

На правах рукописи



ПЕТРОВ Павел Владимирович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УТЕПЛЕНИЯ
ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ СТЕН ЗДАНИЙ**

2.4.6 – Теоретическая и прикладная теплотехника

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Кулагин Владимир Алексеевич

Официальные оппоненты: **Цветков Николай Александрович**, доктор технических наук, профессор; федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра теплогазоснабжения и инженерных систем в строительстве, заведующий кафедрой;

Финиченко Александра Юрьевна, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения», кафедра теплоэнергетики, заведующая кафедрой.

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет»

Защита состоится 13 марта 2024 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета 24.2.404.12, созданного на базе Сибирского федерального университета, по адресу: 660074, ул. Киренского, 26, корпус №14, ауд. 21-02.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» <http://www.sfu-kras.ru>

Автореферат разослан ___ ____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Сизганова Евгения Юрьевна.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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., 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:

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. 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 теплоэнергетики ФГБОУВО «ОмГУПС» (Омск) и кафедры теплотехники и гидрогазодинамики ФГАОУВО «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 рецензируемых журналах из Перечня ВАК; 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 160 страниц основного текста, 33 рисунка и 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, представлена научная новизна и отражены теоретическая и практическая значимость работы, степень достоверности и апробация результатов.

В первом разделе рассмотрены существующие методы теплового расчета ограждающих конструкций стен зданий при капитальном ремонте, которые основаны на эмпирических закономерностях и не всегда отражают характер теплообмена, часто не учитывают влияние технико-экономического обоснования и регулирования отпускаемой тепловой энергии.

Анализ тепловых режимов зданий показал, 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», регламентировавших поэтапное увеличение требований к приведенному 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 с экономической точки зрения.

Основной задачей остается формирование научно - обоснованного технико-экономического выбора теплосберегающих технологий при капитальном ремонте зданий с соблюдением нормативной базы. Для исследования, применения и выбора теплосберегающих мероприятий в зданиях, необходимо разработать соответствующую тех-

нико-экономическую методику определения оптимальных теплотехнических параметров теплозащиты с учетом влияния отпускаемой тепловой энергии. В результате анализа имеющихся литературных источников определены основные задачи диссертационного исследования.

Во втором разделе предложена методика и решается задача для 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 по оптимизации по всему комплексу определяющих параметров с учетом вложений и эксплуатационных расходов в строительство, реконструкцию, модернизацию и эксплуатацию зданий.

При выборе оптимального варианта используют следующие методы расчета: «экстремальный», «вариантный» и их сочетание; «разностный»; «обобщенной разности».

Для выполнения методологически обоснованного выбора системной модели функционирования теплопотребления зданием в течение отопительного периода рассмотрена функциональная схема как наиболее общая и современная (рисунок 1). 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.

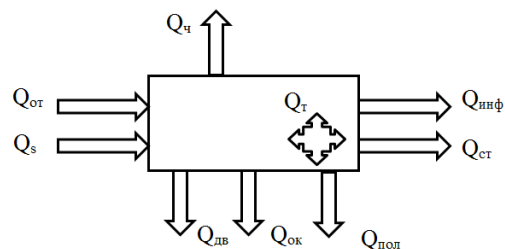


Рисунок 1 – Функциональная схема теплопотребления зданием

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 теплопотребления зданиями.

С учетом приведенных положений по структуре параметров связей теплового режима здания и характера их взаимосвязей определяется математическая формулировка задачи оптимизации параметров.

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

1. Определить функцию цели на основании выбранного критерия оптимально-

сти 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.

Разработанный в разделе 2 материал отражает методику по 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 достоверные 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 теплопотребления зданий на отопление, вентиляцию и кондиционирование 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 теплопотребление 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 теплопотребления 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.

Для выполнения методологически обоснованного выбора системной модели функционирования теплопотребления зданием в течение отопительного периода рассмотрена функциональная схема как наиболее общая и современная (см. рисунок 1).

В третьем разделе предложены алгоритм и программное обеспечение с учётом реального изменения условий отпускаемой тепловой энергии в зависимости от регулирования, конструкции, стоимости и срока службы.

Значение оптимальной толщины утепления тепловой изоляцией, с учетом регулирования отпускаемой тепловой энергии (см. рисунок 2) можно найти исходя из минимума суммарных приведенных дисконтированных затрат на ограждающие конструкции стен здания $I_{ст}$ (руб. /год), при приравнении к нулю частных зависимых от $\delta_{ут}$ производных функции по оптимизируемому параметру:

$$\frac{dI_{ст}}{d\delta_{ут}} = (86400z_{от}\Pi_T + b) \frac{dQ_{ст}}{d\delta_{ут}} + (E_{ст} + H) \frac{dK_{ст}}{d\delta_{ут}} = 0, \quad (1)$$

$$b = \frac{\Pi_{н}^{эл} k H_{н} \gamma Z_{н} N_{н}^{раб}}{\rho_{в} C_{в} (\tau_3 - \tau_2) \eta_{п} \eta_{р}}, \quad (2)$$

где $\delta_{ут}$ – толщина утепляющего слоя теплоизоляционного материала ограждающей конструкции стен здания, м; $z_{от}$ – продолжительность отопительного периода, сут/год; Π_T – средняя годовая стоимость тепловой энергии, руб./Дж; b – комплекс величин, учитывающий регулирование отпускаемой тепловой энергии; $Q_{ст}$ – тепловые потери через наружные стены, Вт; $E_{ст}$ – коэффициент эффективности инвестиций в утепление тепловой изоляцией ограждающих конструкций стен здания, 1/год; H – норма отчислений в относительных единицах на амортизацию и ежегодное обслуживание системы теплового потребления здания, 1/год; $K_{ст}$ – капиталовложение в сберегающие мероприятия по утеплению тепловой изоляцией ограждающих конструкций стен здания, руб.

