup>2</sup>	4010,6
Общая площадь технического назначения	м <sup>2</sup>	785,60
Отапливаемая площадь здания	м <sup>2</sup>	6929,60
Отапливаемый объем здания	м <sup>3</sup>	23593,58
Строительный объём здания	м <sup>3</sup>	30031,00
в том числе ниже отметки 0,0000	м <sup>2</sup>	27642,00
в том числе выше отметки 0,0000	м <sup>2</sup>	2389,00
Площадь стен	м <sup>2</sup>	4073,30
в том числе ниже отметки 0,0000	м <sup>2</sup>	414,60
в том числе выше отметки 0,0000	м <sup>2</sup>	3658,70
Площадь кровли	м <sup>2</sup>	845,00
Площадь дверей	м <sup>2</sup>	20,00
Площадь окон	м <sup>2</sup>	462,00
Площадь пола	м <sup>2</sup>	813,00

### Основные ограждающие конструкции

Характеристики основных ограждающих конструкций представлены на основании [107, 108].

Стены: кирпичная кладка из кирпича марки М100 (теплопроводность 0,44 Вт/м·К) толщиной 500 мм; утеплитель минеральная вата (теплопроводность 0,042 Вт/м·К) толщиной 150 мм, облицовка кассетами, условное сопротивление ограждения теплопередаче 4,86 м<sup>2</sup>·°С/Вт.

Покрытие (кровля): железобетонная плита толщиной 220 мм (теплопроводность 1,92 Вт/м·К), утеплитель минеральная вата (теплопроводность 0,042 Вт/м·К) толщиной 250 мм, условное сопротивление ограждения теплопередаче 6,22 м<sup>2</sup>·°С/Вт.

Окна: ПВХ одинарный оконный блок с двухкамерным стеклопакетом, приведенное сопротивление теплопередаче 0,65 м<sup>2</sup>·°С/Вт.

Двери: металлические, утепленные минеральной ватой толщиной 50 мм (теплопроводность 0,042 Вт/м·К), приведенное сопротивление теплопередаче 1,4 м<sup>2</sup>·°С/Вт.

Полы по грунты: железобетонная плита толщиной 220 мм (теплопроводность 1,92 Вт/м·К), среднее, приведенное сопротивление теплопередаче 2,9 м<sup>2</sup>·°С/Вт.

### **Отпуск тепловой энергии**

Теплоснабжение здания осуществляется за счет собственной крышной газовой котельной.

Принципиальная тепловая схема крышной котельной показано на рисунке 4.2, фото представлено на рисунке 4.3, перечень основного оборудования в приложении 5.

Подключение инженерных систем отопления здания к крышной котельной осуществляется по зависимой схеме.

Расчетный температурный график регулирования сетевого контура крышной котельной 110-70 °С, теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах системы горячего водоснабжения и отопления здания, для расчетных условий 95–70 °С.

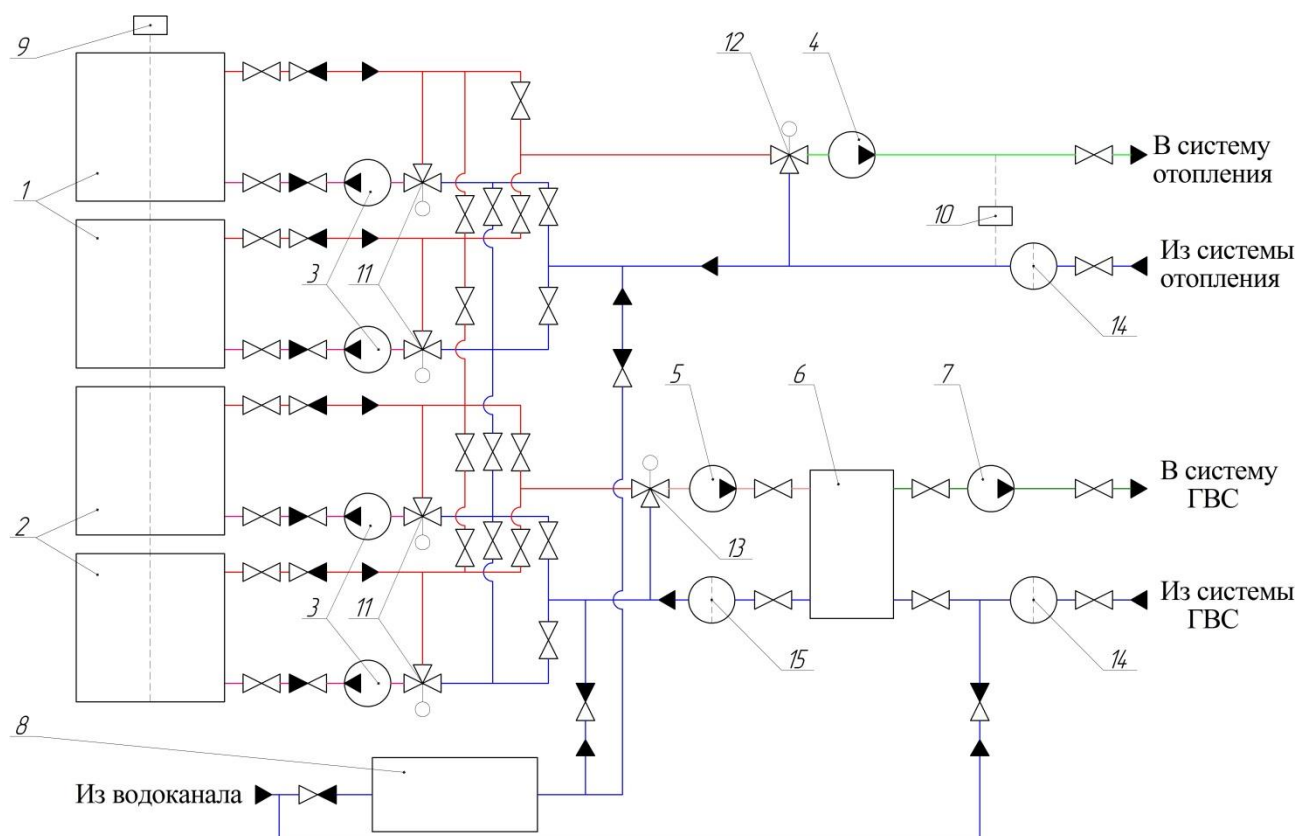


Рисунок 4.2 – Принципиальная тепловая схема крышной котельной: 1 – водогрейный котёл отопительного контура; 2 – водогрейный котёл контура горячего водоснабжения (ГВС); 3 – циркуляционный насос контура котла; 4 – циркуляционный насос контура системы «отопление, вентиляция и кондиционирование»; 5 – циркуляционный насос системы горячего водоснабжения; 6 – теплообменник горячего водоснабжения; 7 – циркуляционный насос подачи горячего водоснабжения; 8 – водоподготовка; 9 – узел учета расхода газа; 10 – узел учета тепловой энергии системы «отопление, вентиляция и кондиционирование»; 11 – трехходовой клапан регулирования расхода воды контура котлов; 12 – трехходовой клапан регулирования отпуска тепловой энергии в систему «отопление, вентиляция и кондиционирование»; 13 – трехходовой клапан регулирования контура горячего водоснабжения; 14 – грязевик с фильтром

Регулирование теплоносителя, циркулирующего в системе «отопление, вентиляция и кондиционирование» здания, осуществляется качественно-количественным способом (рисунок 4.4), путем изменения температуры и расхода теплоносителя, в зависимости от температуры наружного воздуха и температуры теплоносителя в обратном трубопроводе. Для измерения расхода тепловой энергии и температур предусмотрен узел учета тепловой энергии.



А) водогрейные котлы контура горячего водоснабжения



Б) водогрейные котлы контура системы отопления

Рисунок 4.3 – Фото крышной котельной

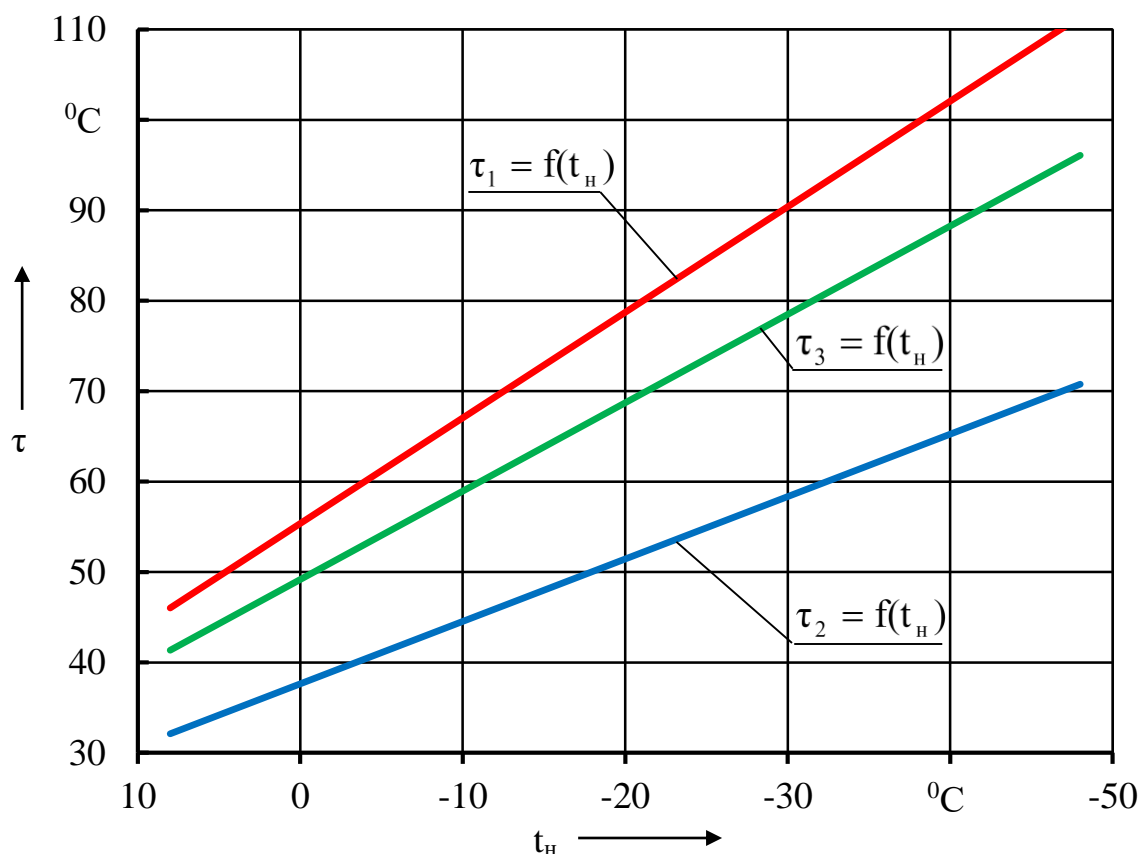


Рисунок 4.4 – Температурный график качественно-количественного регулирования

### Система «отопление, вентиляция и кондиционирование» здания

Система отопления двухтрубная вертикальная с верхней разводкой.

В качестве отопительных приборов в квартирах установлены биметаллические радиаторы. На подводках к отопительным приборам установлены термостатические и запорные клапаны.

В общественных помещениях и техническом этаже установлены алюминиевые радиаторы с термостатическими и запорными клапанами.

В здании реализуется вентиляция с естественным побуждением. Вытяжные каналы системы вентиляции реализованы по схеме с каналами-спутниками, соединяющимися со сборным вытяжным каналом под потолком вышележащего этажа. Вытяжные воздуховоды выполнены из тонколистовой оцинкованной стали. Кондиционирование в здании отсутствует.

## Изменения температур наружного воздуха

Время, ч/ Дата, ч.м.г.	Фактические средние значения температур наружного воздуха, °С						
	16.01.1	17.01.1	18.01.1	19.01.1	20.01.1	21.01.1	22.01.1
	7	7	7	7	7	7	7
1	2	3	4	5	6	7	8
0:00	-16	-18	-13	-21	-20	-14	-38
1:00	-16	-18	-13	-21	-20	-14	-39
2:00	-16	-18	-14	-21	-21	-15	-39
3:00	-16	-18	-14	-22	-21	-15	-40
4:00	-17	-18	-15	-22	-21	-15	-40
5:00	-17	-18	-15	-21	-22	-15	-40
6:00	-17	-18	-16	-21	-22	-15	-40
7:00	-17	-17	-17	-20	-22	-16	-40
8:00	-18	-17	-18	-20	-23	-16	-40
1	2	3	4	5	6	7	8
9:00	-19	-16	-19	-20	-23	-16	-40
10:00	-19	-15	-19	-19	-24	-16	-39
1	2	3	4	5	6	7	8
11:00	-18	-13	-18	-18	-25	-16	-37
12:00	-18	-12	-18	-18	-25	-16	-37
13:00	-17	-12	-17	-17	-27	-15	-36
14:00	-17	-11	-17	-17	-28	-15	-35
15:00	-16	-10	-17	-17	-30	-15	-34
16:00	-17	-10	-18	-17	-32	-15	-34
17:00	-17	-11	-18	-17	-32	-14	-36
18:00	-18	-11	-18	-17	-34	-14	-37
19:00	-18	-12	-19	-18	-35	-13	-38
20:00	-19	-12	-19	-18	-35	-12	-38
21:00	-19	-13	-19	-18	-35	-12	-39
22:00	-19	-13	-20	-18	-35	-11	-39
23:00	-18	-13	-21	-18	-36	-11	-40
24:00	-18	-13	-21	-18	-36	-10	-40
Среднее значени е	-18,2	-14,9	-18,0	-19,8	-28,5	-14,8	-39,8



#### 4.1.2. Анализ теплотребления здания на основе рассчитанных и измеренных значений

##### Измеренные (статистические) значения

В качестве измеренных данных параметров наружного климата были приняты фактические средние значения температур наружного воздуха, полученные при измерении термометром службой эксплуатации и сравненные с данными Gismeteo (таблица 4.2, рисунок 4.5).

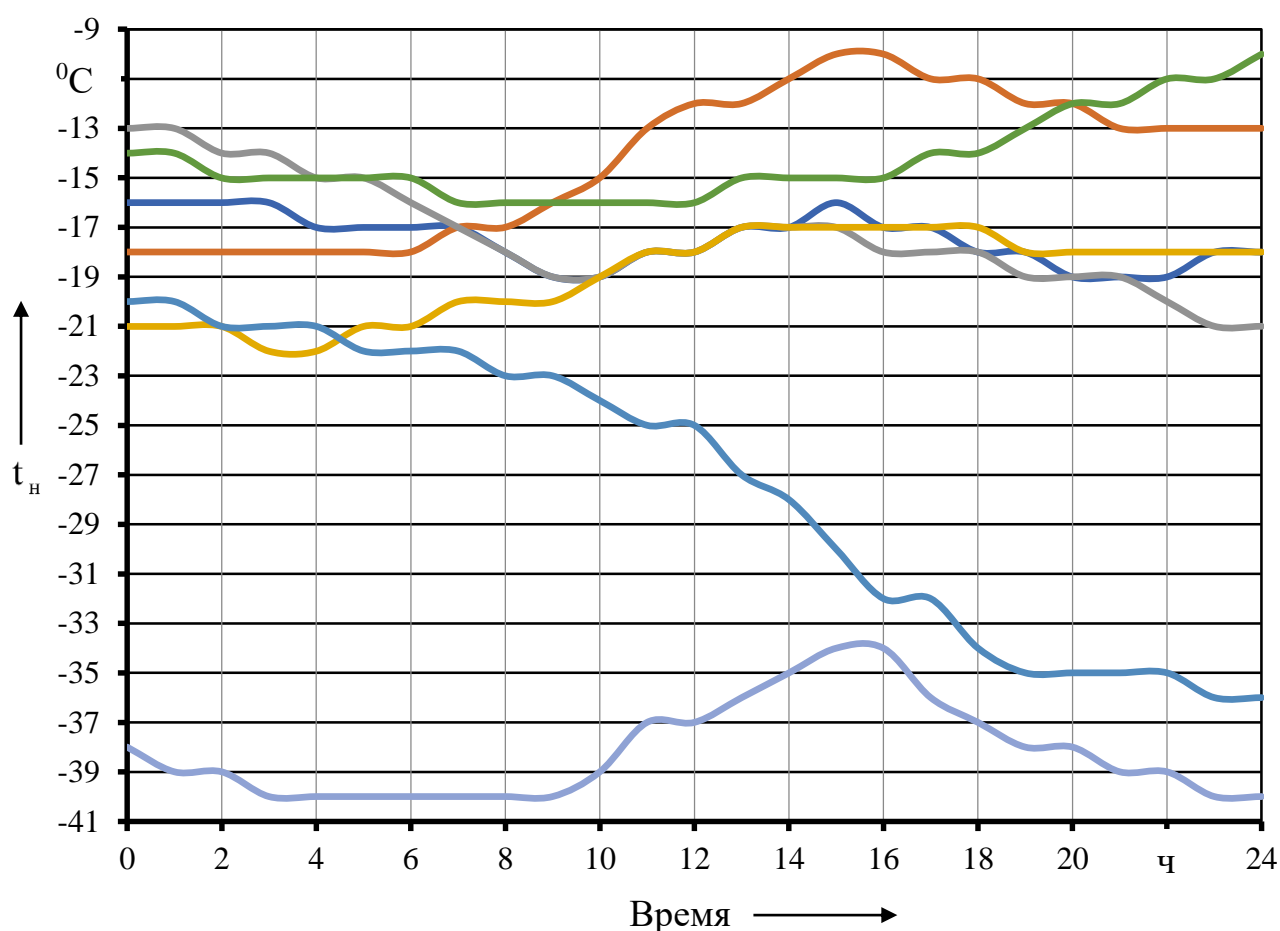


Рисунок 4.5 – Изменения температур наружного воздуха

Измеренная температура внутреннего воздуха термометром с 16 по 20 января 2017 года в среднем показывало по помещениям 20 °С.

Измерение посуточных значений теплотребления в здании (отопление) осуществлялось теплосчетчиком Эльф-04п ВСТН Ду50 (приложение 6), установленным в индивидуальном тепловом пункте (ИТП) крышной котельной

[107]. Показание электроэнергии насосного оборудования осуществляется счетчиком Smart IMS NP73L.2-5-2 (приложение 6) [102].

У службы эксплуатации были получены статистические данные о посуточных и годовых (за 2016 год) изменениях теплопотребления здания (таблица 4.3) [106, 107].

Таблица 4.3

Статистические данные посуточных изменений теплопотребления здания

Дата, ч.м.г.	Расход тепловой энергии, Гкал/сут						
	16.01.17	17.01.17	18.01.17	19.01.17	20.01.17	21.01.17	22.01.17
1	2	3	4	5	6	7	8
Значение	4,4	3,8	4,3	4,5	5,8	3,9	7,6

Фактическое потребление расхода тепловой энергии зданием и электрической энергией системой насосов предоставлено службой эксплуатации за отопительный период 2016 года по приборам учёта (при фактических условиях ГСОП=7022,4 °Cсут,  $t_n=-48$  °C,  $t_b=20$  °C,  $t_{от}=-6,6$  °C): тепловой расход  $Q_{факт} = 726,18$  Гкал/год; электрический расход  $\mathcal{E}_{факт} = 7117$  кВтч/год [106, 107]. Затраты за 2016 год приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4

Суммарные затраты за 2016 год

$\mathcal{C}_т$ , р./Дж	$\mathcal{C}_н^{эл}$ , р./Втч	$\mathcal{Z}_{от}$ , р./год	$\mathcal{Z}_{эл}$ , р./год	$\mathcal{Z}_a+\mathcal{Z}_o$ , р./год
1	2	3	4	5
$4,287 \times 10^{-7}$	$2,63 \times 10^{-3}$	1301729	18718	572700

Рассчитанные значения

Средние посуточные значения теплопотребления на отопление здания по архитектурно-планировочным решениям, теплотехническим характеристикам ограждающих конструкций и режиму эксплуатации помещений были рассчитаны (приложение 7) и сравненные с проектной документацией [107, 108].

Согласно проектной документации, величина вентиляционного воздухообмена в квартирах многофункционального жилого комплекса определяется из расчета  $3 \text{ м}^3/\text{ч}$  на  $1 \text{ м}^2$  площади жилых комнат и компенсации вытяжки из помещений кухонь, с/у, ванных и туалетных комнат. Величина вентиляционного воздухообмена в помещениях технических этажей, так же

принимается в соответствии с нормативным значением. В среднем она составила (величина вентиляционного воздухообмена)  $\eta_v = 0,65 \text{ ч}^{-1}$ .

Величина нестационарных бытовых теплопоступлений в помещениях квартир имеет непредсказуемый характер. Вместе с тем, данная величина может иметь значительное влияние на тепловой баланс здания и, как следствие, на посуточные и годовые значения теплопотребления на отопление. Для расчета теплопотребления на отопление величина бытовых тепловыделений была принята согласно [79].

В качестве исходных данных значений температур внутренних помещений и наружных ограждающих конструкций приняты измеренные средние значения (см. таблица 4.2, приложение 7).

Средние посуточные значения других параметров наружного климата, например, интенсивности прямой и рассеянной солнечной радиации на различно ориентированные поверхности, приняты в соответствии с данными ТСН 23-323-2001 [109].

В результате расчета были получены средние посуточные значения теплопотребления на отопление здания (при качественно-количественном регулировании) за временной период с 16 января 2017 года по 22 января 2017 года (таблица 4.5) (приложение 7).

Таблица 4.5

Рассчитанные данные средних посуточных значений  
теплопотребления здания

Дата, ч.м.г.	Расход тепловой энергии, Гкал/сут						
	16.01.17	17.01.17	18.01.17	19.01.17	20.01.17	21.01.17	22.01.17
1	2	3	4	5	6	7	8
Значение	4,41	3,93	4,38	4,53	5,9	3,92	7,53

Расчет потребление расхода тепловой энергии зданием за отопительный период 2016 года, произведенный на ЭВМ по предложенной методики, с фактическими условиями ГСОП=7022,4 °Ссут,  $t_n = -48 \text{ °C}$ ,  $t_b = 20 \text{ °C}$ ,  $t_{от} = -6,6 \text{ °C}$ , показал  $Q_{рас} = 721,83 \text{ Гкал/год}$ . Затраты приведены в таблице 4.6.

Суммарные затраты за 2016 год

$\text{Ц}_т, \text{р./Дж}$	$\text{Ц}_н^{\text{эл}}, \text{р./Втч}$	$\text{З}_{\text{от}}, \text{р./год}$	$\text{З}_{\text{эл}}, \text{р./год}$	$\text{З}_а+\text{З}_о, \text{р./год}$
1	2	3	4	5
$4,287 \times 10^{-7}$	$2,63 \times 10^{-3}$	1293931	17346,9	572700

Для анализа процессов отпуска тепловой энергии были построены графики качественного (рисунок 4.6) и количественного регулирования (рисунок 4.7), зависимости  $Q_{\text{ст}}=f(\delta_{\text{ут}})$  и  $Q_{\text{от}}=f(\delta_{\text{ут}})$  (рисунок 4.8),  $P_n=f(\delta_{\text{ут}})$  (рисунок 4.9), а также определена зависимость приведенных дисконтированных затраты по утеплению наружных ограждающих конструкций стен здания (рисунок 3.1).

