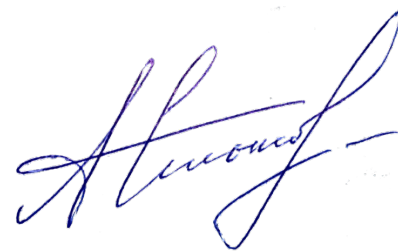


На правах рукописи



Смыков Александр Анатольевич

**ТЕПЛОВОЙ И ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ
ПОМЕЩЕНИЙ С СИСТЕМАМИ ОТОПЛЕНИЯ НА БАЗЕ
ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ**

Специальность 2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция,
кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Тюмень – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: **Бодров Михаил Валерьевич**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Левцев Алексей Павлович**,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО
«Национальный исследовательский Мордовский
государственный университет», заведующий
кафедрой теплоэнергетических систем

Рымаров Андрей Георгиевич,
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет»,
заведующий кафедрой теплогазоснабжения и
вентиляции

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет
имени В. И. Вернадского»

Защита состоится «17» марта 2023 года в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.2.419.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» по адресу: 625001, г. Тюмень, ул. Луначарского д. 2, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» и на сайте www.tyuiu.ru.

Автореферат разослан «17» января 2023 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Степанов Максим Андреевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В связи с тем, что тарифы на тепловую энергию неуклонно растут, а в нормативном поле всё чаще появляются документы, призывающие к применению энергоэффективных технологий, одной из самых актуальных задач является снижение энергозатрат при обеспечении теплотой производственных зданий. Традиционные схемы водяного и воздушного отопления зачастую оказываются чрезмерно затратными, применение таких типов отопления для крупнообъемных производственных зданий не является экономически обоснованным. Использование систем лучистого отопления, напротив является одним из путей к снижению энергозатрат. В лучистых системах отопления теплота, направленным инфракрасным излучением, подаётся в рабочую зону помещения, которое, в свою очередь, нагревает окружающие поверхности. Большая часть лучистой теплоты аккумулируется в приповерхностных слоях облучаемых конструкций, так как воздушные массы являются лучепрозрачной средой. Саккумулированная теплота за счёт конвекции обеспечивает нагрев воздуха в помещении. Таким образом достаточно очевидна перспективность применения лучистых систем отопления.

Благодаря широкому спектру научных исследований в области теплотехники, каждый год на рынке появляются всё более совершенные технологии, устройства и системы устройств. Наиболее значимые труды в данной области опубликовал ряд российских и зарубежных учёных: В.Н. Богословский, А.К. Родин, А.Е. Малышева, С.А. Оцеп, А. Мачкаши, Л. Банхиди, А. Коллмар, Р. Борхерт, П. Фагнер и др. Одним из репрезентативных примеров внедрения современных технологий можно назвать системы лучистого отопления. Проведя анализ практики применения подобных систем, можно сделать вывод о ряде их преимуществ, по сравнению с традиционными системами отопления (конвективными, воздушными и др.). Во многих случаях использование лучистых систем отопления является более энергоэффективным решением для отопления крупнообъемных производственных помещений. Из-за того, что действующие нормативные документы в области отопления не учитывают особенности работы таких систем – они получили недостаточно широкое распространение на данный момент.

Другая причина недостаточного широкого применения лучистых систем отопления кроется в отсутствии научно-обоснованной методики проектирования теплового контура здания, в котором используется система лучистого отопления. Применение в отоплении инфракрасных излучателей позволяет снизить температуру воздуха в рабочей зоне помещения $t_{в,р}$ на величину до 4 °С без потери комфорта по сравнению с нормативными значениями. Однако, согласно действующим нормативным документам, требуемая мощность системы отопления здания приравнивается к его тепловым потерям, таким образом преимущества лучистых систем отопления перечёркиваются. Также те подходы, которые используются при анализе температурных режимов производственных зданий с лучистыми системами отопления, не учитывают отвод теплоты в ограждающие конструкции и конвекцию на внутренней поверхности отапливаемого помещения. При эксплуатации эти факторы могут играть достаточно ощутимую роль.

Резюмируя, можно сделать вывод, что производственные и сельскохозяйственные здания, в которых используются системы лучистого отопления, можно выделить в отдельную группу по нормированию и расчету теплотехнических характеристик теплового контура по отношению к зданиям с конвективным отоплением.

Степень разработанности темы исследований. В ходе выбора тематики исследования, автором были изучены труды известных российских и зарубежных учёных, таких как: В.Н. Богословский, А.К. Родин, А. Мачкаши, Л. Банхиди, А.Н. Сканави, Л.М. Махов, В.И. Бодров, Н.И. Куриленко, Н. Фонсеко и др. Работы вышеупомянутых авторов посвящены лучистому отоплению и проблематике формирования теплового и температурного режима в помещениях, оборудованных такими системами. Также необходимо упомянуть работы Л.Ю. Михайловой, В.В. Шиванова, Р.Р. Давлятчина, А.Н. Ермолаева, которые затрагивали тематику изучения закономерностей формирования теплового и температурного режимов в помещениях с лучистыми системами отопления.

Исходя из опыта российских и иностранных учёных в сфере лучистого отопления можно сделать следующий вывод: для более глубокого внедрения таких систем и повышения энергетической и экономической эффективности данных систем, необходимо провести ряд теоретических и экспериментальных исследований, которые направлены на создание практико-ориентированной теплофизической модели формирования теплового и температурного режима в производственных помещениях с лучистыми системами отопления.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности работы лучистых систем отопления на базе водяных инфракрасных излучателей путём разработки новой научно-обоснованной методики моделирования теплового и температурного режимов в помещениях и наружных ограждающих конструкциях производственных зданий.

Задачи исследования:

- 1) разработка новой теплофизической модели процессов теплопередачи в помещениях с системами лучистого отопления;
- 2) разработка методики определения требуемых теплофизических свойств наружных ограждающих конструкций производственных помещений, оборудованных системами лучистого отопления на базе водяных инфракрасных излучателей;
- 3) разработка методики испытания водяных инфракрасных излучателей;
- 4) проведение экспериментальных лабораторных исследований по определению теплотехнических характеристик водяных инфракрасных излучателей;
- 5) проведение анализа особенностей формирования теплового и температурного режимов производственных помещений, оборудованных системами лучистого отопления на базе водяных инфракрасных излучателей;
- 6) проведение экспериментальных исследований основных закономерностей формирования теплового режима наружных ограждающих конструкций в помещениях, оборудованных системами лучистого отопления на базе водяных инфракрасных излучателей;

7) разработка новой методики проектирования систем лучистого отопления производственных помещений на базе водяных инфракрасных излучателей.

Предметом исследований является тепловой и температурный режим в помещениях производственных зданий, оборудованных системой отопления на базе водяных инфракрасных излучателей.

Объектом исследования являются системы отопления производственных зданий на базе водяных инфракрасных излучателей.

Научная новизна полученных результатов:

- разработана физико-математическая модель процессов теплопереноса в производственных помещениях, оборудованных системами лучистого отопления на базе водяных инфракрасных излучателей;

- на основании полученных зависимостей распределения плотности потока излучения водяными инфракрасными излучателями разработана методика расчёта теплового режима ограждающих конструкций производственных помещений;

- впервые разработана и апробирована в натуральных условиях методика исследований, позволяющая определить достоверные теплотехнические характеристики водяных инфракрасных излучателей, которые используются для описания теплового режима производственных помещений;

- теоретически-экспериментальным методом получены закономерности формирования температурного режима производственных помещений, оборудованных системами лучистого отопления на базе водяных инфракрасных излучателей, которые позволяют снизить градиент температуры по высоте помещения, по сравнению с конвективным отоплением.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в разработке уточнённой методики расчета конкретных пассивных систем обеспечения параметров микроклимата производственных зданий и сооружений, оборудованных лучистыми системами отопления, позволяющей достигать снижения расхода тепловой энергии. Разработаны рекомендации по расположению инфракрасных излучателей в объеме помещения. Разработана научно-обоснованная методика проектирования системы отопления на базе инфракрасных излучателей.

Практическая значимость работы основана на применении результатов диссертационного исследования при проектировании, монтаже и эксплуатации систем лучистого отопления на базе водяных инфракрасных излучателей, с использованием достоверно полученных теплотехнических характеристик водяных инфракрасных излучателей марок Helios 750 и Flower 125.

На защиту выносятся:

1) разработанная теплофизическая модель процессов теплопереноса в помещениях с лучистыми системами отопления;

2) разработанная методика определения требуемых теплофизических свойств наружных ограждающих конструкций производственных помещений, оборудованных системами лучистого отопления на базе водяных инфракрасных излучателей;

3) разработанная методика испытания водяных инфракрасных излучателей;

4) конструкция экспериментального стенда, основные закономерности и анализ формирования теплового режима наружных ограждающих конструкций и помещений с системами отопления на базе водяных инфракрасных излучателей, в результате выполненных лабораторных и натурных экспериментов;

5) разработанная инженерная методика проектирования систем лучистого отопления производственных помещений на базе водяных инфракрасных излучателей.

Методологическими основами исследования являются законы теплообмена, строительной теплофизики, такие как: закон Вина, Ламберта, Кирхгофа, Ньютона-Рихмана, Навье-Стокса, Стефана-Больцмана. В исследовании были применены как теоретические, так и экспериментальные методы. Проводился анализ результатов, по возможности разносторонне характеризующих проблему для взаимопроверки и достоверности окончательных рекомендаций.

