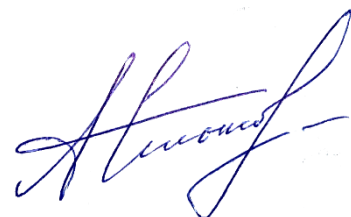


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, доцент
Бодров Михаил Валерьевич



Нижегород – 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ ЛУЧИСТОГО ОТОПЛЕНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ МИКРОКЛИМАТА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ..	16
1.1. Закономерности лучистого теплообмена.....	17
1.2. Классификация систем лучистого отопления.....	24
1.3. Анализ состояния человека и условий комфортности при инфракрасном отоплении.....	29
1.4. Основы расчёта и проектирования лучистых систем отопления.....	38
Выводы по 1 главе.....	42
ГЛАВА 2. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ПОМЕЩЕНИЙ С СИСТЕМАМИ ОТОПЛЕНИЯ НА БАЗЕ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ.....	44
2.1. Методы расчёта лучистых систем отопления.....	44
2.2. Тепловой баланс и температурный режим в помещениях с конвективным отоплением.....	48
2.3. Тепловой баланс и температурный режим в помещениях с лучистым отоплением.....	50
2.4. Температурный режим наружных ограждающих конструкций в облучаемой и необлучаемой зонах помещений, оборудованных лучистым отоплением.....	54
2.5. Численный эксперимент.....	56
Выводы по 2 главе.....	60
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДЯНЫХ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ И ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ПОМЕЩЕНИЙ С СИСТЕМАМИ ЛУЧИСТОГО ОТОПЛЕНИЯ.....	61
3.1. Планирование экспериментальных исследований.....	62
3.2. Исследование теплотехнических характеристик водяных инфракрасных излучателей (эксперимент № 1).....	64
3.3. Исследование лучистых характеристик водяных инфракрасных излучателей (эксперимент № 2).....	70
3.4. Исследование теплового режима в помещениях с системами отопления на базе водяных инфракрасных излучателей (эксперимент № 3).....	74
3.4.1. Лабораторные исследования.....	74
3.4.2. Натурные исследования.....	77
3.4.3. Выводы по эксперименту № 3.....	83
3.5. Исследование температурного режима в помещениях, оборудованных системами лучистого отопления на базе водяных инфракрасных излучателей (эксперимент № 4).....	83
3.5.1. Лабораторные исследования.....	83

3.5.2. Натурные исследования.....	86
3.5.3. Выводы по эксперименту № 4.....	88
3.6. Исследование теплового режима наружных ограждающих конструкций в помещениях с системами отопления на базе водяных инфракрасных излучателей (эксперимент № 5).....	88
3.6.1. Лабораторные исследования.....	88
3.6.2. Натурные исследования.....	91
3.6.3. Выводы по эксперименту № 5.....	93
3.7. Математическая обработка результатов экспериментальных исследований.....	93
Выводы по 3 главе.....	100
ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ И ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛУЧИСТЫХ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ НА БАЗЕ ВОДЯНЫХ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ.....	101
4.1. Методика проектирования системы лучистого отопления на базе водяных инфракрасных излучателей.....	101
4.2. Экономическая эффективность применения систем лучистого отопления на базе водяных инфракрасных излучателей.....	108
4.2.1. Методика определения экономически-обоснованного утепления контура здания.....	109
4.2.2. Расчёт по методике совокупных дисконтированных затрат.....	116
4.2.3. Расчёт по методике определения расходов теплоты.....	119
Выводы по 4 главе.....	122
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	123
ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.....	125
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	134
ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ.....	147
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. СВИДЕТЕЛЬСТВА О РЕГИСТРАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ.....	151
ПРИЛОЖЕНИЕ В. ПЕРЕЧЕНЬ ПРОВЕДЁННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	152
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. ЛАБОРАТОРИЯ ЛУЧИСТОГО ОТОПЛЕНИЯ.....	153
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	159
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАСЧЁТА.....	165

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

Сокращения:

ИИ – инфракрасный излучатель;
ВИИ – водяной инфракрасный излучатель;
ГИИ – газовый инфракрасный излучатель;
ГЛО – газовое лучистое отопление;
ТЭО – технико-экономическое обоснование;
СДЗ – совокупные дисконтированные затраты.

Обозначения:

φ – относительная влажность воздуха, %;
 τ – температура поверхности, °С;
 q – тепловой поток, Вт/м²;
 λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·°С;
 Q – тепловая мощность, Вт;
 I – интенсивность теплового потока, Вт/м²;
 δ – толщина, м;
 c – теплоемкость, Дж/кг·К;
 v – скорость движения воздуха, м/с;
 K – коэффициент теплопередачи, Вт/м²·°С;
 ε – степень черноты поверхности;
ГСОП – градусо-сутки отопительного периода, °С·сут/год;
 F – площадь, м²;
 V – объем, м³;
 C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/м²·К⁴;
 α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·°С;
 E – интегральная интенсивность излучения, Вт/м²;
 d – диаметр, м;

h – высота, м;

l – длина, м;

L – воздухообмен, расход воздуха, м³/ч;

q – удельные тепlopоступления, Вт/м²;

R_o – сопротивление тепlopередаче ограждения, (м²·°C)/Вт;

t – температура, °C.

Надстрочные и подстрочные индексы:

λ – длина волны; о – общий; в – внутренний; н – наружный; R – радиационный; чел – человек; д – диффузия; отр – отраженный; пот – потери; в.з, в.в – верхняя зона; пр – приточный; ух – уходящий; г – природный газ; огр – ограждение; в.р – рабочая зона; ст – стена; тр – требуемый; доп – дополнительный; точ – точечный; общ – общий; изл – излучатель; но – наружное ограждение; инф – инфильтрация; т – теплоноситель; пр – профиль; уд – удельный; норм – нормативный; ок – окно; покр – покрытие; дв – дверь; от – отопление; ти – теплоизоляция; р.р – рабочий режим; п.р – переходный режим; д.р – дежурный режим; смеш – смешанный режим.

ВВЕДЕНИЕ

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, задачей, обладающей высокой актуальностью, является снижение энергозатрат при обеспечении теплотой производственных зданий [68, 69, 96]. Традиционные схемы водяного и воздушного отопления зачастую оказываются чрезмерно затратными, применение таких типов отопления для крупнообъёмных производственных зданий не является экономически обоснованным [93]. 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 [11].

Благодаря широкому спектру научных исследований в области теплотехники, каждый год на рынке появляются всё более совершенные технологии, устройства и системы устройств [28, 43, 47]. 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. [5...9, 14, 22, 38, 40, 49, 51, 52, 55, 56, 60, 63, 71...76, 88, 94, 102, 106, 108, 116, 123]. 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.) [2, 3, 16, 29, 36, 41, 51, 57, 73, A13...A32]. Во многих случаях использование

лучистых систем отопления является более энергоэффективным решением для отопления крупнообъемных производственных помещений [17, 20]. Из-за того, что действующие нормативные документы в области отопления не учитывают особенности работы таких систем – они получили недостаточно широкое распространение на данный момент [79, 85, 86].

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 [79]. Однако, согласно действующим нормативным документам, требуемая мощность системы отопления здания приравнивается к его тепловым потерям, таким образом преимущества лучистых систем отопления перечёркиваются [11]. 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 [20].

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

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 энергоэффективности лучистых систем отопления 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;
- 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;

6) проведение экспериментальных исследований основных закономерностей формирования теплового режима наружных ограждающих конструкций в помещениях, оборудованных системами лучистого отопления;

7) разработка новой методики проектирования систем лучистого отопления производственных помещений.

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 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, 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, 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;
- 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, в результате выполненных лабораторных и натурных экспериментов;
- 5) разработанная инженерная методика проектирования систем лучистого отопления производственных помещений.

Методологическими основами исследования являются законы теплообмена, строительной теплофизики, такие как: закон Кирхгофа, Ньютона-Рихмана, Вина, Ламберта, Стефана-Больцмана, Навье-Стокса. В

исследованиях были применены как теоретические, так и экспериментальные методы.

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, был разработан проект системы лучистого отопления в производственном здании ООО «Флайг+Хоммель» (г. Заволжье, Нижегородская область). Работы по проектированию лучистой системы отопления 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.

Диссертационная 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. Диссертационные исследования проводились в рамках: 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 316-06-16-60a/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 проведённых исследований докладывались и обсуждались в рамках ряда конференций: научная конференция IV Всероссийского Фестиваля науки, г. Н. Новгород, 2014 г.; конгресс 17-го Международного научно-промышленного форума «Великие реки - 2015», 2015 г.; региональная научная студенческая конференция «Экология и энергосбережение: проблемы и перспективы», г. Н. Новгород, 2015 г.; научная конференция V Всероссийского Фестиваля науки, г. Н. Новгород, 2015 г.; научная конференция магистрантов и студентов по направлениям подготовки 08.04.01 Строительство, профили «Системы обеспечения микроклимата зданий и сооружений», «Возобновляемые источники энергии и энергоэффективность в зданиях», 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника, г. Н. Новгород, 2015 г.; 21 Сессия молодых ученых (технические науки), г. Н. Новгород, 2016 г.; научная конференция VI Всероссийского Фестиваля науки, г. Н. Новгород, 2016 г.; всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых с международным