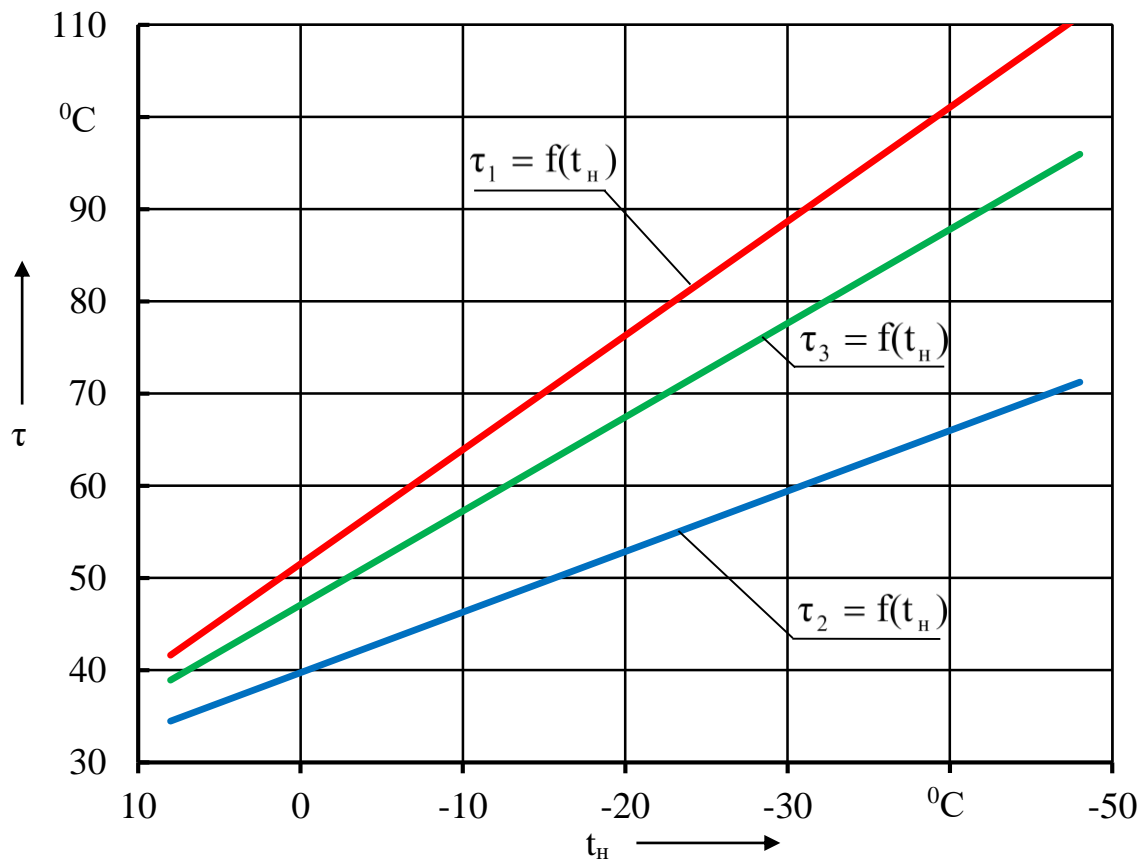


Рисунок 4.6 – Температурный график качественного регулирования

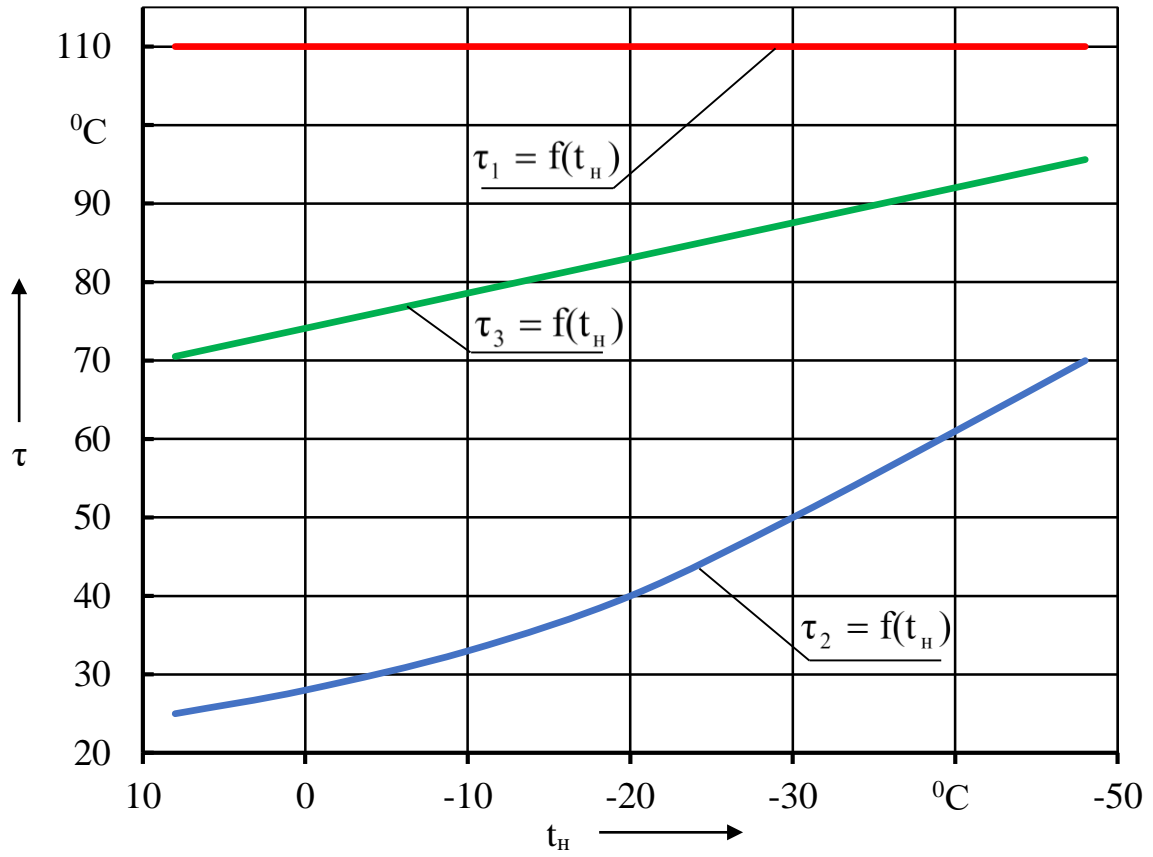
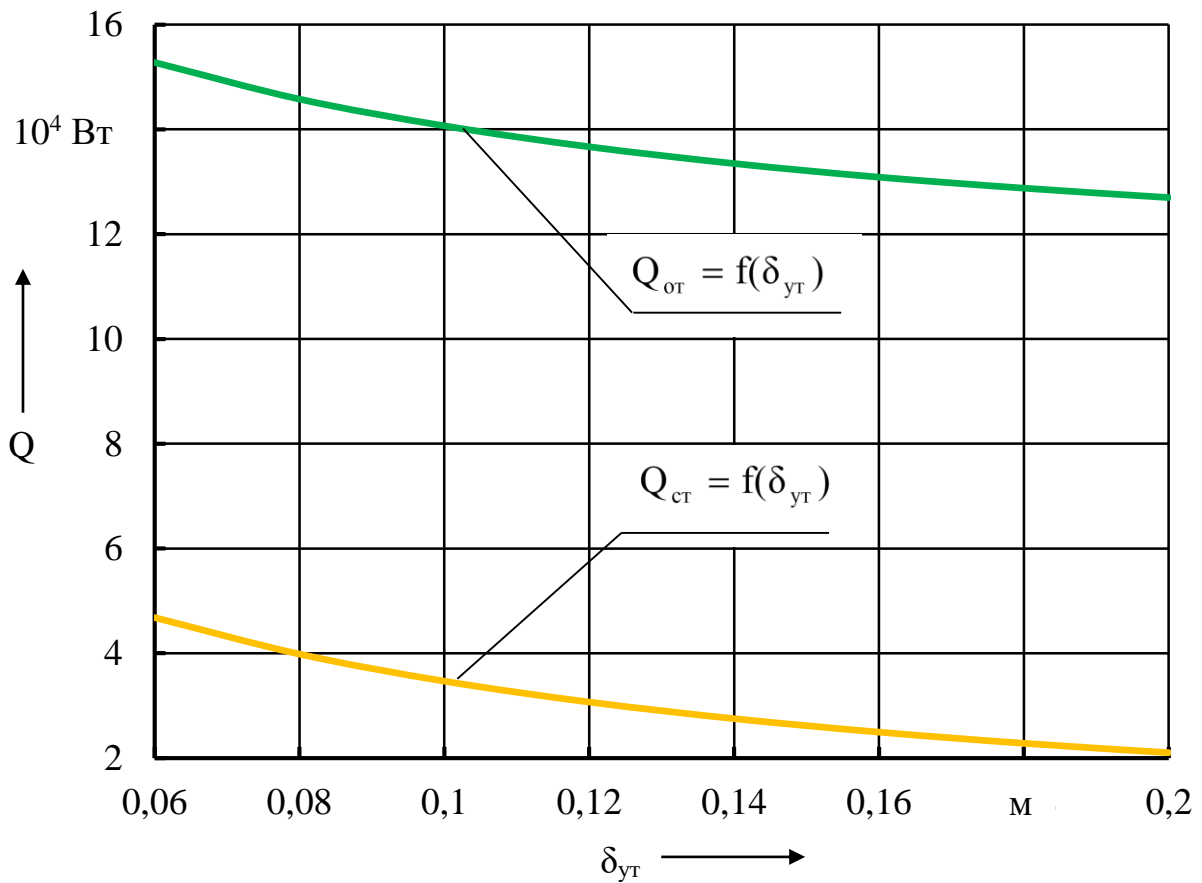


Рисунок 4.7 – Температурный график количественного регулирования

Рисунок 4.8 – Зависимости  $Q_{ст}$ ,  $Q_{от}$  от  $\delta_{yt}$

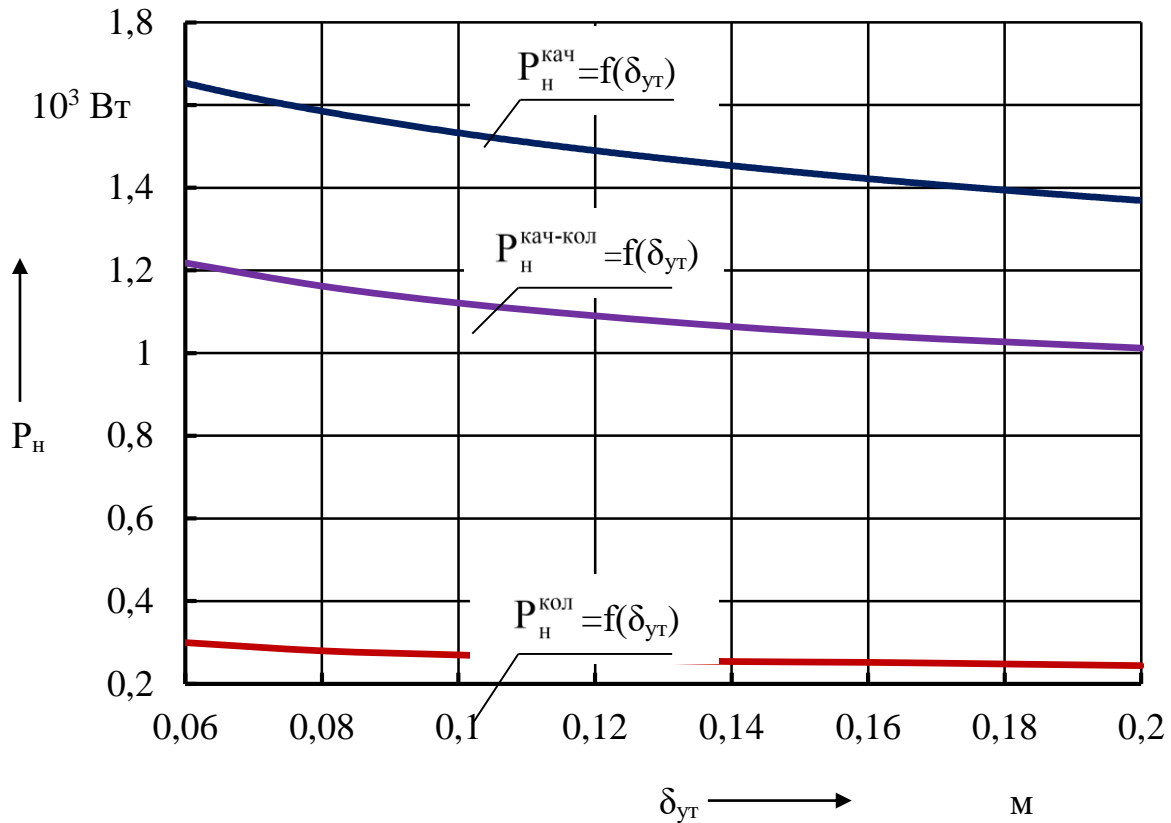


Рисунок 4.9 – Зависимость  $P_n$  от  $\delta_{ут}$ :  $P_n^{кач}$  – средняя мощность насосного оборудования при качественном регулировании отпускаемой тепловой энергии, Вт;  $P_n^{кач-кол}$  – средняя мощность насосного оборудования при качественно-количественном регулировании отпускаемой тепловой энергии, Вт;  $P_n^{кол}$  – средняя мощность насосного оборудования при количественном регулировании отпускаемой тепловой энергии, Вт

Определение приведенных дисконтированных затрат на утепление наружных стен здания и оптимальной величины толщины тепловой изоляции, рассчитанных на ЭВМ, показало (рисунок 3.1):  $I_{ст}^{кол} = 3161502$  р./год,  $\delta_{ут}^{опт} = 0,159$  м при количественном регулировании;  $I_{ст}^{кач-кол} = 3182631$  р./год,  $\delta_{ут}^{опт} = 0,16$  м при качественно-количественном регулировании;  $I_{ст}^{кач} = 3189254$  р./год,  $\delta_{ут}^{опт} = 0,161$  м при качественном регулировании.

## Анализ результатов расчета и эксперимента

Сопоставление результатов, измеренных (таблица 4.3) и рассчитанных (таблица 4.5) посуточных значений теплотребления здания показывает их достаточную степень совпадения. Анализ изменения невязки показал, что расхождения между измеренными и рассчитанными значениями не превышает 2 %.

Анализ технико-экономических характеристик объекта и графиков приведенных на рисунках 3.1, 4.8 и 4.9, показывает сходимость совпадения результатов по утепленной толщине теплоизоляционного материала и затратам, при данном регулировании отпуска тепловой энергии за базовый 2016 год.

Результаты расчетов (рисунок 3.1) показывают, что наиболее эффективный процесс регулирования отпускаемой тепловой энергии является «количественное регулирование» (дает экономию по расходу электрической энергии на привод насосного оборудования), для исследуемого объекта. Что было рекомендовано в [107] (приложение 3).

Если принять эффективную величину утепления тепловой изоляции 0,16 м, что на 0,01 м больше чем уже установленная (0,15 м), то разность в 10 мм снизила бы тепловые потери через ограждающие конструкции здания, расход электрической энергии и топлива (природного газа) сжигаемого в котлоагрегатах крышной котельной, в среднем на 2-5 %.

Проведя анализ данных эксперимента и расчета, можно сделать вывод об адекватности разработанной математической модели и алгоритма «определение оптимальной толщины утепления тепловой изоляцией ограждающих конструкций стен здания».

При решении задачи оптимального утепления наружных ограждающих конструкций стен зданий, с учетом выбора регулирования отпускаемой тепловой энергии, необходимо исследовать влияние основных факторов на параметры теплозащиты, теплового режима и экономических показателей.

4.2. Результаты численного исследования влияния основных факторов на теплозащиту здания и оценка технико-экономического эффекта от использования предложенной разработки

В данном подразделе производится исследование влияния основных факторов на величину оптимальной толщины тепловой изоляции ограждающих конструкций стен зданий, с учетом регулирования отпускаемой тепловой энергии, и технико-экономического эффекта от использования предложенной разработки.

Для проведения численного исследования по предложенной методике технико-экономической оптимизации утепления стен зданий, с учетом отпускаемой тепловой энергии, был выбран объект производственного назначения ФГУП «ФНПЦ «Прогресс» (приложение 8) [110-113].

4.2.1. Результаты численного исследования теплозащиты здания, с учётом регулирования отпускаемой тепловой энергии

Анализ результатов проведенных исследований влияния основных факторов на величину оптимальной толщины утепления тепловой изоляцией наружных ограждающих конструкций стен здания  $\delta_{\text{ут}}^{\text{опт}}$ , с учетом регулирования отпускаемой тепловой энергии, показал следующее:

- с понижением среднесуточной температуры наружного воздуха за отопительный период  $t_{\text{от}}$  (от 8 до  $-32$  °C), оптимальная толщина утепления тепловой изоляции наружных стен здания возрастает (от 0,045 до 0,105 м) (рисунок 4.10);

- повышение градусосуток отопительного периода ГСОП (от 1000 до 21000 °C·сут) приводит к повышению оптимальной толщины утепления тепловой изоляции наружных стен здания (от 0,015 до 0,13 м) (рисунок 4.11);

- повышение стоимости тепловой энергии  $\Pi_{\text{т}}$  (от 200 до 4200·р./Гкал) увеличивает оптимальную толщину утепления тепловой изоляции наружных стен здания (от 0,013 до 0,125 м) (рисунок 4.12);



– с повышением стоимости электрической энергии  $\Pi_{\text{н}}^{\text{эл}}$  (от 1 до 11 р./кВт·ч), оптимальная толщина утепления тепловой изоляции наружных стен здания возрастает (от 0,076 до 0,085 м) (рисунок 4.13);

– с повышением стоимости утеплителя  $\Pi_{\text{ут}}$  (от 200 до 4200·р./м<sup>3</sup>) снижается оптимальная толщина утепления тепловой изоляции наружных стен здания (от 0,21 до 0,02 м) (рисунок 4.14);

– с повышением суммарной стоимости работ по утеплению здания  $\Pi_{\text{раб}}$  (от 200 до 4200·р./м<sup>2</sup>), оптимальная толщина утепления тепловой изоляции наружных стен здания возрастает (от 0,055 до 0,105 м) (рисунок 4.15);

– с повышением теплопроводности утеплителя  $\lambda_{\text{ут}}$  (от 0,01 до 0,1·Вт/м·°С), оптимальная толщина утепления тепловой изоляции наружных стен здания возрастает (от 0,048 до 0,1 м) (рисунок 4.16);

– с повышением расчетной нормы дисконтирования  $r$  (от 0,01 до 0,46), оптимальная толщина утепления тепловой изоляции наружных стен здания снижается (от 0,12 до 0,056 м) (рисунок 4.17);

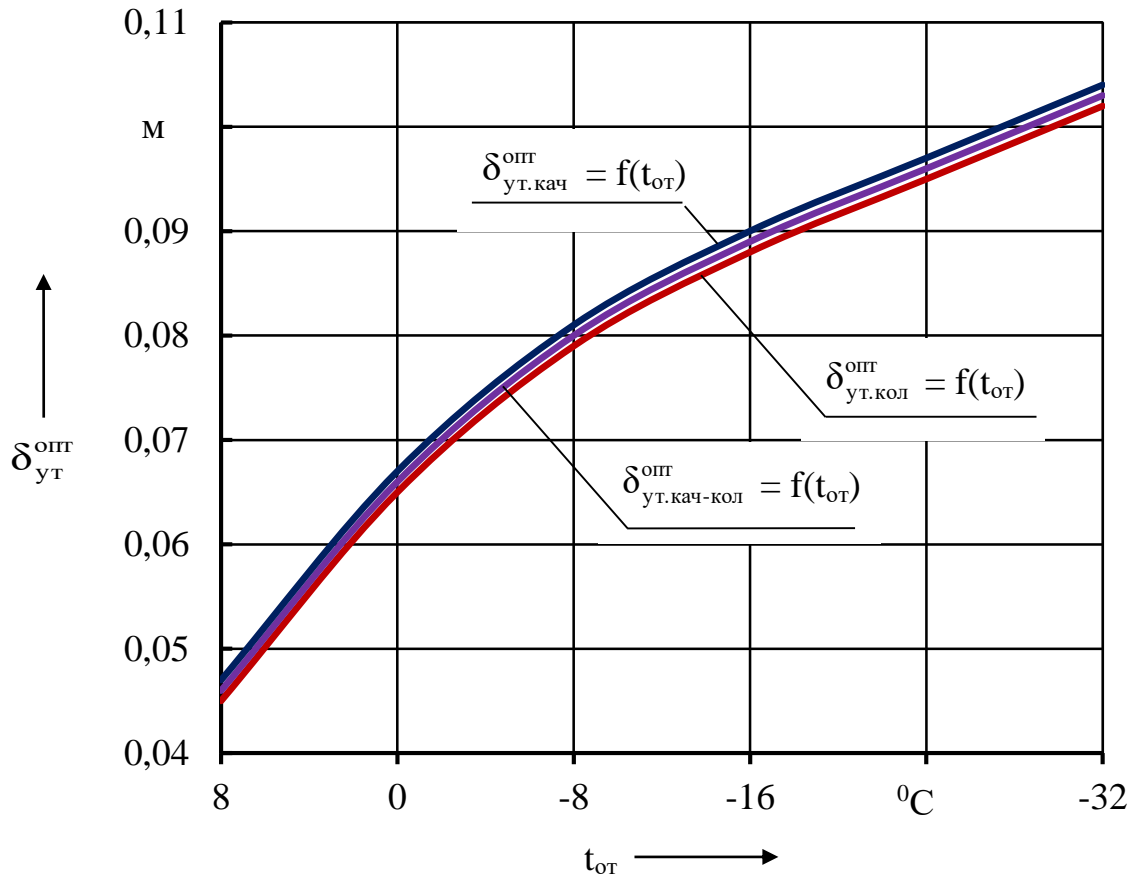
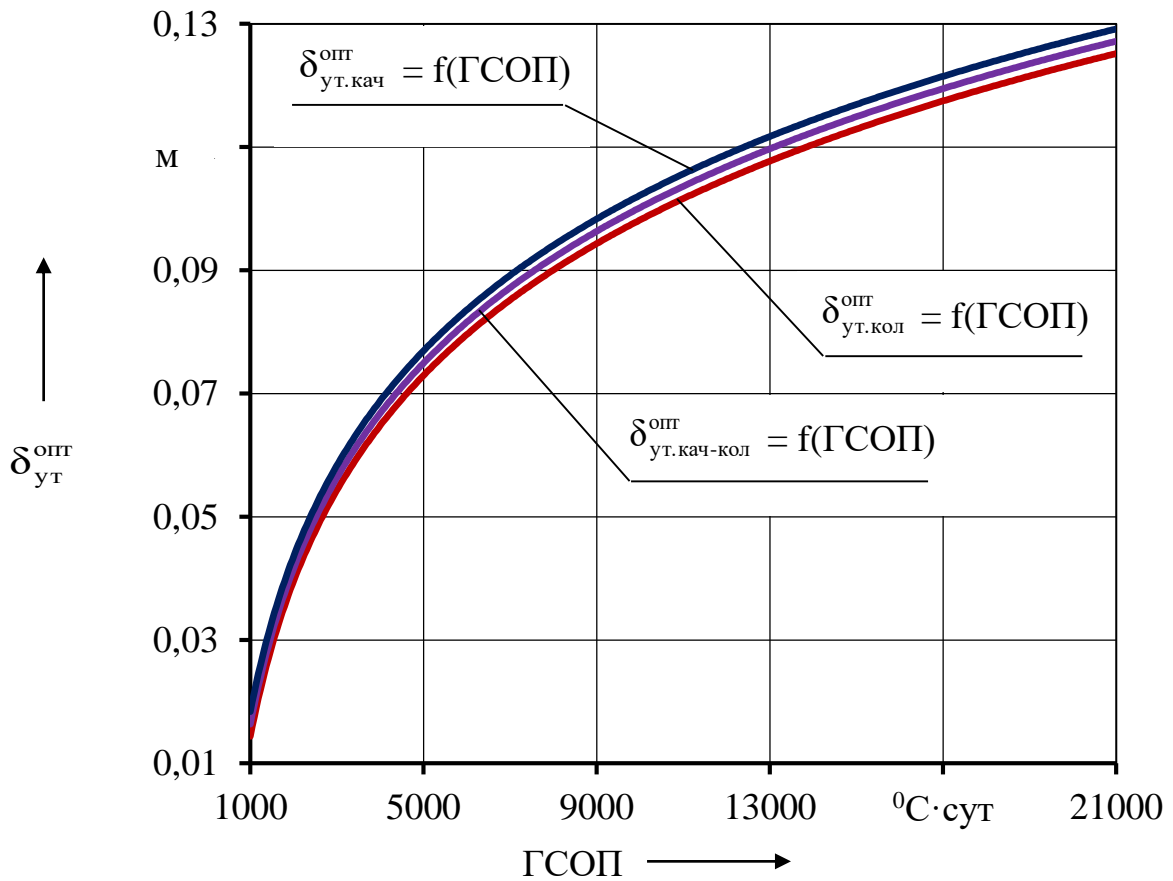
– с повышением нормы отчислений на амортизацию и обслуживание  $H$  (от 0,01 до 0,46), оптимальная толщина утепления тепловой изоляции наружных стен здания снижается (от 0,11 до 0,05 м) (рисунок 4.18);

– влияние изменения температурных графиков регулирования отпускаемой тепловой энергии на оптимальную толщину утепления тепловой изоляцией наружных стен здания приведено в таблице 4.7.

$\delta_{\text{ут.кач}}^{\text{опт}}$  – оптимальная толщина утепления тепловой изоляцией наружных стен здания при качественном регулировании отпускаемой тепловой энергии, м;

$\delta_{\text{ут.кач-кол}}^{\text{опт}}$  – оптимальная толщина утепления тепловой изоляцией наружных стен здания при качественно-количественном регулировании отпускаемой тепловой энергии, м;

$\delta_{\text{ут.кол}}^{\text{опт}}$  – оптимальная толщина утепления тепловой изоляцией наружных стен здания при количественном регулировании отпускаемой тепловой энергии, м.

Рисунок 4.10 – Зависимость  $\delta_{\text{ут}}^{\text{опт}}$  от  $t_{\text{от}}$ Рисунок 4.11 – Зависимость  $\delta_{\text{ут}}^{\text{опт}}$  от ГСОП

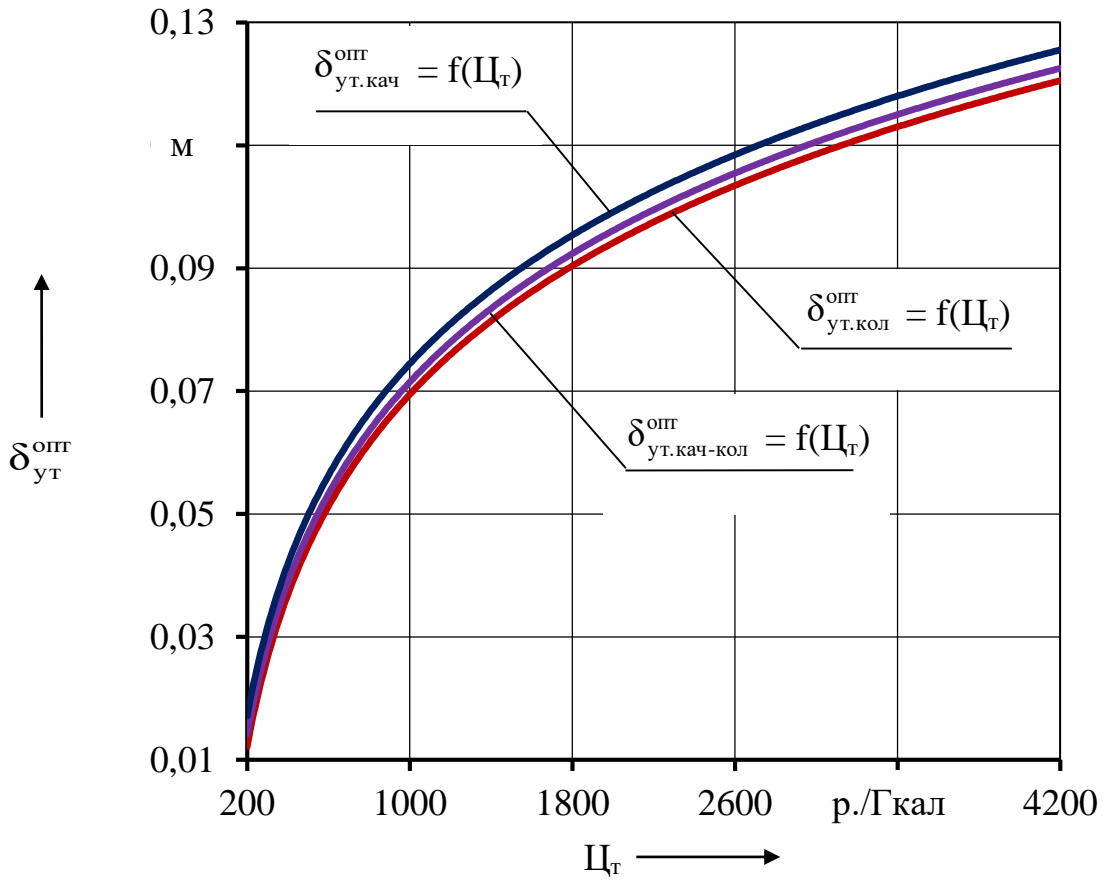


Рисунок 4.12 – Зависимость  $\delta_{\text{ут}}^{\text{опт}}$  от  $P_{\text{т}}$