Теоретические методы: выбор программного обеспечения; выбор математических моделей; анализ документов, литературных источников, результатов деятельности отечественных и зарубежных исследователей в сфере изучения лучистого отопления; математическая обработка результатов, полученных при эмпирических исследованиях.

Экспериментальные методы исследования были заключены в конструировании экспериментального стенда для испытания водяных ИИ; подборе необходимой контрольно-измерительной аппаратуры; наблюдении за работой систем лучистого отопления в лабораторных и натуральных условиях; проведении ряда лабораторных испытаний и натуральных исследований на основе существующих и вновь возведённых производственных зданий.

Достоверность работы обеспечена применением фундаментальных научных положений законов тепло- и массообмена и строительной теплофизики в ходе численных исследований. Предположения, которые были сделаны в ходе эмпирических исследований, подтверждаются анализом погрешности экспериментальных результатов. В ходе исследований применялись современные подходы к проведению экспериментальных исследований, использовалось сертифицированное и поверенное измерительное оборудование. Результаты исследования согласуются с результатами других исследователей и подтверждаются сходимостью результатов численных и экспериментальных исследований.

Реализация результатов исследования. Используя предложенный метод проектирования, было осуществлено проектирование системы лучистого отопления в производственном здании ООО «Флайг+Хоммель» (г. Заволжье, Нижегородская область). Работы по проектированию системы отопления на базе водяных инфракрасных излучателей содержат определение мощности системы отопления и рекомендации по размещению ВИИ в помещении. Использование результатов проведённых исследований привели к значительному экономическому эффекту в виде сокращения капитальных и эксплуатационных затрат на устройство систем теплоснабжения на сумму 2835 тыс. руб (703 руб./м²).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Научная работа посвящена исследованию теплового и температурного режимов

производственных помещений, использующих лучистые системы отопления, что соответствует паспорту специальности 2.1.3 (05.23.03) – «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение» по номенклатуре отраслей науки, по которым присуждаются ученые степени «Технические науки», а также пунктам направлений исследования:

- п. 1 «Климатологическое обеспечение зданий. Теплообмен и гидроаэромеханика систем теплогазоснабжения и вентиляции, тепло и холодогенерирующего оборудования, ограждающих конструкций. Исследования теплового, воздушного, влажностного режимов помещений, зданий и сооружений»;

- п. 2 «Технологические задачи теплогазоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха, разработка методов энергосбережения систем и элементов теплоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха, газоснабжения и освещения, охраны воздушного бассейна, защиты от шума зданий и сооружений. Очистка и расчет рассеивания загрязняющих веществ от вентиляционных выбросов»;

- п. 3 «Разработка и совершенствование систем теплогазоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха, разработка методов энергосбережения систем и элементов теплоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха, газоснабжения и освещения, охраны воздушного бассейна, защиты от шума зданий и сооружений, аспирации и пневмотранспорта, включая использование альтернативных, вторичных и возобновляемых источников энергии; развитие методов моделирования многофазных потоков и динамических процессов в аэродисперсных системах»;

- п. 5 «Разработка и развитие экспериментальных методов исследований, анализа и обработки экспериментальных данных, процессов в системах теплоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха, газоснабжения и освещения, охраны воздушного бассейна, защиты от шума, зданий и сооружений».

Связь с тематикой научно-исследовательских работ. Научные изыскания в ходе подготовке работы проводились в рамках выполнения: гранта УМНИК-19 (б) / Нижегородская область – 2019 «Разработка энергоэффективной системы отопления зданий на базе низкотемпературных инфракрасных излучателей» (договор 15003ГУ/2019 от 31.01.2020); гранта Правительства Нижегородской области молодым ученым в честь 800-летия г. Нижнего Новгорода в форме субсидии «Разработка инновационной энергоэффективной системы отопления зданий на базе низкотемпературных инфракрасных эмиттеров» (договор 316-06-16-60а/21 от 10.11.2021); гранта Фонда содействия развитию институтов гражданского общества в Приволжском федеральном округе «Энергоэффективная система отопления» (договор #Г-5 от 02.12.2021).

Апробация результатов работы. Результаты и основные положения проведенных исследований докладывались и обсуждались в рамках ряда конференций, в т.ч: 8 – регионального уровня; 10 – всероссийского уровня, 15 – международного уровня.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 53 печатных работах, из которых 10 – статьи в журналах, рекомендованных ВАК для

кандидатских диссертаций и 2 статьи в изданиях, входящих в зарубежные индексы цитирования (Web of Science и Scopus), получено 1 свидетельство о регистрации результатов интеллектуальной деятельности в формате «НОУ-ХАУ», 40 печатных работ в других изданиях.

Личный вклад автора состоит в создании научного центра, на базе которого проводились лабораторные эксперименты; разработке испытательной установки для исследования модели лучистой системы отопления; разработке методики испытания водяные инфракрасных излучателей; участии в выполнении проектных работ по созданию системы лучистого отопления в производственном здании (г. Заволжье, Нижегородская область).

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из следующих разделов: введения, четырёх глав, выводов, списка литературы, списка публикаций автора по теме диссертации и шести приложений. Диссертация содержит: 174 страницы текста, 74 рисунка, 35 таблиц, список литературы из 128 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель и задачи исследования, представлена научная новизна результатов исследования и их практическая значимость. Также были представлены положения, выносимые на защиту, общая характеристика и структура работы.

В первой главе было проведено исследование научно-технического состояния проблематики изучения лучистых систем отопления, а именно:

- используемых в практике закономерностей лучистого теплообмена;
- используемых классификаций систем и приборов лучистого отопления;
- способов анализа состояния человека и условий комфортности при инфракрасном отоплении;
- методик расчёта и проектирования лучистых систем отопления.

Во второй главе рассмотрены основные методики моделирования теплового баланса помещений с лучистыми системами отопления, проанализированы их достоинства и недостатки.

В ходе анализа наиболее распространённых методик определения требуемой тепловой мощности лучистой системы отопления было выявлено, что существующие методики не позволяют с высокой достоверностью смоделировать тепловой и температурный режим в отапливаемом помещении, спроектировать оптимальную вентиляционную систему и оптимизировать расположение инфракрасных излучателей в помещении. Расчёт по существующим методикам не позволяет подобрать с высокой точностью количество и мощность инфракрасных излучателей.

Был проведён анализ ключевых отличительных особенностей формирования теплового режима в помещениях с лучистым и конвективным отоплением. В случае применения конвективного отопления под покрытием помещения формируется «тепловая подушка» из перегретого, относительной рабочей зоны, воздуха, и, соответственно, теплота распределяется не оптимальным образом в

объёме обслуживаемого помещения. С применением лучистого отопления в помещении формируется более равномерный тепловой режим ввиду того, что направленное излучение нагревает поверхности нижней зоны помещения.

По итогам анализа была предложена уточнённая система уравнений, которая описывает тепловой баланс помещения с лучистой системой отопления:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^7 Q_{1-i}^{\text{л}} = 0; \quad (1) \\ \sum_{i=1}^5 Q_{2-i}^{\text{л}} + Q_{1-2}^{\text{л}} + Q_{2-6}^{\text{к}} + Q_{2-\text{н}}^{\text{тп}} = 0; \quad (2) \\ \sum_{i=1}^5 Q_{3-i}^{\text{л}} + Q_{1-3}^{\text{л}} + Q_{3-7}^{\text{к}} + Q_{6-7}^{\text{м}} = 0; \quad (3) \\ \sum_{i=1}^3 Q_{4-i}^{\text{л}} + Q_{1-4}^{\text{л}} + Q_{5-7}^{\text{к}} + Q_{5-\text{н}}^{\text{тп}} = 0; \quad (4) \\ \sum_{i=1}^3 Q_{5-i}^{\text{л}} + Q_{1-5}^{\text{л}} + Q_{5-6}^{\text{к}} + Q_{5-\text{н}}^{\text{тп}} = 0; \quad (5) \\ Q_{1-6}^{\text{к}} + Q_{6-2}^{\text{к}} + Q_{6-5}^{\text{к}} + Q_{6-7}^{\text{и}} + Q_{6-7}^{\text{м}} = 0; \quad (6) \\ Q_{7-1}^{\text{л}} + Q_{7-\text{н}}^{\text{и}} + Q_{3-7}^{\text{к}} + Q_{4-7}^{\text{к}} + Q_{8-7}^{\text{к}} = 0; \quad (7) \\ \Delta P_{\text{в.з-н.з}} = sG_{\text{в.з-н.з}}^2; \quad (8) \\ t_R + At_{\text{в.р}} = B. \quad (9) \end{array} \right.$$

Индексы в уравнениях (1÷9): теплообменивающиеся поверхности 1 – ИИ; 2 – потолок; 3 – пол; 4 – облучаемые наружные ограждения; 5 – необлучаемые наружные ограждения; 6 – объем воздуха необлучаемой верхней зоны; 7 – объем воздуха облучаемой нижней зоны; 8 – оборудование; н – наружный воздух; в.з – верхняя зона; н.з – нижняя зона; способы теплообмена л – лучистый; к – конвективный; тп – теплопередача; и – инфильтрация; м – массообмен между зонами; $\Delta P_{\text{в.з-н.з}}$ – перепад давления в уравнении (8), Па, определяющий воздухообмен между зонами; s – характеристика сопротивления; $G_{\text{в.з-н.з}}$ – воздухообмен между зонами, м³/ч; t_R – радиационная температура помещения, °С; A , B – постоянные теплового комфорта; $t_{\text{в.р}}$ – температура воздуха рабочей зоны помещения, °С.