участием, г. Екатеринбург, 2016 г.; конгресс 18-го Международного научно-промышленного форума «Великие реки - 2016», г. Н. Новгород, 2016 г.; XV международная научная конференция «Качество внутреннего воздуха и окружающей среды - 2016», г. Афины, 2016 г.; 22 Сессия молодых ученых (технические науки), г. Н. Новгород, 2017 г.; конгресс 19-го Международного научно-промышленного форума «Великие реки - 2017», г. Н. Новгород, 2017 г.; научная конференция VII Всероссийского Фестиваля науки, г. Н. Новгород, 2017 г.; Международная научно-практическая конференция «Экологическая безопасность и устойчивое развитие урбанизированных территорий», г. Н. Новгород, 2018 г.; конгресс 20-го Международного научно-промышленного форума «Великие реки - 2018», г. Н. Новгород, 2018 г.; 23 Сессия молодых ученых (технические, естественные, математические науки), г. Н. Новгород, 2018 г.; научная конференция VIII Всероссийского Фестиваля науки, г. Н. Новгород, 2018 г.; XVI международная научная конференция «Качество внутреннего воздуха и окружающей среды - 2018», г. Флоренция, 2018 г.; II Международная научно-практическая конференция «Экологическая безопасность и устойчивое развитие урбанизированных территорий», г. Н. Новгород, 2019 г.; конгресс 21-го Международного научно-промышленного форума «Великие реки - 2019», г. Н. Новгород, 2019 г.; 24 Сессия молодых ученых (технические, естественные, математические науки), г. Н. Новгород, 2019 г.; XVII международная научная конференция «Качество внутреннего воздуха и окружающей среды - 2019», г. Москва, 2019 г.; научная конференция IX Всероссийского Фестиваля науки, г. Н. Новгород, 2019 г.; конгресс 22-го Международного научно-промышленного форума «Великие реки - 2020», г. Н. Новгород, 2020 г.; международная научно-техническая конференция, посвященная 100-летию Белорусского национального технического университета, 100-летию кафедры «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика», 90-летию кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция», г. Минск, 2020 г.; XVIII международная научная конференция «Качество внутреннего воздуха и окружающей среды - 2020», г. Москва, 2020 г.; VIII Всероссийская научно-

техническая конференция, посвященная столетию МИСИ-МГСУ, г. Москва, 2020 г.; научная конференция X Всероссийского Фестиваля науки, г. Н. Новгород, 2020 г.; 25 Сессия молодых ученых (технические, естественные, математические науки), г. Н. Новгород, 2020 г.; 26 Сессия молодых ученых (технические науки), г. Н. Новгород, 2021 г.; XXIV Международная научная конференция «Строительство – формирование среды жизнедеятельности (FORM-2021)», г. Москва, 2021 г.; XIX международная научная конференция «Качество внутреннего воздуха и окружающей среды - 2021», г. Волгоград, 2021 г.

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.

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.

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).

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ ЛУЧИСТОГО ОТОПЛЕНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ МИКРОКЛИМАТА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

Среди различных способов обогрева помещений разнообразного назначения в последние годы заново привлекло внимание лучистое отопление, как обеспечивающее более эффективное использование тепловой энергии на производственных объектах. По сравнению с конвективным способом передачи тепла при инфракрасном отоплении энергия передается на значительные расстояния в помещении. Таким образом нагревательные приборы можно размещать под покрытием (в межферменном пространстве), в конструктивных элементах ограждений и т.д. Наша страна является одним из пионеров использования лучистого отопления, активное внедрение таких систем началось в 50-х годах XX века. Основы теории лучистого отопления в России и за границей были сформированы в трудах Г.Л. Поляка, С.Н. Шорина, М.И. Киссина, А.А. Сандера, Р. Зигеля, Дж. Хауэлла, А. Мачкаши, Л. Банхиди, А.К. Родина, П. Фангера, А. Коллмара, А. Миссенара, А.И. Богомолова, А.Н. Сканави, В.Н. Богословского, М.Б. Равича, С.А. Оцепа, Ж.В. Мирзояна, О.Н. Брюханова, Г.Н. Северинеца, А.М. Левина [2...9, 14, 22, 34, 37, 38, 40, 44...46, 49, 50...52, 55, 56, 58, 60, 63, 64, 67, 78, 80, 81, 88, 94, 102, 106, 108, 116, 123].

Главной задачей системы отопления является создание устойчивых параметров внутреннего воздуха в помещении, для обеспечения теплового комфорта находящихся там людей и эффективного протекания технологических процессов. Вследствие этого основными тематиками исследований, связанных с применением лучистого отопления, являются: расчёт требуемой тепловой мощности системы; разработка конструкций инфракрасных излучателей; повышение эффективности существующих конструкций инфракрасных излучателей; изучение влияния на организм человека.

В труде [51] авторов А. Мачкаши и Л. Банхиди представлен способ расчёта системы лучистого отопления, методы определения тепловых параметров тела человека, теория расчёта его теплоощущения, а также уравнение теплового комфорта. А.К. Родин в своих работах [22, 72, 74...76] рассматривает особенности расчёта ГИИ, с учетом различных аспектов инфракрасного обогрева.

В ходе ряда исследований [23, 49, 65], посвящённых изучению санитарно-гигиеническим особенностям теплообмена человека и окружающей его среды было доказано, что применение лучистого отопления является эффективным, так как в отапливаемом помещении допускается снижение расчётной температуры внутреннего воздуха, не приводящее к ухудшению условий теплового комфорта. Уменьшение температуры внутреннего воздуха на 1 °С позволяет сэкономить до 7 % теплоты при обеспечении теплотой помещения [103, 104]. В действующей нормативной документации [86] допускается снижение температуры воздуха до 4 °С ниже минимально допустимой температуры в холодный период года для рабочей зоны помещения.

Главными параметрами воздуха внутри помещения являются: температура воздуха, t_v , °С, относительная влажность воздуха ϕ_v , %; подвижность воздуха v_v , м/с; и важная составляющая для лучистого отопления радиационная температура t_R , °С, которая при данном типе отопления выше значения t_v , °С.

1.1. Закономерности лучистого теплообмена

Явление лучистой теплопередачи лежит в основе проектирования различных технических установок инженерных систем зданий. Расчет лучистого отопления ведется по основным законам излучения, применяемых в инженерной практике. Лучистое отопление основано на законах излучения как одной из форм электромагнитного излучения в инфракрасном диапазоне (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Молекулярные и атомарные явления, вызывающие излучение [71]

Длина волны, мкм	Характер излучения	Явление
Менее 10^{-5}	Радиоактивное	Переход в состояние возбужденного радиоактивного атомного ядра
$10^{-5} \dots 10^{-3}$	Рентгеновское	Изменение траектории внутренних электронов атома
$10^{-3} \dots 0,4$	Ультрафиолетовое	Изменение траектории наружных электронов атома
$0,4 \dots 0,7$	Видимый свет	Изменение траектории наружных электронов атома
$0,7 \dots 10^2$	Инфракрасное	Изменение частоты колебаний и скорости вращения молекул

Принцип образования электромагнитной волны следующий. Излучение создает ускоряющийся заряд, возникает магнитное поле, которое расходуется на ускорение заряда.

Под воздействием тепла атомы тела начинают двигаться быстрее, (у атомов твердого материала ускоряются колебания относительно состояния равновесия), атомы сталкиваются (неупругое столкновение). Таким образом их внутренняя энергия возрастает, а энергия движения уменьшается. Во время излучения атомная электронная оболочка колеблется наподобие микроскопической антенны. Излучение электромагнитных волн является одним из способов отдачи возрастающей энергии. Длина волны при различных температурах разная, это характеризует силу излучения.

Исходя из вышесказанного стоит отметить, что тепловое излучение в основном происходит в инфракрасном диапазоне электромагнитного излучения. На рисунке 1.1 представлена спектральная интенсивность излучения поверхности абсолютно черного тела I_λ , Вт/(м²·м) как функция длин волн при различных температурах. Значения I_λ , приведены на данной диаграмме, в соответствии с законом Планка.

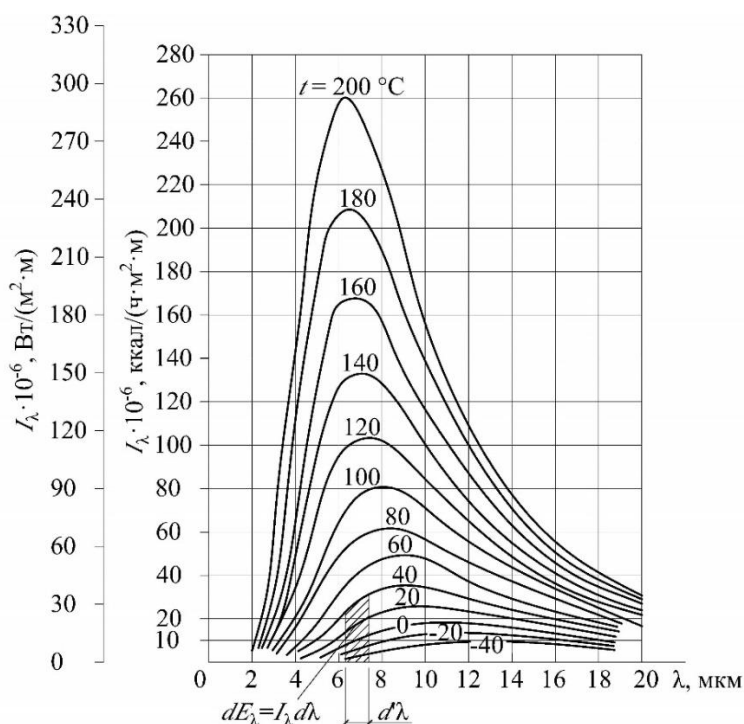


Рисунок 1.1 – Спектральная интенсивность излучения поверхности абсолютно черного тела как функция длин волн при различных температурах

Поверхности, находящиеся в помещении чаще всего, имеют достаточно низкую температуру, их инфракрасное излучение находится в достаточно узком диапазоне длин волн, следовательно его можно рассматривать как монохроматическое. Заменяв полихроматическое излучение монохроматическим, мы можем получить первое упрощение при расчёте лучистого теплообмена в помещении. Кривые, представленные на рисунке 1.1 имеют тенденцию быть параболическими, следовательно, длина волны, которая соответствует максимальной интенсивности излучения, может быть принята за среднюю длину волны $\lambda_{\text{макс}}$, которая определяется с помощью закона Вина: $\lambda_{\text{макс}} = \alpha/T$, где α – это постоянная Вина. Зачастую температура поверхностей помещения ложится в диапазон от 0 до 150 °С, тогда длины волн $\lambda_{\text{макс}}$ приходится на диапазон от 11 до 7 мкм.