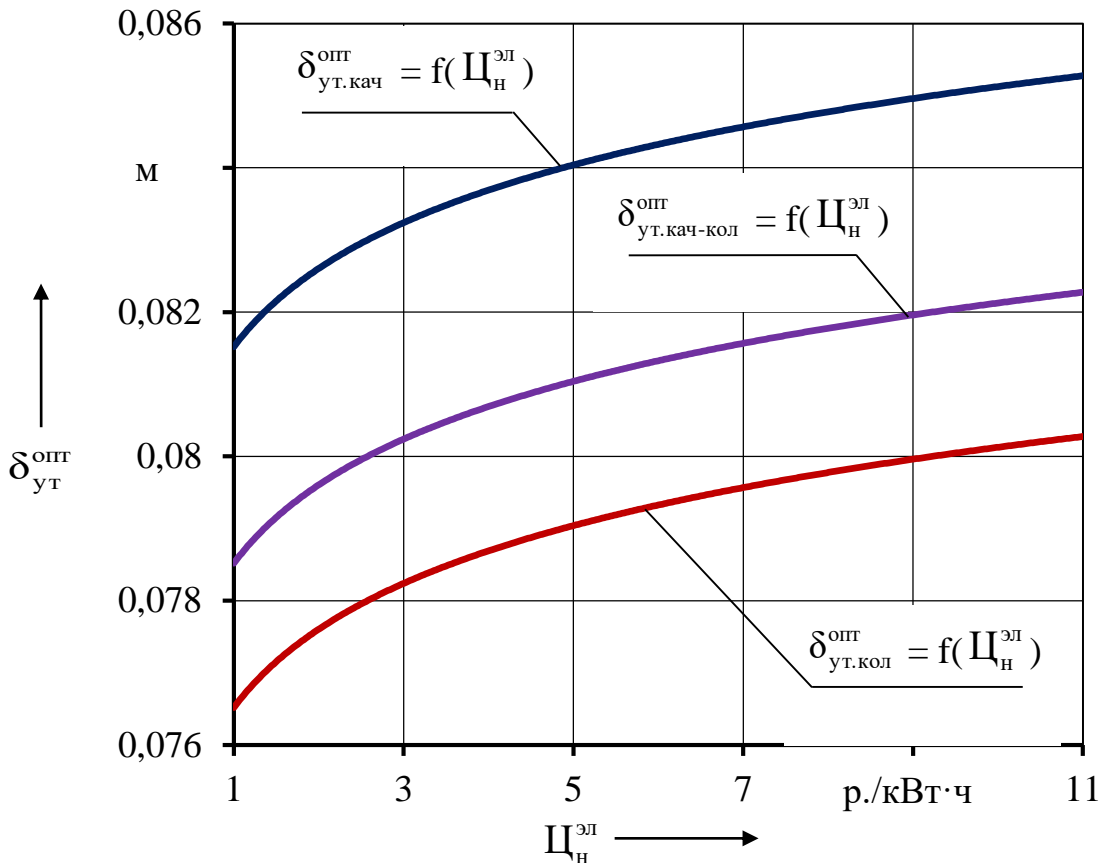
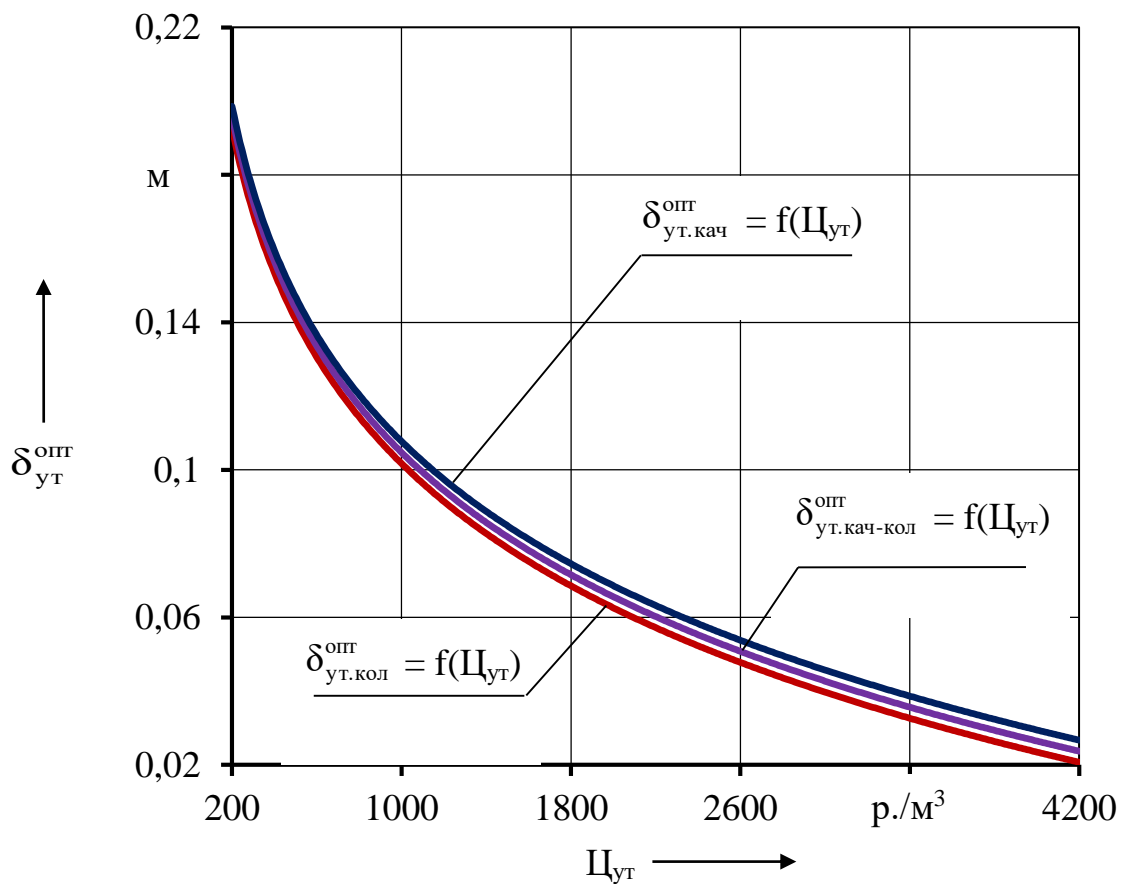
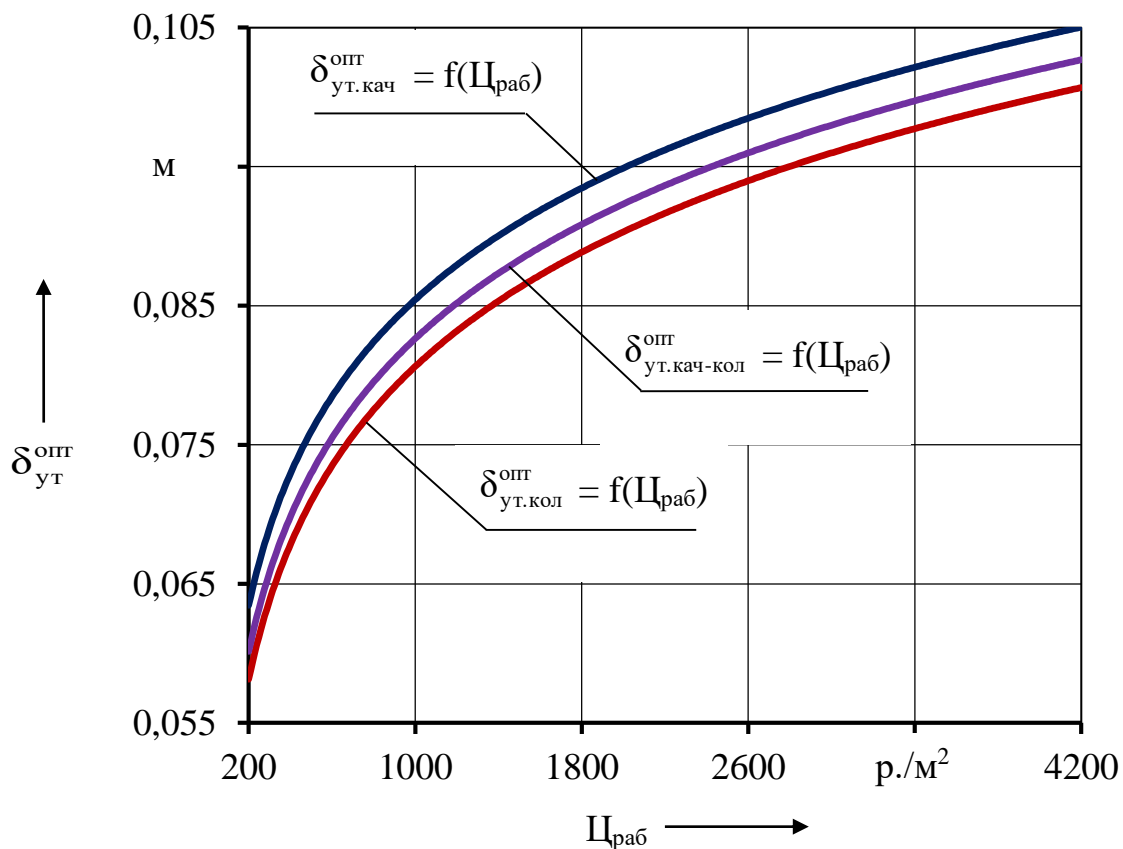


Рисунок 4.13 – Зависимость  $\delta_{\text{ут}}^{\text{опт}}$  от  $P_{\text{н}}^{\text{эл}}$

Рисунок 4.14 – Зависимость  $\delta_{ут}^{опт}$  от  $\Pi_{ут}$ Рисунок 4.15 – Зависимость  $\delta_{ут}^{опт}$  от  $\Pi_{раб}$

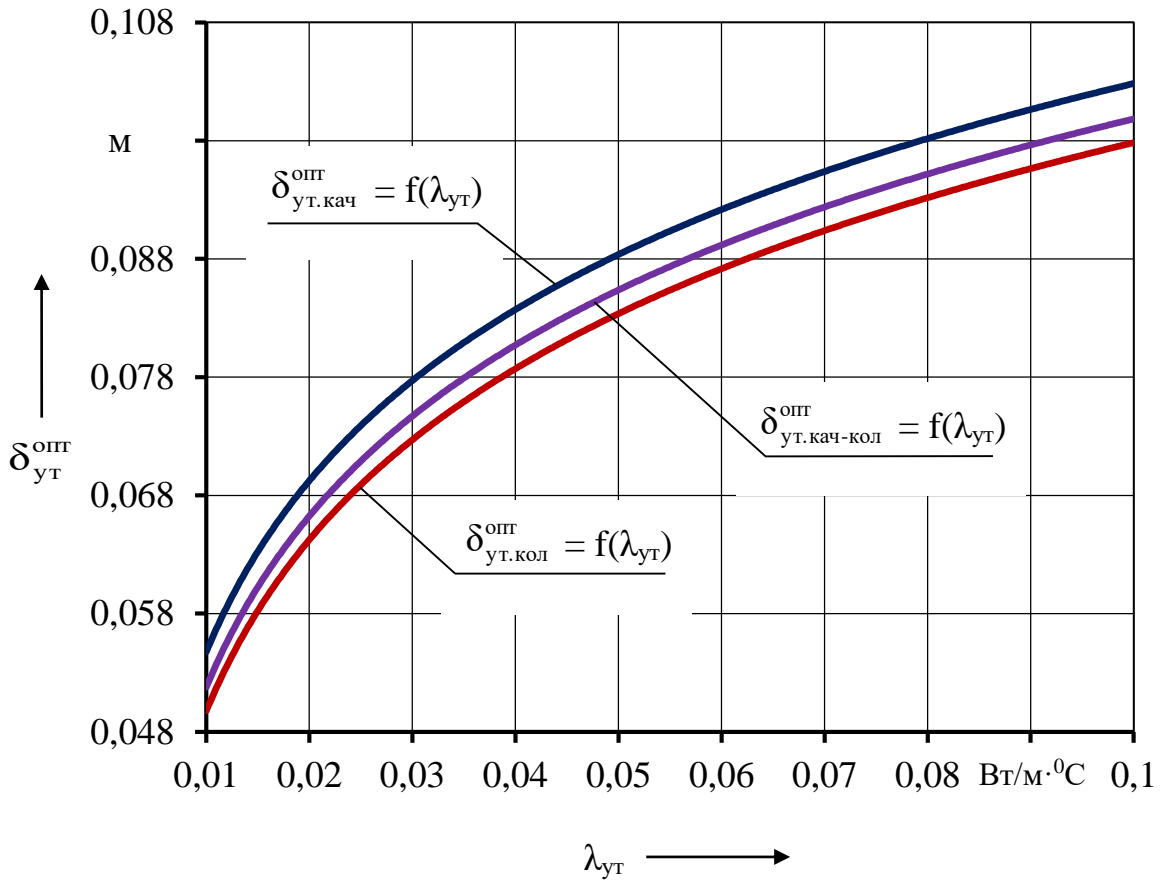


Рисунок 4.16 – Зависимость  $\delta_{ут}^{opt}$  от  $\lambda_{ут}$

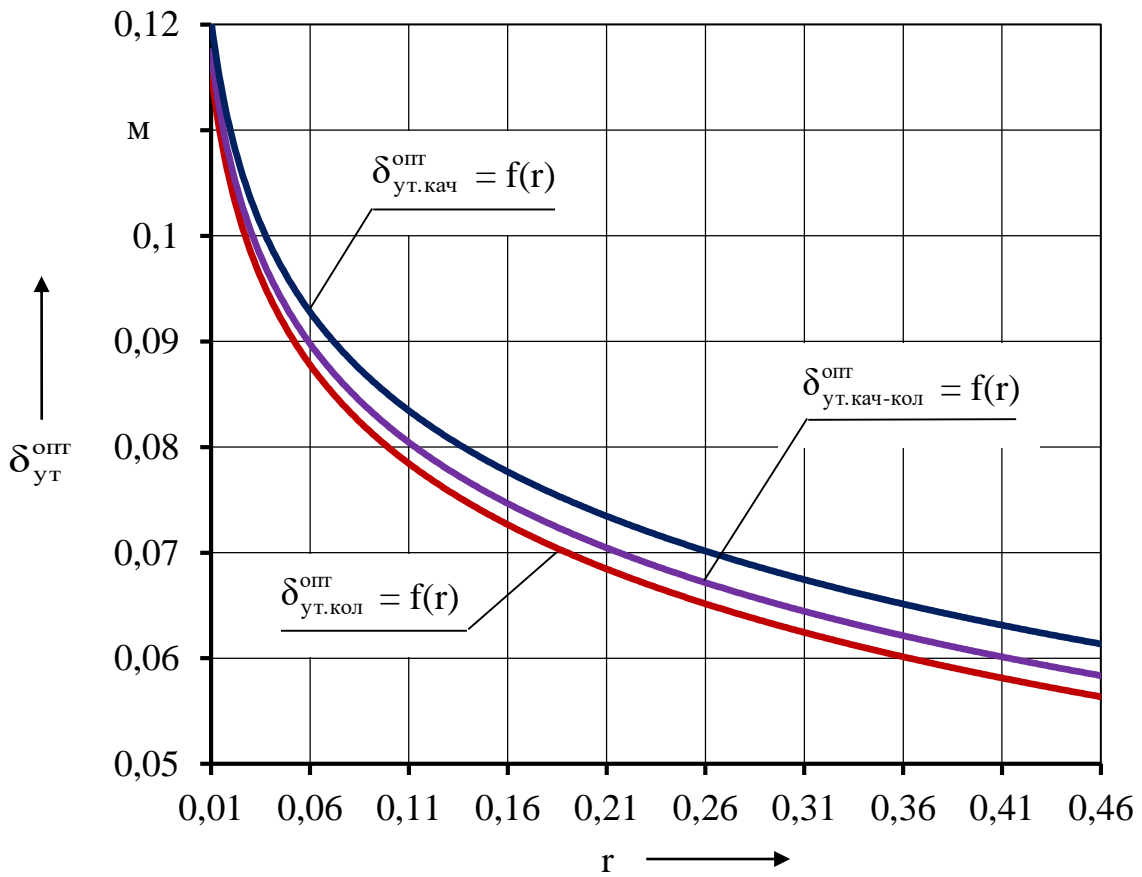


Рисунок 4.17 – Зависимость  $\delta_{ут}^{opt}$  от  $r$

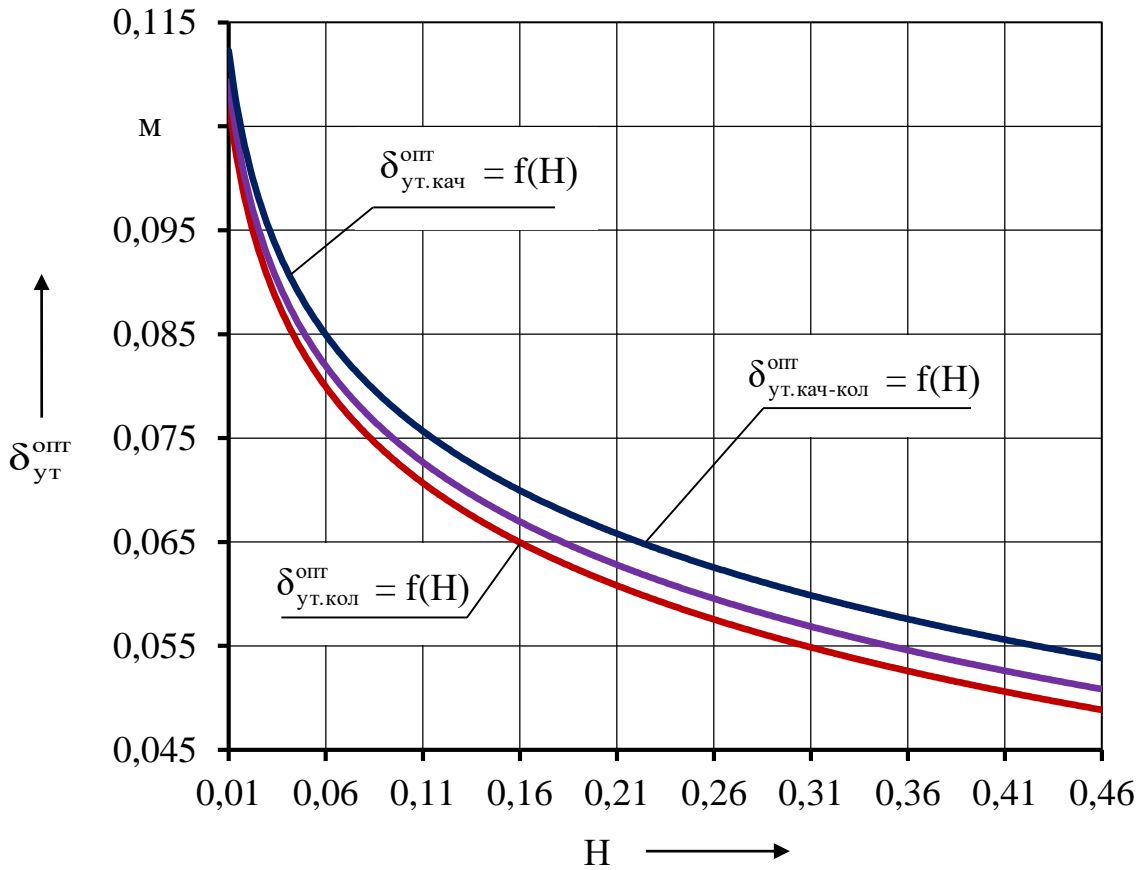


Рисунок 4.18 – Зависимость  $\delta_{\text{ут}}^{\text{опт}}$  от N

Таблица 4.7

Изменения температурных графиков регулирования отпускаемой тепловой энергии на оптимальную толщину утепления тепловой изоляции наружных стен здания

Количественное регулирование		Качественно-количественное регулирование		Качественное регулирование	
1	2	3	4	5	6
$\tau_{01}/\tau_{03}/\tau_{02};$ $\tau_1/\tau_3/\tau_2, ^\circ\text{C}$	$\delta_{\text{ут.кол}}^{\text{опт}}, \text{M}$	$\tau_{01}/\tau_{03}/\tau_{02};$ $\tau_1/\tau_3/\tau_2, ^\circ\text{C}$	$\delta_{\text{ут.кач-кол}}^{\text{опт}}, \text{M}$	$\tau_{01}/\tau_{03}/\tau_{02};$ $\tau_1/\tau_3/\tau_2, ^\circ\text{C}$	$\delta_{\text{ут.кач}}^{\text{опт}}, \text{M}$
95/95/70; 95/95/22	0,079	95/95/70; 63/63/48	0,07964	95/95/70; 62/62/49	0,07982
110/95/70; 110/80/31	0,0791	110/95/70; 73/63/48		110/95/70; 62/62/49	
130/95/70; 130/75/36	0,0792	130/95/70; 85/63/48		130/95/70; 79/62/49	
150/95/70; 150/73/38	0,0793	150/95/70; 98/63/48		150/95/70; 89/62/49	

Анализ влияния изменения толщины теплоизоляционного материала  $\delta_{yt}$  (от 0,02 до 0,2 м) на технико-экономическую эффективность, показал следующее:

- повышается приведенное сопротивление теплопередаче теплозащитной оболочки стен здания  $R_o^{np}$  (от 1,54 до 6,0 ( $m^2 \cdot ^\circ C$ )/Вт, рисунок 4.19);

- снижается расчетный температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающих конструкций стен здания  $\Delta t_{yt}^p$  (от 2,1 до 0,54  $^\circ C$ , рисунок 4.20);

- уменьшается расчетная удельная теплозащитная характеристика здания, определяется согласно  $k_{об}$  (от 0,189 до 0,132 Вт/( $m^3 \cdot ^\circ C$ ), рисунок 4.21);

- уменьшаются тепловые потери через наружные стены  $Q_{ст}$  (от 61693 до 15977 Вт) и расход тепловой энергии здания на отопление, вентиляцию и кондиционирование  $Q_{от}$  (от 230103 до 184387 Вт), рисунок 4.22;

- снижается расчетная удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление, вентиляцию и кондиционирование здания  $q_{yt}^p$  (от 0,297 до 0,232 Вт/( $m^2 \cdot ^\circ C$ ), рисунок 4.23);

- повышается класс энергосбережения здания  $KЭ_{yt}$  (от -22,13 до -39,17 %), рисунок 4.24);

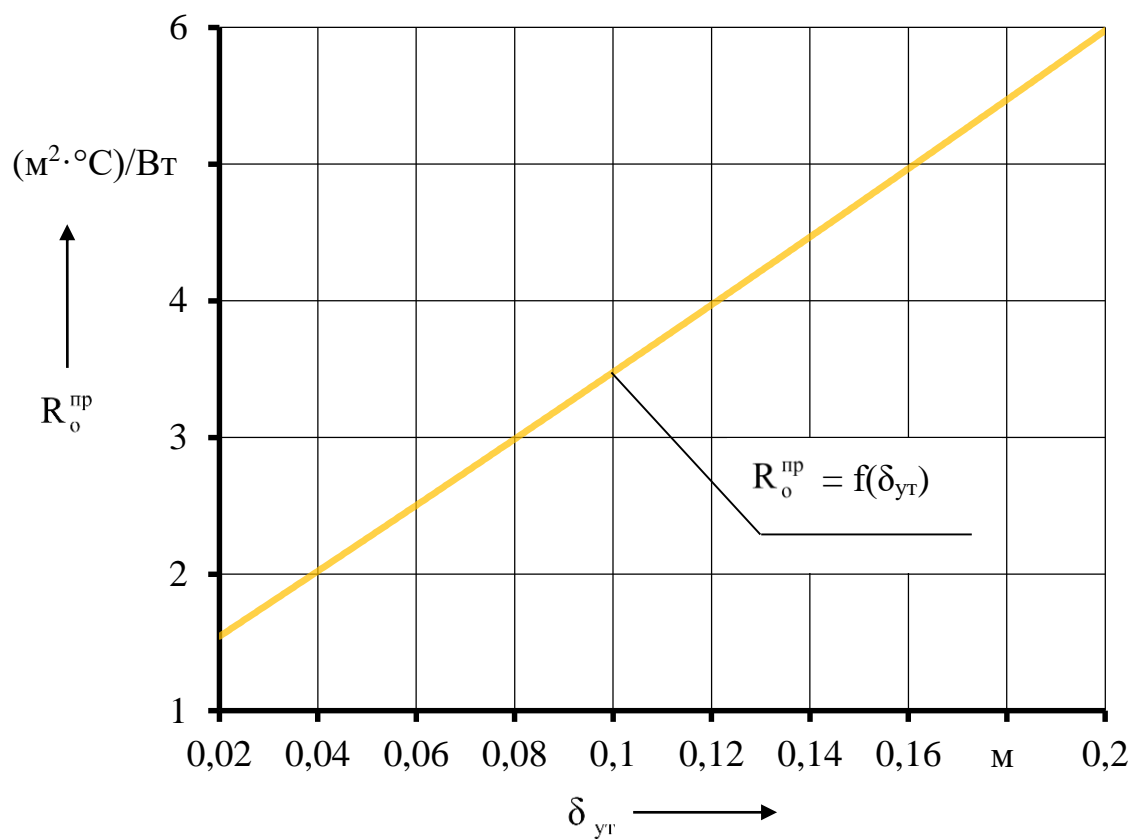
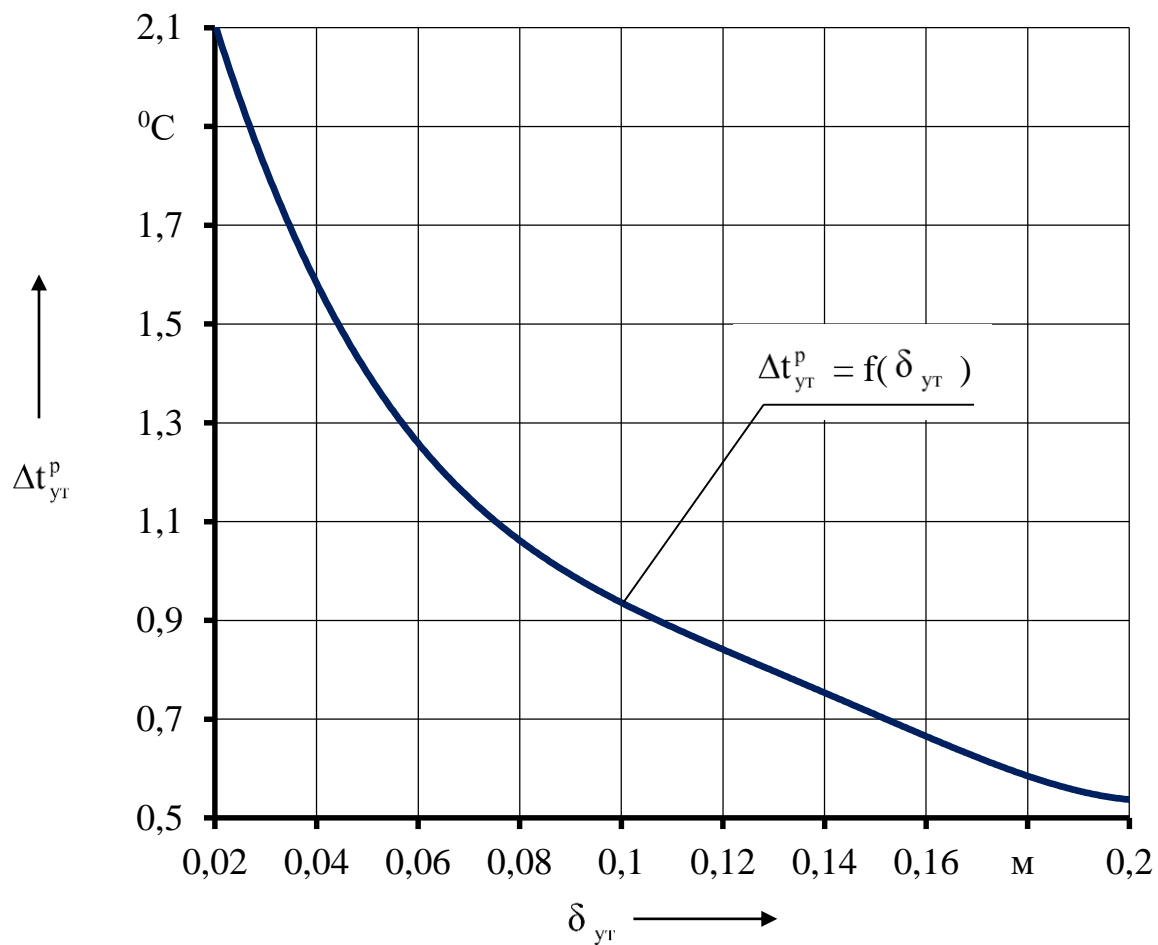
- снижаются срок окупаемости инвестиций  $T_{ок}$  (от 8,6 до 5,4 лет), допустимый срок эксплуатации утепляющего материала по критерию нормируемого процентного ресурса материала  $T_d$  (от 180 до 18 лет) и повышается время до выхода из строя теплоизоляционного слоя по критерию потери теплозащитных свойств  $\tau'$  (от 75 до 761 лет), рисунок 4.25;

- снижается средняя мощность насосного оборудования  $P_n$  (от 1166 до 293 Вт, рисунок 4.26);

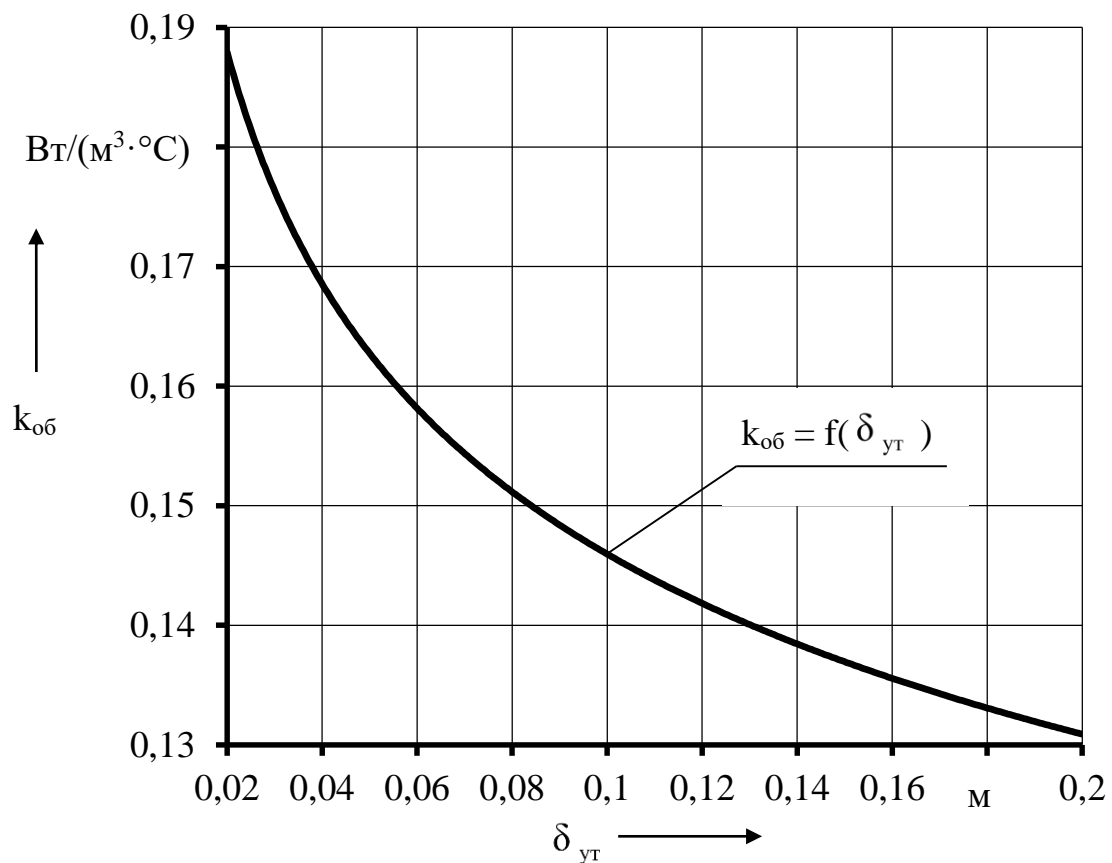
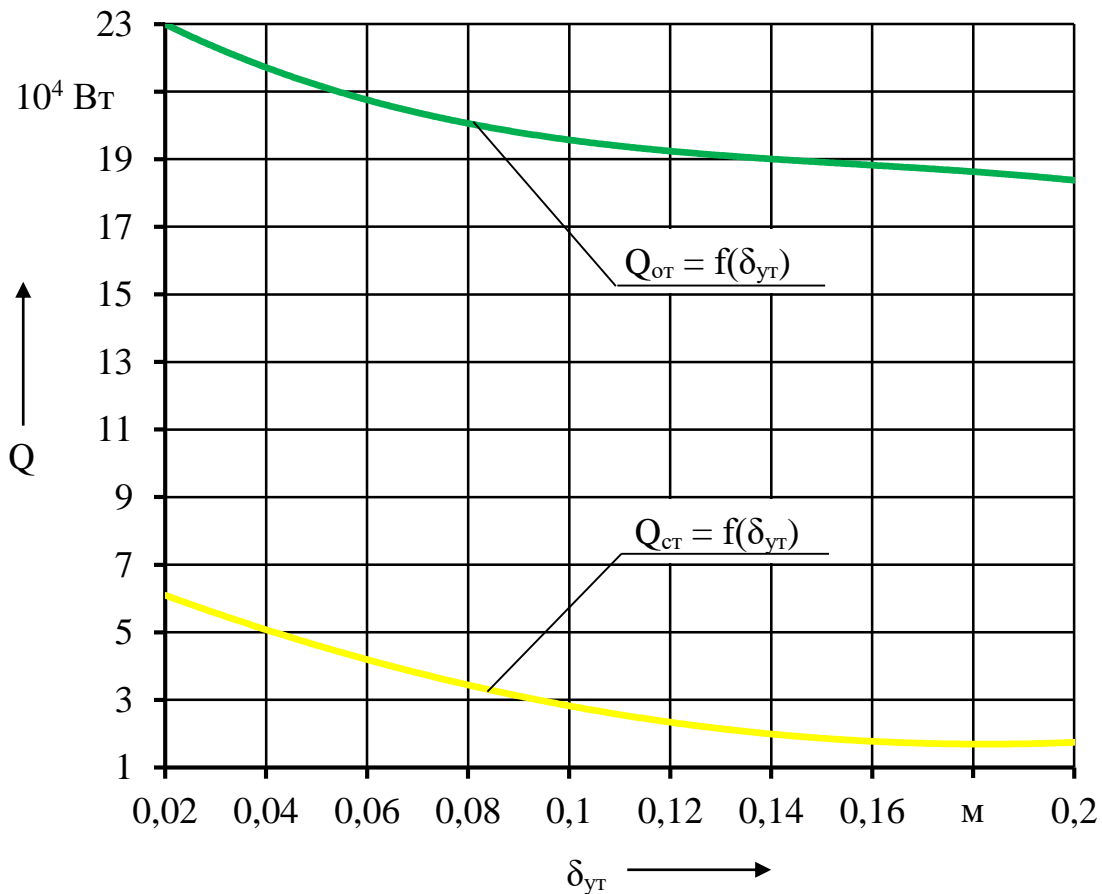
- снижается годовой расход электрической энергии на привод насосного оборудования  $\mathcal{E}_n$  (от 1519 до 4842 кВт·ч/год), рисунок 4.27;

- увеличиваются капитальные вложения в теплосберегающие мероприятия  $K_{ст}$  (от 2523260 до 3307370 р.), рисунок 4.28;

- изменение приведенных дискантированных затрат  $I_{ст}$  на утепление тепловой изоляцией наружных ограждающих конструкций стен здания согласно рисунку 4.29.