По уравнению (1) определяется поток излучения от отопительного прибора. Теплообмен на поверхностях пола, потолка, стен обеих зон описывается уравнениями (2), (3), (4), (5), которые учитывают взаимное облучение каждой отдельной поверхности помещения с остальными, включая ИИ. Тепловой баланс воздуха верхней и рабочей зон рассмотрен в уравнениях (6) и (7). Уравнение (8) дает величину воздухообмена между верхней и рабочей зонами. В качестве граничных условий при решении системы принято первое условие комфортности, представленное в уравнении (9).

Для упрощения и получения однозначного решения системы уравнений (1÷9) введен ряд допущений и приближений, не меняющих физической сущности и количественных показателей процессов переноса теплоты: процессы стационарны;

средняя интегральная степень черноты поверхностей $\varepsilon = 0,85$; доля лучистой составляющей определяется КПД излучателя Ψ ; тепловое излучение с верхней поверхности ИИ в верхнюю зону помещения не учитывается ($Q_{1-5}^{\text{л}} = 0, Q_{1-2}^{\text{л}} = 0$); лучистый теплообмен между наружными стенами нижней зоны и покрытием отсутствует ($Q_{4-2}^{\text{л}} = 0$). Для получения расчётных параметров микроклимата при лучистом отоплении крупногабаритных помещений объёмом было принято: термическое сопротивление одежды $0,155 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$; тяжесть выполняемых работ – средняя; для промышленных помещений максимально допустимая плотность потока теплового излучения на уровне головы $q_{\text{л}} = 60 \text{ Вт}/\text{м}^2$, при этом максимальная плотность потока на поверхности туловища, рук и ног $q_{\text{л}} \leq 60 \text{ Вт}/\text{м}^2$; для сельскохозяйственных помещений среднее значение потока $q_{\text{л}} = 80 \text{ Вт}/\text{м}^2$ при максимально допустимых $q_{\text{л}} = 160 \text{ Вт}/\text{м}^2$ (телята) и $q_{\text{л}} = 210 \text{ Вт}/\text{м}^2$ (поросята в возрасте до 30 суток).

С учётом принятых допущений система уравнений (1÷9) запишется в развернутом виде:

$$Q_0 = 0,125 \frac{\sum F_1}{f_3} Q_{\text{н}}^{\text{с}} \Psi / 3600; \quad (10)$$

$$C_{\text{в.3-3}} \Phi_{3-2} (F_2 - \sum F_1) (\tau_3 - \tau_{\text{в.3}}) + (\alpha_2 F_2 + \alpha_5 F_5) (t_6 - \tau_{\text{в.3}}) - \left(\frac{F_2}{(\delta_2/\lambda_2 + 1/\alpha_{\text{н}})} + \frac{F_5}{(\delta_5/\lambda_5 + 1/\alpha_{\text{н}})} \right) (t_6 - t_{\text{н}}) = 0; \quad (11)$$

$$(1 - k_{\text{в.п}}) (1 - \mu) \Psi Q_0 + C_{3-4} \Phi_{3-4} F_3 (\tau_3 - \tau_4) - F_4 \alpha_{\text{к4}} (\tau_4 - t_{\text{в.п}}) - F_4 \frac{(\tau_4 - t_{\text{н}})}{(\delta_4/\lambda_4 + 1/\alpha_{\text{н}})} = 0; \quad (12)$$

$$Q_8 + F_4 \alpha_4 (\tau_4 - t_{\text{в.п}}) + F_3 \alpha_3 (\tau_3 - t_{\text{в.п}}) - G_{\text{в.3-н.3}} c_{\text{п}} (t_6 - t_{\text{в.п}}) - c_{\text{п}} G_{\text{н}} (t_{\text{в.п}} - t_8) + \Psi Q_0 = 0; \quad (13)$$

$$(1 - \Psi) Q_0 - (F_5 \alpha_{\text{к5}} + F_2 \alpha_{\text{к2}}) (t_6 - \tau_5) - c_{\text{п}} G_{\text{н}} (t_6 - t_{\text{в.п}}) = 0; \quad (14)$$

$$\Psi Q_0 - F_3 \alpha_{\text{к3}} (\tau_3 - t_{\text{в.п}}) - C_{\text{в.3-3}} \Phi_{3-2} (F_2 - \sum F_1) (\tau_3 - \tau_{\text{в.3}}) - C_{3-4} \Phi_{3-4} F_3 (\tau_3 - \tau_4) - F_3 \frac{(\tau_3 - t_{\text{н}})}{(\delta_3/\lambda_3 + 1/\alpha_{\text{н}})} = 0; \quad (15)$$

$$\Psi Q_0 = C_{1-3} \mu \sum F_1 (\tau_1 - \tau_3) + C_{1-4} (1 - \mu) \sum F_1 (\tau_1 - \tau_4); \quad (16)$$

$$\left[\Phi_{\text{ч-2}} \frac{\tau_1 \sum F_1 + \tau_{\text{в.3}} (F_2 - \sum F_1)}{F_2} + \Phi_{\text{ч-4}} \tau_4 + \Phi_{\text{ч-3}} \tau_3 - \tau_{\text{ч}} \right] + A t_{\text{в.п}} = B. \quad (17)$$

В системе уравнений (10÷17) дополнительно: $\alpha_{\text{к}}$ – коэффициент конвективного теплообмена, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$; $\alpha_{\text{в}}$, $\alpha_{\text{н}}$ – коэффициенты теплоотдачи внутренней и наружной поверхностями ограждения $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$; φ – коэффициент облучённости соответствующих ограждений; $\varphi_{\text{ч-2}}$, $\varphi_{\text{ч-3}}$, $\varphi_{\text{ч-4}}$ – коэффициенты облучённости с поверхности тела человека (животного) на соответствующее ограждение; C_{3-4} , $C_{\text{в.3-3}}$ – коэффициенты, равные $C_0 \varepsilon b$, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$; b – температурный коэффициент, K^3 ; δ –

условная толщина, м; λ – коэффициент теплопроводности Вт/(м·°С) наружного ограждения; Q_8 – тепловыделения от оборудования, Вт; ψ – лучистый коэффициент полезного действия излучателя; F_2, F_3, F_4, F_5 – площади потолка (покрытия), пола и стен нижней и верхней зон, м²; ΣF_1 – суммарная площадь излучающих поверхностей излучателя, м²; $t_{ч}$ – температура тела человека или животного, °С; c_p – теплоёмкость воздуха, Дж/(кг·°С); Q_H^c – низшая теплота сжигания газа, Дж/м³.

Физико-математическая модель температурного режима в помещении с лучистой системой отопления, которая описана в системе уравнений (10÷17), позволяет с высокой достоверностью моделировать температурный режим в производственных помещениях.

Также был рассмотрен температурный режим наружных ограждающих конструкций в облучаемой и необлучаемой зонах помещений, оборудованных системами лучистого отопления. Полученные, в ходе исследования данные легли в основу уточнённой методики расчёта требуемых теплотехнических характеристик наружных ограждающих конструкций помещений с лучистыми системами отопления. Предложено уравнение с учётом поправочного коэффициента n для определения требуемого сопротивления теплопередаче от внутренней поверхности наружных ограждений, конкретно, в помещениях, оборудованных лучистым отоплением:

$$R'_o{}^{тр} = \frac{(\tau'_B{}^{доп} - t_H)n}{q_H}, \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт}. \quad (18)$$

В уравнении температура внутренней поверхности ограждений $\tau'_B{}^{доп}$, °С, рассчитывается по формуле:

$$\tau'_B{}^{доп} = t_{B,p} + \Delta\tau^л. \quad (19)$$

где: t_H – расчётная температура наружного воздуха, °С;

q_H – нормированный поток теплоты, Вт/м².

$t_{B,p}$, °С и $\Delta\tau^л$, °С температуры воздуха рабочей зоны и разница между температурными напорами на наружной ограждающей конструкции в случае применения лучистого и конвективного отопления соответственно.

В третьей главе проведен ряд экспериментальных исследований, позволяющих описать теплотехнические характеристики водяных инфракрасных излучателей и теплового режима обогреваемых ими помещений.

Для построения репрезентативной картины формирования теплового баланса помещений с лучистыми системами отопления были проведены следующие лабораторные и натурные эксперименты: эксперимент № 1 – исследование теплотехнических характеристик водяных инфракрасных излучателей; эксперимент № 2 – исследование лучистых характеристик водяных инфракрасных излучателей; эксперимент № 3 – исследование теплового режима в помещениях с системами отопления на базе водяных инфракрасных излучателей; эксперимент № 4 – исследование температурного режима в помещениях, оборудованных системами лучистого отопления на базе водяных инфракрасных излучателей; эксперимент № 5 – исследование теплового режима наружных ограждающих конструкций в помещениях с системами отопления на базе водяных инфракрасных излучателей.

Для проведения комплекса исследований модели лучистой системы отопления на базе водяных инфракрасных излучателей в ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» был создан Учебно-научно-исследовательский центр «Системы отопления с использованием низкотемпературных инфракрасных излучателей» (УНИЦ «СОНИИ»). Основой центра стала Лаборатория лучистого отопления (рисунок 1), оборудованная необходимой приборной базой, и созданная совместно с ООО «Флайг+Хоммель» (г. Заволжье, Нижегородская обл.) – единственным производителем излучающих профилей на территории России. Лаборатория лучистого отопления в своём составе имеет поверенную и сертифицированную приборную базу.