Исходя из кривых, представленных на рисунке 1.1 интенсивность излучения абсолютно чёрного тела определяется по формуле: $dE_o = I_\lambda d\lambda$, Вт/м², которая соответствует определённому диапазону длины волны в интервале от λ до $\lambda + d\lambda$.

Для всего спектра длин волн можно определить интенсивность излучения нагретой поверхности через интегрирование зависимостей, которые формируют кривые, представленные на рисунке 1.1. Определить значение интегральной интенсивности излучения E_o , Вт/м² можно, применив закон Стефана-Больцмана:

$$E_o = \int_0^{\infty} I_\lambda d\lambda = C_o (T / 100)^4, \quad (1.1)$$

где C_o – коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный 5,77 Вт/(м²·К⁴).

На рисунке 1.2 приведены значения интегральной интенсивности излучения E_o в зависимости от температуры излучающей поверхности.

Окружающие поверхности, которые находятся в помещении – это серые тела, они отличаются от абсолютно чёрных тем, что выделяют меньше теплоты, а падающий на них поток излучения поглощается ими не полностью в соответствии с законом Кирхгофа [6]:

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1, \quad (1.2)$$

где: ρ – коэффициент отражения (отношение общей энергии излучения, отраженной поверхностью, к общей энергии излучения, падающего на эту поверхность);

τ – коэффициент пропускания (коэффициент характеризующий способность материала пропускать через себя инфракрасное излучение и зависит от типа и толщины материала);

ε – коэффициент излучения (отношение излучения поверхности объекта к излучению абсолютно черного тела при той же температуре и в том же интервале длин волн).

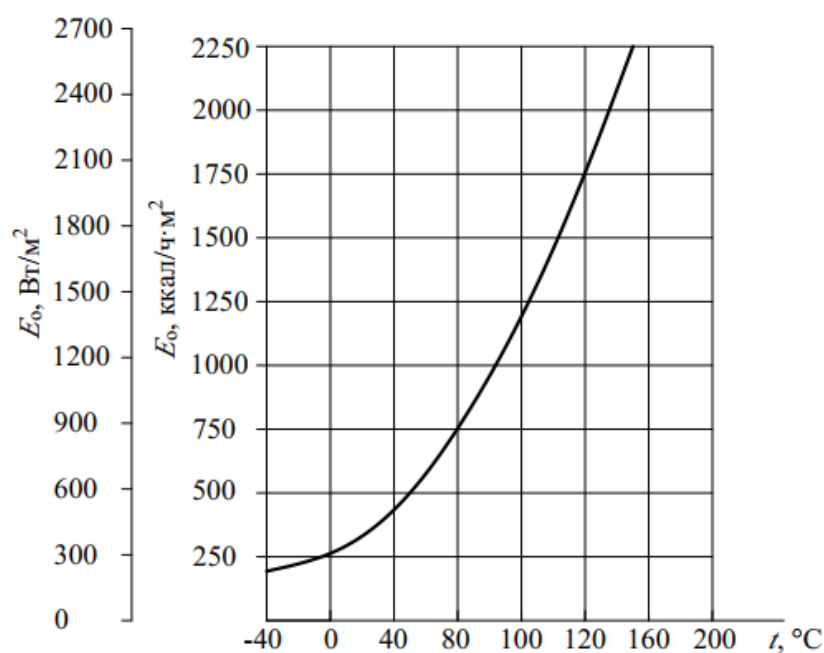


Рисунок 1.2 – Интенсивность интегрального излучения абсолютно черного тела в зависимости от температуры

Используемые в сфере строительства материалы условно можно поделить на две группы: проводники и диэлектрики. В отношении инфракрасного диапазона спектра электромагнитного излучения между этими группами существуют заметные различия. Диэлектрики большую часть излучения, падающего на них, поглощают, а проводники – отражают. Следуя закону Кирхгофа коэффициенты излучения и поглощения тождественны между друг другом, из этого следует, что диэлектрики выделяют больше теплоты чем проводники.

Коэффициент излучения серого тела C всегда меньше коэффициента излучения абсолютно чёрного тела C_0 [6]:

$$C = \varepsilon C_0, \quad (1.3)$$

где ε – относительный коэффициент излучения поверхности или степень черноты, для серых тел $\varepsilon < 1$.

Интенсивность интегрального излучения серой поверхности «1» можно определить по следующей зависимости [6]:

$$E_1 = \varepsilon_1 E_{0,1} = \varepsilon_1 C_0 (T_1 / 100)^4. \quad (1.4)$$

Значительное влияние на свойства отражения и поглощения излучения поверхности оказывает её износ, а также угол падения излучения и длина волн. На рисунке 1.3 представлена зависимость относительных коэффициентов поглощения и отражения различных материалов от температуры источника излучения [6].

Зависимость относительной поглощающей способности от угла падения излучения представлена на рисунке 1.4. Согласно закону Ламберта, интенсивность излучения прямо пропорциональна косинусу угла падения, однако для материалов, которые чаще всего применяются в строительстве эти отклонения не выражены чётко, что подтверждается кривыми, представленными на рисунке 1.4.

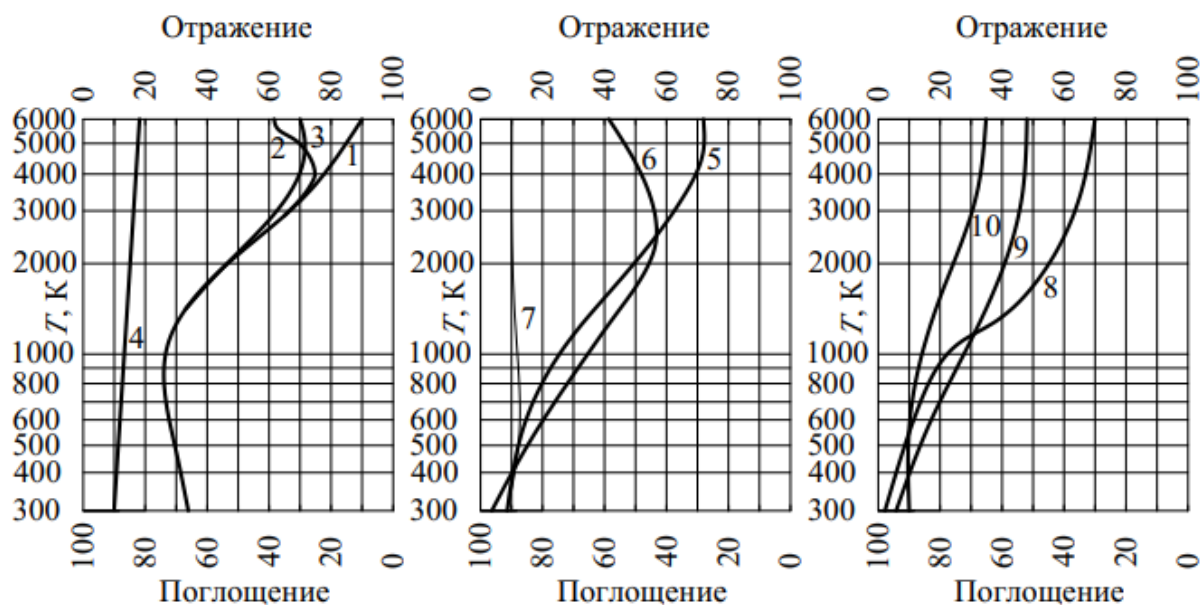


Рисунок 1.3 – Отражательная и поглощательная способности материалов в зависимости от температуры источника (абсолютно черного тела) падающего излучения: 1 – бумага; 2 – дерево; 3 – материал одежды; 4 – линолеум (красно-коричневый); 5 – штукатурка гипсовая; 6 – красный кирпич; 7 – шиферные плиты; 8 – кафель белый; 9 – керамическая плитка; 10 – бетон

Для монохроматического диапазона интегрального излучения можно принимать осреднённые значения коэффициентов поглощения и излучения поверхностей равными между собой.

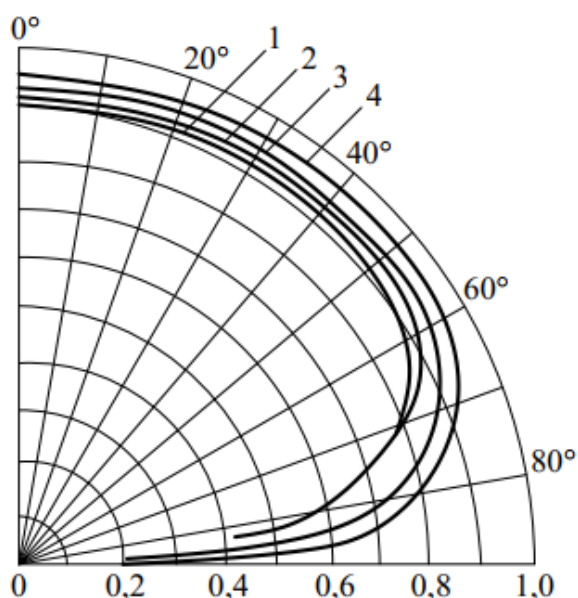


Рисунок 1.4 – Относительная поглощательная способность в зависимости от угла направления излучения: 1 – глина; 2 – стекло; 3 – бумага; 4 – древесина

Значения данных коэффициентов при температурах источника излучения 0...150 °С приведены в таблице 1.2, также в таблице указаны значения коэффициентов поглощения материалами солнечного излучения, при температуре источника порядка 6000 К.