Рисунок 4.19 – Зависимость  $R_o^{np}$  от  $\delta_{yt}$ Рисунок 4.20 – Зависимость  $\Delta t_{yt}^p$  от  $\delta_{yt}$



Рисунок 4.21 – Зависимость  $k_{об}$  от  $\delta_{ут}$ Рисунок 4.22 – Зависимости  $Q_{ст}$ ,  $Q_{от}$  от  $\delta_{ут}$

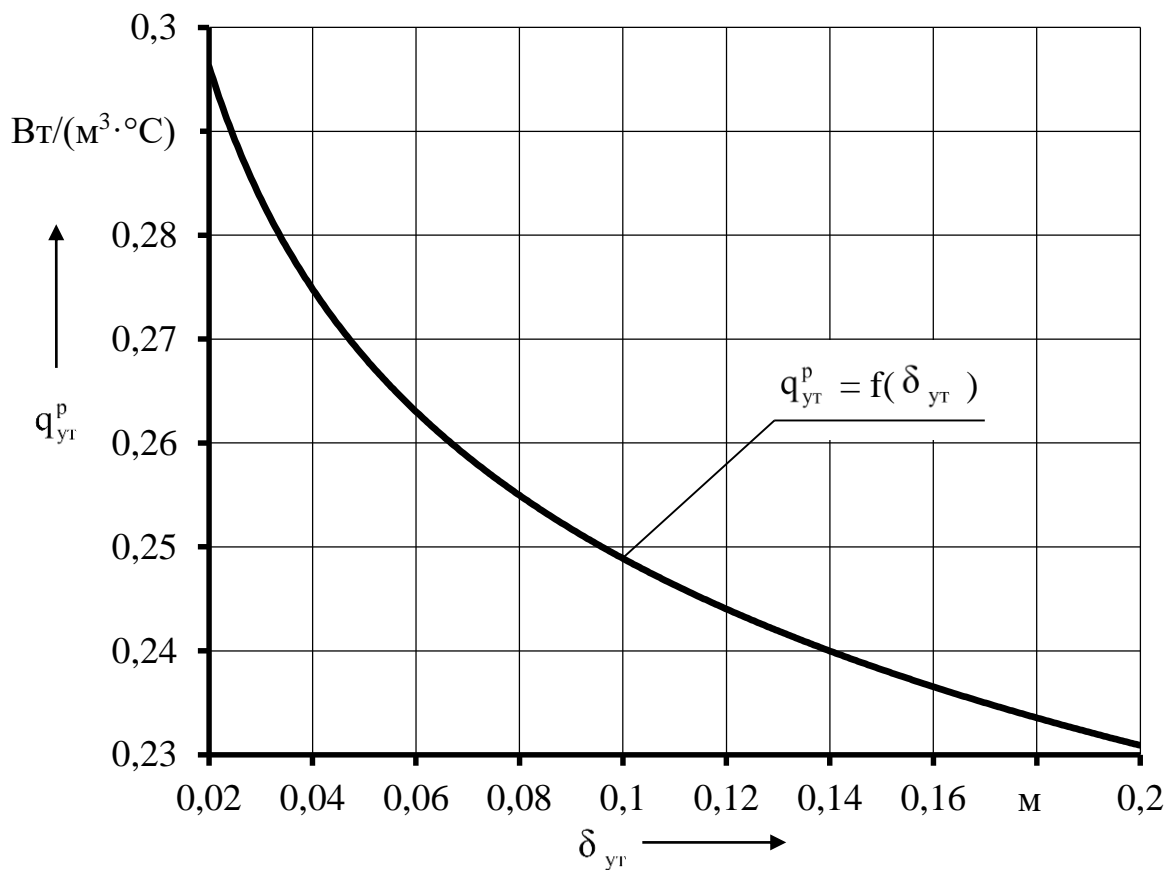


Рисунок 4.23 – Зависимость  $q_{yt}^p$  от  $\delta_{yt}$

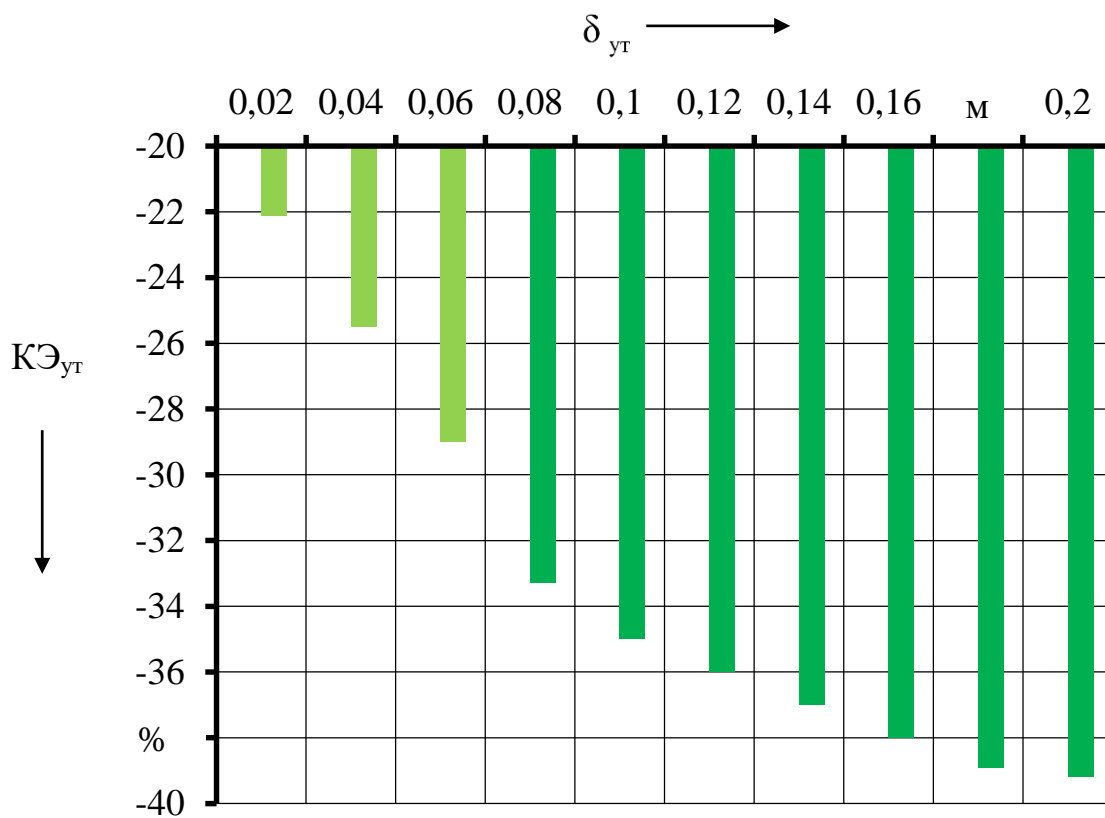


Рисунок 4.24 – Зависимость  $KЭ_{yt}$  от  $\delta_{yt}$

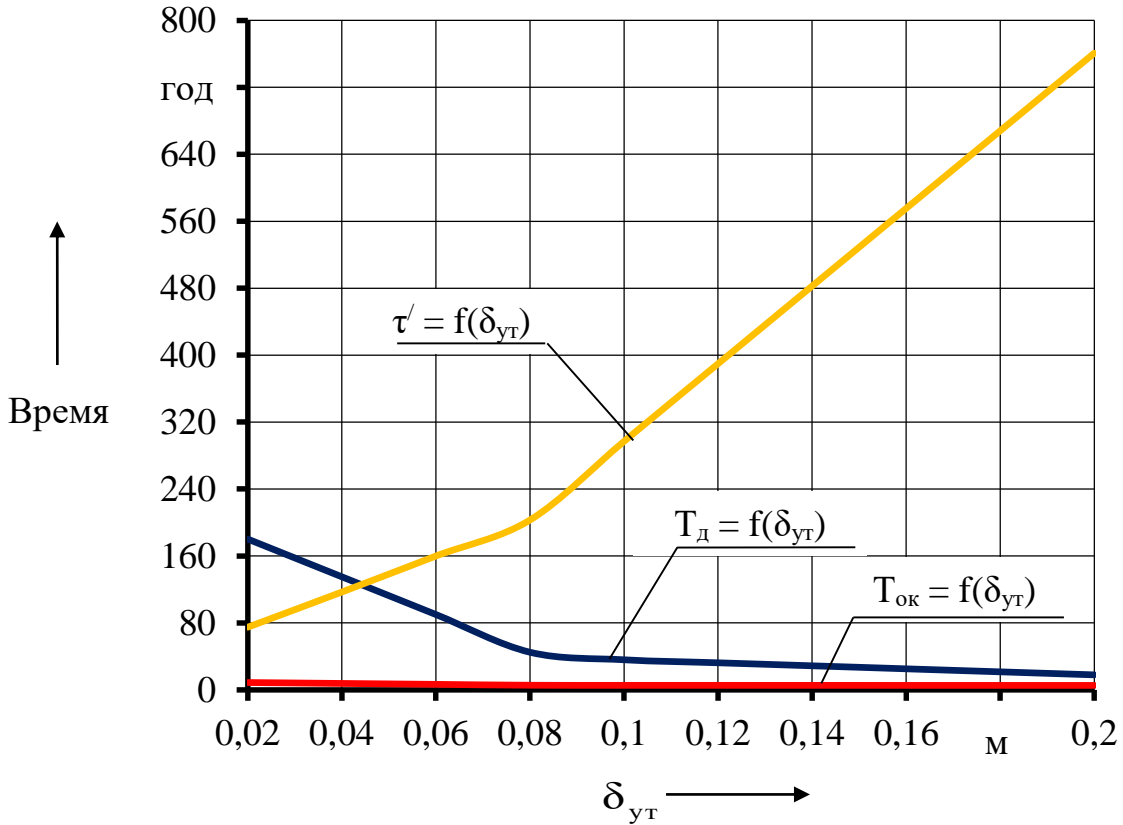


Рисунок 4.25 – Зависимость  $T_{ок}$ ,  $T_d$  и  $\tau'$  от  $\delta_{ут}$

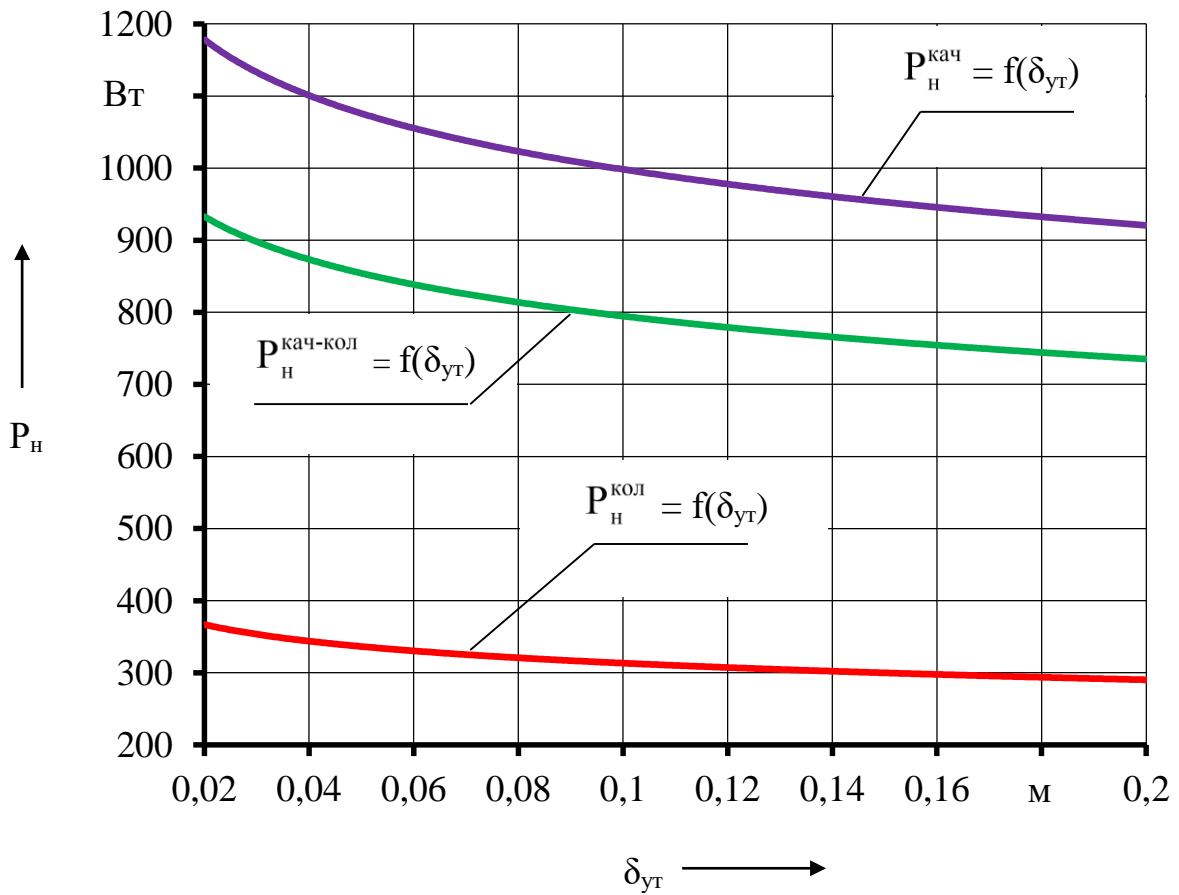
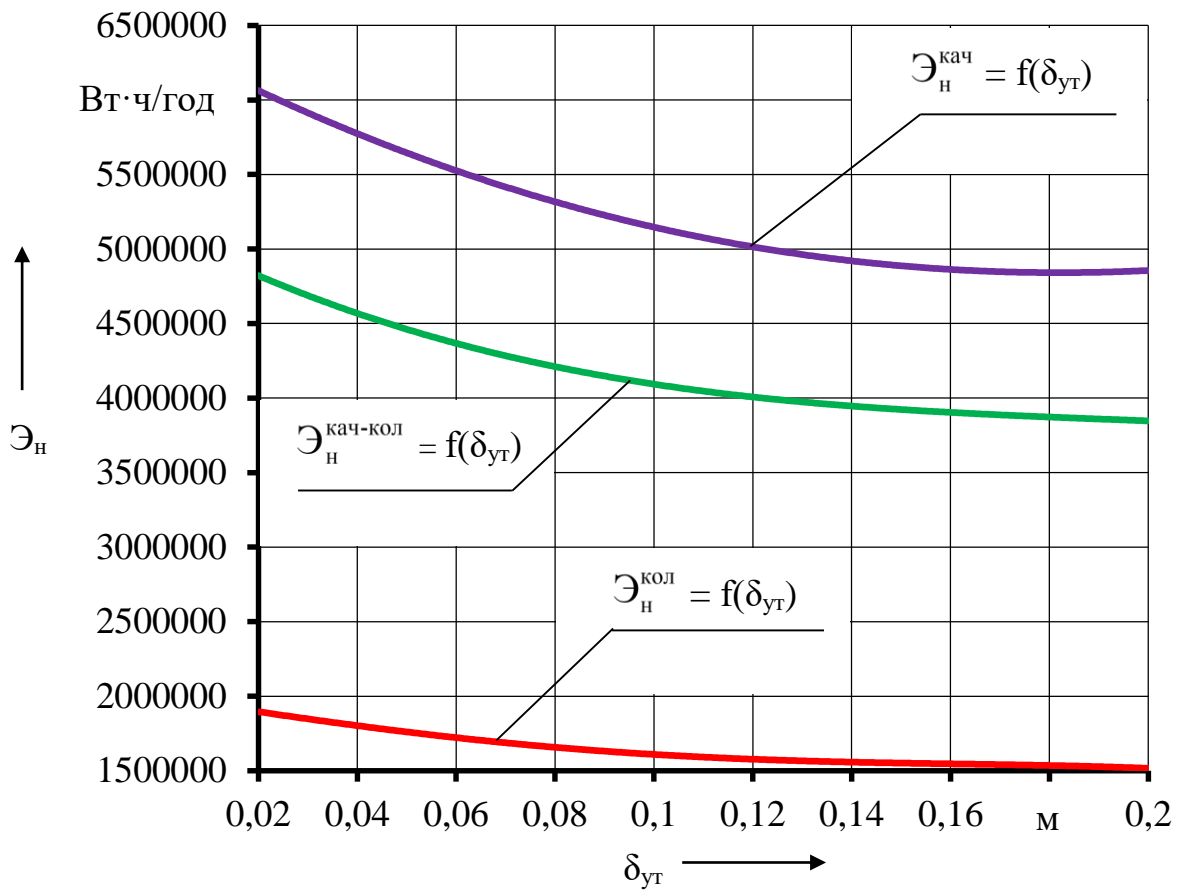
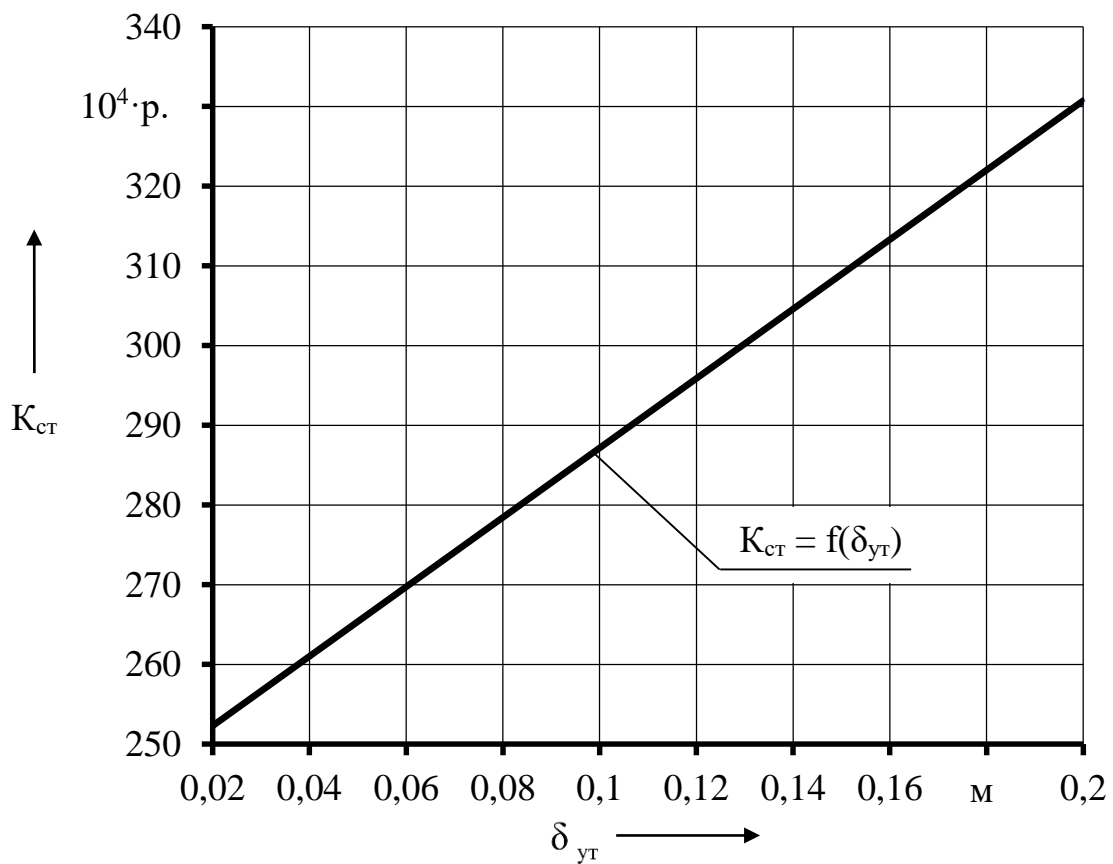
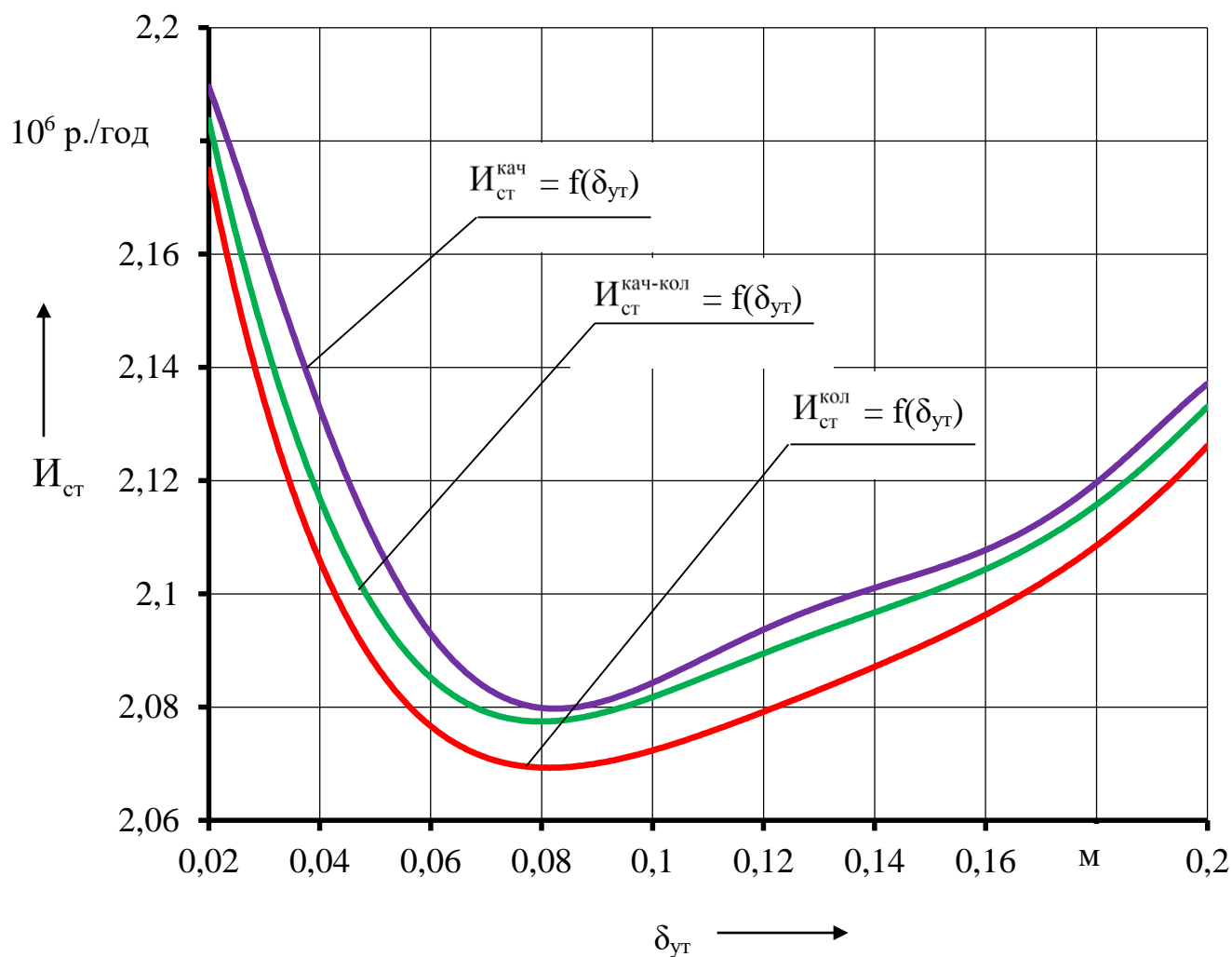


Рисунок 4.26 – Зависимость  $P_H$  от  $\delta_{ут}$

Рисунок 4.27 – Зависимость  $\mathcal{E}_H$  от  $\delta_{UT}$ Рисунок 4.28 – Зависимость  $K_{ст}$  от  $\delta_{UT}$

Рисунок 4.29 – Зависимость  $I_{ст}$  от  $\delta_{ут}$ 

4.2.2. Оценка технико-экономического эффекта от использования предложенных разработок

В качестве примера рассматривается утепление здания производственного назначения ФГУП «ФНПЦ «Прогресс».

Предложенная заводу модернизация здания, заключается в следующем:

1) утеплить наружные ограждающие конструкции стен здания толщиной 0,08 м (вместо 0,05 и 0,09 м), которая является оптимальной для заданных условий;

2) вместо качественного регулирования, перейти на количественный отпуск тепловой энергии зданию.

Предлагаемая модернизация по утеплению здания позволяет улучшить технико-экономические показатели теплозащиты и процесс регулирования отпускаемой тепловой энергии, снизить затраты.