Объектом исследований стали излучающие профили моделей Helios 750 и Flower 125 производства ООО «Флайг+Хоммель» (рисунки 2 и 3).



Рисунок 1 – Общий вид и термограммы Лаборатории лучистого отопления

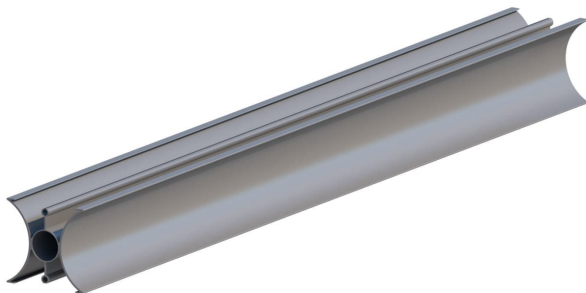


Рисунок 2 – Излучатель марки Helios 750

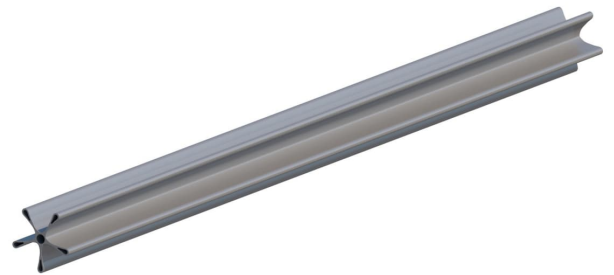


Рисунок 3 – Излучатель марки Flower 125

В результате проведения эксперимента № 1 были получены достоверные теплотехнические характеристики исследуемых отопительных приборов.

Для определения удельной мощности ВИИ при любом температурном напоре ΔT , необходимо определить показатели a и m для степенного уравнения:

$$q_{\text{изл}} = a \cdot \Delta T^m \quad (20)$$

Для построения зависимости необходимо определить показатели a и m для уравнения (20). Автором были использованы две методики: математическое моделирование линии тренда в программном комплексе MathCAD (рисунок 4) и построение линейной регрессии в логарифмическом масштабе.

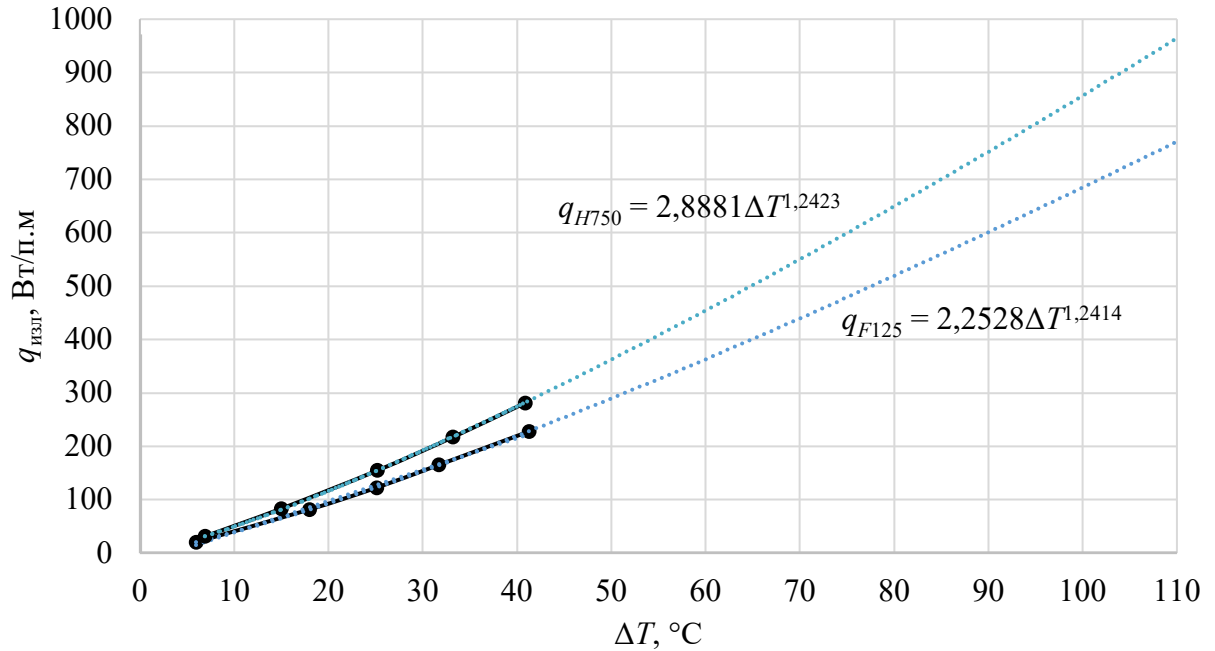


Рисунок 4 – Результаты моделирования степенной линии тренда в программном комплексе MathCAD для результатов испытания излучателей марок Helios 750 и Flower 125

Вследствие проведённых построений уравнение удельного теплового потока для исследуемых излучателей будет выглядеть следующим образом:

$$q_{\text{изл}}^{H750} = 2,8881 \cdot \Delta T^{1,2423}; \quad (21)$$

$$q_{\text{изл}}^{F125} = 2,2528 \cdot \Delta T^{1,2414}. \quad (22)$$

Следовательно, теперь мы можем составить таблицу для всего расчётного диапазона ΔT (таблица 1).

Таблица 1 – Удельная мощность исследуемых излучателей при фиксированных значениях ΔT

$\Delta T, ^\circ\text{C}$	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
$q_{\text{изл}}^{H750},$ Вт/П.М	50,46	83,51	119,38	157,52	197,56	239,26	282,43	326,94	372,66	419,50	467,39	516,26	566,04	616,70	668,18	720,45	773,47	827,21	881,64
$q_{\text{изл}}^{F125},$ Вт/П.М	39,28	64,98	92,87	122,51	153,63	186,03	219,57	254,15	289,66	326,04	363,24	401,19	439,85	479,18	519,15	559,73	600,89	642,61	684,86

В ходе эксперимента № 2 были получены достоверные зависимости, характеризующих кривые изменения плотности лучистого теплового потока (эпюра лучистой теплоты). Для их построения была проведена математическая обработка результатов эксперимента. В результате обработки результатов в программном комплексе MathCAD были получены полиномиальные уравнения

четвёртой степени для кривых плотности лучистого теплового потока при разных параметрах излучателей (рисунок 5).

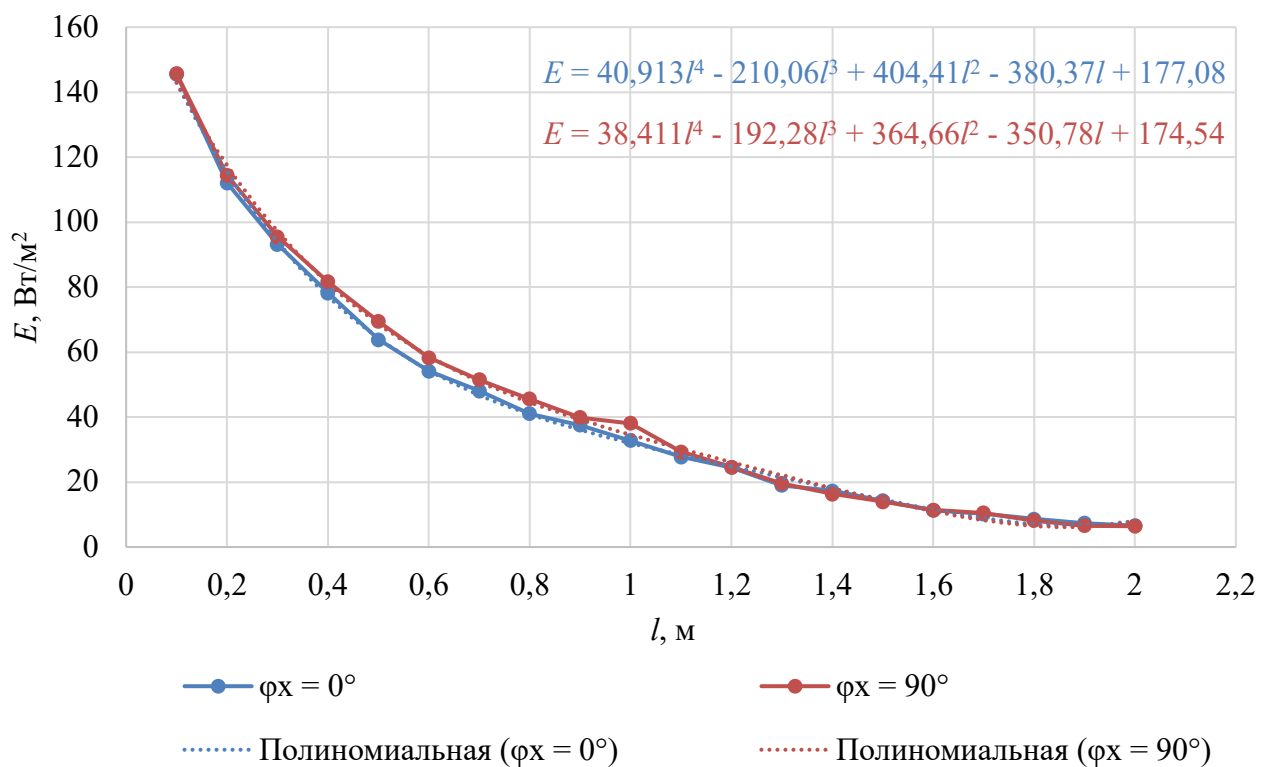


Рисунок 5 – Кривые плотности лучистого теплового потока для излучателя Helios 750 ($T'_1 = 90^\circ\text{C}$; $\tau_{\text{изл}} = 88,7^\circ\text{C}$)

По итогам проведения лабораторных и натурных исследований входящих в эксперимент № 3 автором был сделан вывод, что применение систем лучистого отопления действительно позволяет добиться более равномерного теплового режима в крупнообъёмном помещении. Результаты термографического обследования, проведённого в ходе эксперимента приведены на рисунке 6.