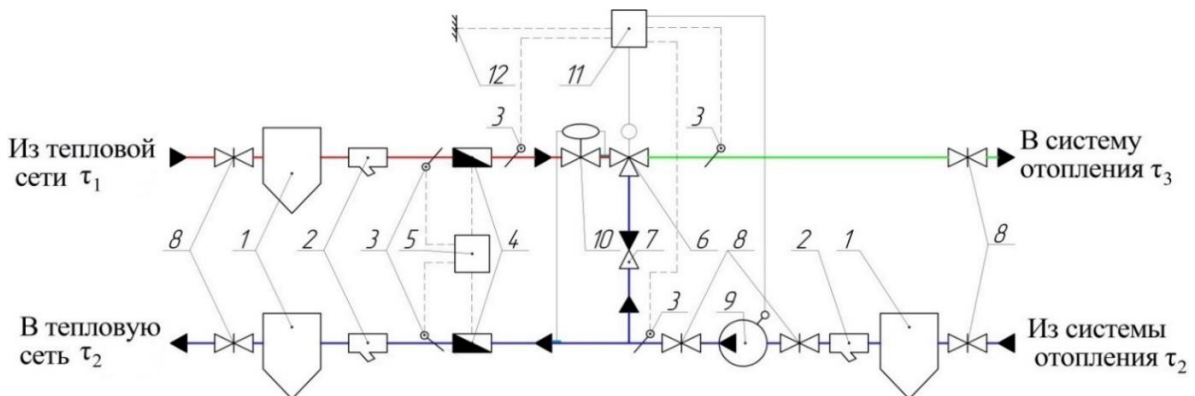


Рисунок 2 – Принципиальная схема узла регулирования отпускаемой тепловой энергии системы «отопление, вентиляция» здания: 1 – грязевик; 2 – фильтр; 3 – датчик температуры; 4 – расходомер; 5 – тепловой вычислитель; 6 – трехходовой регулирующий клапан; 7 – обратный клапан; 8 – отключающая арматура; 9 –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

Решение уравнения (1) можно представить в виде:

$$\delta_{ут}^{опт} = -R_{уст} \lambda_{ут} + \sqrt{\frac{(86400z_{от}\Pi_T + b) \lambda_{ут} (\sum F_{ст, i} (t_{в, i} - t_{от}) n_i)}{r_0 \eta (E_{ст} + H) \Pi_{ут} F_{ст}}}; \quad (3)$$

$$\tau_1 = t_{в} + \Delta t \bar{Q}_0^{0,8} + (\delta \tau - 0,5\Theta) \frac{\bar{Q}_0}{G_0}; \quad (4)$$

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

$$\tau_3 = t_B + \Delta t \bar{Q}_0^{0,8} + 0,5\Theta \frac{\bar{Q}_0}{G_0}; \quad (6)$$

$$\bar{Q}_0 = \left(\frac{t_B - t_{от}}{t_B - t_{нх}} \right), \quad (7)$$

где δ_{yt}^{opt} – оптимальная толщина утепляющего слоя теплоизоляционного материала стен здания, м; $R_{уст}$ – установленное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции стен здания, $(m^2 \cdot ^\circ C)/Вт$; λ_{yt} – теплопроводность утепляющего слоя теплоизоляционного материала ограждающей конструкции стен здания, $Вт/(m \cdot ^\circ C)$; $F_{ст,i}$ – площадь поверхности наружных ограждающих конструкций стен здания i -ой зоны помещения, m^2 ; $t_{в,i}$ – средняя температура внутреннего воздуха i -й зоны помещения здания, $^\circ C$; n_i – коэффициент, зависящей от положения i - от зоны наружной поверхности ограждающей конструкции стен здания по отношению к наружному воздуху; $t_{от}$ – среднесуточная температура наружного воздуха за отопительный период, $^\circ C$; r_0 – коэффициент теплотехнической однородности ограждающей конструкции; η – коэффициент расхода усреднённости по площади условного сопротивления теплопередаче стен здания, при утеплении его снаружи теплоизоляционным материалом; Π_{yt} – стоимость $1 m^3$ утепляющего теплоизоляционного материала, $руб./m^3$; $F_{ст}$ – общая площадь поверхности наружных ограждающих конструкций стен здания после утепления его тепловой изоляцией, m^2 ; $\Pi_n^{эл}$ – средняя годовая стоимость электрической энергии, потребляемой перекачивающим насосом, $руб./(Вт \cdot ч)$; Z_n – продолжительность работы насоса в течение суток, ч; $N_n^{раб}$ – число рабочих дней в году насосного оборудования, $1/год$; k – коэффициент запаса; H_n – напор, развиваемый насосом, м; γ – удельный вес перекачиваемой жидкости, $Н/м^3$; $\eta_{п}$ – коэффициент полезного действия передачи; η_p – коэффициент полезного действия насоса; $\rho_в$ – плотность перекачиваемой жидкости, $кг/м^3$; $C_в$ – теплоемкость перекачиваемой жидкости, $Дж/кг \cdot ^\circ C$; τ_1 – текущая температура жидкости в подающем трубопроводе тепловой сети, $^\circ C$; τ_3 – текущая температура перекачиваемой жидкости в подающем трубопроводе системы «отопление, вентиляция», $^\circ C$; τ_2 – текущая температура перекачиваемой жидкости в обратном трубопроводе системы «отопление, вентиляция и кондиционирование», $^\circ C$; t_B – средняя расчетная температура внутреннего воздуха помещений здания, $^\circ C$; Δt – расчетный температурный напор в нагревательных приборах отопительной системы, $^\circ C$; \bar{Q}_0 – относительная нагрузка системы «отопление, вентиляция и кондиционирование»; $t_{нх}$ – температура наружного воздуха в наиболее холодный период года, $^\circ C$; δt – расчетный температурный перепад в сети, $^\circ C$; Θ – расчетный температурный перепад в отопительной системе, $^\circ C$; \bar{G}_0 – относительный расход воды на систему «отопление, вентиляция»:

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

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

– при качественно-количественном регулировании

$$\bar{G}_0 = \bar{Q}_0^{0,33}. \quad (9)$$

Расход отпускаемой тепловой энергии зданию на систему «отопление, вентиляция» $Q_{от}$ (Вт) можно записать из баланса теплового потребления в виде:

$$Q_{от} = G_B \cdot \rho_B \cdot C_B \cdot (\tau_3 - \tau_2) = Q_{ст} + Q_ч + Q_{ок} + Q_{дв} + Q_{пол} + Q_{инф} + Q_{тс} - Q_s - Q_T, \quad (10)$$

где G_B – расход перекачиваемой жидкости в системе «отопление, вентиляция», м³/с; $Q_ч$ – тепловые потери через чердачные перекрытия (покрытия), Вт; $Q_{ок}$ – тепловые потери через светопрозрачные конструкции (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», проходящей через неотапливаемые помещения, Вт; Q_s – тепловые поступления от солнечной радиации, Вт; Q_T – бытовые тепловыделения в здании, Вт.