Сравнительные результаты расчета использования научной разработки, применительно к утеплению тепловой изоляцией наружных ограждающих конструкций стен здания, представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8

Сравнительные результаты расчета использования научной разработки

Наименование параметров	Обозначение	Размерность	Значение
1	3	4	5
Предлагаемые при проектировании [107]	$\delta_{ут}$	м	0,05 и 0,09
	$I_{ст}$	р./год	2075340
	$q_{от}^p$	Вт/м <sup>30</sup> С	0,26
	$КЭ_{ут}$	%; оценка	-32; «В+» (высокий)
	$\Delta t_{ут}^p$	°С	1,22
	$r_o$	-	0,98
	$R_{ст}$	(м <sup>2</sup> ·°С)/Вт	2,67
	$Q_{общ}$	кВтч/год	1189511,91
	$Q_{от}$	кВтч/год	1070149,14
	$T_{ок}$	год	5,9
	$T_{д}$	год	56
	$\tau$	год	134
Определенные по предложенной методике	$\delta_{ут}^{опг}$	м	0,08
	$I_{ст}$	р./год	2067820
	$q_{от}^p$	Вт/м <sup>30</sup> С	0,254
	$КЭ_{ут}$	%; оценка	-33,3; «В+» (высокий)
	$\Delta t_{ут}^p$	°С	1,08
	$r_o$	-	0,98
	$R_{ст}$	(м <sup>2</sup> ·°С)/Вт	3,0
	$Q_{общ}$	кВтч/год	1168932,14

Окончание таблицы 4.8

1	3	4	5
	$Q_{от}$	кВтч/год	1045453,4
	$T_{ок}$	год	5,6
	$T_{д}$	год	45
	$\tau'$	год	203

#### 4.3. Основные выводы по четвертому разделу

Проведенный эксперимент и анализ адекватности, на примере энергетического обследования (энергоаудита) жилого комплекса в Ханты-Мансийском автономном округе – Югра, город Ханты-Мансийск, подтверждает целесообразность использования предложенных разработок, облегчения труда проектировщику по определению и выбору оптимальных параметров утепления наружных ограждающих конструкций стен здания, с учетом процесса регулирования отпускаемой тепловой энергии.

Полученные результаты численного исследования, на примере производственного здания ФГУП «ФНПЦ «Прогресс» (г. Омск), позволяют оценить влияние основных факторов на теплозащиту, тепловой режим и экономические показатели.

Численные исследования влияния увеличения толщины теплоизоляционного материала, показали снижение тепловых потерь, повышение теплозащиты. Однако повышаются капитальные затраты на утепление стен, что приводит к необходимости находить минимальное значение приведенных дисконтированных затрат.

Оценка технико-экономического эффекта от использования разработанной методики показывает наиболее выгодный вариант выбора решений, с точки зрения экономической прибыли материальных вложений, минимизации потребления энергетических ресурсов и потерь, сроков эксплуатации.

Проведенные исследования показали, что значение оптимальной толщины утепляющего слоя ограждающих конструкций стен здания  $\delta_{ут}^{опт}$  отвечает минимуму суммарных дисконтированных затрат по утеплению ограждающих конструкций стен здания (рисунок 4.29).

Из расчетов видно (таблица 4.8), что при разной по толщине утеплителя тепловой изоляции стен здания, суммарные затраты на утепление отличаются на 7520 р.

При оптимальной толщине утеплителя (0,08 м) класс энергосбережения остается прежний («В+» (высокий)), но снижаются тепловые потери через ограждающие конструкции и расход тепловой энергии на отопление, и вентиляцию здания (на 24695,74 кВтч/год).

Проведенные исследования подтверждают целесообразность использования предложенных разработок по определению оптимальной толщины утепления тепловой изоляцией стен зданий, с учетом регулирования отпускаемой тепловой энергии, с целью повышения эффективности и экономичности.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные и практические результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Анализ тепловых режимов зданий показал, что большинство изменений в этой области в течение последних двадцати лет обусловлены повышением требований к теплозащитным качествам ограждающих конструкций. Основной задачей остается формирование научно - обоснованного технико - экономического выбора тепло- сберегающих технологий при капитальном ремонте зданий с соблюдением нормативной базы. В результате анализа имеющихся литературных источников определены основные задачи диссертации.

2. Усовершенствована математическая модель теплообмена зданий, отличающаяся тем, что учитывает тепловые потери трубопроводной системой «отопление – вентиляция», проходящей через неотапливаемые помещения.

3. Разработана методика определения эффективного утепления ограждающих конструкций стен зданий, отличающаяся тем, что учитывает взаимосвязь конструктивных, теплотехнических, режимных параметров и экономических показателей с учетом регулирования отпускаемой тепловой энергии; проведенные экспериментальные исследования подтвердили адекватность предложенной разработки.

4. Предложены алгоритм и программное обеспечение, которые в отличие от существующих позволяют рассчитывать оптимальную толщину тепловой изоляции стен зданий с учётом реального изменения условий отпускаемой тепловой энергии в зависимости от регулирования системы, конструкции стен, дисконтных затрат и срока службы.

5. Результаты проведенных исследований подтверждают обоснованность применения предложенных разработок: повышается класс энергосбережения и снижаются тепловые потери через ограждающие конструкции, расход электрической энергии на регулирование системы «ОВ», приведенных дисконтированных затрат. Работа принята в ФГУП «ФНПЦ «Прогресс» при

разработке проектов по реконструкции и модернизации зданий, используется в ООО «Инком-Энерго», ООО «Сибирская проектная компания», СРО НП «Энергоаудиторы Сибири», ФГБОУ ВО «ОмГУПС» (Омск) при проведении энергетических обследований, технико-экономических обоснований по сбережению энергетических ресурсов и учебного процесса.

**В качестве рекомендации и перспективы дальнейшей** разработки темы диссертации рекомендуется выполнить исследования по применению разновидностей теплоизоляционных материалов с их комбинированием, при этом учесть в перспективных планах изменения режимов регулирования как отпускаемой, так и потребляемой тепловой энергии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Законы.** Российская Федерация. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: федер. закон от 23.11.2009 года № 216. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_93978/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978/) (дата обращения: 14.07.2022).

2. **Законы.** Российская Федерация. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: федер. закон от 30.12.2009 года № 384. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_95720/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/) (дата обращения: 20.09.2018).

3. **Самарин, О.Д.** Оптимизация комплекса энергосберегающих технических решений и теплотехнической безопасности при проектировании зданий: дис. на соиск. учен. степени докт. техн. наук. Москва, 2013. 288 с.

4. **Ливчак, И.Ф.** Основные пути экономии тепла и топлива, расходуемого на теплоснабжение зданий / И.Ф. Ливчак // Водоснабжение и санитарная техника. №10. 1978. С. 2-6.

5. **Щербаков, В.В.** Повышение энергоэффективности и нормирование теплопотребления общественных зданий: дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Саратов, 2004. 220 с.

6. **Береговой, А.М.** Здания с энергосберегающими конструкциями: дис. на соиск. учен. степени докт. техн. наук. Пенза, 2005. 344 с.

7. **Шихалиев, С.С.** Повышение эффективности капитального ремонта и реконструкции зданий на основе энергосбережения: дис. на соиск. учен. степени канд. экон. наук. Санкт-Петербург, 2012. 148 с.

8. **Законы.** Российская Федерация. О внесении изменений в Жилищный кодекс Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации и признании утратившим силу отдельных положений законодательных актов Российской Федерации: федер. закон от 25.12.2012 года № 271. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_139776/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_139776/) (дата обращения: 20.09.2018).

9. **Законы.** Российская Федерация. О внесении изменений в Федеральный закон «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: федер. закон от 28.12.2013 года № 399. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_207917/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_207917/) (дата обращения: 20.09.2018).

10. **Шахин, В.П.** Энергоэффективность и энергосбережение в России: состояние, проблемы, пути решения / В.П. Шахин // Энергонадзор и энергоэффективность. 2003, №10, с. 7-13.

11. **Рубцов, А.С.** Куда уходит тепло? / А.С. Рубцов // ЭнергоНадзор. № 1(10). 2010. С. 40-43.

12. **Горячев, С.В.** Панельные дома: куда уходит тепло? Метод тепловизионной диагностики зданий / С.В. Горячев // Стр-во и гор. хоз-во в Санкт-Петербурге и Ленингр. обл. 2005. № 76. С. 154 - 155.

13. **Ватин, Н.И.** Влияние уровня тепловой защиты ограждающих конструкций на величину потерь тепловой энергии в здании / Н.И. Ватин, Д.В. Немов, П.П. Рымкевич, А.С. Горшков. Инженерно-строительный журнал. № 8. 2012. С. 4-14.

14. **Афанасьев, А.А., Матвеев, Е.П.** Реконструкция жилых зданий. Часть II. Технологии восстановления эксплуатационной надежности жилых зданий. Москва, 2008. 479 с.

15. **Афанасьев, А.А., Матвеев, Е.П.** Реконструкция жилых зданий. Часть I. Технологии восстановления эксплуатационной надежности жилых зданий. Москва, 2008. 479 с.

16. **Еремкин, А.И.** Тепловой режим зданий: учеб. пособие для студ. по строит. специальностям / А.И. Еремкин, Т.И. Королева. М.: АСВ, 2000. 368с.

17. **Сигачев, Н.П.** Энергосбережение в зданиях с управляемыми тепло-воздухообменными режима: дис. на соиск. учен. степени докт. техн. наук. Чита, 2001. 341 с.

18. **Матросов, Ю.А.** Сравнительный анализ новых территориальных норм

России по энергетической эффективности жилых зданий и нового постановления Германии / Ю.А. Матросов // Энергосбережение. №4. 2002. С. 58-61.

19. **Рубашкина, Т.И.** Исследование эффективности современных утеплителей в многослойных ограждающих конструкциях зданий: дис. на соиск. учен. степени кан. техн. наук. Чита, 2009. 152 с.

20. **Кобзарь, К.В.** Совершенствование метода расчета вертикальных элементов жесткости железобетонных каркасных зданий: дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Москва, 2007. 131 с.

21. **Коканин, С.В.** Исследование долговечности теплоизоляционных материалов на основе пенополистирола: дис. на соиск. учен. степени кан. техн. наук. Иваново, 2011. 170 с.

22. **Дерябин, П.П.** Технология получения ячеистых бетонов способом форсированного порообразования: дис. на соиск. учен. степени кан. техн. наук. Новосибирск, 2002. 164 с.

23. **Давидюк, А.Н.** Конструкционно-теплоизоляционные легкие бетоны на стекловидных пористых заполнителях: дис. на соиск. учен. степени докт. техн. наук. Ростов-на-Дону, 2009. 387 с.

24. **Сизенко, О.А.** Совершенствование методики расчета систем естественной вентиляции жилых зданий с теплыми чердаками: дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Воронеж, 2010. 152 с.

25. **Гаранин, А.В.** Разработка систем динамического микроклимата и создание на их основе энергосберегающих режимов работы оборудования: дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Иваново, 2010. 209 с.

26. **Смирнова, С.Н.** Принципы формирования архитектурных решений энергоэффективных жилых зданий: дис. на соиск. учен. степени канд. архитектуры. Нижний Новгород, 2009. 216 с.

27. **Шилкин, Н.В.** Методы повышения тепловой эффективности зданий и их экономическая оценка: дис. на соиск. учен. степени канд. архитектуры. Нижний Новгород, 2007. 174 с.

28. **Ковалев, И.Н.** Рациональные решения при экономическом

обосновании теплозащиты зданий / И.Н. Ковалев // Энергосбережение. 2014. №8. С. 14-19.

29. **Рымкевич, А.А.** Системный анализ оптимизации общеобменной вентиляции и кондиционирования воздуха. СПб: АВОК СЕВЕРО-ЗАПАД, 2003. 272 с.

30. **Богословский, В.Н.** Строительная теплофизика. Теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха / В.Н. Богословский. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1982. 415 с.

31. **Гагарин, В.Г.** Методы экономического анализа повышения уровня теплозащиты ограждающих конструкций зданий. Часть 1. / В.Г. Гагарин // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2009. №1. С. 10–17.

32. **Гагарин, В.Г.** Методы экономического анализа повышения уровня теплозащиты ограждающих конструкций зданий. Часть 2. / В.Г. Гагарин // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2009. №2. С. 14–23.

33. **Гагарин, В.Г.** Методы экономического анализа повышения уровня теплозащиты ограждающих конструкций зданий. Часть 3. / В.Г. Гагарин // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2009. №3. С. 62–68.

34. **Гагарин, В.Г.** Учет теплотехнических неоднородностей при оценке теплозащиты ограждающих конструкций в России и европейских странах / В.Г. Гагарин, К.А. Дмитриев // Строительные материалы. 2013. № 6. С. 14–16.

35. **Гагарин, В.Г.** Учет теплопроводных включений и вентилируемой прослойки при расчетах сопротивления теплопередаче стены с навесной фасадной системой (НФС) / В.Г. Гагарин, В.В. Козлов, К.И. Лушин, Н.Ю. Плющенко // Строительные материалы. 2016. № 6. С. 32–35.

36. **Гагарин, В.Г.** Учет теплопроводных включений при определении тепловой нагрузки на систему отопления здания / В.Г. Гагарин, В.В. Козлов, А.Ю. Неклюдов // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2016. № 2(978). С. 57–

61.

37. **Дацюк, Т.А.** Моделирование теплового режима жилых помещений при прерывистом отоплении / Т.А. Дацюк, Ю.П. Ивлев, В.А. Пухкал // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. С. 179.

38. **Малявина, Е.Г.** Строительная теплофизика и проблемы утепления современных зданий / Е.Г. Малявина // АВОК. 2009. № 1. С. 4–7.

39. **Малявина, Е.Г.** Теплотери здания: справочное пособие / Е.Г. Малявина. 2-е изд., испр. М.: АВОК–ПРЕСС, 2011. 144 с.

40. **Малявина, Е.Г.** Выявление экономически целесообразной теплозащиты наружных ограждений трехэтажного здания / Е.Г. Малявина // Жилищное строительство. 2016. №6. С. 13–15.

41. **Табунщиков, Ю.А.** Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач – М.: АВОК-ПРЕСС, 2012. 204 с.

42. **Башмаков, И.А.** Повышение энергоэффективности в системах теплоснабжения. Часть 1. Проблемы российских систем теплоснабжения / И.А. Башмаков // Энергосбережение. 2010. № 2. С. 46–51.

43. **Денисова, Ю.В.** Выбор эффективного утеплителя в конструкции навесных вентилируемых фасадов / Ю.В. Денисова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. №4. С. 26–30.

44. **Козлов, В.В.** Основы оптимизации теплозащиты ограждающих конструкций по окупаемости энергосберегающих мероприятий / В.В. Козлов // Строительные материалы. 2013. № 6. С. 10–13.

45. **Фролова, А.А.** Выбор теплозащиты офисных зданий с учетом энергетических и экономических показателей систем климатизации: дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Москва, 2017. 147 с.

#### **Литература на иностранных языках:**

46. **BS EN 15603:2008.** Energy performance of buildings. Overall energy use and definition of energy ratings. Effective 2008–09–30. 66 p.

47. **Hong, T.** Data and analytics to inform energy retrofit of high performance

build-ings / Tianzhen Hong, Le Yang, David Hill, et al. // Applied Energy. 2014. №126. P. 90-106.

48. **Crawley, D.B.** Contrasting the Capabilities of building energy performance simulation programs: report / Drury B. Crawley [et al.] / United States Department of Energy: University of Strathclyde : University of Wisconsin. 2005. July. 59 p.

49. **Hoes, P.** User behavior in whole building simulation / P. Hoes, J.L.M. Hensen, M.G.L.C. Loomans, et al. // Energy and Buildings. 2009. №41. P. 295-302.

50. **Fabi, V.** Description of occupant behaviour in building energy simulation: stateofart and concepts for improvements / Valentina Fabi et al. / 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, 14-16 November // Proceedings of Building Simulation. 2011. P. 2882-2889.

51. **Alajmi, A.** Energy audit of an educational building in a hot summer climate / A. Alajmi // Energy and Buildings. 2012. Vol. 47. P. 122-130.

52. **Lubina, P.** Nantka Internal heat gains in relation to the dynamics of buildings heat requirements / Piotr Lubina, Marian B. Nantka // Architecture civil engineering environment. 2009. № 1. P. 137-142.

53. **Maile, T.** Building energy performance simulation tools. A life-cycle and interoperable perspective: report / Tobias Maile, Martin Fischer & Vladimir Bazjanac / Center for Integrated Facility Engineering. 2007. Dec. 43 p.

54. **Energy saving for London hotel.** URL: <https://www.heatpumps.org.uk/space-air-gets-top-marks-at-ashridge-college/> (дата обращения 20.09.2018).

55. **Grzelczak, M.** The influence of window thermal insulating properties on waste of heat in buildings / M. Grzelczak // Pap. of 5-th conf. of VGTU. 2002. С. 51-57.

#### **Авторские публикации:**

56. **Петров П. В.,** Кулагин В. А., Стариков А. П. Резанов Е. М., Совершенствование технологии теплоизоляции зданий, *ЕнисейскаяТеплоФизика: Тезисы докл. I Всерос. конф. с междунар. участием.* Красноярск: СФУ, 2023. 99–100.

57. **Петров, П. В.,** Кулагин, В. А., Резанов, Е. М., Старикова, А. П. Совершенствование технологии теплоизоляции зданий, *Журнал СФУ. Техника и*



- технологии*. 2023. 16(2). 187–197. EDN: IXBHRM (IF 0.588, **K1**, Web of Science: RSCI).
58. **Petrov, P.V.**, Vedruchenko, V.R., Rezanov, E.V., Kadtsin, I.I. and Kulagin, V.A. Experimental study of the effective insulation of building envelopes, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.* 2022, 15(3), 356–367. DOI: 10.17516/1999-494X-0403 DOI: 10.17516/1999-494X-0403 (IF 0.588, **K1**, Web of Science: RSCI).
59. **Петров, П.В.**, Резанов, Е.М., Ведрученко, В.Р., Глухова, М.В. Результаты численного исследования теплозащиты здания с учетом регулирования отпускаемой тепловой энергии, *Энергосбережение и водоподготовка*. 2022. № 1(135). (IF 0.187, **K2**). 16–21.
60. **Петров, П.В.**, Резанов Е.М. Повышение эффективности утепления стен зданий с учетом регулирования отпускаемой тепловой энергии. *Известия Транссиба* 2019. № 4 (40). 77–86
61. **Петров, П.В.** Расчет оптимальной толщины тепловой изоляции наружных стен здания при капитальном ремонте / Материалы IV Международной научно-практической конференции «Современные концепции научных исследований» / П.В. Петров, Е.М. Резанов, М.О. Тесля // Н. Новгород: ООО «Стимул-СТ», 2015. С. 287-290.
62. **Петров, П.В.** К вопросу повышения эффективности утепления тепловой изоляцией наружных ограждающих конструкций стен зданий / П.В. Петров, Е.М. Резанов // Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы энергетики». Омск: ОмГТУ, 2017. С. 18-21.
63. **Петров, П.В.** Оптимизация затрат на утепления тепловой изоляцией наружных стен зданий при проведении капитального ремонта / П.В. Петров, Е.М. Резанов // Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Актуальные вопросы энергетики». Омск: ОмГТУ, 2018. С 45-48.
64. **Петров, П.В.** Повышение эффективности и экономичности утепление тепловой изоляцией наружных ограждающих конструкций стен зданий / П.В. Петров, Е.М. Резанов, М.О. Тесля // Материалы всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Повышение энергоэффективности объектов энергетики и систем теплоснабжения». Омск: ОмГУПС, 2017. С. 277-282.

65. **Петров, П.В.** Оптимизация затрат на утепления тепловой изоляцией наружных стен зданий при проведении капитального ремонта / П.В. Петров, Е.М. Резанов // Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Актуальные вопросы энергетики». Омск: ОмГТУ, 2018. С 45-48.

66. **Петров, П.В.** Оптимизация затрат при проектировании эксплуатации тепловых схем и систем теплоснабжения потребителей / П.В. Петров, В.Р. Ведрученко, В.В. Крайнов, А.П. Стариков, Д.А. Мещеряков // Журнал «Промышленная энергетика». Москва. 2013. №2(143). С. 23-27.

67. **Петров, П.В.** Определение оптимальной толщины тепловой изоляции ограждающих конструкций зданий при капитальном ремонте / П.В. Петров, Е.М. Резанов, В.Р. Ведрученко, А.П. Стариков // Журнал «Омский научный вестник». Омск. 2015. №3(143). С. 254-258.

68. **Петров, П.В.** Методика эффективного расчета утепления наружных ограждающих конструкций стен зданий при проведении капитального ремонта / П.В. Петров, Е.М. Резанов, В.Р. Ведрученко, М.С. Шерстобитов // Журнал «Омский научный вестник». Омск. 2016. №6(150). С. 109-113.

69. **Петров, П.В.** О необходимости нормирования и стандартизации теплозащиты зданий и сооружений при капитальном ремонте / П.В. Петров, В.Р. Ведрученко, А.П. Стариков // Журнал «Омские коммунальные системы». Омск. 2012. №3(19). С. 38-40.

70. **Петров, П.В.** Основные направления совершенствования тепловой работы зданий и сооружений при капитальном ремонте / П.В. Петров, Е.М. Резанов, В.Р. Ведрученко, А.П. Стариков // Журнал «КС энергетика и жкх». Омск. 2015. №2(34). С. 30-33.

71. **Петров, П.В.** Об энергосбережении в системах вентиляции зданий и сооружений в условиях капитального ремонта / П.В. Петров // Межвузовский тематический сборник научных трудов «Повышение эффективности объектов теплоэнергетики и систем теплоснабжения» / Омск: ОмГУПС, 2016. С. 59-62.

72. **Петров, П.В.** Определение оптимальной толщины утепления тепловой

изоляция ограждающих конструкций стен здания: свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ № 2016616691 Российская Федерация / П.В. Петров – заявл. № 2016614064 от 20.04.2016; опубл. 20.07.2016.

73. **СНиП II-3-79\***. Строительная теплотехника. Введ. 1979-07-01. М.: НИИСФ Госстроя СССР, 1979. –49 с. URL: <http://docs.cntd.ru/document/871001234> (дата обращения: 20.09.2018).

74. **Законы**. Российская Федерация. Об утверждении Правил установления требований энергетической эффективности для зданий, строений, сооружений и требований к правилам определения класса энергетической эффективности многоквартирных домов: федер. закон от 25.01.2011 года № 18. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_109801/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_109801/) (дата обращения: 20.09.2018).

75. **Законы**. Российская Федерация. Об утверждении требований энергетической эффективности зданий, строений, сооружений: приказ Министерства регионального развития РФ от 17.05.2011 года № 224. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902293075> (дата обращения: 20.09.2018).

76. **Бадьин, Г.М.** Игровое моделирование при подготовке строительного производства: учеб. пособие / Г.М. Бадьин, Э.К. Завадская, Ф.Ф. Пелдшус. Л.: ЛИСИ., 1989. 41с.

77. **СП 23-101-2004**. Проектирование тепловой защиты зданий. Введ. 2004-06-01. М. : Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2004. 158 с. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200037434> (дата обращения: 22.10.2018).

78. **СНиП 23-02-2003**. Тепловая защита зданий. Введ. 2003-10-01. М. : Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2004. 31 с.

79. **СП 50.13330.2012**. Тепловая защита зданий (Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003). Введ. 2013-07-01. М.: ФАУ "ФЦС", 2012. 96 с. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200095525> (дата обращения: 22.10.2018).

80. **СНиП 23-01-99**. Строительная климатология. Введ. 2000-01-01. М.: Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2000. 109 с.

81. **СП 131.13330.2012**. Строительная климатология (Актуализированная

редакция СНиП 23-01-99\*). Введ. 2013-01-01. М.: НИИСФ РААСН, 2012. 109 с.  
URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200095546> (дата обращения: 22.10.2018).

82. **Богословский, В.Н.** Отопление / В.Н. Богословский, А.Н. Сканави. М.: Стройиздат, 1991. 725 с.

83. **ТСН 23-304-99 (МГСН 2.01-99).** Энергосбережение в зданиях. Нормативы по теплозащите и тепловодозэлектроснабжению. Введ. 1999-02-23. М.: РААСН, 1999. 50 с. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200000376> (дата обращения: 22.10.2018).

84. **Бобров, Ю.Л.** Теплоизоляционные материалы и конструкции: учебник для средних профессионально-технических учебных заведений / Ю.Л. Бобров. М.: ИНФРА-М, 2003. 268 с.

85. **Баталин, Б.С.** Исследование свойств пенополистирола как утеплителя в панелях сборных жилых домов / Б.С. Баталин, И.А. Полетаев // Известия вузов. Строительство. 2003. №4. С. 58-61.

86. **Ли, А.В.** Долговечность энергоэффективных полимерсодержащих ограждающих конструкций: дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Ли Андрей Валерьевич. Хабаровск, 2003. 141 с.

87. **Менейлюк, А.** Современные фасадные системы (учебное пособие) / А. Менейлюк, В. Дорофеев, Л. Лукашенко, В. Москаленко, А. Петровский, В. Соха. Киев, 2008. 340 с.

88. **Иванов, Г.С.** Радикальное решение проблемы энергосбережения в градостроительстве на основе применения новых конструкций окон. / Г.С., Иванов, А.Н. Дмитриев, А.В. Спиридонов, Ю.Д. Хромец // Строительные материалы. 1999. № 10. С. 9-12.

89. **Митина, И.В.** Повышение эффективности солнечных коллекторов с вакуумированными стеклопакетами: дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Москва, 2009. 148 с.

90. **Девятаева, Г.В.** Технология реконструкции и модернизации зданий: учеб. пособие / Г.В. Девятаева. М.: ИНФРА-М, 2003. 250 с.

91. **Гребенщиков, С.Г.** Эффективность в ЖКХ начинается с учета / С.Г.

Гребенщиков // КС Энергетика и ЖКХ. 2013. № 2(23). С. 26–28.

92. **Завадскас, Э.К.** Методика выбора рациональных вариантов строительства в условиях неопределенности. (Проблематика выбора вариантов строительства) / Э.К. Завадскас // Строит, материалы, оборудование, технологии XXI века. 2003. № 7. С.35 - 37.

93. **СН 423-71.** Инструкция по определению экономической эффективности капитальных вложений в строительстве. Введ. 1971-05-31. М.: СТРОЙИЗДАТ, 1971. 41 с. URL: <http://docs.cntd.ru/document/901708992> (дата обращения: 22.10.2018).

94. **ГКНТ СССР.** Методика определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений» утвержденной постановлением ГКСМ СССР по науке и технике Госплана СССР, Академии наук СССР и ГК СМ СССР по делам изобретений и открытий от 14 февраля 1977 года № 48/16/13/3.

95. **Ларин, Р.М., Плясунов А.В., Пяткин А.В.** Методы оптимизации. Примеры и задачи: учебное пособие. Новосибирск: НГУ, 2003. 115 с.

96. **Козлов В.Н.** Системный анализ, оптимизация и принятие решений: учебное пособие / В.Н. Козлов. СПб.: СПбГУ, 2011. 244 с.

97. **Камнев, И.М.** Методы обоснования ставки дисконтирования / И.М. Камнев, А.Ю. Жулина, А.Ю. // Проблемы учета и финансов. № 2(6). 2012. С. 30-35.

98. **Быков, А.Б.** Регулирование отпуска тепла в системах централизованного теплоснабжения в периоды резкого похолодания / А.Б. Быков, В.И. Бабенков, Г.И. Кравченко // Теплоэнергетика. 2007. №7. С. 53-54.

99. **Громов Н.К, Шубин Е.П.** Водяные тепловые сети: справочное пособие по проектированию / И.В. Беляйкина, В.П. Витальев и др.; под ред. Н.К. Громова, Е.П. Шубина. М.: Энергоатомиздат, 1988. 376 с.

100. **Сибикин, Ю.Д.** Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха / Ю.Д. Сибикин. М.: Академия, 2004. 304 с.

101. **СП 60.13330.2016.** Отопление, вентиляция и кондиционирование

воздуха. Введ. 2017-06-17. М.: Минрегион России, 2016. 104 с. URL: <http://docs.cntd.ru/document/456054205> (дата обращения: 22.10.2018).

102. **Малявина, Е.Г.** Теплопотери здания. Справочное пособие / Е.Г. Малявина. М.: АВОК-ПРЕСС, 2007. 144 с.

103. **ГОСТ Р 54851-2011.** Национальный стандарт Российской Федерации. Конструкции строительные ограждающие неоднородные. Введ. 2012-05-01. М.: Стандартинформ, 2012. 24 с

104. **СП 230.1325800.2015.** Конструкции ограждающие зданий. Характеристики теплотехнических неоднородностей. Введ. 2015-04-30. М.: ФАУ "ФЦС", 2015. 68 с.