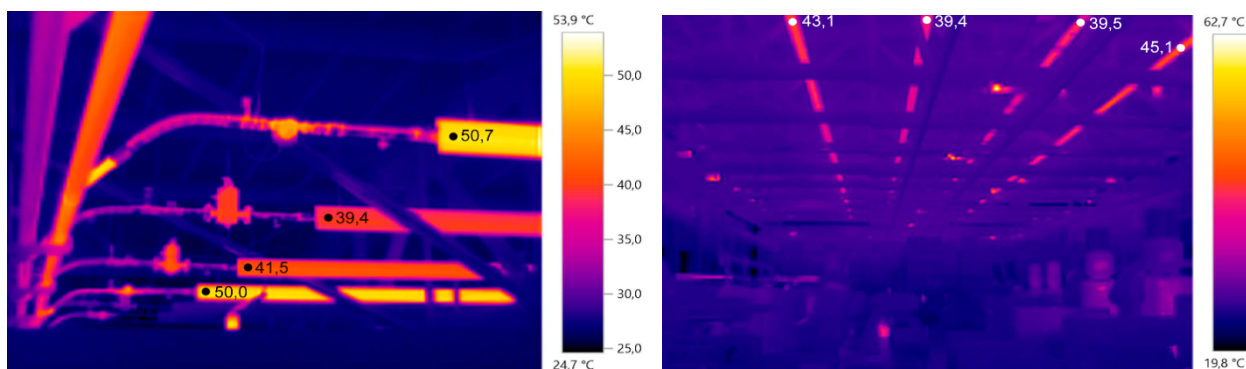


Рисунок 6 – Результат термографического обследования

В ходе проведения эксперимента № 4 были получены данные, позволяющие говорить о том, что использование лучистого отопления приводит к более равномерному температурному режиму в отапливаемом помещении, и меньшему перегреву покрытия помещения, чем при использовании конвективных систем отопления (рисунок 7, 8).

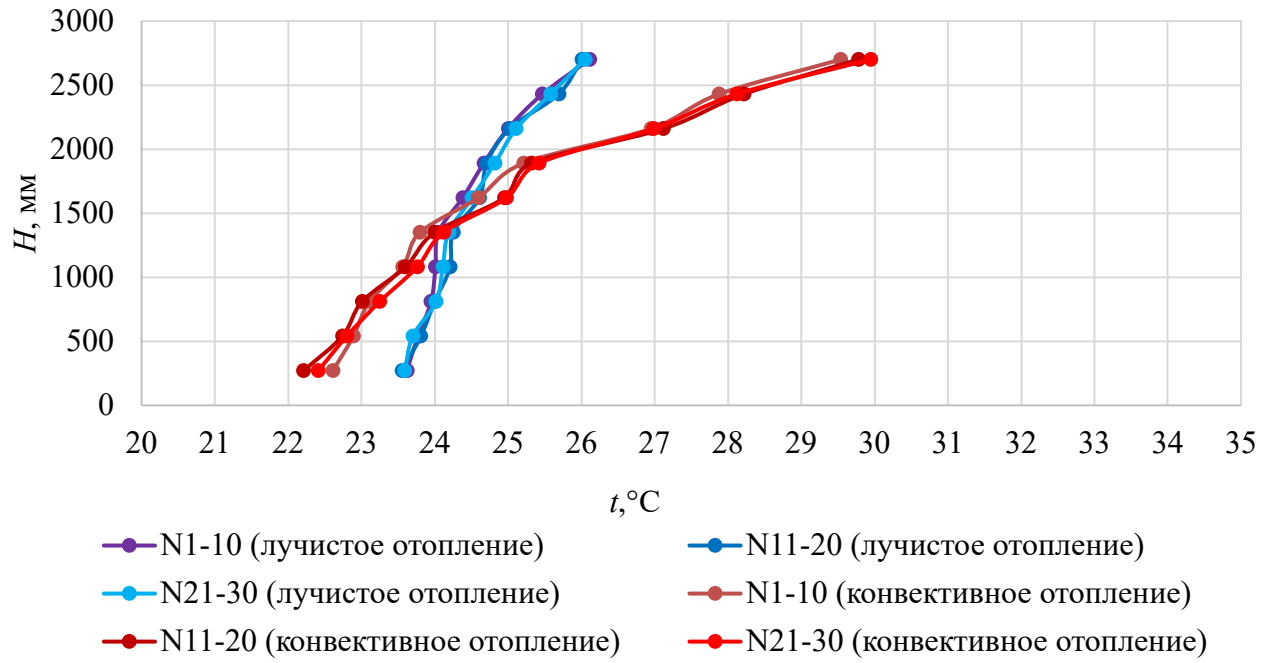


Рисунок 7 – Распределение температуры воздуха в помещении лаборатории

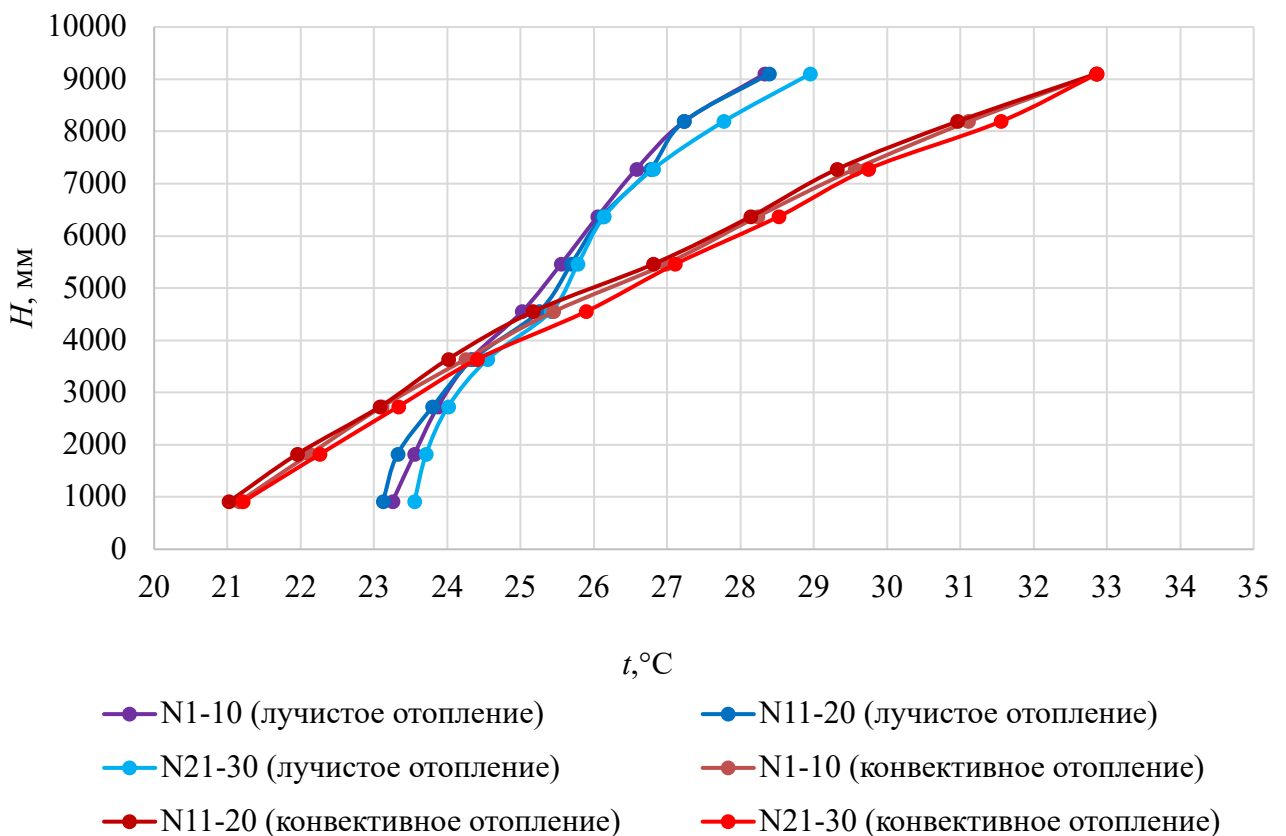
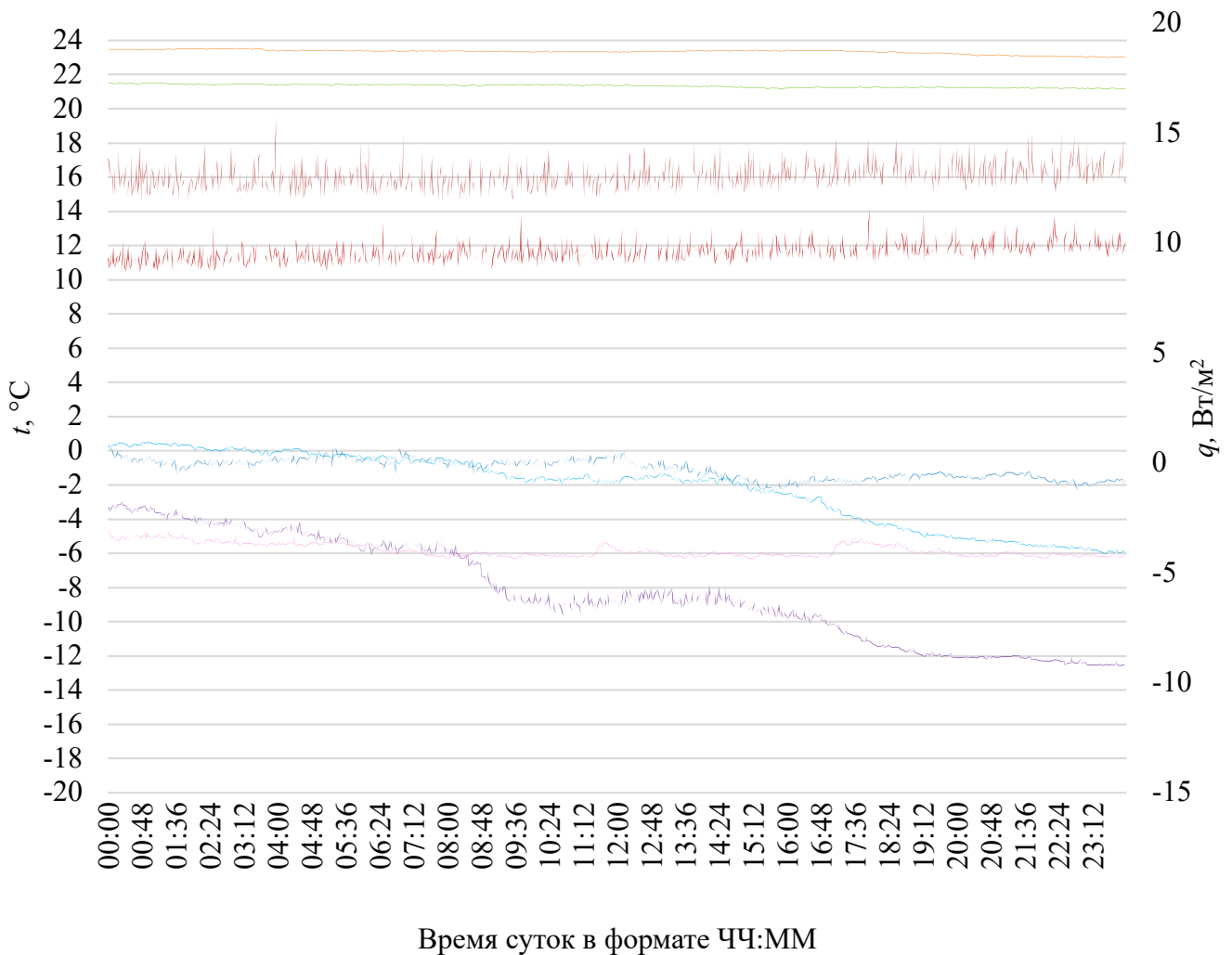