Численные исследования влияния изменения толщины теплоизоляционных сэндвич-панелей из минеральных плит на основе базальтового волокна с коэффициентом теплопроводности 0,038 Вт/(м°С) и стоимостью 5090 руб./м³, на технико-экономическую эффективность показали уменьшение затрат $I_{ст}$ при качественном регулировании отпускаемой тепловой энергии с оптимальной толщиной 0,036 м (рисунок 3).

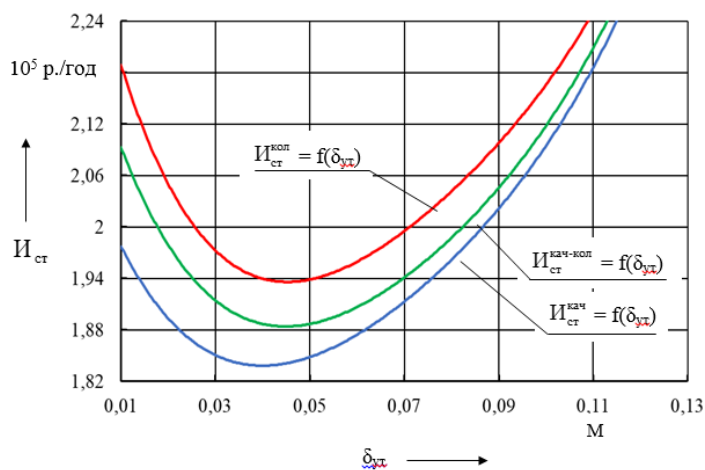


Рисунок 3 – Зависимости $I_{ст}^{кач}$, $I_{ст}^{кач-кол}$ и $I_{ст}^{кол}$ от $\delta_{ут}$: $I_{ст}^{кач}$ – затраты по утеплению наружных ограждающих конструкций стен здания при качественном регулировании отпускаемой тепловой энергии, руб./год; $I_{ст}^{кач-кол}$ – затраты по утеплению наружных ограждающих конструкций стен здания при качественно-количественном регулировании отпускаемой тепловой энергии, руб./год; $I_{ст}^{кол}$ – затраты по утеплению наружных ограждающих конструкций стен здания при количественном регулировании отпускаемой тепловой энергии, руб./год

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

На основании полученных выражений разработаны алгоритм и программа опре-

деления оптимальной толщины утепляющего слоя наружных ограждающих конструкций стен зданий с учетом отпускаемой тепловой энергии (см. рисунок 4).

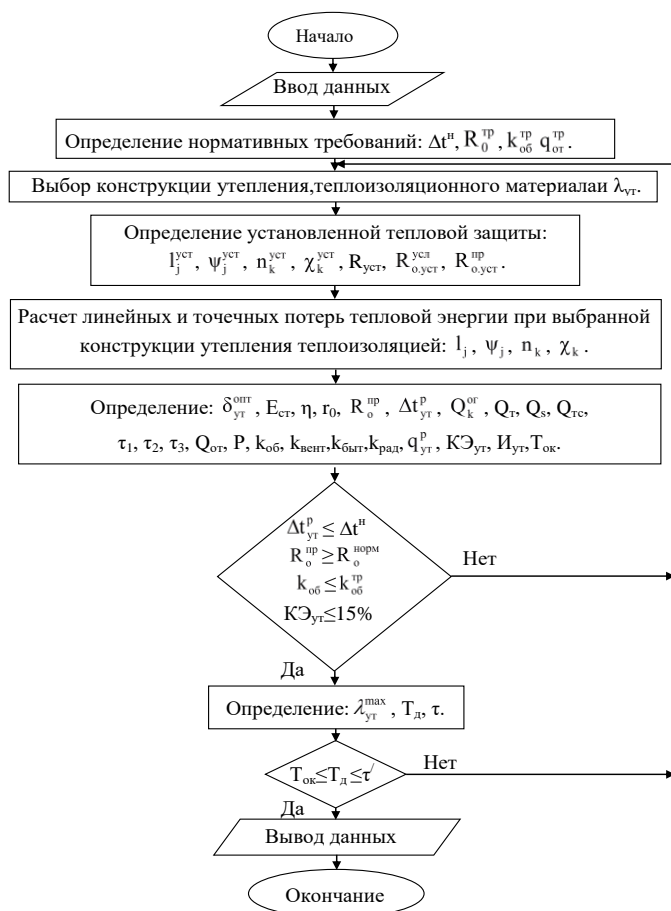


Рисунок 4 – Структурная схема методики технико-экономической оптимизации утепления стен зданий, с учетом отпускаемой тепловой энергии

Разработанная компьютерная программа может быть использована энергоаудиторами и проектировщиками по основным направлениям: прогнозирование теплопотребления 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 теплопотребление 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 теплопотребления здания. Дать оценку сопоставления результатов эксперимента и расчета.

Для нахождения решения задачи определения составлена целевая функция, аргументом которой является искомая. Решение целевой функции производилось методом наискорейшего спуска. Так как целевая функция является линейной относительно одного аргумента, то решение производилось за малое время, вычисления были устойчивы, не наблюдалось ни одного случая «срыва» решения.

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

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.

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», который подразумевает наблюдение и сбор необходимой статистической информации об исследуемом объекте при его нормальном режиме эксплуатации и сопоставление с рассчитанными данными.