Инфракрасное излучение от поверхностей помещения можно рассматривать как монохроматическое, подчиняющееся законам Стефана-Больцмана, Ламберта и Кирхгофа. Воздух в помещении не обладает собственной тепловой энергией, а наличие в нём углекислого газа и водяного пара при небольших расстояниях не изменяет свойств воздушных масс – они остаются прозрачными для электромагнитного излучения в инфракрасном диапазоне.

Таблица 1.2 – Значения относительного коэффициента излучения ϵ (при температурах 0...150 °С) и относительного коэффициента поглощения солнечной радиации ρ (при температуре около 6000 К) поверхностями различных материалов, используемых в строительстве

Наименование материала и состояние поверхности	ϵ	ρ
Кирпич обыкновенный:		
- красный	0,93	0,70...0,74
- светло-коричневый	-	0,55
- глазурованный белый	-	0,26
Песчаник шлифованный:		
- желто-коричневый	-	0,54
- светлый	-	0,62
- красный	0,57	0,73
Гранит серый светлый полированный	0,42	0,80
Известняк шлифованный:		
- светлый	0,40	0,35
- тёмный	0,40	0,50
Мрамор шлифованный:		
- серый	0,93	0,30
- темный	0,93	0,65
Бетон, гладкая поверхность	0,62	0,54...0,65
Краски масляные:		
- кармин светлый, красный	-	0,52
- ультрамарин (синий)	-	0,64
- кобальт зеленый светлый	-	0,58
- марс коричневый	0,81	0,65
- кобальт фиолетовый	-	0,83
- зелень изумрудная	-	0,61
- охра золотистая	-	0,44
- охра красная	-	0,63
Штукатурка:		
- светлая	0,91	0,42
- тёмная	0,94	0,73
Дерево:		
- неокрашенное	0,7...0,9	0,59
- окрашенное светло-желтое	-	0,60
Асбест белый	0,96	0,42
Рубероид	0,93	0,76...0,94
Голь черный	0,91	0,86...0,88
Железо:		
- полированное	0,128	0,45
- оцинкованное	0,28	0,64
Асбоцемент белый	0,96	0,61
Алюминий:		
- матовый	0,055	0,52
- полированный	0,039...0,057	0,26
Стекло оконное, $\delta = 4,5$ мм	-	0,04
То же, $\delta = 7$ мм	0,94	0,076

1.2. Классификация систем лучистого отопления

Классификация инфракрасных излучателей основывается на их различных характеристиках: температуре поверхности устройства, конструкции устройства, местоположении устройства, типе и свойствах теплоносителя и т.д. Среди различных характеристик инфракрасных излучателей на первое место выходит температура поверхности нагревательного прибора. Именно она определяет другие его особенности [35].

Лучистое отопление можно разделить на группы по температуре поверхности отопительных приборов, так различают отопление с высокой, низкой и средней температурой [4]. Низкотемпературные лучистые нагревательные приборы: температура их поверхности не превышает 90 °С. Их можно размещать в ограждающих конструкциях. Теплоносителем может служить горячая вода, пар низкого давления, в редких случаях воздух. Среднетемпературные приборы имеют поверхность с нагревом от 90 °С до 200 °С. Для высокотемпературных приборов характерны значения температур на поверхности выше 200 °С и может достигать значений 500...900 °С. Установка двух последних типов приборов предусматривается вне ограждающих конструкций отапливаемых помещений. В данных двух случаях в качестве теплоносителя используется перегретая вода, пар высокого давления, нефть, газ.

Лучистые обогреватели часто классифицируют по спектральному составу излучения с максимальной энергией в определенном диапазоне длины волны [74], так различают приборы:

- белого свечения: температура поверхности излучателя 1000...1500°С ($\lambda = 0,76...2,5$ мкм);
- красного свечения: температура поверхности излучателя 700...1000 °С ($\lambda = 2,3...3,5$ мкм);
- темно-красного свечения: температура поверхности излучателя 300...700 °С ($\lambda = 3,5...5$ мкм);

- тёмного свечения: температура поверхности излучателя 35...300 °С ($\lambda = 5,8...9$ мкм).

Самым энергоэффективным видом излучателей являются газовые инфракрасные излучатели (ГИИ) [13]. Основным преимуществом систем лучистого отопления, построенных на базе ГИИ, можно назвать отсутствие промежуточного теплоносителя. Энергия первичного энергоносителя поступает непосредственно в отапливаемое помещение, за счёт чего повышается общая эффективность работы системы. Однако у таких систем лучистого отопления существует ряд ограничений, например, такие системы нельзя применять:

- в зданиях V степени огнестойкости;
- в помещениях подвального и цокольного этажей;
- во взрывоопасных зонах производственных помещений и складов;
- в зданиях любой степени огнестойкости классов конструкционной пожарной опасности С1, С2 и С3 [86];
- в помещениях для парковки и ремонта транспортных средств, работающих на природном газе.

Дополнительно стоит отметить, что выброс продуктов сгорания зачастую происходит непосредственно в отапливаемое помещение, что также накладывает ряд ограничений на использование подобных систем. Ограничивает возможности использования таких систем в регионах, где подключение газа связано с большими капитальными вложениями и нецелесообразно по финансовым соображениям.

Общая классификация горелок инфракрасного излучения, применяемых для отопления, начинается с условного их разделения на «тёмные» и «светлые» [4, 18, 35]. Отличие «тёмных» от «светлых» заключается в методе сжигания природного газа: закрытым пламенем в трубных нагревательных элементах или открытым пламенем на излучающей поверхности. Соответственно, все горелки инфракрасного излучения, сжигающие газ открытым пламенем – горелки инжекционного типа с коэффициентом избытка воздуха $\alpha > 1$.

Инжекционные горелки полного смешивания обычно рассчитаны на работу с коэффициентом избытка воздуха 1,02...1,05. Сжигание газоздушных смесей при $\alpha > 1,1$ не рекомендуется, поскольку при этом понижается температура горения и, как следствие, мощность излучения самой горелки.

Инфракрасный излучатель «темного» типа простейшей конструкции (рисунок 1.5) состоит из двух труб длиной около 5 м и диаметром 75 мм. Один конец трубы соединен друг с другом. На одном трубопроводе установлен вентилятор, на другом газогорелочный блок. Оба трубопровода накрыты алюминиевым или стальным отражателем. Чаще всего данный тип излучателей устанавливается непосредственно под перекрытием помещения.

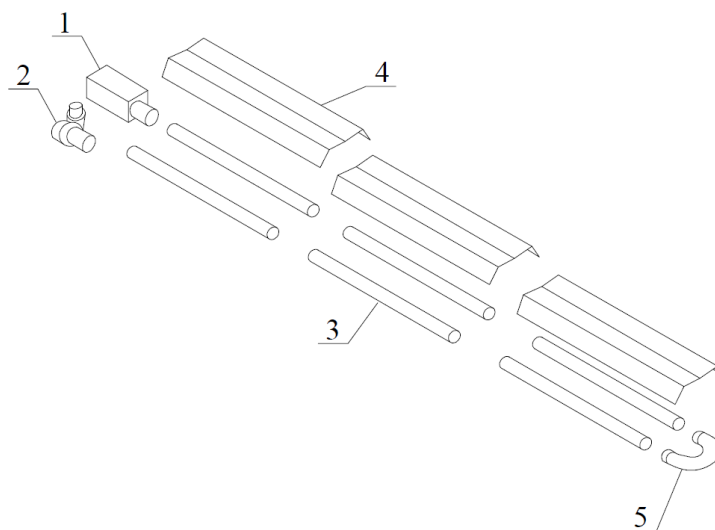


Рисунок 1.5 – Модульный инфракрасный излучатель: 1 – газогорелочный блок; 2 – вытяжной вентилятор; 3 – трубы с теплоизлучающей поверхностью, нагреваемые проходящими внутри продуктами сгорания, прямые или U-образные; 4 – теплоотражающий экран; 5 – соединительное колено

Газогорелочный блок создаёт пламя, распространяющееся по всей длине отопителя, с другой стороны, вентилятор создаёт тягу для уходящих газов, которые проходят через него и выхлопную трубу, после чего удаляются в атмосферу. В рабочем режиме трубопроводы излучателя нагреваются до температуры 150...650 °С и излучают электромагнитное излучение в инфракрасном диапазоне. При помощи рефлектора лучистая теплота направляется вниз – в рабочую зону помещения.

Сама горелка содержит в себе две основных составляющих: первая – камера сгорания, содержащая устройство зажигания, головку горелки и пламячувствительные электроды, вторая – регулятор давления газа, запорный клапан подачи газа, регулятор горелки и выключатель вакуумной системы тяги.

В настоящее время выпускаются нагреватели мощностью 10...44 кВт с прямыми и U-образными трубами, нагреватели с индивидуальными вентиляторами и театральные системы, использующие один общий вытяжной вентилятор.

Большинство «светлых» ГИИ имеют подобное конструктивное решение [35]: стабилизирующее устройство, смесительную камеру, сопло горелки и устройство для подачи газозвушной смеси (рисунок 1.6). В зависимости от требований к ГИИ каждый из конструктивных её элементов может иметь различное исполнение.