Рисунок 8 – Распределение температуры воздуха в помещении цеха металлообработки

Целью проведения эксперимента № 5 стало изучение теплового режима наружных ограждающих конструкций в помещениях с системами лучистого отопления (рисунок 9).



- Температура на наружной поверхности (1 этап), °С
- Температура на наружной поверхности (2 этап), °С
- Температура на внутренней поверхности (1 этап), °С
- Температура на внутренней поверхности (2 этап), °С
- Температура наружного воздуха, (2 этап), °С
- Температура наружного воздуха (1 этап), °С
- Тепловой поток на внутренней поверхности (1 этап), Вт/м²
- Тепловой поток на внутренней поверхности (2 этап), Вт/м²

Рисунок 9 – Показания датчиков в ходе 1 (лучистое отопление) и 2 (конвективное отопление) этапов эксперимента

Проведённые эксперименты позволяют сделать вывод о том, что применение лучистых систем отопления позволяет повысить энергоэффективность обслуживаемого помещения за счёт: более равномерного температурного режима в помещении; снижения трансмиссионных теплопотерь; уменьшения общей тепловой инерции системы отопления.

В четвертой главе автором предложены конкретные рекомендации по проектированию системы лучистого отопления, включающие в себя: общие требования к данным системам; рекомендации по расчёту требуемой мощности

системы отопления; условия по размещению профилей; рекомендации по подключению профилей; рекомендации по использованию дополнительного оборудования в системе отопления; методику расчёта удельного теплового потока излучающих профилей; рекомендации по гидравлическому расчёту; рекомендации по осуществлению монтажа системы отопления; рекомендации по эксплуатации системы отопления.

Автором была разработана блок-схема проектирования системы отопления на базе водяных инфракрасных излучателей, приведённая на рисунке 10.



Рисунок 10 – Блок-схема расчёта системы лучистого отопления

Также, для оценки экономической эффективности внедрения лучистых систем отопления были применены следующие методики оценки: методика

определения экономически-обоснованного утепления контура здания на основе расчёта срока окупаемости капитальных затрат на обустройство утепления теплового контура здания; методика определения совокупных дисконтированных капитальных и эксплуатационных затрат за определённый срок; методика Госстроя РФ определения годовых потоков теплоты, которая широко применяется ресурсоснабжающими организациями.

Для апробации результатов диссертационного исследования послужило вновь возведённое здание склада сухого хранения с административно-бытовой частью ООО «Флайг+Хоммель» в г. Заволжье (рисунок 11), в котором создание системы лучистого отопления было проведено с применением предложенной методики проектирования лучистой системы отопления.

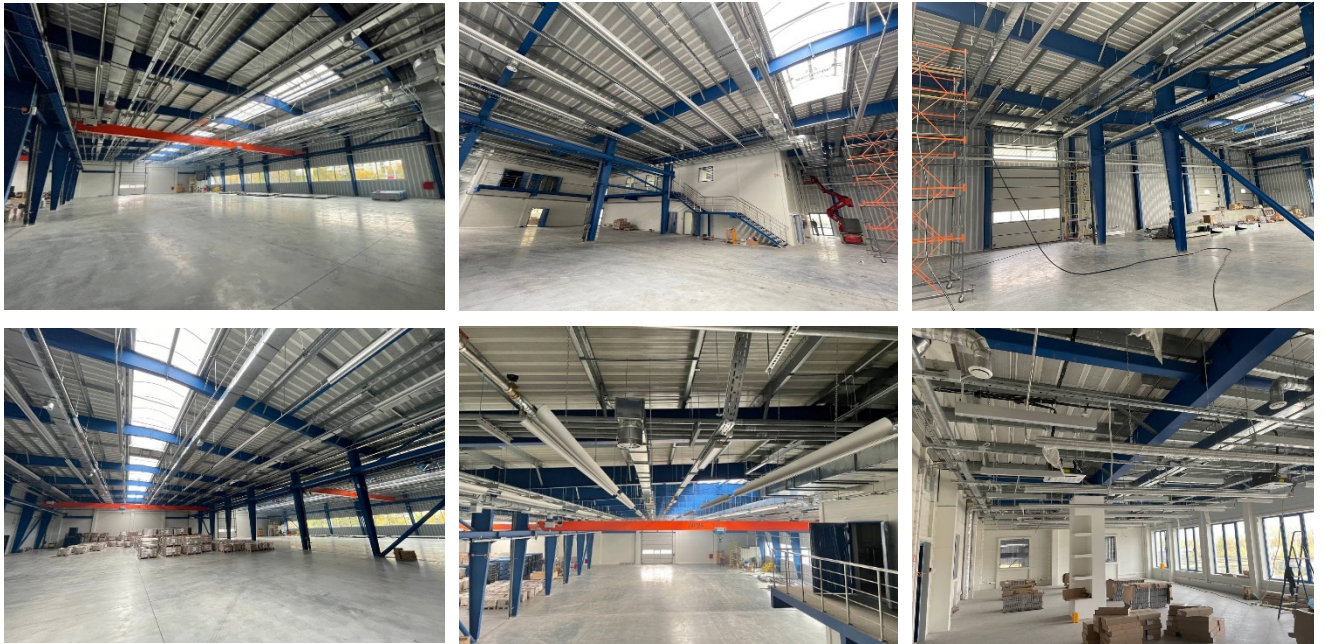


Рисунок 11 – Общий вид вновь возведённого здания склада сухого хранения с административно-бытовой частью ООО «Флайг+Хоммель» в г. Заволжье

В ходе расчёта экономически-обоснованного утепления контура здания на основе расчёта срока окупаемости капитальных затрат на обустройство утепления теплового контура здания была разработана блок-схема (рисунок 12). Результатом расчёта стал график срока окупаемости утепления контура здания для города Заволжья и других городов России (рисунок 13). График зависимости экономии денежных средств на оплату тепловой энергии от толщины утепляющего слоя (для г. Заволжье) представлен на рисунке 14.