Объект, принятый для «пассивного эксперимента», представляет собой многофункциональное жилое здание с собственной крышной котельной, расположенное по адресу Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, город Ханты-Мансийск, ул. Гагарина, д. 141. Это двухподъездное, 11-ти этажное здание постройки 2015 г., количество квартир - 77, отапливаемая площадь – 6,93 тыс. м³. В качестве источника тепла используется крышная котельная. Принципиальная тепловая схема крышной котельной показана на рисунке 5.

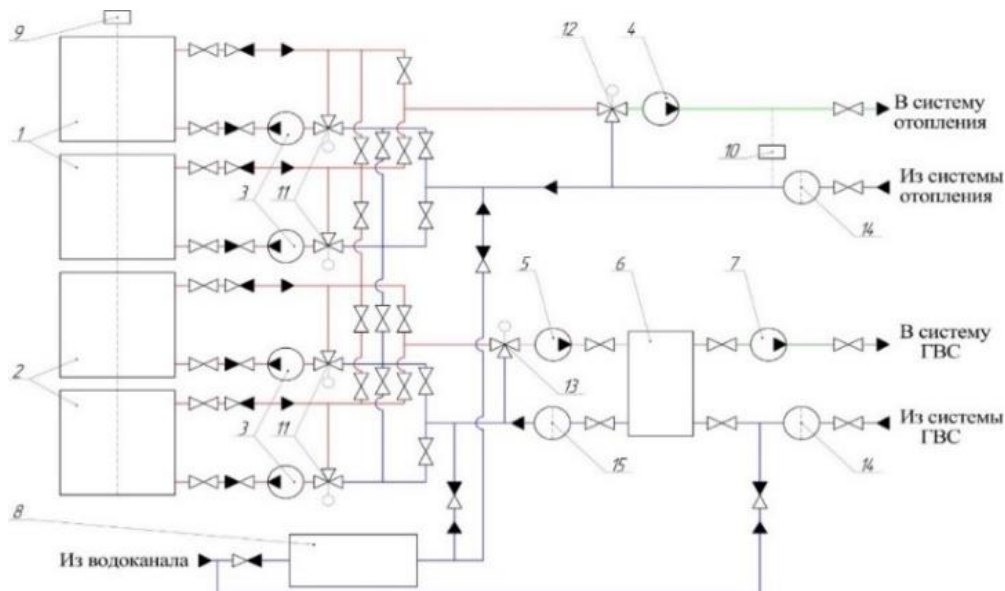


Рисунок 5 – Принципиальная тепловая схема крышной котельной: 1 – водогрейный котел отопительного контура; 2 – водогрейный котел контура ГВС; 3 – циркуляционный насос контура котла; 4 – циркуляционный насос контура системы ОВК; 5 – циркуляционный насос системы ГВС; 6 – теплообменник ГВС; 7 – циркуляционный насос подачи горячей воды; 8 – водоподготовительная установка; 9 – узел учета расхода газа; 10 – узел учета тепловой энергии системы ОВ; 11 – трехходовой клапан регулирования расхода воды контура котлов; 12 – трехходовой клапан регулирования отпуска тепловой энергии в систему ОВ; 13 – трехходовой клапан регулирования контура ГВС; 14, 15 – фильтры.

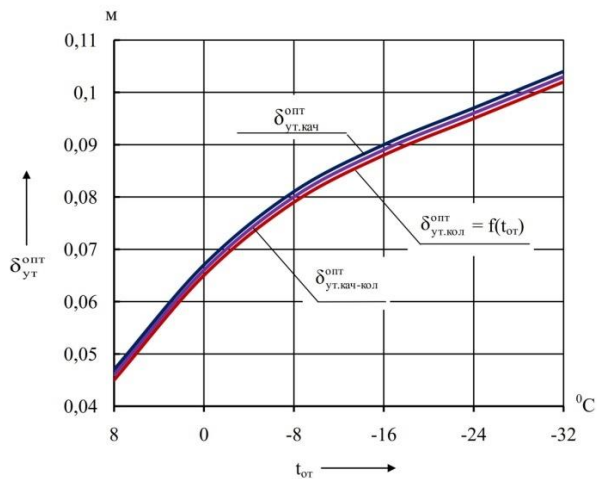


Рисунок 6 – Зависимость $\delta_{\text{ут}}^{\text{опт}}$ от $t_{\text{от}}$

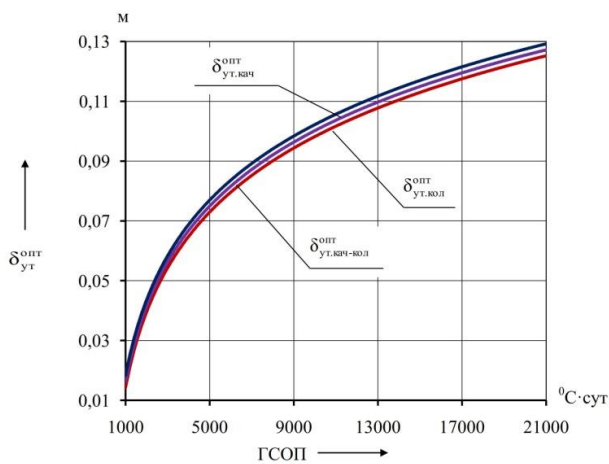


Рисунок 7 – Зависимость $\delta_{\text{ут}}^{\text{опт}}$ от ГСОП

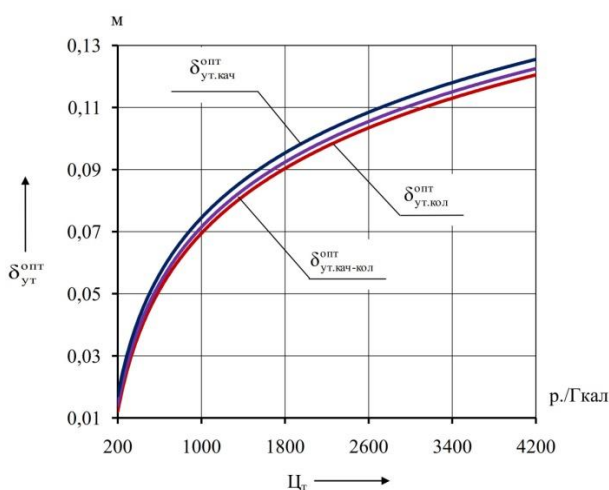


Рисунок 8 – Зависимость $\delta_{\text{ут}}^{\text{опт}}$ от Ц_g

Регулирование теплоносителя, циркулирующего в системе отопления и вентиляции здания, осуществляется качественно-количественным способом, 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.