105. **Иванцов, А.И.** Прогнозирование срока службы наружных стен жилых зданий по потере требуемой теплозащиты: дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Казань, 2014. 159 с.

106. **Захарьин, Е.Н.** Долговечность экструзионного пенополистирола. Оценка и прогнозирование теплопроводности: дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Красноярск, 2011. 156 с.

107. **Энергетическое обследование:** технический отчет по договору № Э/2016-000/425 от 21 ноября 2016 года, на проведение энергетического обследования (энергоаудита) здания жилого дома по адресу Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, город Ханты-Мансийск, улица Гагарина, дом 141 / ООО «Инком-Энерго»: руководитель Цыганков Н. О, исполнитель Шибанов И. А. Омск: 2017, 28 с.

108. **Энергетическое обследование:** энергетический паспорт № 1125-Д-064-050 от 28 февраля 2017 года здания жилого дома по адресу Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, город Ханты-Мансийск, улица Гагарина, дом 141 / ООО «Инком-Энерго»: разработал Шибанов И. А., согласовал Цыганков Н. О; МП «Жилищно-коммунальное управление» МО город Ханты-Мансийск: утвердил Зиганшин С.А. Омск: 2017, 25 с.

109. **ТСН 23-323-2001.** Энергетическая эффективность жилых и общественных зданий. Нормативы по теплозащите зданий Ханты-Мансийского

автономного округа. Введ. 2002-03-01. М.: Госстрой России, 2002. 35 с.

110. **Проектная документация:** проект Федеральное государственное унитарное предприятие «Федеральный научно-производственный центр «Прогресс», город Омск, Омская область – реконструкция и техническое перевооружение производственных фондов для обеспечения серийного производства всей номенклатуры резинокордных оболочек для комплектации заказов «Ясень-М» и «Борей» / 78-2012/М-АР «Архитектурные решения» // ООО «Омскпромпроект»: разработал: разработал Битейкин А. С. [и др.], согласовал Матвеев Л. Н. Омск: 2017, 90 с.

111. **Проектная документация:** проект Федеральное государственное унитарное предприятие «Федеральный научно-производственный центр «Прогресс», город Омск, Омская область – реконструкция и техническое перевооружение производственных фондов для обеспечения серийного производства всей номенклатуры резинокордных оболочек для комплектации заказов «Ясень-М» и «Борей» / 78-2012/М-ИОС4 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха, тепловые сети» // ООО «Омскпромпроект»: разработал: разработал Битейкин А. С. [и др.], согласовал Матвеев Л. Н. Омск: 2017, 321 с.

112. **Проектная документация:** проект Федеральное государственное унитарное предприятие «Федеральный научно-производственный центр «Прогресс», город Омск, Омская область – реконструкция и техническое перевооружение производственных фондов для обеспечения серийного производства всей номенклатуры резинокордных оболочек для комплектации заказов «Ясень-М» и «Борей» / 78-2012/М-ЭЭ «Мероприятия по обеспечению соблюдения требований энергетической эффективности и требований оснащенности зданий, строений и сооружений приборами учёта используемых энергетических ресурсов» // ООО «Омскпромпроект»: разработал: разработал Битейкин А. С. [и др.], согласовал Матвеев Л. Н. Омск: 2017, 78 с.

113. **Проектная документация:** проект Федеральное государственное унитарное предприятие «Федеральный научно-производственный центр

«Прогресс», город Омск, Омская область – реконструкция и техническое перевооружение производственных фондов для обеспечения серийного производства всей номенклатуры резинокордных оболочек для комплектации заказов «Ясень-М» и «Борей» / 78-2012/М-СМ «Сметы на строительство объектов капитального строительства. Прайс-листы» // ООО «Омскпромпроект»: разработал: разработал Битейкин А. С. [и др.], согласовал Матвеев Л. Н. Омск: 2017, 433 с.

114. **ТСН 23-338-2002** Омской области. Энергосбережение в гражданских зданиях. Нормативы по теплопотреблению и теплозащите. Введ. 2002-09-04. М.: Госстрой России, 2002. 42 с.



## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

## АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ РАЗРАБОТКИ



Инком-Энерго

**ООО «Инком-Энерго»**

644079, Россия, г. Омск, ул. Рабочая-27 я, 19  
 ИНН 5506215761 КПП 550601001  
 ОГРН 1105543041207 ОКПО 67388522  
 mailto: [inkom-energo@mail.ru](mailto:inkom-energo@mail.ru)

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ООО «Инком-Энерго»

Н.О. Цыганков

«30» сентября 2017 г.

**АКТ****использования научно-технической разработки**


Настоящий акт составлен о том, что при проведении энергетического обследования (энергоаудита) и технико-экономическом обосновании рекомендаций по сбережению тепловой энергии сорока пяти зданий города Ханты-Мансийск, была использована научно-техническая разработка: «Методика эффективного расчёта утепления наружных ограждающих конструкций стен зданий при проведении капитального ремонта».

**Авторы научно-технической разработки:** доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Теплоэнергетика» ФГБОУ ВО «ОмГУПС» В. Р. Ведрученко; кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Теплоэнергетика» ФГБОУ ВО «ОмГУПС» Е. М. Резанов; заместитель директора по техническим вопросам ООО «Сибирская проектная компания» П. В. Петров.

**Технико-экономическая эффективность от использования научно-технической разработки:** эффект от использования предложенных в методике технических решений был достигнут за счет определения оптимальной толщины утепления тепловой изоляцией наружных стен, с учетом нормативных документов по тепловой защите зданий, обоснованию применяемых экономических решений, расчета и анализа степени долговечности утепляющего материала. Это способствует снижению тепловых потерь через ограждающие конструкции стен, расхода тепловой энергии на отопление, вентиляцию и кондиционирование и приведенных дисконтированных затрат при капитальном ремонте зданий.

От ООО «Инком-Энерго»

Руководитель работ, инженер

 И.А. Шибанов

От СРО НП «Энергоаудиторы Сибири»

Эксперт, к.т.н.

 С.В. Глухов



СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ  
ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2016616691

**Определение оптимальной толщины утепления  
тепловой изоляцией ограждающих конструкций стен здания**

Правообладатель: *Петров Павел Владимирович (RU)*

Автор: *Петров Павел Владимирович (RU)*



Заявка № 2016614064

Дата поступления 20 апреля 2016 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 17 июня 2016 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

## ВЫПИСКА ИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО ПАСПОРТА НА ЗДАНИЕ

Филиал муниципального унитарного предприятия "Бюро технической инвентаризации, учета недвижимости и приватизации жилья города Нижневартовска" в городе Ханты-Мансийске

## ВЫПИСКА ИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО ПАСПОРТА НА ЗДАНИЕ (СТРОЕНИЕ)

№ дела 25754 Литер А  
 по состоянию на 01.04.2015  
 Информация по зданию (строению) жилое  
 (жилое, нежилое)

Кадастровый номер	-		
Предыдущий кадастровый номер	-		
Условный номер	-		
Адрес	Город Ханты-Мансийск		
Наименование (ул., пл., пер., просп., туп. бульв., и т.п.)	Улица Гагарина		
Дом	141	Корп.	- Строение
Функциональное назначение	жилое		
Площадь всего (кв. м.)	6929,6	Количество квартир	77
кроме того площади (кв. м.):	-	Материал стен	кирпичные
в том числе: лестничных клеток	-	Год постройки	
технического подполья, технического этажа	-	Этажность (без учета подземных этажей)	10
вент. камер	-	Подземных этажей	1
других помещений	-	Инвентаризационная стоимость (тыс. руб.)	-
Площадь застройки (кв. м.)	923	Памятник архитектуры	нет
Жилая площадь (кв. м.)	2133,4	Нежилая площадь (кв. м.)	4796,2

Описание объекта права:	здания		
Кадастровый номер	-		
Наименование правообладателя	-		
Здание/строение	здание		
Тип помещения: встроенно-пристроенное	-		
пристроенное	-		
Общая площадь, всего (кв. м.)	6929,6	Площадь, всего (кв. м.), с учетом балконов, лоджий, и т.п.	7264,6
Жилая площадь (кв. м.)	2133,4	Нежилая площадь (кв. м.)	4796,2

Технико-экономические показатели объекта приведены в приложении к выписке

Директор филиала



А.В. Терновой

МП

Исполнитель

*[Handwritten signature]*

Н.В. Шнейдмиллер

## Приложение к выписке из технического паспорта на здание (строение)

№ дела 25754 Литер Апо состоянию на 01.04.2015Информация по зданию (строению) жилое

(МК-СС, нежилое)

Кадастровый номер	-		
Предыдущий кадастровый номер	-		
Условный номер	-		
Адрес	Город (пос.)	Город Ханты-Мансийск	
Наименование (ул., пл., пер., просп., туп.,	Улица Гагарина		
Дом	141	Корп.	-
		Строение	-

## Технико-экономические показатели

№ строки	Показатель	Единица измерения	Количество по данным инвентаризации
1	Количество этажей	ед.	11
2	в том числе подземных	ед.	1
3	Количество секций	ед.	2
4	Высота этажа (средняя)	м.	3,06
5	Строительный объем надземной части	куб. м.	27642
6	Строительный объем подземной части	куб. м.	2389
7	Площадь здания	кв. м.	6929,6
8	Общая площадь квартир (помещений)	кв. м.	4422,5
9	Площадь общего назначения	кв. м.	771,6
10	Площадь встроенных помещений	кв. м.	785,6
11	Площадь мест общего пользования	кв. м.	949,9

## Распределение площади квартир жилого здания по числу комнат

№ строки	Состав квартир жилого дома	Количество	Их площадь, кв.м	
			Площадь квартир	Жилая
12	Однокомнатные	36	1536,9	668
13	Двухкомнатные	32	2076,7	995,8
14	Трехкомнатные	9	808,9	469,6
15	Четырехкомнатные	-	-	-
16	Пяти и более комнатные	-	-	-
17	Всего	77	4422,5	2133,4
18	Площадь веранд, балконов, лоджий	335		-

Основные конструктивные элементы объекта (по проекту):

1. Фундамент	свайный с железобетонным монолитным ростверком
2. Стены	кирпичные, пеноблоки
3. Перекрытия	плиты монолитные железобетонные
4. Кровля	технониколь

Директор филиала



А.В. Терновой

МП

Исполнитель

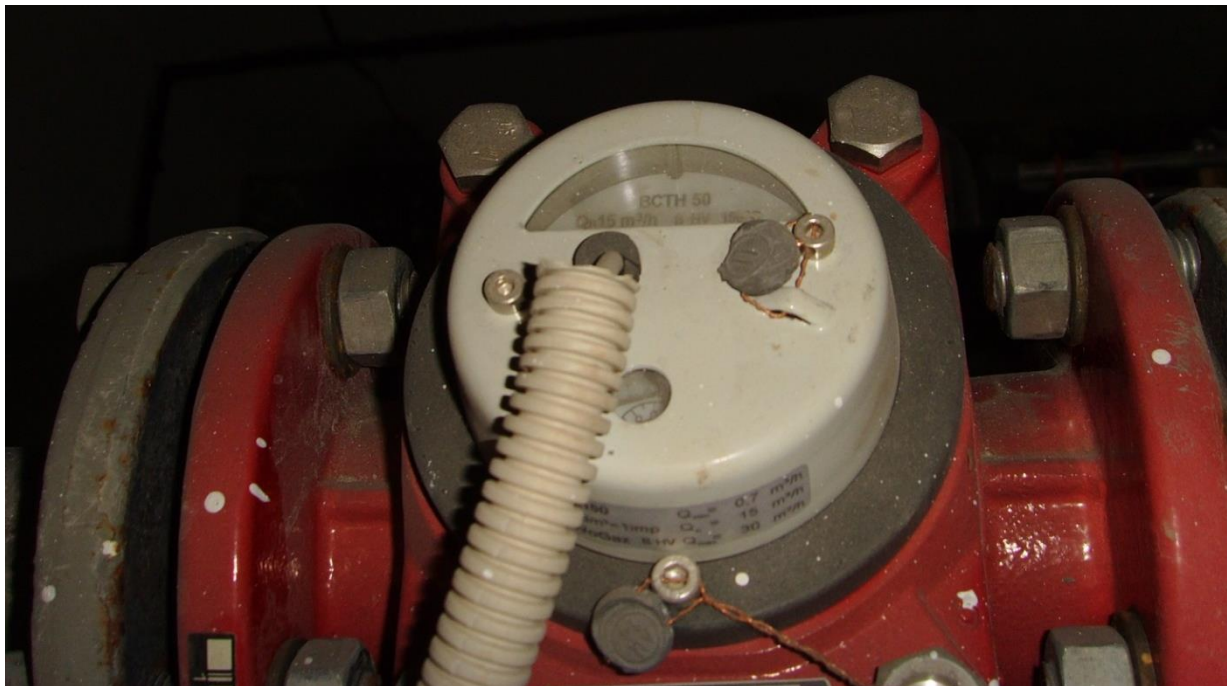
Н.В. Шнейдмиллер

## ПРИЛОЖЕНИЕ 5

## ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ КРЫШНОЙ КОТЕЛЬНОЙ

№	Наименование оборудования	Кол-во, шт	Марка	Технические характеристики
1	Водогрейный котёл отопительного контура (атмосферный)	4	Buderus Logano G334 WS 94-10	Номинальная теплопроизводительность 94 кВт. Потребляемая мощность 102,6 кВт. Максимальное рабочее давление 0,4 МПа. Максимальная рабочая температура 110 °С. Объем теплоносителя 43 л. Номинальное давление газа 20 мбар.
2	Водогрейный котёл контура горячего водоснабжения (атмосферный)	4	Buderus Logano G334 WS 73-8	Номинальная теплопроизводительность 73 кВт. Потребляемая мощность 79,5 кВт. Максимальное рабочее давление 0,4 МПа. Максимальная рабочая температура 110 °С. Объем теплоносителя 35 л. Номинальное давление газа 20 мбар.
3	Циркуляционный насос контура котла	8	Wilo Тип: Yonos MAXO 30/0,5-7	Расход максимальный 8.2 м³/ч. Напор максимальный 7 м. Максимальное рабочее давление 10 бар. Допустимые температуры перекачиваемой жидкости 110 °С. Потребляемая мощность (мин.) 5-120 Вт.
4	Циркуляционный насос контура системы «отопление, вентиляция и кондиционирование»	4	Wilo- Stratos-D 50/1-16	Расход максимальный 57 м³/ч. Напор максимальный 18 м. Максимальное рабочее давление 10 бар. Допустимые температуры перекачиваемой жидкости 110 °С. Потребляемая мощность 40-1250 Вт.
5	Циркуляционный насос системы горячего водоснабжения	4	Wilo- Stratos-D 50/1-16	Расход максимальный 57 м³/ч. Напор максимальный 18 м. Максимальное рабочее давление 10 бар. Допустимые температуры перекачиваемой жидкости 110 °С. Потребляемая мощность 40-1250 Вт.
6	Теплообменник горячего водоснабжения	2	FP-10-13-1-EN	Греющая и нагреваемая среда – вода. Контур греющий: Расход 3,4 кг/с; Температура входная 80 °С; Температура выходная 70 °С; Потери давления 45,477 кПа. Контур нагреваемый: Расход 0,62 кг/с; Температура входная 5 °С; Температура выходная 60 °С; потери давления 1,422 кПа. Тепловая мощность 142,11 кВт. Коэффициент теплопередачи 4879 Вт/м²°С.
7	Циркуляционный насос подачи горячего водоснабжения	4	Wilo- Stratos-D 50/1-16	Расход максимальный 57 м³/ч. Напор максимальный 18 м. Максимальное рабочее давление 10 бар. Допустимые температуры перекачиваемой жидкости 110 °С. Потребляемая мощность 40-1250 Вт.
8	Химводоподготовка	2	Комплексон-6	
9	Узел учета расхода газа	2	Elster BK-25G25T	
10	Узел учета тепловой энергии системы «отопление, вентиляция и кондиционирование»	2	Эльф-04п, ВСТН Ду50	

## СЧЕТЧИКИ ПОТРЕБЛЯЕМЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ



А) Расходомер ВСТН Ду50 контура котельной



Б) Тепловычислитель Эльф-04п, заводской номер 00642014

Рисунок П6.1 – Фотографии теплосчетчика системы отопления №1



А) Расходомер ВСТН Ду50 контура системы отопления



Б) Тепловычислитель Эльф-04п

Рисунок П6.2 – Фотографии теплосчетчика ситемы отопления №2



Основные технические характеристики тепловычислителя Эльф-04п

Характеристика	Значение
Диапазон измерения тепловой энергии, Гкал	$10^{-3} - 10^5$
Диапазон измерения объема и массы теплоносителя, м <sup>3</sup> (т)	$10^{-3} - 10^5$
Диапазон измерения объема и массы теплоносителя, м <sup>3</sup> (т)	$10^{-3} - 10^5$
Диапазон измерения температуры теплоносителя и воды, °С	от 0 до +150
Диапазон измерения разности температур теплоносителя, °С	от 3 до +147
Диапазон измерения давления теплоносителя и воды, МПа при измерении ИПД класса точности 0,1 0,25 0,5	0,06·P <sub>max</sub> — P <sub>max</sub> 0,14·P <sub>max</sub> — P <sub>max</sub> 0,28·P <sub>max</sub> — P <sub>max</sub> где P <sub>max</sub> не более 2,5 МПа — верхний предел диапазона измерения ИПД
Пределы допускаемой абсолютной погрешности ИК температуры теплоносителя и воды (t), °С	$\pm(0,4+0,002 \cdot t)$
Пределы допускаемой абсолютной погрешности ИК разности температур ( $\Delta t$ ), °С	$\pm(0,11+0,006 \cdot \Delta t)$
Пределы допускаемой относительной погрешности ИК тепловой энергии, % для комплексов класса «В» для комплексов класса «С»	$\pm(2+12 / \Delta t+0,02 \cdot G_B / G)$ $\pm(1+12 / \Delta t+0,01 \cdot G_B / G)$ где G и G <sub>B</sub> — нижние и верхние пределы диапазона измерения
Пределы допускаемой относительной погрешности ИК давления, %	$\pm 2$
Пределы допускаемой относительной погрешности ИК объема и массы теплоносителя, %	$\pm 2$
Пределы допускаемой абсолютной погрешности при измерении времени, с / сут.	$\pm 2$
Дата поверки 2015 год (интервал между поверками 4 года), класс допускаемой приведенной погрешности теплосчетчика «С» (не более 2 %), класс защиты по ГОСТ 14254.	

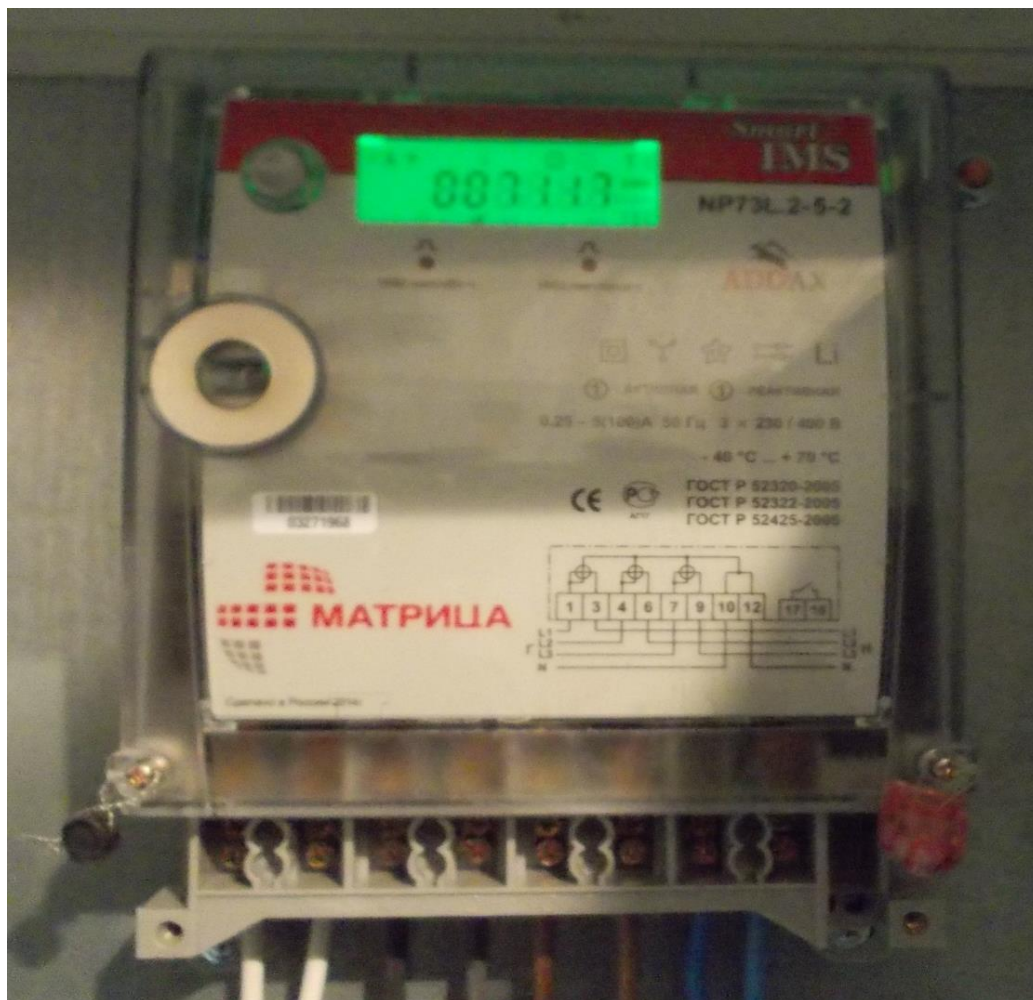


Рисунок П6.2 – Фотография электрического счетчика

Таблица П6.2

Основные технические характеристики Smart IMS NP73L.2-5-2

Класс точности по активной энергии	1,0
по реактивной энергии	1,0
Чувствительность	0,02 А
Мощность, потребляемая цепями напряжения активная, не более	1,0 Вт
полная, не более	9,0 ВА
Мощность, потребляемая цепями тока	0,08 ВА
Средний срок службы, не менее	20 лет
Средняя наработка до отказа счетчика, при вероятности отказа 0,8, не менее	96 000 часов
Межповерочный интервал	10 лет
Едовлетворяет требованиям ГОСТ Р 52320-2005 (МЭК 62053-11:2005) ГОСТ Р 52323-2005 (МЭК 62053-22:2005), ГОСТ Р 52425-2005 (МЭК 62053-23:2005).	

## ПРИЛОЖЕНИЕ 7

## ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИЛОГО ЗДАНИЯ

## Расчет согласно СП 50.13330.2012 [74, 76 и 96].

Под первым этажом расположены магазины (общественное назначение) с средней температурой воздуха 20 °С, площадь 780,00 м<sup>2</sup>.

С первого по девятые этажи жилые помещения с средней температурой воздуха 20 °С, жилая площадь 2133,4 м<sup>2</sup>.

На десятом этаже отапливаемое техническое помещение с средней температурой воздуха 20 °С, площадь 785,60 м<sup>2</sup>.

## 7.1. Расчет приведенного сопротивление теплопередачи

## 7.1.1. Расчет приведенного сопротивление теплопередачи стен

Состав стены представлен в таблице П7.1.

Таблица П7.1

Материал слоя	Толщина $\delta_s$ , мм	Теплопроводность $\lambda_s$ , Вт/м °С	Площадь $F_{ст}$ , м <sup>2</sup>
Кирпичная стена	500	0,44	4073,3
Утеплитель минеральная вата	150	0,042	

Расчет условного сопротивления ограждения теплопередаче стены:

$$R_{\text{усл. ст}} = (1/\alpha_{\text{в}}) + \sum (\delta_s/\lambda_s) + (1/\alpha_{\text{н}}) = (1/8,7) + (0,5/0,44) + (0,15/0,042) + (1/23) = 4,86 \text{ м}^2\text{°С /Вт.}$$

Некоторые элементы стеновой конструкции, необходимые для расчета приведенного сопротивления теплопередачи здания, отсутствуют, так как оказывают несущественное влияние. Примыкание к цокольному ограждению утеплено таким образом, что дополнительные тепловые потери не возникают.

Элементы составляющие стеновую конструкцию:

1. Плоский элемент – панели минераловатные;
2. Линейный элемент 1 – примыкание окна к стене;
3. Линейный элемент 2 – примыкание дверей к стене;
4. Линейный элемент 3 – примыкание стен в углах;
5. Точечные – тарельчатый анкер.

Весь фасад здания за исключением ворот и дверей, включая светопроемы, имеет общую площадь 4535,3 м<sup>2</sup>. Суммарная площадь светопроемов 462 м<sup>2</sup>. Площадь поверхности фрагмента ограждающей конструкции для расчета приведенного сопротивления:

$$A=4535,3-462=4073,3 \text{ м}^2.$$

Общая длина оконных откосов 1504 м.

Длина откосов, приходящаяся на 1 м<sup>2</sup> площади фрагмента:

$$l=1504/4073,3=0,37 \text{ м}^{-1}.$$

Весь фасад здания за исключением светопроемов, имеет общую площадь 4093,3 м<sup>2</sup>. Суммарная площадь дверей 20,0 м<sup>2</sup>. Площадь поверхности фрагмента ограждающей конструкции для расчета приведенного сопротивления:

$$A=4093,3-20,0=4073,3 \text{ м}^2.$$

Общая длина примыкания 60 м<sup>2</sup>.

Длина примыкания, приходящаяся на 1 м<sup>2</sup> площади фрагмента:

$$l=60/4073,3=0,015 \text{ м}^{-1}.$$

Общая длина углов 756 м. Общая площадь 4073,3 м<sup>2</sup>.

Длина стен в углах, приходящаяся на 1 м<sup>2</sup> площади фрагмента:

$$l=756/4073,3=0,185 \text{ м}^{-1}.$$

Общее количество анкеров в среднем 20000 шт. Количество, приходящаяся на 1 м<sup>2</sup> площади фрагмента:

$$n=20000/4073,3=5,0 \text{ м}^{-1}.$$

Результаты расчетов сведены в таблицу П7.2.

Таблица П7.2

Элемент конструкции	Удельный геометрический показатель	Удельные потери теплоты	Удельный поток теплоты, обусловленный элементом
Плоский элемент	$a=1 \text{ м}^2/\text{м}^2$	$U=1/R_{\text{усл.ст}}=0,206 \text{ Вт}/\text{м}^2\text{°C}$	$U \times a=0,206 \text{ Вт}/\text{м}^2 \text{°C}$
Линейный элемент 1	$l=0,37 \text{ м}^{-1}$	$\Psi=0,04 \text{ Вт}/\text{м}^2 \text{°C}$ [96]	$l \times \Psi=0,015 \text{ Вт}/\text{м}^2 \text{°C}$
Линейный элемент 2	$l=0,015 \text{ м}^{-1}$	$\Psi=0,04 \text{ Вт}/\text{м}^2 \text{°C}$ [96]	$l \times \Psi=0,0006 \text{ Вт}/\text{м}^2 \text{°C}$
Линейный элемент 3	$l=0,185 \text{ м}^{-1}$	$\Psi=0,04 \text{ Вт}/\text{м}^2 \text{°C}$ [96]	$l \times \Psi=0,0074 \text{ Вт}/\text{м}^2 \text{°C}$
Точечный элемент	$n=5,0 \text{ м}^{-1}$	$\chi=0,003 \text{ Вт}/\text{м}^2 \text{°C}$ [96]	$n \times \chi=0,015 \text{ Вт}/\text{м}^2 \text{°C}$

Приведенное сопротивление теплопередачи стен (формула 2.13):

$$R_{0,ст}^{пр} = 1/(0,206+0,015+0,0006+0,0074+0,015)=4,1 \text{ м}^{20}\text{С /Вт.}$$

Коэффициент теплотехнической однородности:

$$r = R_{0,ст}^{пр} / R_{усл.ст} = 4,1/4,86=0,85.$$

### 7.1.2. Расчет приведенного сопротивление теплопередачи покрытий

Состав покрытий представлен в таблице П7.3.

Таблица П7.3

Материал слоя	Толщина $\delta_s$ , мм	Теплопроводность $\lambda_s$ , Вт/м К	Площадь $F_{пок}$ , м <sup>2</sup>
Железобетонная плита	220	1,92	845
Утеплитель минеральная вата	250	0,042	

Расчетное сопротивление ограждения теплопередаче покрытий:

$$R_{усл. пок} = (1/\alpha_в) + \sum (\delta_s/\lambda_s) + (1/\alpha_н) = (1/8,7) + (0,22/1,92) + (0,25/0,042) + (1/23) = 6,22 \text{ м}^{20}\text{С /Вт.}$$

Элементы, составляющие конструкцию:

1. Плоский элемент – утеплитель;
2. Линейный элемент – примыкание покрытия к стенам.