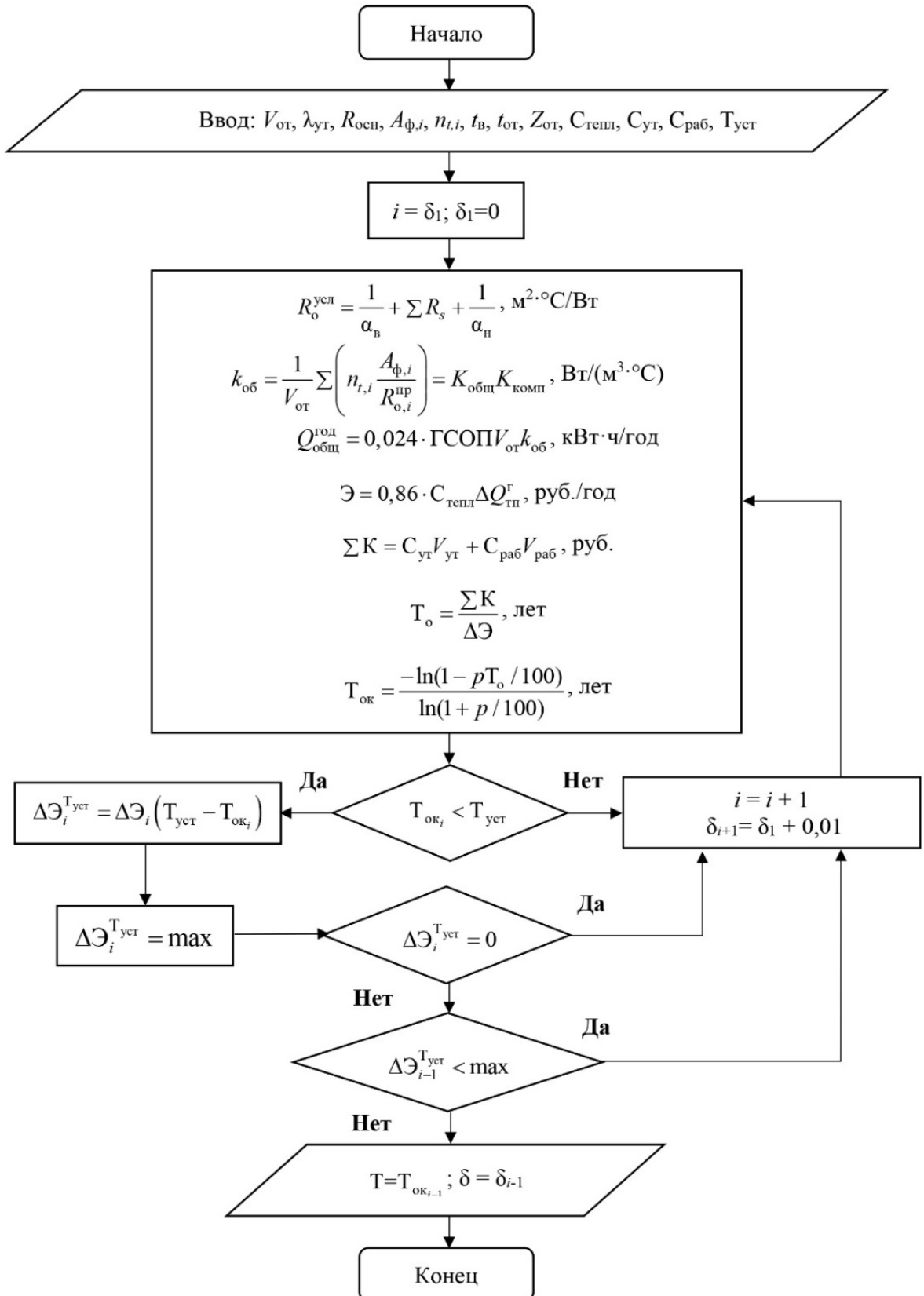


Рисунок 12 – Блок схема расчёта экономически-обоснованного утепления контура здания

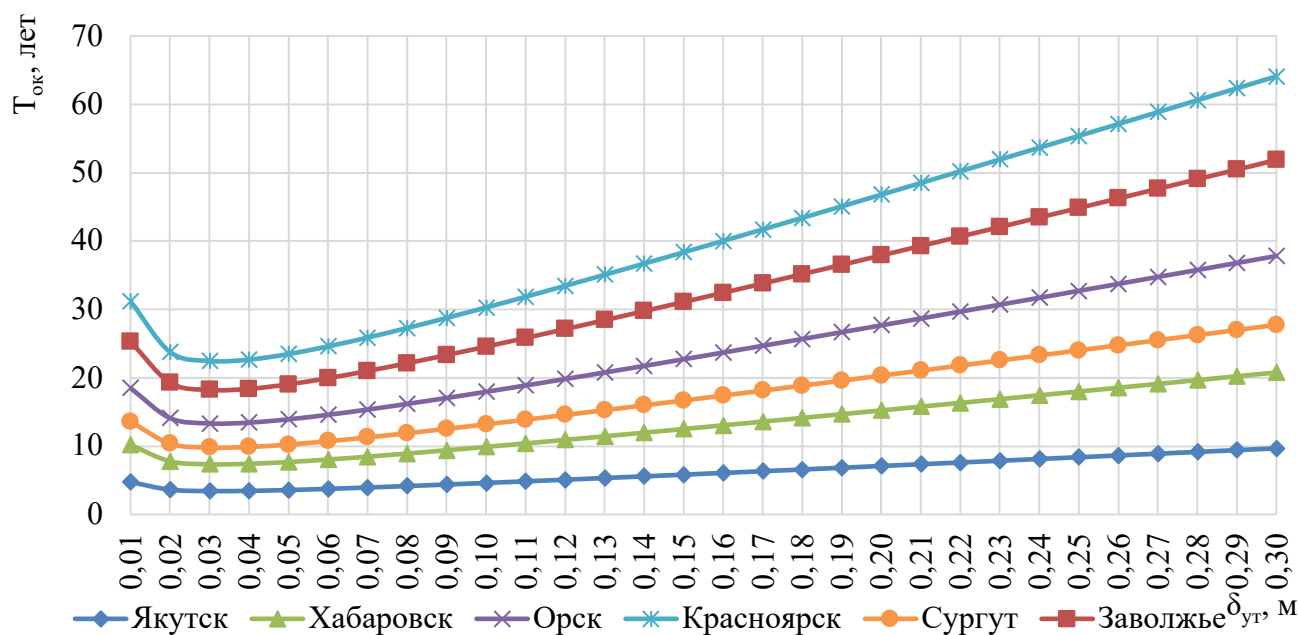


Рисунок 13 – Зависимость прогнозируемого срока окупаемости от толщины утепляющего слоя

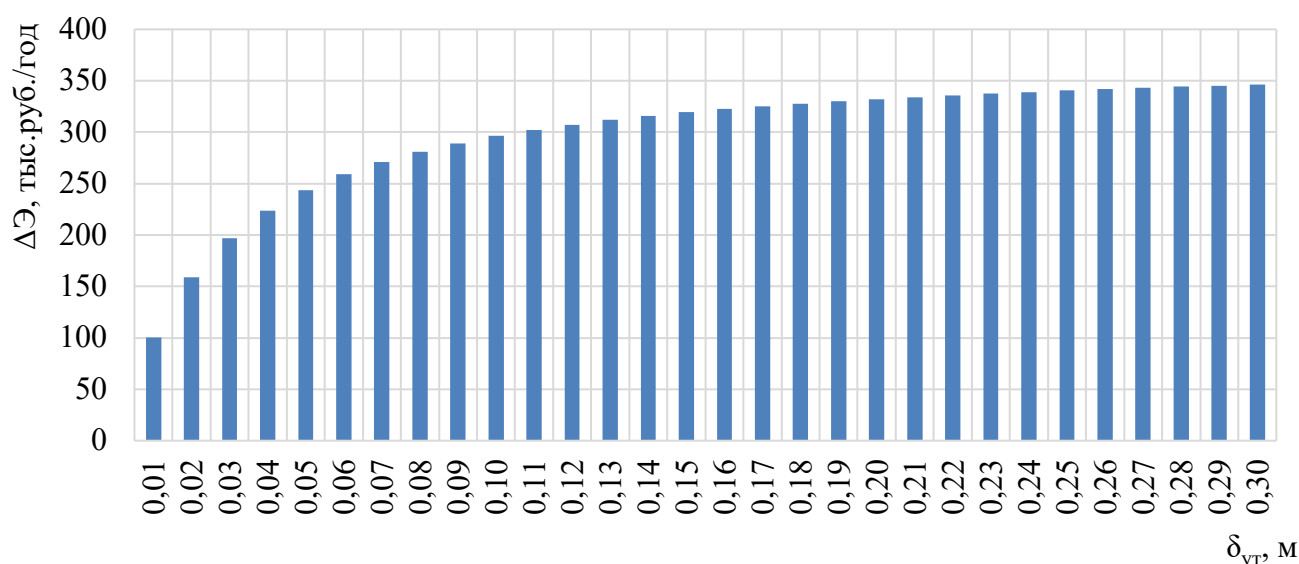


Рисунок 14 – Зависимость экономии денежных средств на оплату тепловой энергии от толщины утепляющего слоя (для г. Заволжье)

Согласно методике определения совокупных дисконтированных капитальных и эксплуатационных затрат общий эффект от применения лучистой системы лучистого отопления составил 11,32 %, или 595 руб./м² (таблица 2).