В качестве параметров климата были приняты фактические среднечасовые значения температур наружного воздуха, полученные при измерении термометром службой эксплуатации.

Сопоставление измеренных и рассчитанных посуточных значений теплопотребления здания показывает их достаточную степень совпадения. Анализ изменения невязки показал, что расхождения между измеренными и рассчитанными значениями не превышают 2 %.

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 %.

Влияние основных факторов на величину оптимальной толщины тепловой изоляции наружных ограждающих конструкций здания $\delta_{\text{ут}}^{\text{опт}}$ с учетом регулирования отпускаемой тепловой энергии, было смоделировано с помощью математической модели и показало следующие зависимости, представленные на рисунках 6–14.

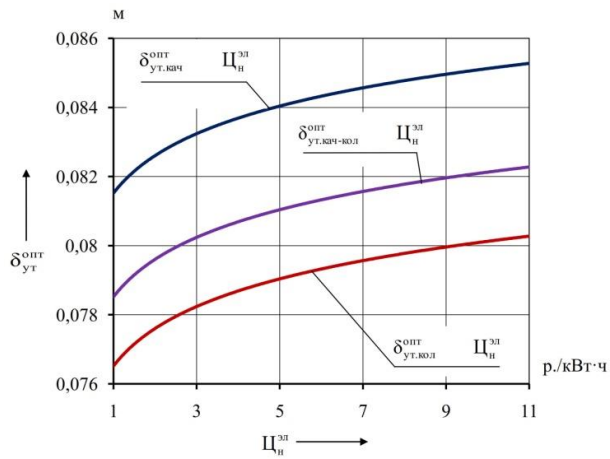


Рисунок 9 – Зависимость $\delta_{ут}^{опт}$ от $C_n^{эл}$

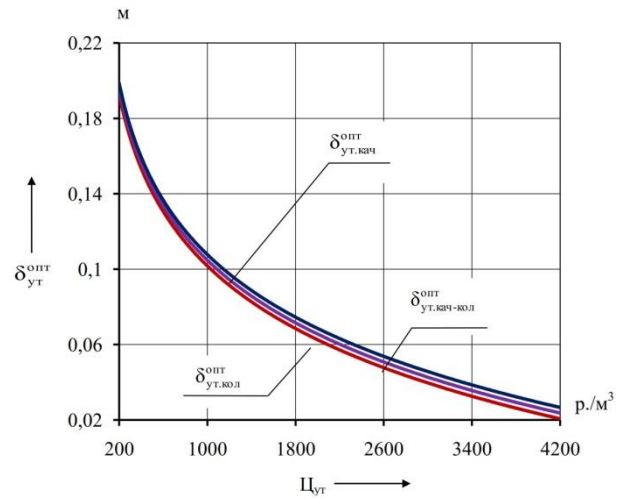


Рисунок 10 – Зависимость $\delta_{ут}^{опт}$ от $C_{ут}$

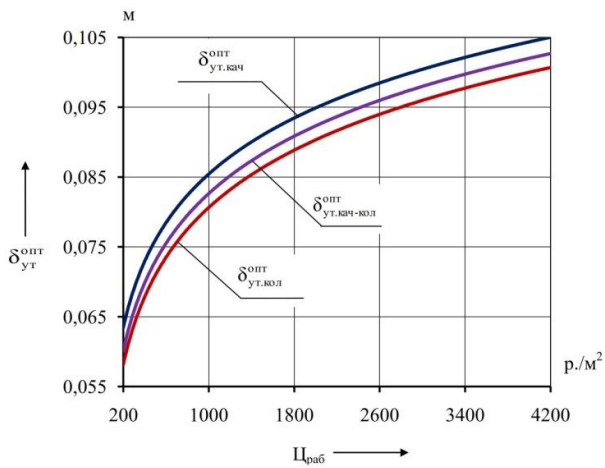


Рисунок 11 – Зависимость $\delta_{ут}^{опт}$ от $C_{раб}$

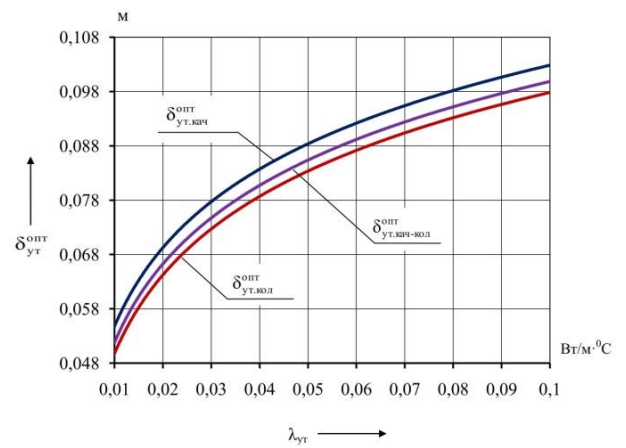


Рисунок 12 – Зависимость $\delta_{ут}^{опт}$ от $\lambda_{ут}$

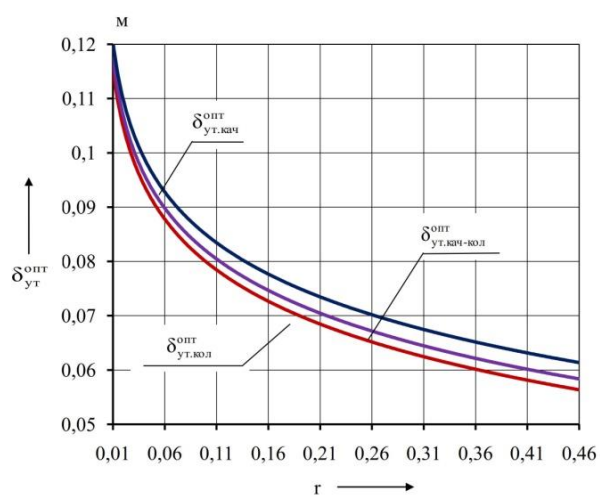


Рисунок 13 – Зависимость $\delta_{ут}^{опт}$ от r

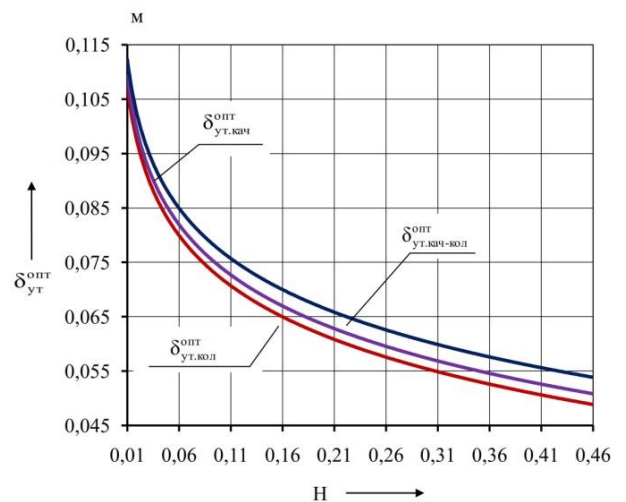


Рисунок 14 – Зависимость $\delta_{ут}^{опт}$ от H

Анализ влияния изменения толщины теплоизоляционного материала δ_{yt} на технико-экономическую эффективность, показал следующее – представлено на рисунках 15–24.