Площадь поверхности фрагмента покрытия 845 м<sup>2</sup>.

Суммарная протяжённость примыкания покрытия к стенам 250 м.

Длина примыкания покрытия к стенам, приходящаяся на 1 м<sup>2</sup> площади фрагмента:

$$l = 250/845 = 0,296 \text{ м}^{-1}.$$

Результаты расчетов сведены в таблицу П7.4.

Таблица П7.4

Элемент конструкции	Удельный геометрический показатель	Удельные потери теплоты	Удельный поток теплоты, обусловленный элементом
Плоский элемент	$a = 1 \text{ м}^2/\text{м}^2$	$U = 1/R_{усл. пок} = 0,16 \text{ Вт}/\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{С}$	$U \times a = 0,16 \text{ Вт}/\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{С}$
Линейный элемент 1	$l = 0,296 \text{ м}^{-1}$	$\Psi = 0,04 \text{ Вт}/\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{С}$ [96]	$l \times \Psi = 0,012 \text{ Вт}/\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{С}$

Приведенное сопротивление теплопередачи покрытий:

$$R_{0,пок}^{пр} = 1/(0,16+0,012)=5,81 \text{ м}^2\text{С /Вт.}$$

Коэффициент теплотехнической однородности:

$$r = R_{0,пок}^{пр} / R_{усл.пок} = 5,81/6,22=0,93.$$

### 7.1.3. Приведенное сопротивление теплопередачи полов

В конструкции пола принята железобетонные многослойные сборные плиты толщиной 220 мм (теплопроводность 1,92 Вт/м<sup>0</sup>С), так как  $\lambda > 1,2$  Вт/мК, то согласно СП 50.13330.2012  $R_{пол}$ : 2,1 – для I зоны; 4,3 – для II зоны; 8,6 – для III зоны; 14,2 – для IV зоны.

Результаты расчета сведены в таблицу П7.5.

Таблица П7.5

Зоны	Площадь $A_{пол}, \text{ м}^2$	Сопротивление теплопередачи пола $R_{о. пол}, \text{ м}^2\text{С/Вт}$
I	450,0	2,1
II	220,0	4,3
III	100,0	8,6
IV	43,0	14,2
ИТОГО:	813,0	$813/((450/2,1)+(220/4,3)+(100/8,6)+(43/14,2))=2,9$

### 7.2. Расчет удельной теплозащитной характеристики здания

Коэффициент учитывающий отличие температур у конструкции:

- стен, окон, ворот, покрытий и пола при 20 °С,  $n=(20+8,1)/(20+8,1)=1$ .

Удельная теплозащитная характеристика здания:

$$k_{об} = \frac{1}{V_{от}} \cdot \sum \left( n \cdot \frac{A_{ф,i}}{R_{0,i}^{пр}} \right) =$$

$$= \frac{1}{23593,58} \cdot \left( \frac{1 \cdot 4073,3}{4,1} + \frac{1 \cdot 845}{5,81} + \frac{1 \cdot 462}{0,65} + \frac{1 \cdot 20}{1,14} + \frac{1 \cdot 813}{2,9} \right) = 0,093 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{°С}).$$

### 7.3. Расчет общего коэффициента теплопередачи здания

Общий коэффициент теплопередачи здания:

$$K_{\text{общ}}=k_{\text{об}}/K_{\text{комп}}=0,093/0,2=0,465 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}).$$

#### 7.4. Расчет удельной вентиляционной характеристики здания

Удельная вентиляционная характеристика здания:

$$k_{\text{вент}} = 0,28cn_{\text{в}}\beta_{\text{в}}\rho_{\text{в}}^{\text{вент}}(1-k_{\text{эф}}),$$

где  $c$  - удельная теплоемкость воздуха, равная 1 кДж/(кг·°C);  $\beta_{\text{в}}$  - коэффициент снижения объема воздуха в здании, учитывающий наличие внутренних ограждающих конструкций. При отсутствии данных принимать  $\beta_{\text{в}} = 0,85$ ;  $\rho_{\text{в}}^{\text{вент}}$  - средняя плотность приточного воздуха за отопительный период, кг/м<sup>3</sup> :

$$\rho_{\text{в}}^{\text{вент}} = 353/(273-8,8)=1,33 \text{ кг}/\text{м}^3$$

где  $n_{\text{в}}$  - средняя кратность воздухообмена здания за отопительный период, ч<sup>-1</sup> ;

$k_{\text{эф}}$  - коэффициент эффективности рекуператора (0).

Средняя кратность воздухообмена здания за отопительный период по проектным данным:

$$n_{\text{в}} = 0,65 \text{ , ч}^{-1} .$$

$$k_{\text{вент}}=0,28 \times 1 \times 0,65 \times 0,85 \times 1,33 \times 1=0,206 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}).$$

#### 7.5. Расчет удельной характеристики бытовых тепловыделений здания

Удельная характеристика бытовых тепловыделений здания:

$$k_{\text{быт}} = \frac{q_{\text{быт}}A_{\text{ж}}}{V_{\text{от}}(t_{\text{в}} - t_{\text{от}})},$$

где  $A_{\text{ж}}= 2133,4 \text{ м}^2$ ;

$q_{\text{быт}} - 16,64 \text{ Вт}/\text{м}^2$ ,

$$k_{\text{быт}}=(16,64 \times 2133,4)/(23593,58 \times (20+8,8))=0,052 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}).$$

За ГСОП принято 7113,6 °Ссут.

7.6. Расчет удельной характеристики тепlopоступлений в здание от солнечной радиации

Удельная характеристика тепlopоступлений в здание от солнечной радиации:

$$k_{\text{рад}} = \frac{11,6 Q_{\text{рад}}^{\text{год}}}{(V_{\text{от}} \Gamma \text{СОП})},$$

где  $Q_{\text{рад}}^{\text{год}}$  - тепlopоступления через окна от солнечной радиации в течение отопительного периода, МДж/год, для четырех фасадов зданий, ориентированных по четырем направлениям, принимая для окон, выходящих на север  $I = 961$  МДж/(м<sup>2</sup>·год), на запад  $I = 1094$  МДж/(м<sup>2</sup>·год), на юг  $I = 2144$  МДж/(м<sup>2</sup>·год), на восток  $I = 1924$  МДж/(м<sup>2</sup>·год) [104];  $\tau_{\text{ок}} = 0,75$  – коэффициент затенения;  $\tau_{2\text{ок}} = 0,83$  – коэффициент относительного пропуска солнечной радиации:

$$Q_{\text{рад}}^{\text{год}} = \tau_{\text{ок}} \tau_{2\text{ок}} (A_{\text{ок1}} I_1 + A_{\text{ок2}} I_2 + A_{\text{ок3}} I_3 + A_{\text{ок4}} I_4) + \tau_{1\text{фон}} \tau_{2\text{фон}} A_{\text{фон}} I_{\text{гор}},$$

$$Q_{\text{рад}}^{\text{год}} = 0,75 \cdot 0,83 \cdot (162 \cdot 2144 + 69 \cdot 1094 + 162 \cdot 961 + 69 \cdot 1924) = 711252 \text{ МДж/год.}$$

$$k_{\text{рад}} = (11,6 \times 711252) / (23593,58 \times 7113,6) = 0,05 \text{ Вт/(м}^3 \cdot \text{°C)}.$$

7.7. Расчет удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания

Удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания с учетом  $\zeta = 0,95$  (в двухтрубной системе отопления с термостатами и с центральным авторегулированием на вводе):

$$q_{\text{от}}^{\text{р}} = [k_{\text{об}} + k_{\text{вент}} - (k_{\text{быт}} + k_{\text{рад}}) \nu \zeta] (1 - \xi) \beta_h =$$

$$= (0,093 + 0,206 - (0,052 + 0,05) \times 0,853 \times 0,95) \times (1 - 0) \times 1,13 = 0,243 \text{ Вт/(м}^3 \cdot \text{°C)}.$$

Удельная расчетная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания соответствует проектным данным и классу энергосбережения «В» - высокий.



## Расчет по предложенной модели теплового потребления зданием

### 7.8. Расчет средних посуточных значений расходов тепловой энергии

Для примера произведем расчет для 16 января 2017 года и средней температуры окружающего воздуха  $-18,2$  °С. Для последующих суток расчет произведен на ЭВМ.

Тепловые поступления от солнечной радиации:

$$Q_s = (711252/264 \times 24 \times 3600) \times 0,85 \times 0,95 = 25179,57 \text{ Вт.}$$

Бытовые тепловыделения в здании:

$$Q_T = 16,64 \times 2133,4 \times 0,85 \times 0,95 = 28666,07 \text{ Вт.}$$

Тепловые потери через ограждающие конструкции здания:

$$Q_{ст} = 4073,3 \times (20 + 18,2) / 4,1 = 37951,23 \text{ Вт;}$$

$$Q_{ч} = 845 \times (20 + 18,2) / 5,81 = 5555,77 \text{ Вт;}$$

$$Q_{ок} = 462 \times (20 + 18,2) / 0,65 = 27151,38 \text{ Вт;}$$

$$Q_{дв} = 20 \times (20 + 18,2) / 1,14 = 670,18 \text{ Вт;}$$

$$Q_{пол} = 813 \times (20 + 18,2) / 2,9 = 10709,17 \text{ Вт;}$$

$$Q_k^{от} = 82037,73 \text{ Вт.}$$

Тепловые потери за счет инфильтрации и вентиляции:

$$Q_{инф} = 0,28 \times 1 \times 0,65 \times 0,85 \times 1,33 \times 23593,58 \times (20 + 18,2) \times (1 - 0) = 185438,18 \text{ Вт.}$$

Тепловые потери трубопроводной системой «отопление, вентиляция и кондиционирование», проходящей через неотапливаемые помещения в данном здании отсутствуют.

Расход отпускаемой тепловой энергии зданию на отопление, вентиляцию и кондиционирование:

$$Q_{от} = 82037,73 + 185438,18 - (25179,57 + 28666,07) = 213630,27 \text{ Вт} = 4,41 \text{ Гкал/сут.}$$

7.9 Расчет за отопительный период 2016 года при фактических условиях  $z_{от} = 264$  сут/год, ГСОП = 7022,4 °Ссут,  $t_n = -48$  °С,  $t_B = 20$  °С,  $t_{от} = -6,6$  °С.

Тепловые поступления от солнечной радиации:

$$Q_s=(711252/264 \times 24 \times 3600) \times 0,85 \times 0,95=25179,57 \text{ Вт.}$$

Бытовые тепловыделения в здании:

$$Q_T=16,64 \times 2133,4 \times 0,85 \times 0,95=28666,07 \text{ Вт.}$$

Тепловые потери через ограждающие конструкции здания:

$$Q_{ст}=4073,3 \times (20+6,6)/4,1=26426,78 \text{ Вт;}$$

$$Q_{ч}=845 \times (20+6,6)/5,81=3868,67 \text{ Вт;}$$

$$Q_{ок}=462 \times (20+6,6)/0,65=18906,46 \text{ Вт;}$$

$$Q_{дв}=20 \times (20+6,6)/1,14=466,67 \text{ Вт;}$$

$$Q_{пол}=813 \times (20+6,6)/2,9=7457,17 \text{ Вт;}$$

$$Q_k^{ог}=57125,75 \text{ Вт.}$$

Тепловые потери за счет инфильтрации и вентиляции:

$$Q_{инф}=0,28 \times 1 \times 0,65 \times 0,85 \times 1,33 \times 23593,58 \times (20+6,6)=129127,11 \text{ Вт.}$$

Тепловые потери трубопроводной системой «отопление, вентиляция и кондиционирование», проходящей через неотапливаемые помещения в данном здании отсутствуют.

Расход отпускаемой тепловой энергии зданию на отопление, вентиляцию и кондиционирование:

$$Q_{от}=57125,75+129127,11-(25179,57+28666,07)=132407,22 \text{ Вт}=721,83 \text{ Гкал/год.}$$

#### 7.10 Расчет приведенных дисконтированных затрат

Основные экономические характеристики здания за базовый 2016 год приведены в таблице П7.6 [103].

Таблица П7.6

Экономические характеристики здания

Наименование показателя	Обозначение	Размерность	Значение
1	2	3	4
Стоимость 1 м <sup>3</sup> утепляющего теплоизоляционного материала	Ц <sub>ут</sub>	руб./м <sup>3</sup>	1210

## Окончание таблицы П7.6

1	2	3	4
Стоимость 1 м <sup>2</sup> работ по утеплению ограждающих конструкций стен здания теплоизоляционным материалом	$C_{\text{раб}}$	руб./м <sup>2</sup>	1752
Средняя годовая стоимость электрической энергии потребления перекачивающими насосами	$C_{\text{н}}^{\text{эл}}$	р./кВт·ч	2,63
Средняя годовая стоимость тепловой энергии	$C_{\text{т}}$	руб./Гкал	1792,57
Расчетная норма дисконта	$r$	-	0,1
Норма отчислений на амортизацию и обслуживание	$H$	-	0,07
Суммарные дисконтированные затраты по утеплению ограждающих конструкций стен здания	$I_{\text{ст}}$	руб.	3182600

**ПРИЛОЖЕНИЕ 8****РАСЧЕТ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЗДАНИЯ С АДМИНИСТРАТИВНО-БЫТОВЫМИ ПОМЕЩЕНИЯМИ ПО ПРЕДЛОЖЕННОЙ РАЗРАБОТКЕ****Общая характеристика объекта**

Общая характеристика объекта представлена на основании [105-107].

Функциональное назначение здания – производственное с административно-бытовыми помещениями (рисунок П8.1).

Наружные стены выполнены из кирпича обыкновенного глиняного на цементнопесчаном растворе толщиной 640 мм (теплопроводность 0,7 Вт/м·°С) с устройством фасадной теплоизоляции минераловатными плитами «Rockwool «Фасад Баттс» толщиной 50 и 90 мм (теплопроводность 0,04 Вт/м·°С). С внутренней стороны стены оштукатурены цементно-песчаным раствором толщиной 20 мм.

Чердачное перекрытие: пустотные плиты перекрытия с минераловатными плитами толщиной 60 мм (теплопроводность 0,04 Вт/м·°С) и пароизоляцией. Сверху выполнено утепление из керамзита плотностью 600 кг/м<sup>3</sup> толщиной 180 мм. По утеплителю выполняется цементно-песчаная стяжка толщиной 50 мм.

Оконные блоки и витражи выполнены из ПВХ-профилей с двухкамерными стеклопакетами для административно-бытовых помещений и с однокамерными – для помещений производственного назначения.

Полы здания – бетонные и предусмотрены непосредственно по грунту без дополнительной теплоизоляции.

Входные двери – металлические, утепленные и из ПВХ-профилей с двухкамерными стеклопакетами.

Источником теплоснабжения является существующая котельная ООО «Омсктехуглерод». Тепло поступает на площадку в виде теплофикационной воды с расчетным температурным графиком 130/70 °С (Т<sub>1</sub>/Т<sub>2</sub>). Ввод организован в тепловой пункт, где осуществляется коммерческий учет.

Режимы потребления тепла: на отопление - в течение отопительного периода круглосуточно.

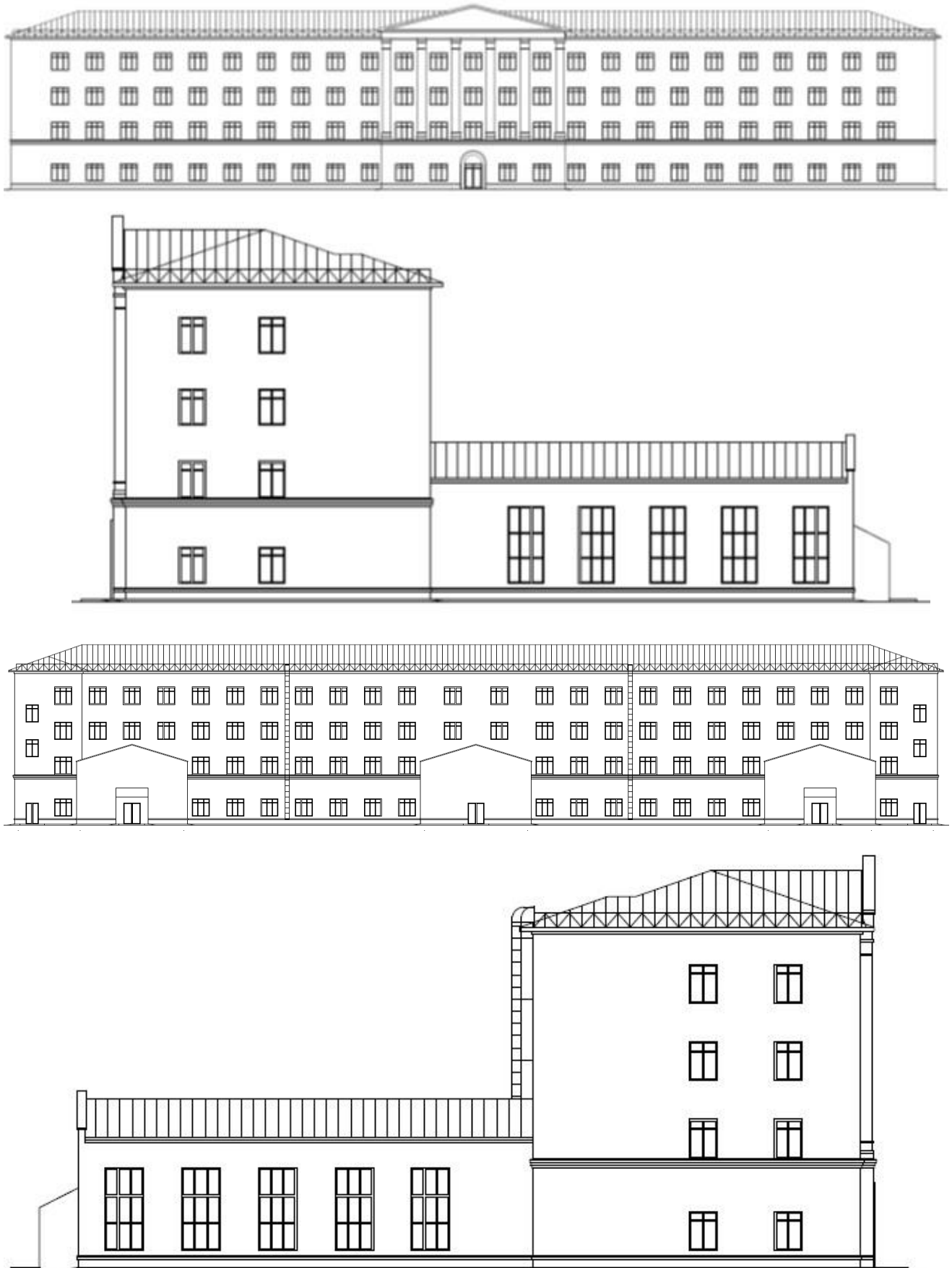


Рисунок П8.1 – Фасады здания

Запроектировано дежурное водяное отопление. Система водяного отопления - двухтрубная, с верхней разводкой магистралей. Теплоносителем является вода с расчетными параметрами  $\tau_1=130$  °С,  $\tau_3=95$  °С,  $\tau_2=70$  °С. Понижение температуры теплоносителя осуществляется в автоматическом тепловом узле с помощью насосов MAGNA. В качестве приборов отопления приняты секционные алюминиевые радиаторы. Регулирование теплоотдачи приборов осуществляется терморегуляторами, постоянного перепада давления автоматическими балансировочными клапанами.

В производственной части здания запроектирована приточно-вытяжная вентиляция с механическим побуждением, в административно-бытовых помещениях – естественная.

Принципиальная схема теплового узла показана на рисунке П8.1. Расчетные графики регулирования отпускаемой тепловой энергии представлены на рисунках П8.2-П8.4. Выбор способа отпуска тепловой энергии регламентируется ФГУП «ФНПЦ «Прогресс» (выбрано количественное регулирование).

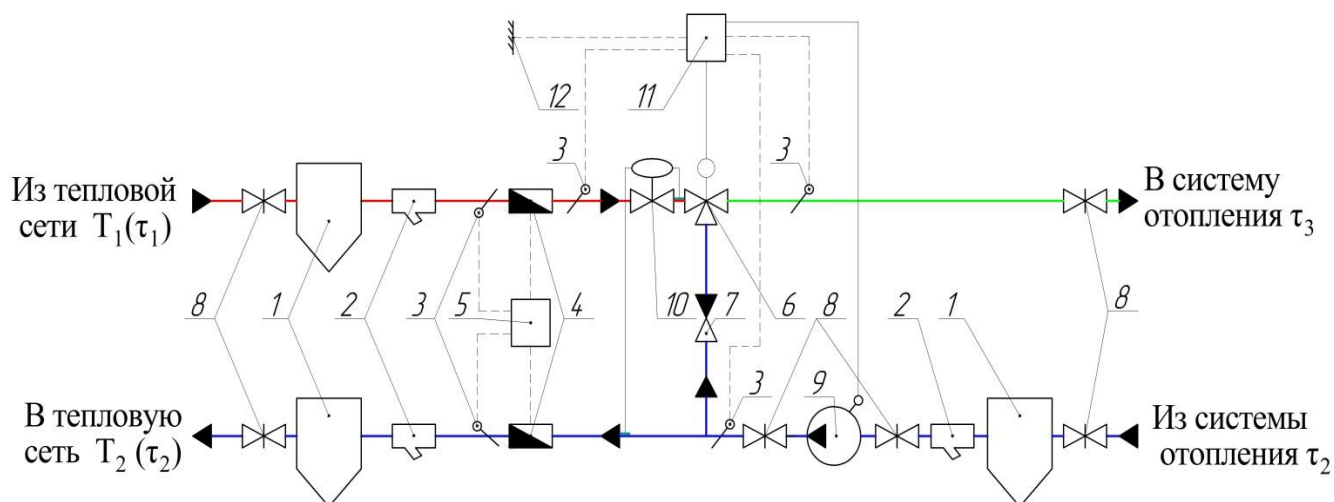


Рисунок П8.1 – Принципиальная схема автоматического теплового узла

- 1 – грязевик; 2 – фильтр; 3 – датчик температуры; 4 – расходомер;
- 5 – тепловычислитель; 6 – трехходовой регулирующий клапан;
- 7 – обратный клапан; 8 – отключающая арматура; 9 – насосная группа;
- 10 – регулятор перепада давления; 11 – регулятор по температурам;
- 12 – датчик температуры наружного воздуха.

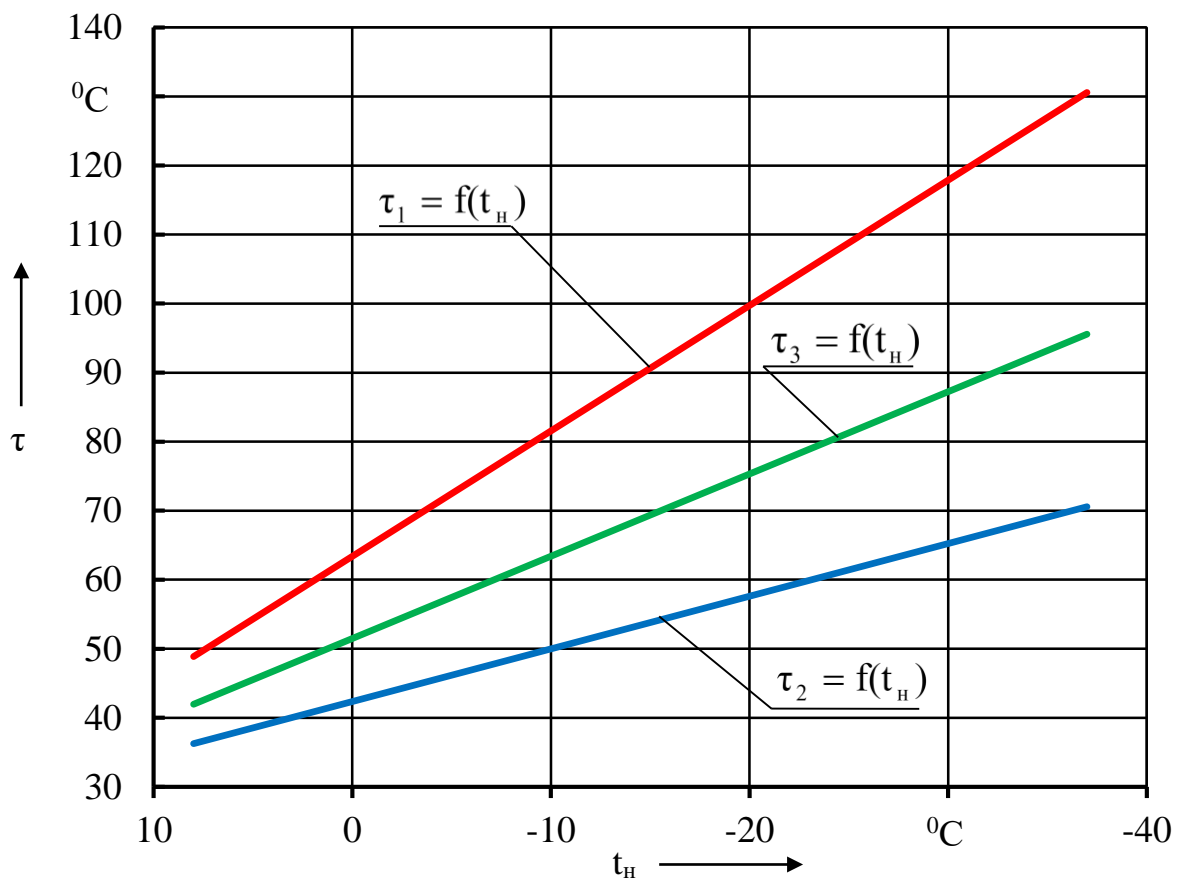


Рисунок П8.2 – Температурный график качественного регулирования

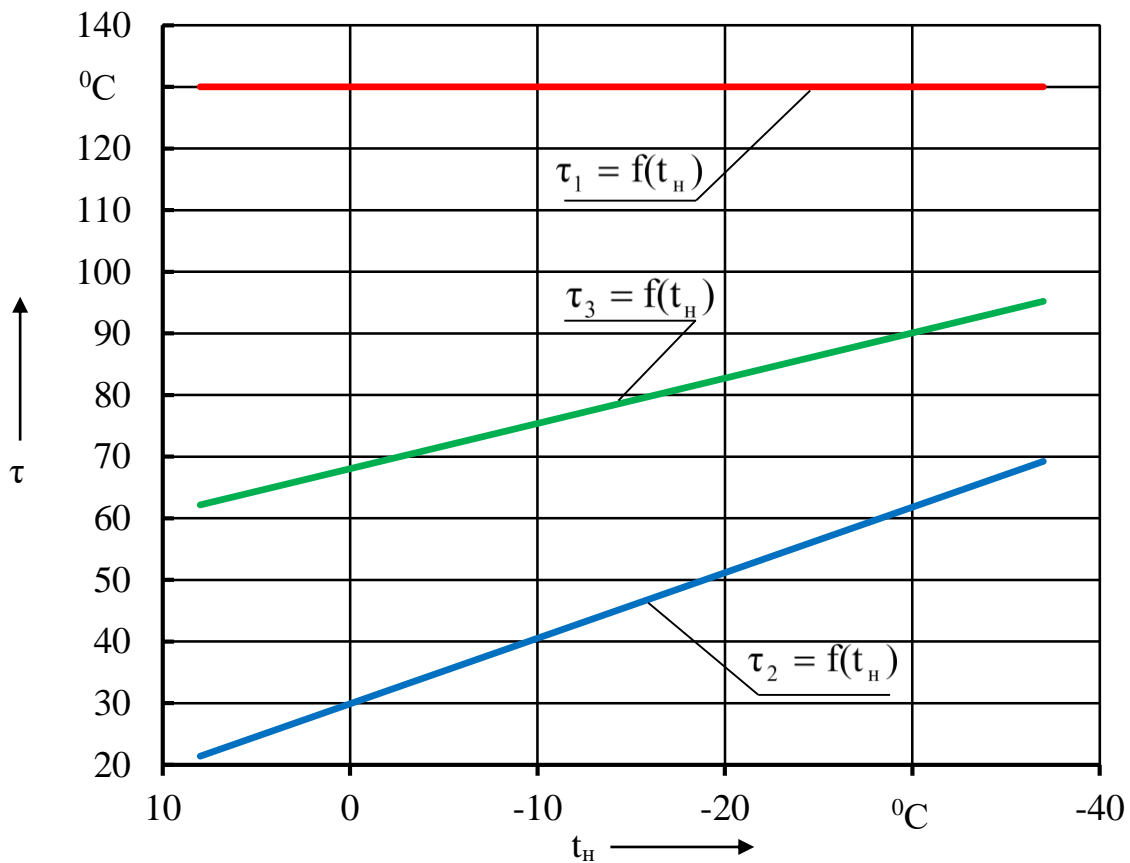


Рисунок П8.3 – Температурный график количественного регулирования

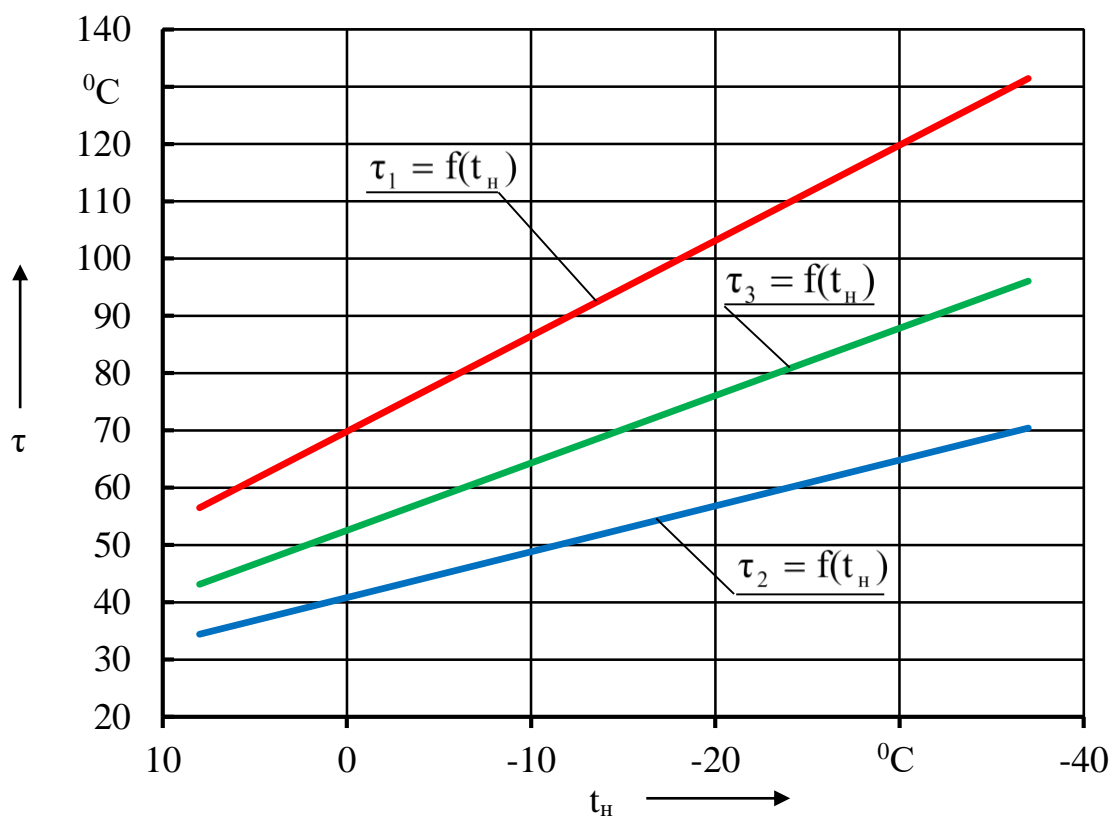


Рисунок П8.4 – Температурный график  
качественно-количественного регулирования

### Теплотехническая характеристика здания

Основные теплотехнические характеристики здания на основании [105], сведены в таблицу П8.1.