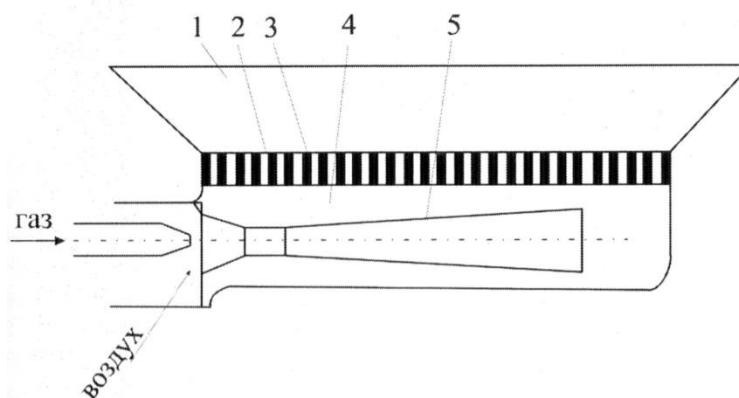


Рисунок 1.6 – Принципиальная схема беспламенной излучающей горелки: 1 – рефlector; 2 – каналы в керамическом насадке; 3 – насадка; 4 – распределительная коробка; 5 – инжектор-смеситель

Газовая горелка инфракрасного излучения (рисунок 1.6) содержит корпус с присоединенным к нему блоком подачи газа и блоком приготовления газозвушной смеси, набор керамических плиток, отражатель, блок управления и контроля зажигания в виде автоматического регулятора зажигания, регулятор давления газа, электрод зажигания, датчик пожара. Струя горючего газа, истекающая из сопла инжектора, создает кинетическую энергию, за счет которой происходит засасывание окружающего воздуха, необходимого для полного сгорания газа. В результате образуется однородная смесь газа и воздуха, которая,

свою очередь, поступает в каналы перфорированной керамической плитки, к которой и происходит высокотемпературное горение.

Исключающими ограничения применения ГИИ являются системы лучистого отопления на базе водяных инфракрасных излучателей (ВИИ). Теплоносителем в них является горячая вода от 40 °С до 150 °С. Нагревательными устройствами в этих системах являются излучающие профили (рисунок 1.7), работающие, передающие тепло, в инфракрасном диапазоне, обеспечивая тем самым обогрев обслуживаемого помещения.

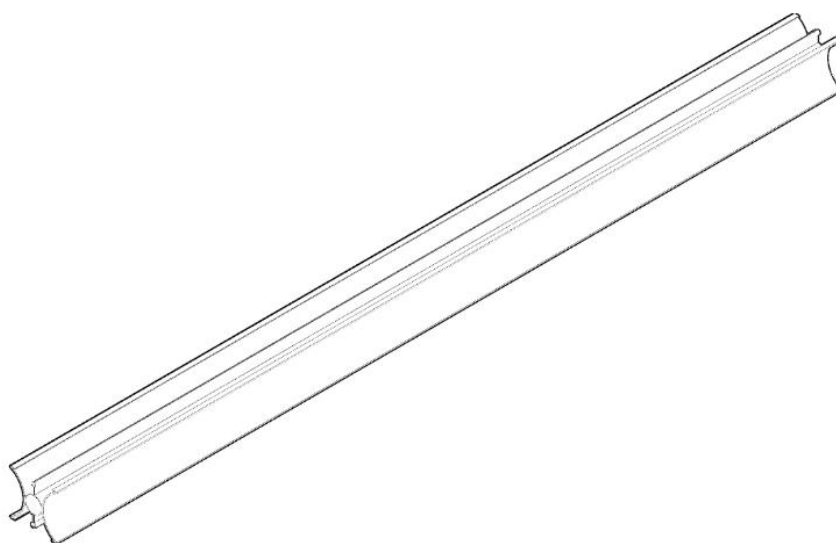


Рисунок 1.7 – Водяной инфракрасный излучатель – излучающий профиль марки Helios 750

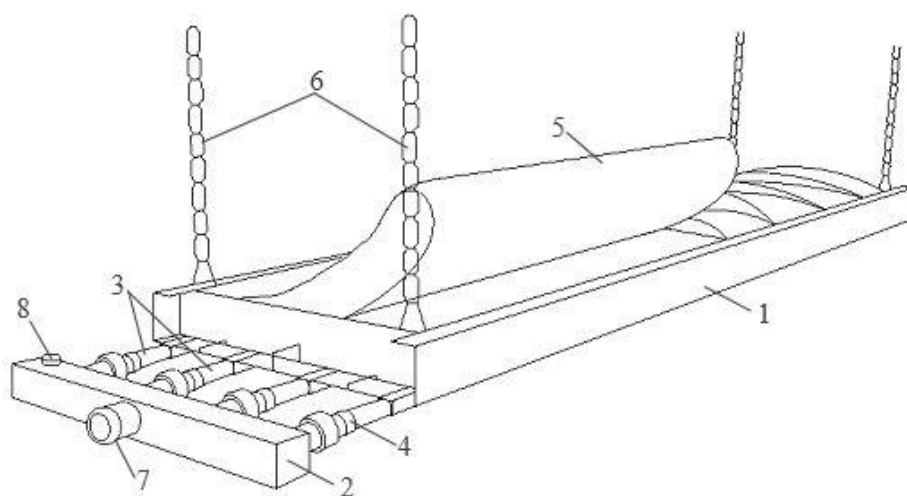


Рисунок 1.8 – Водяная потолочная панель инфракрасного отопления: 1 – излучающая панель; 2 – водяной коллектор; 3 – трубопроводы; 4 – соединительные элементы; 5 – утеплитель из фольгированной минваты; 6 – подвес; 7 – подводящий штуцер; 8 – патрубок для воздухоотводчика

Системы лучистого отопления на базе ВИИ имеют ряд значительных преимуществ перед традиционными конвективными или воздушными системами отопления: простое и эффективное гидравлическое регулирование; снижение потерь теплоты через покрытие помещения за счёт уменьшения «тепловой подушки»; отсутствие сквозняков и пылевых масс; экономия места; низкая тепловая инерция; направленная подача теплоты в рабочую зону помещения; длительный срок службы.

1.3. Анализ состояния человека и условий комфортности при инфракрасном отоплении

Использование лучистого отопления может привести к созданию дискомфорта теплого режима в помещении. При облучении кожного покрова человека часть инфракрасного излучения проникает в подкожный слой человеческого организма. Влияние излучения на комфорт человека зависит от соотношения этих частей и глубины прогревания тела человека (рисунок 1.9). Данное соотношение зависит от длины волны электромагнитного излучения.

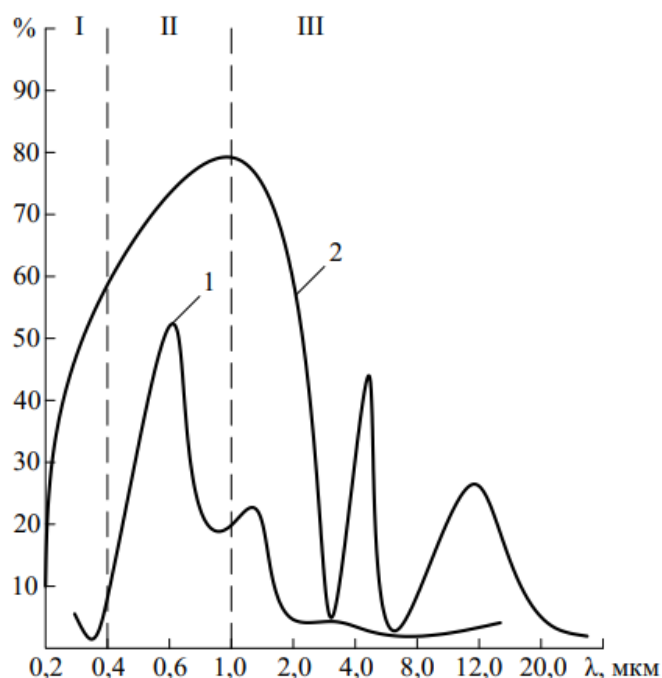


Рисунок 1.9 – Лучистая характеристика кожи человека: I – ультрафиолетовый диапазон электромагнитного излучения; II – видимый диапазон электромагнитного излучения; III – инфракрасный диапазон электромагнитного излучения; 1 – отражающая способность; 2 – поглощающая способность;

Наиболее высокий коэффициент отражения кожного покрова человека, вследствие выработанной эволюционной защиты от солнечного света, приходится на излучение с длиной волны $\lambda \leq 0,7$ мкм. Если длина волны достигает значений $\lambda \geq 1,8$ мкм, то отражающая способность кожного покрова человека снижается и значительная часть излучения поглощается, вследствие чего происходит нагрев кожи. Волны с длиной $\lambda = 2,0 \dots 2,6$ мкм наблюдаются при максимуме мощности излучения инфракрасных излучателей, при такой длине волны 94...96 % излучения поглощается, при этом глубина нагревания кожного покрова напрямую зависит от длины волны (рисунок 1.10). При более высокой температуре отопительного прибора кожный покров человека прогревается на большую глубину, это негативно сказывается на теплоощущении человека [27, 30]. Поэтому стоит отметить, что излучение «светлых» ГИИ практически полностью поглощается верхним слоем кожи человека, что сильно влияет на теплоощущение человека. В свою очередь, «тёмные» ГИИ, а также ВИИ не имеют столь значительного влияния.