Таблица 2 – Удельная мощность исследуемых излучателей при фиксированных значениях ΔT

Тип системы	СДЗ капитальные, руб.	СДЗ эксплуатационные, руб.	ΣСДЗ, руб.
Конвективное отопление	9775169	11420130	21195300
Лучистое отопление	8974513	9822240	18796753
		Разница, руб.	2398547
		Разница, %	11,32

Анализ годового нормативного потребления тепловой энергии показал, что при использовании лучистого отопления можно добиться величины энергосбережения в 22,13 %, при использовании дежурного режима в нерабочее время эффект от применения системы лучистого отопления достигнет 27,19 %, а максимальная разница между постоянным режимом работы конвективного отопления и режимом работы лучистого отопления с использованием перехода в дежурный режим составит 37,37 % (таблица 3).

Таблица 3 – Расчёт нормативного потребления тепловой энергии на нужды отопления в отопительный период

Наименование	Примеч.	Янв.	Фев.	Мар.	Апр.	Окт.	Ноя.	Дек.	Год	Эффект, %
$t_{ср.ф}$, °С	Волжская ГМО*	-8,5	-4,1	-0,4	6,5	7,7	-0,3	-1,6	-	-
Q_o , Гкал	Конвект. отопление	278,53	209,80	193,39	116,97	108,26	186,14	206,01	1299,10	22,13
	Лучистое отопление	236,49	171,83	151,35	76,29	66,22	145,45	163,96	1011,59	
$Q_{o.p.p}$, Гкал	Конвект. отопление	63,64	62,44	51,99	35,74	33,47	51,70	60,92	359,90	22,61
	Лучистое отопление	54,04	51,14	40,69	23,31	20,47	40,40	48,48	278,53	
$Q_{o.d.p}$, Гкал	Конвект. отопление	166,24	105,35	98,46	45,98	39,61	92,93	100,93	649,50	21,91
	Лучистое отопление	145,57	90,03	76,99	23,63	15,95	72,75	82,26	507,20	
$Q_{o.p.p}$, Гкал	Конвект. отопление	19,09	18,73	15,60	10,72	10,04	15,51	18,27	107,97	74,21
	Лучистое отопление	5,40	5,11	4,07	2,33	2,05	4,04	4,85	27,85	
$Q_{o.смеш}$, Гкал	Конвект. отопление	248,97	186,52	166,04	92,45	83,11	160,14	180,13	1117,37	27,19
	Лучистое отопление	205,01	146,29	121,74	49,28	38,47	117,20	135,60	813,58	

Примечание. *гидрометеорологическая обсерватория, расположена в г. Городец (Нижегородская обл.); $z_{р.р}$ – продолжительность в рабочего режима, ч; $z_{д.р}$ – продолжительность дежурного режима, ч; $z_{п.р}$ – продолжительность переходного режима, ч; $Q_{o.p.p}$ – потребление тепловой энергии в рабочем режиме, Гкал; $Q_{o.d.p}$ – потребление тепловой энергии в дежурном режиме, Гкал; $Q_{o.p.p}$ – потребление тепловой энергии в переходном режиме, Гкал; $Q_{o.смеш}$ – потребление тепловой энергии в смешанном режиме, Гкал

На основании проведенного сравнительного анализа по трем различными методикам была доказана экономическая эффективность внедрения лучистых систем отопления.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана теплофизическая модель процессов теплопереноса в помещениях с лучистыми системами отопления, на основании которой была

получена уточнённая методика определения требуемых теплофизических свойств наружных ограждений в производственных помещениях, оборудованных системами отопления на базе водяных инфракрасных излучателей.

2. Разработана методика испытаний водяных инфракрасных излучателей, для апробации которой автором был создан комплекс оборудования в составе учебно-научно-исследовательского центра «Системы отопления с использованием низкотемпературных инфракрасных излучателей» ННГАСУ (УНИЦ «СОНИИ» ННГАСУ), позволяющий проводить данные исследования.

3. В ходе проведения экспериментальных исследований были получены достоверные теплотехнические и лучистые характеристики водяных инфракрасных излучающих профилей марок Helios 750 и Flower 125 (Россия) которые легли в основу разработанных рекомендаций по проектированию систем отопления на базе водяных инфракрасных излучателей помещений производственных зданий.

4. На основании анализа особенностей теплового и температурного режимов производственных помещений, оборудованных системами лучистого отопления на базе водяных инфракрасных излучателей, была доказана их высокая энергоэффективность. Комплексное изучение подходов к нормированию и расчету лучистых систем отопления показал необходимость выделения их в особый класс отопительных систем для учёта особенностей формирования теплового и температурного режима помещения при лучистом отоплении, и повышении эффективности их применения.

5. Результаты исследования теплового режима наружных ограждающих конструкций в помещениях с лучистыми системами отопления могут послужить основой для актуализации существующих нормативных документов в сфере создания энергоэффективных пассивных и активных систем обеспечения параметров микроклимата, сферах энергосбережения и тепловой защите зданий.

6. Результаты научно-исследовательской работы апробированы при проектировании системы лучистого отопления для ООО «Флайг+Хоммель». Обоснована экономическая эффективность применения систем лучистого отопления на базе водяных инфракрасных излучателей, достигаемая за счёт снижения расчётной температуры внутреннего воздуха без потери комфорта, меньшей тепловой инерции системы и снижения трансмиссионных тепловых потерь через покрытие помещения за счёт меньшего градиента температуры воздуха в помещении. Согласно различным методикам, эффект от внедрения лучистой системы отопления на базе водяных инфракрасных излучателей, по сравнению с конвективной системой отопления составил от 11,32 % до 37,37 %. Совокупный экономический эффект составил 2835 тыс. руб. (703 руб./м²) в ценах 2021 года по сравнению с системой отопления, построенной на базе водяных радиаторов.

7. Применение результатов исследований в прикладной и научно-педагогической деятельности подтверждается рядом актов внедрения: в производственный процесс при обосновании выбора конкретных инженерных решений систем обеспечения параметров микроклимата (ООО «Флайг+Хоммель»); при решении задачи снижения общего потребления теплоты в рамках промышленного комплекса России (Министерство строительства Нижегородской области); при проектировании систем отопления ведущими проектными

организациями Нижегородской области (ООО «Аспирация»); в учебный процесс (ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»).

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы исследования: исследование влияния строительных конструкций с различными коэффициентами серости на формируемый тепловой и температурный режимы в отапливаемом помещении.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, перечень которых устанавливает Минобрнауки России

1. Смыков, А.А. Температурный режим наружных ограждений помещений с системами отопления на базе газовых инфракрасных излучателей / А.А. Смыков, В.И. Бодров, Л.Ю. Михайлова // Приволжский научный журнал. – 2015. – № 2 (34). – С. 58...64.

2. Смыков, А.А. Исследование теплового режима наружных ограждающих конструкций в промышленных помещениях с системами отопления на базе инфракрасных излучателей / А.А. Смыков, В.И. Бодров, В.Ф. Бодрова // Приволжский научный журнал. – 2018. – № 2 (46). – С. 23...36.

3. Смыков, А.А. Исследование систем лучистого отопления на базе низкотемпературных инфракрасных излучателей / А.А. Смыков, В.И. Бодров, М.В. Бодров // Приволжский научный журнал. – 2019. – № 3 (51). – С. 52...57.

4. Смыков, А.А. Исследование теплотехнических характеристик низкотемпературных инфракрасных излучателей / А.А. Смыков, В.И. Бодров, М.В. Бодров // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2019. – № 10 (214). – С. 32...36.

5. Смыков, А.А. Применение технологий низкотемпературного лучистого отопления в помещениях содержания крупного рогатого скота / А.А. Смыков, М.В. Бодров, Д.Е. Седнев, А.Е. Руин // Приволжский научный журнал. – 2020. – № 4 (56). – С. 114...118.

6. Смыков, А.А. Температурный режим цеха металлообработки при использовании системы отопления на базе водяных ИК-излучателей / А.А. Смыков, М.В. Бодров, Д. Кузнецов // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2020. – № 12 (214). – С. 32...36.

7. Смыков, А.А. Исследование теплового режима помещения, оборудованного системой лучистого отопления на базе водяных инфракрасных излучателей и экономической эффективности данного решения / А.А. Смыков, М.В. Бодров, В.П. Болдин // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2021. – № 5 (223). – С. 38...41.

8. Смыков, А.А. Тепловой и температурный режим помещений с системами отопления на основе водяных инфракрасных излучателей / А.А. Смыков // Приволжский научный журнал. – 2021. – № 2 (58). – С. 98...106.

9. Смыков, А.А. Повышение энергоэффективности пассивных систем обеспечения параметров микроклимата в производственных помещениях / А.А. Смыков, М.В. Бодров, А.Ф. Юланова, А.Е. Руин // Приволжский научный журнал. – 2021. – № 4 (60). – С. 84...89.

10. Смыков, А.А. Снижение энергоемкости и повышение экологической безопасности производственных помещений при использовании систем лучистого отопления на базе водяных инфракрасных излучателей/ А.А. Смыков, М.В. Бодров // Вестник МГСУ. – 2021. – № 12 (157). – С. 1599...1607.

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, входящих в зарубежные индексы цитирования

11. Смыков, А.А. Системы лучистого отопления на базе водяных инфракрасных излучателей для текстильной промышленности / А.А. Смыков, М.В. Бодров, М.С. Морозов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2020. – № 6 (390). – С. 168...174.

12. Smykov, A. Energy efficiency of radiant heating systems based on water-based radiant profiles / M. Bodrov, A. Smykov, M. Morozov // Civil Engineering Journal. – 2021. – Vol. 9, № 5. – P. 1546...1557.