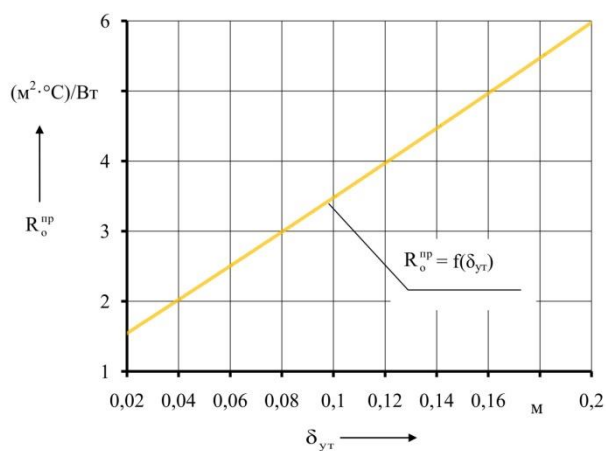


Рисунок 15 – Зависимость R_0^{np} от δ_{yt}

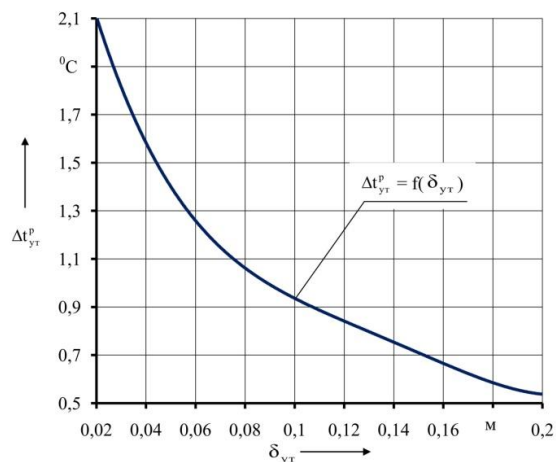


Рисунок 16 – Зависимость Δt_{yt}^p от δ_{yt}

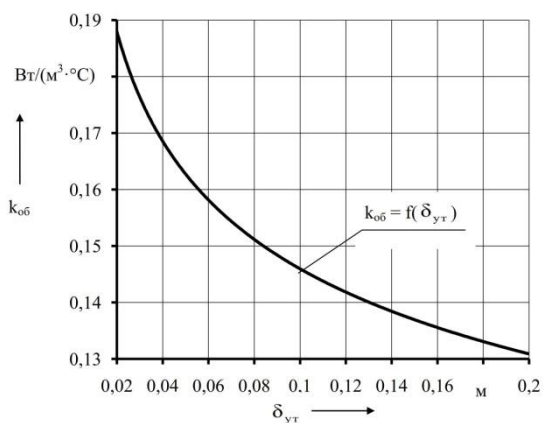


Рисунок 17 – Зависимость $k_{об}$ от δ_{yt}

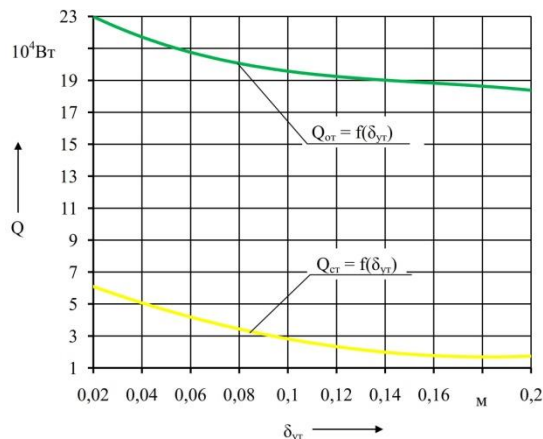


Рисунок 18 – Зависимости $Q_{ст}$, $Q_{от}$ от δ_{yt}

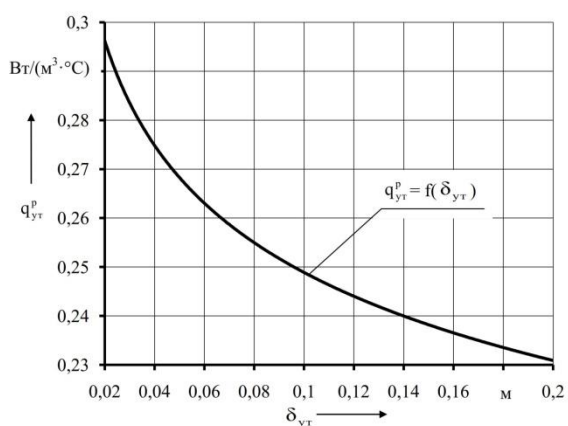


Рисунок 19 – Зависимость q_{yt}^p от δ_{yt}

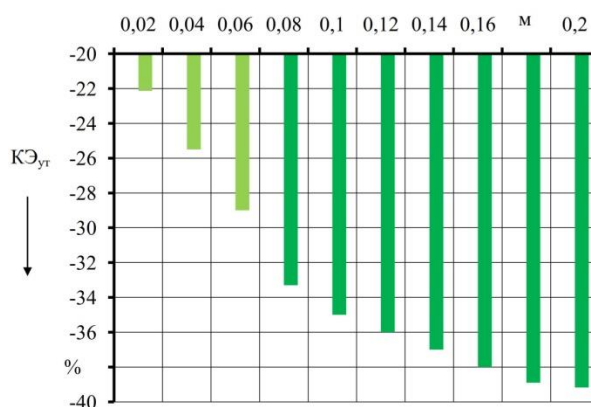


Рисунок 20 – Зависимость $KЭ_{yt}$ от δ_{yt}

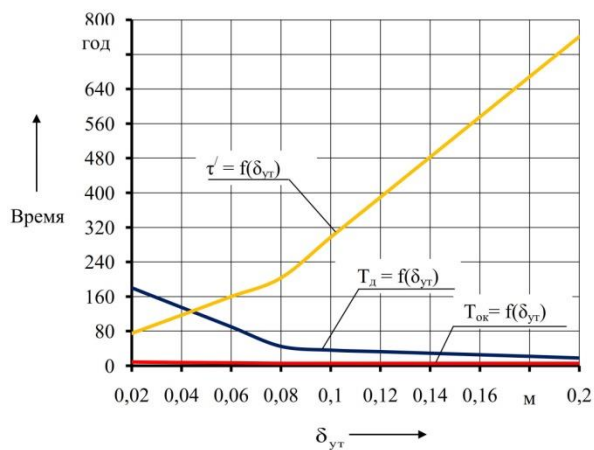