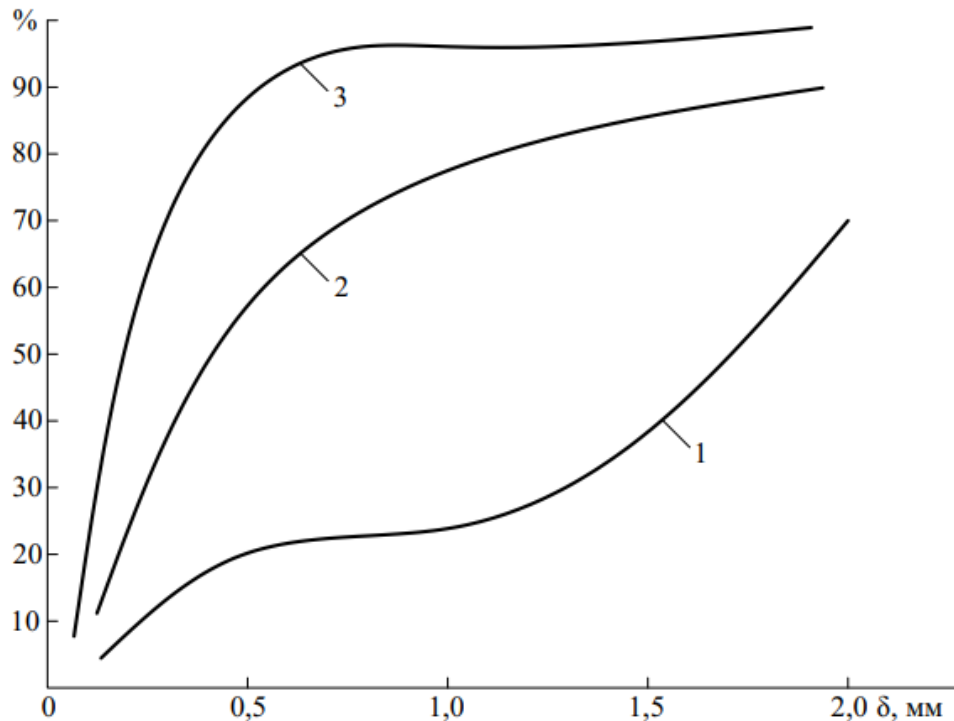


Рисунок 1.10 – Проникающая способность инфракрасного излучения в кожный покров человека: 1 – длина волны $\lambda = 1,0$ мкм, 2 – длина волны $\lambda = 1,4$ мкм, 3 – длина волны $\lambda = 6,0$ мкм

Отдельно следует отметить действие инфракрасного излучения на роговицу глаза человека. Глаза человека, в отличие от кожного покрова, не имеют эволюционного механизма защиты от электромагнитного излучения в инфракрасном диапазоне. Наиболее вредным для человеческого глаза является излучение с короткой длиной волны $\lambda = 1,0 \dots 1,8$ мкм, продолжительное воздействие его на глаз приводит к различным заболеваниям, в том числе к катаракте [24]. Максимальная интенсивность инфракрасного излучения приходится на длину волны $\lambda = 1,0 \dots 1,8$ мкм, согласно закону Вина, это соответствует температуре поверхности излучателя $1300 \dots 2610$ °С. Следовательно, использование ИИ с температурой поверхности, находящейся в этих пределах, нежелательно. При температурах излучателя ниже 1200 °С ($\lambda = 2,0 \dots 2,6$ мкм) негативное влияние излучения на человеческий глаз становится незначительным.

Следовательно, для создания комфортной обстановки в производственном помещении, где постоянно находится персонал необходимо применять излучатели с температурой не выше 1200 °С ($\lambda = 2,0$ мкм).

При оценке уровня теплового комфорта помещения наибольшее распространение получил критериальный параметр «температура помещения» $t_{п}$, °С. Для двух помещений, реального и мнимого, в которых поддерживаются одинаковые параметры микроклимата: температуры поверхностей всех ограждений, подвижность воздуха $v_{в} = 0$ м/с, относительная влажность воздуха $\phi_{в} = 100$ %, теплоощущение человека будет одинаковым. Совокупность параметров (температуры воздуха и ограждающих конструкций) такого мнимого помещения и называют «температурой помещения». При оценке уровня комфорта человека часто учитывается только температура воздуха и радиационная температура помещения [5], при этом, прочие параметры мнимого и реального помещений должны быть одинаковыми: распределение температур по поверхностям, температура воздуха $t_{в}$, °С и поверхностей τ , °С должны находиться пределах $10 \dots 30$ °С, относительная влажность воздуха $\phi_{в}$, % в диапазоне $30 \dots 70$ %, подвижность воздуха $v_{в} \approx 0,1$ м/с.

Ряд авторов называют параметр, объединяющий температуру воздуха и радиационную температуру помещения «результатирующей температурой»; А.

Миссенар [60], С.П. Яглоу [127] – «эквивалентной температурой»; В.Н. Богословский [5, 6] оперирует понятием «температура помещения»; С.Э. Уинслоу, Л.П. Харрингтон и А.П. Гейдж называют данный параметр «оперативной температурой».

Вышеуказанный параметр определяется по формуле [60]:

$$t = rt_B + (1 - r)t_R, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1.5)$$

где: r – степень влияния температуры воздуха, значение которой зависит от используемого автором работы подхода и находится в диапазоне 0,333...0,557;

t_B – температура внутреннего воздуха помещения, $^\circ\text{C}$;

t_R – радиационная температура в помещении, $^\circ\text{C}$.

В.В. Батурич в своей работе [2] в понятии результирующей температуры учитывает тепловое излучение как отдельный фактор:

$$t = t_B - 0,83q, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1.6)$$

где q – общая плотность теплового облучения человека, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Авторы С.Э. Уинслоу, Л.П. Харрингтон и А.П. Гейдж вводят в уравнение переменную величину подвижности воздуха в помещении:

$$t = 0,55t_R + 0,32t_B + 0,46v^{0,5}t_B + 18,35v^{0,5} + 5, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1.7)$$

где v – подвижность воздуха, $\text{м}/\text{с}$.

В трудах [60, 106, 127] данный критерий именуется «модифицированной эквивалентной температурой» и рассчитывается по формуле:

$$t = 0,522t_B + 0,478t_R - 0,01474v^{0,5}(100 - t_B), \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (1.8)$$

«Температуру помещения» также можно определить при помощи номограммы, которая была представлена С.П. Яглоу и Ф.Г. Хьюстоном [127].

Т. Бедфортом предлагается определять показатель теплового состояния человека по зависимости:

$$t = 0,431t_B + 0,408t_R + 0,132p_{\text{п}} - 0,328 - 0,0141v^{0,5}(37,8 - t_B), \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1.9)$$

где $p_{\text{п}}$ – парциальное давление водяного пара в воздухе, мм рт. ст.

Можно отметить, что ряд авторов выражали комфортное состояние человека при помощи полуэмпирических зависимостей. Недостаток данного подхода заключается в том, что достоверность данных зависимостей обеспечивает

схождение результатов только при совпадении внутренних условий, при которых было проведено экспериментальное исследование.

Зачастую, при использовании отопления на базе ИИ, используются эмпирические зависимости, с помощью которых можно определить температуру ИИ в зависимости от его расположения в отапливаемом объёме. Для среднетемпературного лучистого отопления опыты были проведены коллективом авторов А. Мачкаши и Л. Банхиди в работе [51]. Для панельно-лучистого отопления пул экспериментальных исследований был проведён Ф.А. Кренко [106]. В ходе проведения экспериментов производился нагрев потолка помещения до температуры, при которой наблюдалось минимальное количество жалоб от фокус-группы. Полученные результаты исследований представлены в виде диаграмм с указанием оптимальной температуры ИИ. Температурный диапазон поверхности излучателя, для диаграммы Мачкаши составляет $t_s = 60 \dots 290 \text{ }^\circ\text{C}$ (рисунок 1.11), для диаграммы Кренко – $t_s = 20 \dots 500 \text{ }^\circ\text{C}$ (рисунок 1.12). Для других разновидностей лучистого отопления допустимую температуру излучателей можно найти аналогичным образом.

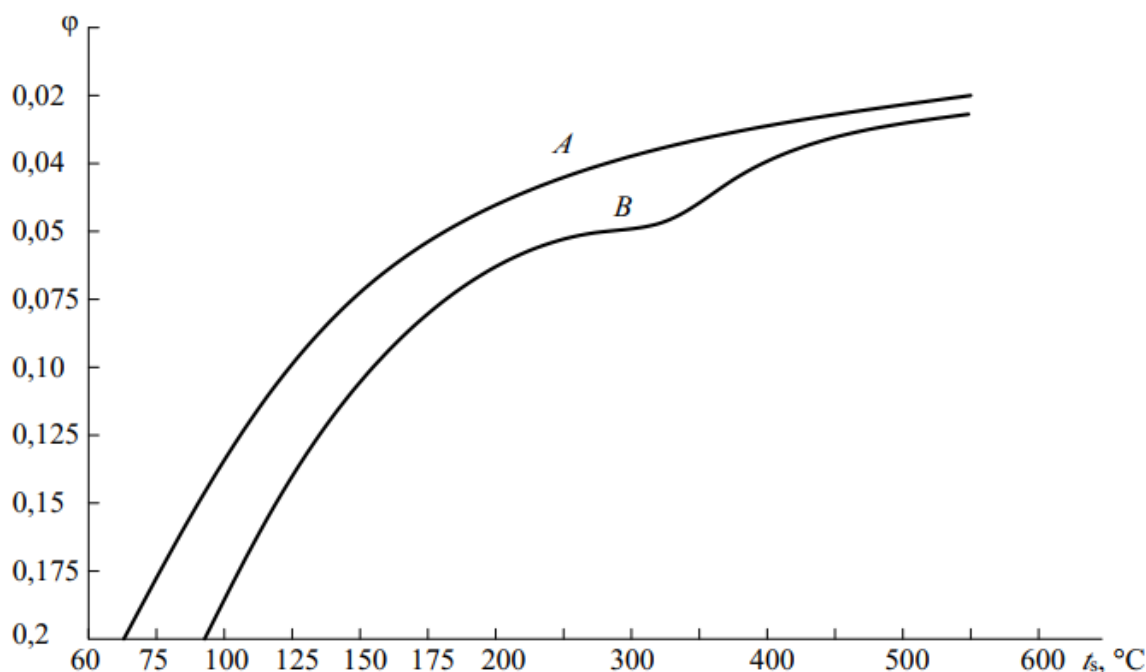


Рисунок 1.11 – Диаграмма оптимальной температуры поверхности инфракрасного излучателя согласно данным А. Мачкаши и Л. Банхиди: A – для людей, ведущих работу стоя; B – для людей, спокойно сидящих