Таблица П8.1

#### Теплотехнические характеристики здания

Наименование показателя	Обозначение	Размерность	Значение
1	2	3	4
Расчетная температура наружного воздуха для теплозащиты	$t_n$	°C	- 37
Средняя температура наружного воздуха за отопительный период	$t_{от}$	°C	- 8,1
Продолжительность отопительного периода	$Z_{от}$	сут/год	216



Продолжение таблицы П8.1

1	2	3	4	
Градусо-сутки	ГСОП	°С·сут/год	6070	
Расчетная температура внутреннего воздуха для проектирования	$t_{в}$	°С	20	
Расчетная температура чердака	$t_{черд}$	°С	- 37	
Отапливаемая площадь	$F_{от}$	м <sup>2</sup>	7595,15	
Отапливаемый объем	$V_{от}$	м <sup>3</sup>	28253,42	
Площадь стен до утепления	$F_{ст}$	м <sup>2</sup>	3363,9	
Установленное, условное сопротивление теплопередаче	$R_{уст}$	(м <sup>2</sup> ·°С)/Вт	1,073	
Толщина утепляющего слоя	$\delta_{ут}$	м	0,05	0,09
Площадь стен (с утеплением)	$F_{ст}'$	м <sup>2</sup>	837,4	2526,5
Теплопроводность утепляющего слоя	$\lambda_{ут}$	Вт/м <sup>0</sup> С	0,04	
Условное сопротивление теплопередаче с утеплителем	$R_{усл.ут.}$	(м <sup>2</sup> ·°С)/Вт	2,72	
Приведенное сопротивление теплопередаче	$R_{пр}$	(м <sup>2</sup> ·°С)/Вт	2,67	
Коэффициент неоднородности	$\gamma_0$	-	0,98	
Нормативное значение сопротивления теплопередаче	$R_0^{норм}$	(м <sup>2</sup> ·°С)/Вт	1,93	
Общий коэффициент теплопередачи здания	$K_{общ}$	Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)	0,567	
Кратность воздухообмена здания за отопительный период	$n_{в,}$	ч <sup>-1</sup>	0,42	
Удельные бытовые тепловыделения в здании	$q_{быт}$	Вт/м <sup>2</sup>	2,5	
Удельная теплозащитная характеристика здания	$k_{об}$	Вт/(м <sup>3</sup> ·°С)	0,156	
Удельная вентиляционная характеристика здания	$k_{вент}$	Вт/(м <sup>3</sup> ·°С)	0,133	
Удельная характеристика бытовых тепловыделений	$k_{быт}$	Вт/(м <sup>3</sup> ·°С)	0,023	
Удельная характеристика теплоступлений в здание от солнечной радиации	$k_{рад}$	Вт/(м <sup>3</sup> ·°С)	0,051	

Окончание таблицы П8.1

1	2	3	4
Нормируемая удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания за отопительный период	$q_{от}^{тр}$	Вт/м <sup>3</sup> С	0,382
Расчетная удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания за отопительный период	$q_p$	Вт/м <sup>3</sup> С	0,26
Класс энергосбережения	$KЭ_{ут}$	%; оценка	- 32; (В+) Высокий
Общие тепловые потери здания	$Q_{общ}$	кВтч/год	1189511,91
Расход тепловой энергии на отопление здания за отопительный период	$Q_{от}$	кВтч/год	1070149,14

Все расчетные данные соответствуют проекту [105] и нормативным требованиям СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» [74].

### Экономические характеристики здания

Основные экономические характеристики здания на основании раздела [108], сведены в таблицу П8.2.

Таблица П8.2

### Экономические характеристики зданий

Наименование показателя	Обозначение	Размерность	Значение
1	2	3	4
Общая стоимость теплоизоляционного утеплителя	$C_{ут}$	руб./м <sup>3</sup>	1292,46
Суммарная стоимость работ по утеплению теплоизоляционным материалом стен	$C_{раб}$	руб./м <sup>2</sup>	722,8

Окончание таблицы П8.2

1	2	3	4
Стоимость тепловой энергии (тариф на потребление отопления, вентиляции зданием)	$C_{\text{ТК}}$	руб./Гкал	1369,84
Средняя годовая стоимость электрической энергии потребления перекачивающими насосами	$C_{\text{Н}}^{\text{эл}}$	р./кВт·ч	3,68
Расчетная норма дисконта	$r$	-	0,15
Норма отчислений на амортизацию и обслуживание	$H$	-	0,105
Стоимость электрической энергии	$C_{\text{Н}}^{\text{эл}}$	р./кВт·ч	3,68

**Расчет по предложенной методике технико-экономической оптимизации утепления стен зданий с учетом отпускаемой тепловой энергии**

Расчет по предложенной методике технико-экономической оптимизации утепления стен здания с учетом отпускаемой тепловой энергии представлен в таблице П8.3.

Таблица П8.3

**Расчет по предложенной методике технико-экономической оптимизации утепления стен здания с учетом отпускаемой тепловой энергии**

Наименование показателя	Обозначение	Размерность	Значение
1	2	3	4
Расчетная температура наружного воздуха [76, 107]	$t_{\text{н}}$	°С	- 37
Средняя температура наружного воздуха за отопительный период [76, 107]	$t_{\text{от}}$	°С	- 8,1
Продолжительность отопительного периода [76, 107]	$Z_{\text{от}}$	сут/год	216
Градусо-сутки отопительного периода [107]	ГСОП	°С·сут/год	6070
Расчетная температура внутреннего воздуха [107]	$t_{\text{в}}$	°С	20

Продолжение таблицы П8.3

1	2	3	4
Нормируемый температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающих конструкций стен здания [74, 107]	$\Delta t^H$	$^{\circ}\text{C}$	4,5
Нормируемое значение приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций стен здания [74]	$R_o^{\text{норм}}$	$(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})/\text{Вт}$	1,93
Требуемая удельная теплозащитная характеристика здания	$k_{об}^{\text{тп}}$	$\text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$	0,157
Нормируемая удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания [74, 107]	$q_{от}^{\text{тп}}$	$\text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$	0,382
Коэффициент относительного проникания солнечной радиации для светопропускающих заполнений окон [107, 109]	$\tau_{ок}^1$	-	0,8
Коэффициент, учитывающий затенение светового проема окон непрозрачными элементами заполнения [107, 109]	$\tau_{ок}^2$	-	0,74
Площадь j-го светопроема здания ориентированного по сторонам света окон [107]	$A_j^{\text{ок}}$	$\text{м}^2$	Юг – 378,18; Север – 294,14; Запад – 81,42; Восток – 81,42.
Величина солнечной радиации j-от поверхности окон ориентированная по направлениям света [107, 109]	$I_j^{\text{ок}}$	$\text{Вт}/\text{м}^2$	Юг – 185,3; Север – 45,3; Запад – 22,44; Восток – 22,44.
Коэффициент, учитывающий регулирование теплоступлений за счет тепловой инерции ограждающих конструкций здания [74, 107]	$\nu$	-	0,827

Продолжение таблицы П8.3

1	2	3	4
Коэффициент, учитывающий эффективность автоматического регулирования отпуска и потребления теплоты в системе «отопление, вентиляция и кондиционирование» [74, 107]	$\zeta$	-	0,95
Тепловые поступления от солнечной радиации	$Q_s$	Вт	40490
Удельная величина бытовых тепловыделений [74, 107]	$q_T$	Вт/м <sup>2</sup>	2,5
Отапливаемая площадь здания	$F_{от}$	м <sup>2</sup>	7595,15
Бытовые тепловыделения в здании	$Q_T$	Вт	14917,824
Средняя удельная теплоёмкость воздуха [107]	$c_B$	Дж/кг·°С	1000
Кратность воздухообмена здания [107]	$\eta_B$	с <sup>-1</sup>	0,42
Коэффициент снижения объема воздуха в здании, учитывающий наличие внутренних ограждающих конструкций [107]	$\beta_V$	-	0,85
Средняя плотность воздуха [107]	$\rho_B^{вент}$	кг/м <sup>3</sup>	1,33
Отапливаемый объём здания [107]	$V_{от}$	м <sup>3</sup>	28253,42
Коэффициент эффективности применяемого рекуператора при утилизации вентилируемого воздуха [107]	$k_{эф}$	-	0
Тепловые потери за счет инфильтрации и вентиляции	$Q_{инф}$	Вт	105549
Площадь поверхности трубопроводной системы «отопление, вентиляцию и кондиционирование», проходящей через неотапливаемые помещения [107]	$F_{тс}$	м <sup>2</sup>	64

Продолжение таблицы П8.3

1	2	3	4
Средний суммарный коэффициент теплоотдачи внешней поверхности трубопроводной системы «отопление, вентиляция и кондиционирование», проходящей через неотапливаемые помещения [97]	$\alpha_{тс}$	Вт/(м <sup>2</sup> ·°C)	8,7
Средняя температура наружной поверхности трубопроводной системы «отопление, вентиляция и кондиционирование», проходящей через неотапливаемые помещения	$t_{тс}$	°C	45
Средняя температура окружающего воздуха неотапливаемых помещений здания [107]	$t_{окр}$	°C	-8,1
Тепловые потери трубопроводной системой «отопление, вентиляция и кондиционирование», проходящей через неотапливаемые помещения	$Q_{тс}$	Вт	29566,08
Коэффициент, зависящий от положения наружной поверхности ограждающей конструкции здания по отношению к наружному воздуху [107]	$\eta_k$	-	1
Площадь чердачных перекрытий [107]	$F_{пок}$	м <sup>2</sup>	2558,19
Приведенное сопротивление теплопередаче чердачных перекрытий (покрытий) [107]	$R_{пок}$	(м <sup>2</sup> ·°C)/Вт	2,86
Тепловые потери через чердачные перекрытия	$Q_{ч}$	Вт	25134,66
Площадь окон [107]	$F_{ок}$	м <sup>2</sup>	835,16

Продолжение таблицы П8.3

1	2	3	4
Приведенное сопротивление теплопередаче окон [107]	$R_{ок}$	$(м^2 \cdot ^\circ C)/Вт$	0,54
Тепловые потери через оконные блоки	$Q_{ок}$	Вт	43459,252
Площадь дверей и ворот [107]	$F_{дв}$	$м^2$	25,02
Приведенное сопротивление теплопередаче дверей и ворот [107]	$R_{дв}$	$(м^2 \cdot ^\circ C)/Вт$	0,87
Тепловые потери через наружные двери и ворота	$Q_{дв}$	Вт	808,117
Площадь пола [107]	$F_{пол}$	$м^2$	2609,97
Приведенное сопротивление теплопередаче пола [107]	$R_{пол}$	$(м^2 \cdot ^\circ C)/Вт$	3,8
Тепловые потери через пол	$Q_{пол}$	Вт	19300,04
Удельная вентиляционная характеристика здания [107]	$k_{вент}$	$Вт/(м^3 \cdot ^\circ C)$	0,133
Удельная характеристика бытовых тепловыделений [107]	$k_{быт}$	$Вт/(м^3 \cdot ^\circ C)$	0,023
Удельная характеристика тепlopоступлений в здание от солнечной радиации [107]	$k_{рад}$	$Вт/(м^3 \cdot ^\circ C)$	0,051
Коэффициент запаса [106]	$k$	-	1,2
Напор, развиваемый насосом [106]	$H_n$	м	18
Коэффициент полезного действия передачи [106]	$\eta_p$	-	0,9
Коэффициент полезного действия насоса [106]	$\eta_p$	-	0,9
Срок амортизационных инвестиций (срок полезного использования объекта)	$T_{ам}$	год	150
Средняя заработная плата рабочих	$C_{ср}$	мес.	30000
Численность рабочих	$N_{чел}$	-	1
Количество смен	$n_{см}$	-	1
Стоимость оборудования на отопление [108]	$K_{об}$	р.	905301
Стоимость условий присоединения систем отопления [108]	$K_{пр}$	р.	0

Продолжение таблицы П8.3

1	2	3	4
Продолжительность работы насоса в течение суток	$Z_{\text{н}}$	ч	24
Число рабочих дней в году насосного оборудования	$N_{\text{н}}^{\text{раб}}$	-	216
Показатель долговечности при тепловом старении [100]	$K_{\lambda}$	Вт/м·°С·год	0,0316
Энергия активации процесса разрушения, определенная на основании лабораторных испытаний [100]	$E_{\text{а}}$	Дж/моль	$10^5$
Эквивалентная эксплуатационная температура в слое теплоизоляционного материала [101]	$T_{\text{экв}}$	К	285,9
Температура при изотермических испытаниях	$T_{\text{и}}$	К	323,5
Количество расчетных слоев в слое теплоизоляционного материала	$n_{\text{с}}$	-	1
Относительная нагрузка системы отопления	$\bar{Q}_0$	-	0,493
Расчетный температурный перепад в сети	$\delta t$	°С	60
Расчетный температурный напор в нагревательных приборах отопительной системы	$\Delta t$	°С	62,5
Расчетный температурный перепад в отопительной системе	$\Theta$	°С	25
<b>Количественное регулирование отпускаемой тепловой энергии</b>			
Относительный расход воды на систему «отопление, вентиляция и кондиционирование»	$\bar{G}_0$	-	0,314
Текущая температура жидкости в подающем трубопроводе тепловой сети	$\tau_1$	°С	130



Продолжение таблицы П8.3

1	2	3	4
Текущая температура перекачиваемой жидкости в обратном трубопроводе системы «отопление, вентиляция и кондиционирование»	$\tau_2$	$^{\circ}\text{C}$	36
Текущая температура перекачиваемой жидкости в подающем трубопроводе системы «отопление, вентиляция и кондиционирование»	$\tau_3$	$^{\circ}\text{C}$	75
Удельный вес перекачиваемой жидкости	$\gamma$	$\text{H}/\text{M}^3$	9556
Плотность перекачиваемой жидкости	$\rho_{\text{в}}$	$\text{кг}/\text{M}^3$	974,84
Теплоемкость перекачиваемой жидкости	$C_{\text{в}}$	$\text{Дж}/\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C}$	4192,5
Оптимальная величина толщины тепловой изоляции при количественном регулировании тепловой нагрузки	$\delta_{\text{ут}}^{\text{опт}}$	$\text{M}$	0,0792
Коэффициент расхождения осредненности по площади условного сопротивления теплопередаче фрагмента теплозащитной оболочки стен здания, при утеплении его снаружи теплоизоляционным материалом	$\eta$	-	1,0
Площадь стен	$F_{\text{ст}}$	$\text{M}^2$	3370,42
Коэффициент неоднородности	$r_0$	-	0,97612
Приведенное сопротивление теплопередаче стен	$R_{\text{ст}}$	$(\text{M}^2\cdot^{\circ}\text{C})/\text{Вт}$	2,98
Расчетный температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающих конструкций стен здания	$\Delta t_{\text{ут}}^{\text{р}}$	$^{\circ}\text{C}$	1,08

Продолжение таблицы П8.3

1	2	3	4
Тепловые потери через наружные стены	$Q_{ст}$	Вт	31783,53
Удельная теплозащитная характеристика здания	$k_{об}$	Вт/(м <sup>3</sup> · °С)	0,15176
Тепловые потери через ограждающие конструкции	$Q_k^{ог}$	Вт	120486
Расход тепловой энергии здания на отопление, вентиляцию и кондиционирование	$Q_{от}$	Вт	200193
Средняя мощность насосного оборудования	$P_n$	Вт	318,311
Капитальные вложения в теплосберегающие мероприятия по утеплению тепловой изоляцией ограждающих конструкций стен здания	$K_{ст}$	р.	2781150
Норма отчислений в относительных единицах на амортизацию и ежегодное обслуживание системы теплового потребления здания	$H$	1/год	0,105
Амортизационные отчисления на реновацию и стоимость ежегодного обслуживания системой теплового потребления здания	$Z_a + Z_o$	р.	396864
Коэффициент эффективности инвестиций в утепление тепловой изоляцией ограждающих конструкций стен зданий	$E_{ст}$	1/год	0,26192
Приведенные дисконтированные затраты на утепление тепловой изоляцией наружных ограждающих конструкций стен зданий	$I_{ст}$	р./год	2068060
Срок окупаемости инвестиций	$T_{ок}$	год	5,7

Продолжение таблицы П8.3

1	2	3	4
Расчетная удельная характеристика расхода тепловой энергии на теплотребление здания	$q_{от}^p$	Вт/(м <sup>3</sup> ·°С)	0,25487
Класс энергосбережения здания после утепления	КЭ <sub>ут</sub>	%	- 33,28
Коэффициент теплопроводности изоляционного материала, которому соответствует граничное значение нормируемого класса энергосбережения здания	$\lambda_{ут}^{max}$	Вт/(м·°С)	0,0876
Допустимый срок эксплуатации утепляющего материала	$T_d$	год	45,7
Критическое приращение коэффициента теплопроводности материала теплоизоляционного слоя	$\Delta\lambda_{кр}$	Вт/(м·°С)	0,0476
Время до выхода из строя теплоизоляционного слоя по критерию потери теплозащитных свойств	$\tau'$	год	200
<b>Качественное регулирование отпускаемой тепловой энергии</b>			
Относительный расход воды на систему «отопление, вентиляция и кондиционирование»	$\bar{G}_0$	-	1
Текущая температура жидкости в подающем трубопроводе тепловой сети	$\tau_1$	°С	79
Текущая температура перекачиваемой жидкости в обратном трубопроводе системы «отопление, вентиляция и кондиционирование»	$\tau_2$	°С	49
Текущая температура перекачиваемой жидкости в подающем трубопроводе системы «отопление, вентиляция и кондиционирование»	$\tau_3$	°С	62

Продолжение таблицы П8.3

1	2	3	4
Удельный вес перекачиваемой жидкости	$\gamma$	Н/м <sup>3</sup>	9633,6
Плотность перекачиваемой жидкости	$\rho_B$	кг/м <sup>3</sup>	982,72
Теплоемкость перекачиваемой жидкости	$C_B$	Дж/кг·°С	4185
Оптимальная величина толщины тепловой изоляции при количественном регулировании тепловой нагрузки	$\delta_{ут}^{опт}$	м	0,07983
Коэффициент расхождения осредненности по площади условного сопротивления теплопередаче фрагмента теплозащитной оболочки стен здания, при утеплении его снаружи теплоизоляционным материалом	$\eta$	-	1
Площадь стен	$F_{ст}$	м <sup>2</sup>	3370,48
Коэффициент неоднородности	$r_o$	-	0,976
Приведенное сопротивление теплопередаче стен	$R_{ст}$	(м <sup>2</sup> ·°С)/Вт	2,9948
Расчетный температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающих конструкций стен здания	$\Delta t_{ут}^P$	°С	1,08
Тепловые потери через наружные стены	$Q_{ст}$	Вт	31624,84
Удельная теплозащитная характеристика здания	$k_{об}$	Вт/(м <sup>3</sup> ·°С)	0,15156
Тепловые потери через ограждающие конструкции	$Q_k^{ор}$	Вт	120327
Расход тепловой энергии здания на отопление, вентиляцию и кондиционирование	$Q_{от}$	Вт	200034
Средняя мощность насосного оборудования	$P_H$	Вт	1013,81

Продолжение таблицы П8.3

1	2	3	4
Капитальные вложения в теплосберегающие мероприятия по утеплению тепловой изоляцией ограждающих конструкций стен здания	$K_{ст}$	р.	2783940
Норма отчислений в относительных единицах на амортизацию и ежегодное обслуживание системы теплового потребления здания	$H$	1/год	0,105
Амортизационные отчисления на реновацию и стоимость ежегодного обслуживания системой теплового потребления здания	$Z_a + Z_o$	р.	396892
Коэффициент эффективности инвестиций в утепление тепловой изоляцией ограждающих конструкций стен зданий	$E_{ст}$	1/год	0,26213
Приведенные дисконтированные затраты на утепление тепловой изоляцией наружных ограждающих конструкций стен зданий	$I_{ст}$	р./год	2079810
Срок окупаемости инвестиций	$T_{ок}$	год	5,6
Расчетная удельная характеристика расхода тепловой энергии на теплопотребление здания	$q_{от}^p$	Вт/(м <sup>3</sup> ·°С)	0,25465
Класс энергосбережения здания после утепления	$KЭ_{ут}$	%	-33,34
Коэффициент теплопроводности изоляционного материала, которому соответствует граничное значение нормируемого класса энергосбережения здания	$\lambda_{ут}^{max}$	Вт/(м·°С)	0,0882
Допустимый срок эксплуатации утепляющего материала	$T_d$	год	45,3

Продолжение таблицы П8.3

1	2	3	4
Критическое приращение коэффициента теплопроводности материала теплоизоляционного слоя	$\Delta\lambda_{кр}$	Вт/(м·°С)	0,0482
Время до выхода из строя теплоизоляционного слоя по критерию потери теплозащитных свойств	$\tau'$	год	203
<b>Качественно-количественное регулирование отпускаемой тепловой энергии</b>			
Относительный расход воды на систему «отопление, вентиляция и кондиционирование»	$\bar{G}_0$	-	0,792
Текущая температура жидкости в подающем трубопроводе тепловой сети	$\tau_1$	°С	85
Текущая температура перекачиваемой жидкости в обратном трубопроводе системы «отопление, вентиляция и кондиционирование»	$\tau_2$	°С	48
Текущая температура перекачиваемой жидкости в подающем трубопроводе системы «отопление, вентиляция и кондиционирование»	$\tau_3$	°С	63
Удельный вес перекачиваемой жидкости	$\gamma$	Н/м <sup>3</sup>	9628,51
Плотность перекачиваемой жидкости	$\rho_B$	кг/м <sup>3</sup>	982,2
Теплоемкость перекачиваемой жидкости	$C_B$	Дж/кг·°С	4185,5
Оптимальная величина толщины тепловой изоляции при количественном регулировании тепловой нагрузки	$\delta_{ут}^{опт}$	м	0,07964

Продолжение таблицы П8.3

1	2	3	4
Коэффициент расхождения осредненности по площади условного сопротивления теплопередаче фрагмента теплозащитной оболочки стен здания, при утеплении его снаружи теплоизоляционным материалом	$\eta$	-	1
Площадь стен	$F_{ст}$	$m^2$	3370,46
Коэффициент неоднородности	$r_0$	-	0,97603
Приведенное сопротивление теплопередаче стен	$R_{ст}$	$(m^2 \cdot ^\circ C)/Вт$	2,99027
Расчетный температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающих конструкций стен здания	$\Delta t_{ут}^p$	$^\circ C$	1,08013
Тепловые потери через наружные стены	$Q_{ст}$	Вт	31672,7062
Удельная теплозащитная характеристика здания	$k_{об}$	$Вт/(m^3 \cdot ^\circ C)$	0,15162
Тепловые потери через ограждающие конструкции	$Q_k^{ор}$	Вт	120375
Расход тепловой энергии здания на отопление, вентиляцию и кондиционирование	$Q_{от}$	Вт	200082
Средняя мощность насосного оборудования	$P_n$	Вт	802,88
Капитальные вложения в теплосберегающие мероприятия по утеплению тепловой изоляцией ограждающих конструкций стен здания	$K_{ст}$	р.	2783100
Норма отчислений в относительных единицах на амортизацию и ежегодное обслуживание системы теплового потребления здания	$H$	1/год	0,105

1	2	3	4
Амортизационные отчисления на реновацию и стоимость ежегодного обслуживания системой теплового потребления здания	$Z_a + Z_o$	р.	396884
Коэффициент эффективности инвестиций в утепление тепловой изоляцией ограждающих конструкций стен зданий	$E_{ст}$	1/год	0,26207
Приведенные дисконтированные затраты на утепление тепловой изоляцией наружных ограждающих конструкций стен зданий	$I_{ст}$	р./год	2076260*
Срок окупаемости инвестиций	$T_{ок}$	год	5,7
Расчетная удельная характеристика расхода тепловой энергии на теплопотребление здания	$q_{от}^p$	Вт/(м <sup>3</sup> ·°C)	0,2547
Класс энергосбережения здания после утепления	$KЭ_{ут}$	%	- 33,32
Коэффициент теплопроводности изоляционного материала, которому соответствует граничное значение нормируемого класса энергосбережения здания	$\lambda_{ут}^{max}$	Вт/(м·°C)	0,08803
Допустимый срок эксплуатации утепляющего материала	$T_d$	год	45,4
Критическое приращение коэффициента теплопроводности материала теплоизоляционного слоя	$\Delta\lambda_{кр}$	Вт/(м·°C)	0,04803
Время до выхода из строя теплоизоляционного слоя по критерию потери теплозащитных свойств	$\tau'$	год	202