Рисунок 21 – Зависимость $T_{ок}$, $T_{д}$ и τ' от $\delta_{ут}$

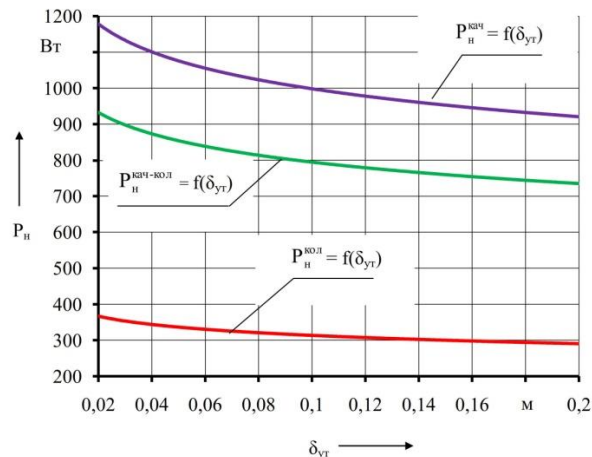


Рисунок 22 – Зависимость $P_{н}$ от $\delta_{ут}$

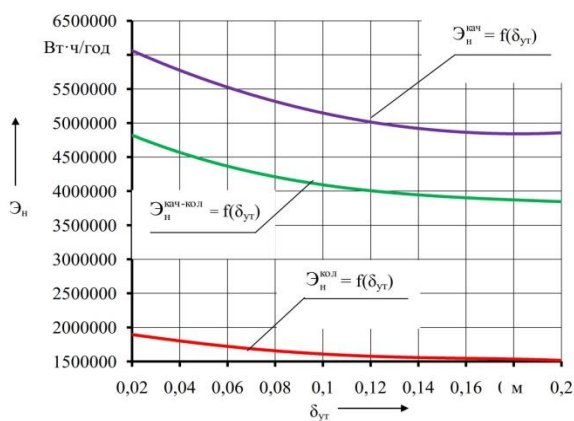


Рисунок 23 – Зависимость $\mathcal{E}_{н}$ от $\delta_{ут}$

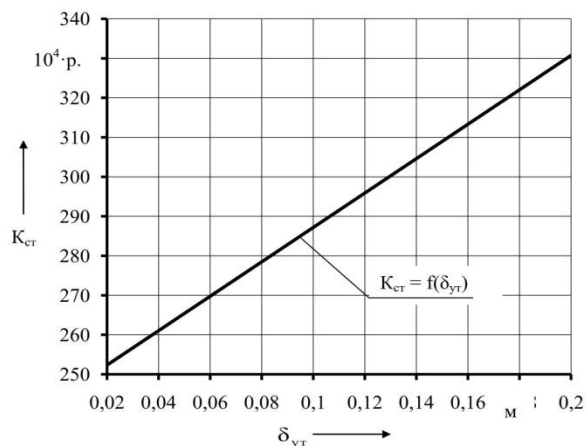


Рисунок 24 – Зависимость $K_{ст}$ от $\delta_{ут}$

С учетом полученных зависимостей было рассчитано изменение приведенных дисконтированных затрат и на утепление тепловой изоляцией наружных ограждающих конструкций стен здания при различной толщине теплоизоляции (рисунок 25).