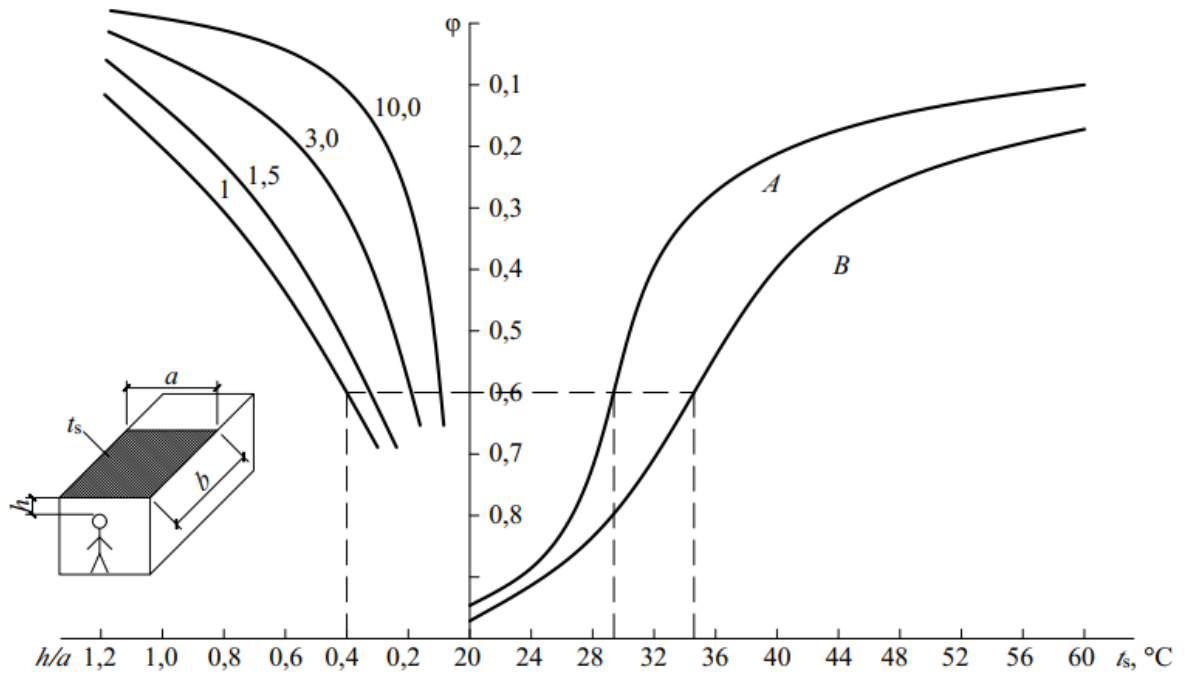


Рисунок 1.12 – График оптимальной температуры ИИ, согласно данным Ф.А. Кренко: *A* – для людей, ведущих работу стоя; *B* – для людей, спокойно сидящих

Существует ряд методов определения уровня теплового комфорта, в которых вводится показатель теплового ощущения, для которого вводятся следующие условные значения: 7 – очень холодно, 6 – холодно, 5 – приятно прохладно, 4 – комфортно, 3 – приятно тепло, 2 – тепло, 1 – жарко [1].

Согласно мнению автора [1] комплексный показатель теплоощущения можно определить по формуле:

$$S = 11,16 - 0,0556t_B - 0,0538t_R - 0,0372p_{\Pi} + 0,014v^{0,5}(100 - t_B). \quad (1.10)$$

Ван Зуйлен в своих трудах рассчитывает комплексный показатель теплоощущения по следующей зависимости:

$$S = 7,83 - 0,1t_B - 0,0968t_R - 0,0372p_{\Pi} + 0,0367v^{0,5}(37,8 - t_B). \quad (1.11)$$

Исследования П. Фангера [108], посвящённые разработке критерия комфортного состояния, отличаются высокой объективностью полученных результатов, достигнутой вследствие большого количества проведённых эмпирических исследований. Основой для данных исследований послужил тепловой баланс человеческого тела. Известным фактом является то, что

интенсивность теплотерь тела человека, которые возникают путём излучения, испарения или конвекции, зависит от условий, наблюдаемых в помещении. В свою очередь, теплопродуктивность тела человека зависит от уровня физической активности. Функцию удержания баланса выполняет система терморегуляции человека. Автором [108] было представлено следующее уравнение теплового баланса человеческого тела:

$$H - Q_{\text{сд}} - Q_{\text{яд}} - Q_{\text{д}} - Q_{\text{п}} = \frac{t_{\text{чел}} - t_{\text{од}}}{0,153R_{\text{од}}} = Q_{\text{р.чел}} + Q_{\text{к.чел}}, \text{ Вт}, \quad (1.12)$$

где: H – полная теплоотдача человека, Вт/м²;

$Q_{\text{сд}}$ – скрытая теплоотдача дыханием, Вт/м²;

$Q_{\text{яд}}$ – явная теплоотдача дыханием, Вт/м²;

$Q_{\text{д}}$ – теплоотдача диффузией водяного пара сквозь сухую кожу, Вт/м²;

$Q_{\text{п}}$ – теплоотдача через потоотделение, Вт/м²;

$t_{\text{чел}}$ – температура кожи человека, °С;

$t_{\text{од}}$ – температура на поверхности одежды, °С;

$R_{\text{од}}$ – тепловое сопротивление одежды м²·°С/Вт;

$Q_{\text{р.чел}}$ – теплотери излучением от человека в окружающую среду, Вт;

$Q_{\text{к.чел}}$ – теплотери конвекцией от человека в окружающую среду, Вт.

При этом, в случае комфортного самочувствия, температура кожи человека должна соответствовать следующей зависимости [108]:

$$t_{\text{чел}} = 35,7 - 0,032H, \text{ °С}, \quad (1.13)$$

при этом теплотери потоотделением должны равняться [108]:

$$Q_{\text{п}} = 0,49(H - 50), \text{ Вт/м}^2. \quad (1.14)$$

В случае соблюдения условий, описанных выше, напряжение систем терморегуляции тела человека наблюдаться не будет.

Другие переменные балансового уравнения человеческого тела определяются по ряду следующих зависимостей. Количество теплоты, которое необходимо отвести [108]:

$$H = M(1 - \eta), \text{ Вт/м}^2. \quad (1.15)$$

где: M – теплопродукция человека, Вт/м²;

η – коэффициент вида деятельности человека.

Данные показатели можно найти в трудах [15, 108] в зависимости от степени тяжести труда.

Диффузионные теплотери через кожу человека определяются по формуле [108]:

$$Q_d = 0,41(1,92t_{\text{чел}} - 25,3 - p_v), \text{ Вт/м}^2, \quad (1.16)$$

где p_v – парциальное давление паров в воздухе, Па, при заданной температуре.

Явные и скрытые теплотери через дыхание равняются:

$$Q_{\text{яд}} = 0,0014M(34 - t_b), \text{ Вт/м}^2. \quad (1.17)$$

$$Q_{\text{сд}} = 0,0027M(44 - p_v), \text{ Вт/м}^2, \quad (1.18)$$

Тепловые потери с поверхности кожи человека посредством инфракрасного излучения [108]:

$$Q_{\text{р.чел}} = \sum \varepsilon_{\text{пр}} \varphi_{\text{чел-}i} C_o f_{\text{эф}} f_{\text{од}} \left[\left(\frac{T_{\text{од}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_i}{100} \right)^4 \right], \text{ Вт/м}^2, \quad (1.19)$$

где: $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты;

$\varphi_{\text{чел-}i}$ – освещенность человека со стороны i -той поверхности с температурой T_i ;

$f_{\text{эф}}$ – коэффициент эффективности самозатенения человека (для сидящего человека $f_{\text{эф}} = 0,696$, для стоящего человека $f_{\text{эф}} = 0,725$);

$f_{\text{од}}$ – коэффициент, который учитывает увеличение площади теплообмена одетого человека в сравнении с раздетым.

Коэффициент облученности человека со стороны элементарной площадки dF можно вычислить по зависимости [51]:

$$\varphi_{\text{чел-dF}} = f_p \frac{\cos \beta_{\text{п}}}{\pi R^2} dF, \quad (1.20)$$

где: f_p – коэффициент проекции человека. Для вычисления коэффициента проекции стоящего или сидящего человека в зависимости от угла β подъема элементарной

платформы и угла α назначения этой платформы можно воспользоваться диаграммами, представленными в [51, 59, 108];

β_{π} – угол между нормалью элементарной площадки dF и отрезком R , град;

R – расстояние от центра человеческого тела до центра элементарной площадки dF , м.

При определении коэффициента облучённости человека поверхностью необходимо проинтегрировать уравнение (1.20) по этой поверхности:

$$\varphi_{\text{чел-}dF} = \int_F f_p \frac{\cos \beta_{\pi}}{\pi R^2} dF. \quad (1.21)$$

Тепловые потери человека посредством конвекции вычисляются по формуле [51]:

$$Q_{\text{к.чел}} = \alpha_{\text{в}} k (t_{\text{од}} - t_{\text{в}}), \text{ Вт/м}^2, \quad (1.22)$$

где: $\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент теплоотдачи поверхности человека, $\text{Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$. При низкой подвижности воздуха порядка 0,1 м/с его можно найти по формуле:

$$\alpha_{\text{в}} = 2,5 (t_{\text{од}} - t_{\text{в}})^{0,25}, \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{С}. \quad (1.23)$$

k – коэффициент, учитывающий влияние одежды на конвективную теплоотдачу человека.