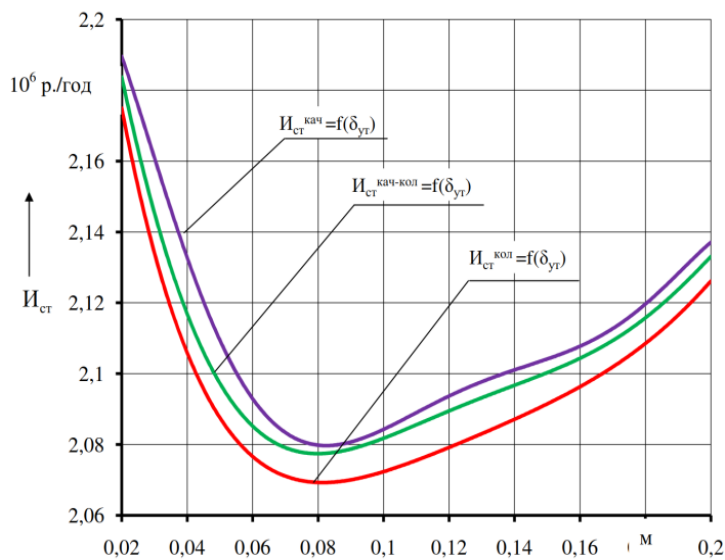


Рисунок 25 – Зависимость $I_{ст}$ от $\delta_{ут}$

Для оценки технико-экономического эффекта от использования предложенных разработок и в качестве примера практического применения методики расчета эффективного утепления наружных ограждающих конструкций были рассчитаны параметры утеплителя при реконструкции здания производственного назначения ФГУП «ФНПЦ «Прогресс».

Предложенная заводу модернизация здания заключается в следующем: утеплить наружные

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

Сравнение результатов расчета, предлагаемых при проектировании и определенных по данной методике, показало снижение приведенных дисконтированных затрат с 2,075 до 2,067 млн руб./год и снижение расхода тепловой энергии на отопление вентиляции (ОВ) здания на 3 %. Коэффициент энергоэффективности при этом не изменился. Срок окупаемости утепления здания при выполнении капитального ремонта снизился с 5,9 до 5,6 года.

Проведенный эксперимент и анализ адекватности на примере энергетического обследования (энергоаудита) жилого комплекса подтверждает целесообразность использования предложенных разработок, сокращение объема работ проектировщика 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 при этом 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 $\delta_{\text{ут}}^{\text{опт}}$ отвечает минимуму суммарных дисконтированных затрат по утеплению ограждающих конструкций стен здания, что подтверждает целесообразность использования предложенных разработок по определению оптимальной толщины утепления тепловой изоляцией стен зданий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы. 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 РАБОТ АВТОРА, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В ведущих рецензируемых изданиях из Перечня ВАК:

1. **Петров, П.В.**, Кулагин, В.А., Резанов, Е.М., Старикова, А.П. Совершенствование технологии теплоизоляции зданий, *Журнал СВУ. Техника и технологии*. 2023. 16(2). 187–197. EDN: IXBHRM (IF 0.588, **K1**, Web of Science: RSCI).

2. **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).

3. **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.

4. **Петров, П.В.**, Резанов, Е.М. Повышение эффективности утепления стен зданий с учетом регулирования отпускаемой тепловой энергии. *Известия Транссиба* 2019. № 4 (40). 77–86.

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

6. **Петров, П.В.**, Резанов, Е.М., Ведрученко, В.Р., Стариков, А.П. Основные направления совершенствования тепловой работы зданий и сооружений при капитальном ремонте, *КС энергетика и ЖКХ*. 2015. № 2(34). 30–33.

7. **Петров, П.В.**, Резанов, Е.М., Ведрученко, В.Р., Стариков, А.П. Определение оптимальной толщины тепловой изоляции ограждающих конструкций зданий при капитальном ремонте, *Омский научный вестник*. 2015. № 3(143). 254–258.

8. **Петров, П.В.**, Ведрученко, В.Р., Стариков, А.П. и др. Оптимизация затрат при проектировании эксплуатации тепловых схем и систем теплоснабжения потребителей, *Промышленная энергетика*. 2013. № 2(143). 23–27.

9. **Петров, П.В.**, Ведрученко, В.Р., Стариков, А.П. О необходимости нормирования и стандартизации теплозащиты зданий и сооружений при капитальном ремонте, *Омские коммунальные системы*. 2012. № 3(19). 38–40.

Свидетельство о государственной регистрации программы:

10. Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ № 2016616691 Российская Федерация Определение оптимальной толщины утепления тепловой изоляцией ограждающих конструкций стен здания / **П.В. Петров** – заявл. № 2016614064 от 20.04.2016; опублик. 20.07.2016.

В других изданиях:

11. **Петров, П. В.**, Кулагин, В.А., Стариков, А.П. Резанов, Е.М., Совершенствование технологии теплоизоляции зданий, *Енисейская теплофизика – 2023: тезисы докладов I Всероссийской научной конференции с международным участием. Красноярск, 28–31 марта 2023 г.* Сиб. федер. ун-т, Ин-т инж. физики и радиоэлектроники; отв. за вып. Д.В. Платонов. – Электрон. текстовые дан. (pdf, 20,6 Мб). Красноярск: СФУ, 2023. 99–100. Загл. с титул. экрана. ISBN 978-5-7638-4846-5.

12. **Петров, П.В.**, Резанов, Е.М. Оптимизация затрат на утепление тепловой изоляцией наружных стен зданий при проведении капитального ремонта, *Актуальные вопросы энергетики: матер. Всерос. НПК с междунар. участием*. Омск: ОмГТУ, 2018. 45–48.

13. **Петров, П.В.**, Резанов, Е.М. К вопросу повышения эффективности утепления тепловой изоляцией наружных ограждающих конструкций стен зданий, *Актуальные вопросы энергетики: труды Междунар. НПК*. Омск: ОмГТУ, 2017. 18–21.

14. **Петров, П.В.**, Резанов, Е.М., Тесля, М.О. Повышение эффективности и экономичности утепление тепловой изоляцией наружных ограждающих конструкций стен зданий, *Повышение энергоэффективности объектов энергетики и систем теплоснабжения: материалы Всерос. НПК с междунар. участием*. Омск: ОмГУПС, 2017. 277–282.

15. **Петров, П.В.**, Резанов, Е.М., Тесля, М.О. Расчет оптимальной толщины тепловой изоляции наружных стен здания при капитальном ремонте, *Современные концепции научных исследований: Матер. IV Междунар. НПК*. Н. Новгород: ООО «Стимул-СТ», 2015. 287–290.

16. **Петров, П.В.** Об энергосбережении в системах вентиляции зданий и сооружений в условиях капитального ремонта, *Повышение эффективности объектов теплоэнергетики и систем теплоснабжения: Межвуз. сб. науч. тр.* Омск: ОмГУПС, 2016. 59–62.