В случае, когда подвижность воздуха v находится в диапазоне от 0,1 до 2,6 м/с, коэффициент конвективной теплоотдачи человека находится из зависимости [1]:

$$\alpha_{\text{в}} = 12v^{0,5}, \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{С}. \quad (1.24)$$

Для учёта уменьшения теплоотдачи за счёт влияния одежды был введён коэффициент [1]:

$$k = \frac{1}{1 + 0,155\alpha_{\text{в}}R_0}. \quad (1.25)$$

где R_0 – коэффициент сопротивления теплопередачи одежды, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С/Вт}$.

Общее количество тепловой энергии, поступающей от человеческого тела, определяется по зависимости:

$$Q = Q_x F_{\text{чел}}, \text{ Вт}, \quad (1.26)$$

где: Q_x – интенсивность теплоотдачи тела человека, рассчитывается, как сумма результатов уравнений (1.16÷1.19, 1.22);

$F_{\text{чел}}$ – площадь поверхности тела человека, м² [1, 108].

$$F_{\text{чел}} = 0,203l^{0,725}p^{0,425}, \text{ м}^2, \quad (1.27)$$

где: l – рост человека, м;

p – вес человека, кг [1, 108].

Исходя из проведённого анализа используемых подходов можно сделать вывод, что наиболее точным методом определения теплоощущения человека является метод, предложенный П. Фангером в работе [108].

1.4. Основы расчёта и проектирования лучистых систем отопления

Применение лучистых систем отопления в производственных помещениях связано с выполнением стандартных этапов строительных работ: сбора исходной документации; стадии ТЭО; выполнения проектных работ; поставки элементов системы; монтажа; пусконаладочных работ; эксплуатации; обслуживания.

Сбор исходной документации подразумевает под собой уточнение местоположения помещения, климатических характеристик, определение архитектурно-строительных характеристик помещения, тип и состав ограждающих конструкций, и их теплотехнические характеристики, технологические требования к параметрам микроклимата (температуре внутреннего воздуха, кратности воздухообмена, типу организации вентиляции).

Стадия ТЭО включает в себя определение целесообразности применения того или иного вида системы отопления, проводится расчет капитальных и эксплуатационных затрат, определяется срок окупаемости. Для сравнения проводится расчёт для систем лучистого и конвективного отопления. В расчёт берутся условия подведения энергоносителя к помещению (наличие тепловой сети, собственной котельной, возможности подключения к сети газоснабжения).

При проектировании системы отопления выполняется ряд типовых работ:

- расчёт тепловых потерь помещения (тепловой мощности системы отопления);

- подбор типа отопительных приборов (инфракрасных излучателей) и расстановка их в помещении;
- проверочный расчёт, включающий в себя уточнение суммарной тепловой нагрузки и проверку выполнения требований условий комфортности;
- в отдельных случаях – гидравлический расчет системы отопления.

Действующая нормативная документация в сфере строительства не учитывает особенности проектирования и эксплуатации систем лучистого отопления, устанавливая только лишь общие требования к температуре внутреннего воздуха помещения, при этом учитываются только тепловые потери через наружные ограждения, количество теплоты на нагрев вносимых в помещение материалов, оборудования, инфильтрующегося воздуха, въезжающих транспортных средств, теплопоступлений от электрооборудования и производственных процессов. Также отсутствует научно-обоснованная методика проектирования и расчёта таких систем.

Существует несколько различных подходов по расчету необходимой тепловой мощности лучистой системы отопления [1, 5...9, 15, 21, 32, 39, 48, 51, 60...62, 66, 70...75, 82, 89, 90, 92, 94, 98...101, 123, 126]. Стоит отметить, что на практике не существует единой модели – все подходы крайне разнообразны и основываются на учёте различных особенностей лучистого отопления. Предлагается разделение существующих моделей по двум укрупнённым группам [71]:

- модели, основанные на нахождении теплотерь с учётом норм облучённости;
- поиск значений комфортной облучённости, опираясь на фактор объёма облучённости.

Способы нахождения мощности лучистой системе отопления, согласно наиболее распространённой классификации [92, 97], можно поделить на три различных группы.

I группа. Методы, которые основаны на практике проектирования и эксплуатации систем лучистого отопления. В работе [123] автором предлагается определение мощности системы отопления, исходя из геометрических параметров

отапливаемого помещения – его площади. Мощность каждого инфракрасного излучателя определяется из условия, что интенсивность лучистого теплового потока не должна превышать 400 Вт/м^2 при высоте подвеса ИИ не менее 4 м от поверхности пола, интенсивность излучения уточняется, исходя из особенностей технологического процесса и условий труда в помещении. Такой метод ввиду того, что автор делает выводы на основе проектирования помещений с конкретными геометрическими характеристиками и расположенных в конкретных климатических условиях, имеет весьма ограниченное применение. Методика, основанная на анализе процессов лучистого и конвективного теплообмена между людьми, излучателями, помещением и окружающей средой представлена в работе автора [32].

Определение требуемой мощности по вышеприведённым методикам может иметь значительную погрешность ввиду того, что при расчёте не учитывается тип наружных ограждений и особенности воздухообмена в обслуживаемом помещении.

II группа. В эту группу входят работы, в которых для определения тепловой мощности системы отопления, сначала согласно общепринятым методам, определяются теплотери помещения, а затем полученные значения корректируются с применением коэффициента, которые учитывают особенности формирования тепловой режим в помещении, оборудованном лучистым отоплением [21, 32, 63, 89, 127]. Данный подход не учитывает многих специфических процессов теплообмена, протекающих в помещениях с лучистым отоплением, а также не уделяет должного внимания процессам тепломассообмена, протекающим в верхней зоне помещения (выше расположения отопительных приборов), в результате недостаточно достоверного расчёта температура воздуха верхней зоны может упасть до точки росы, что спровоцирует образование конденсата на ограждающих конструкциях. В случае, когда выполняется расчёт тепловых потерь, с учётом пониженной температуры внутреннего воздуха помещения, что допускается нормативными документами [86] при наличии лучистого теплового потока определённой плотности, использование таких методик может привести к большим погрешностям в расчётах, так как в расчётах может произойти повторное занижение мощности системы лучистого отопления.

III группа. В данной группе представлен наиболее широкий спектр работ [1, 5...9, 15, 22, 48, 51, 60, 66, 70...76, 82, 92, 94, 98]. В данных работах определение требуемой мощности системы лучистого отопления производится путём составления и решения системы уравнений теплового баланса обслуживаемого помещения. Данный метод расчёта наиболее трудоёмок и слабо применим в инженерной практике, однако он является наиболее точным и научно-обоснованным, учитывает многие специфические особенности систем лучистого отопления. Процесс применения данного способа является очень ответственной и трудоёмкой задачей, т.к. любая допущенная неточность при составлении и решении системы балансовых уравнений может привести к недостаточной мощности системы лучистого отопления и некомфортному тепловому режиму в помещении. Однако, лишь только работы данной группы учитывают немаловажный фактор, который не учитывается авторами других групп методик – размещение инфракрасных излучателей в объёме обогреваемого помещения (рисунки 1.13, 1.14). Положения ряда работ [92, 98] предлагают определять расположение и высоту подвеса излучателей на основании интенсивности инфракрасного излучения, учитывая при этом, неравномерность облучения. В работе [92] параметры размещения излучателей определяются на основе экспериментально полученных диаграмм излучения, а в работе [98] на основании численного анализа облучённости человека.

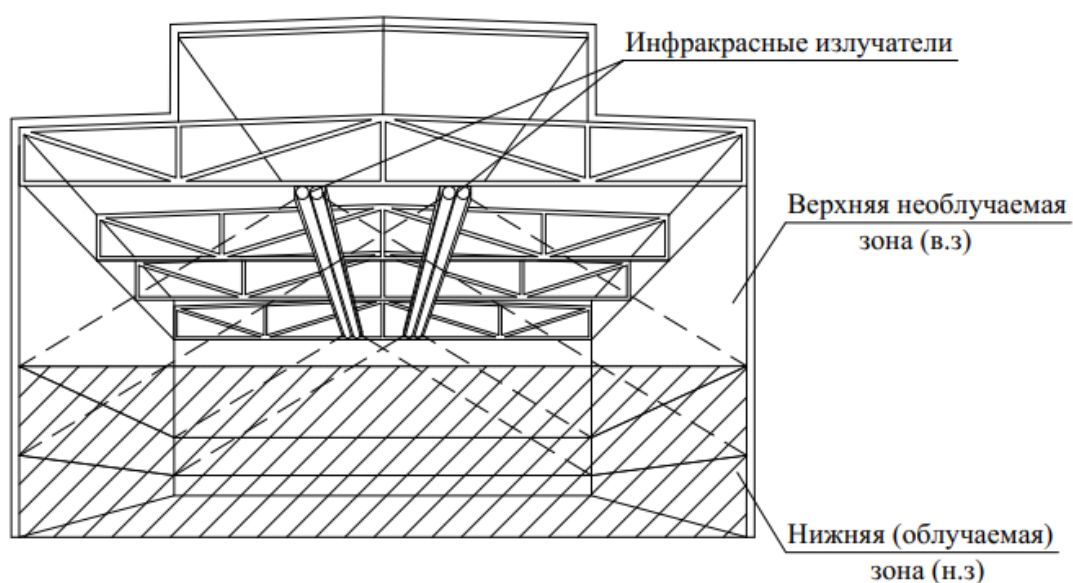


Рисунок 1.13 – Пример расположения ИИ в производственном помещении

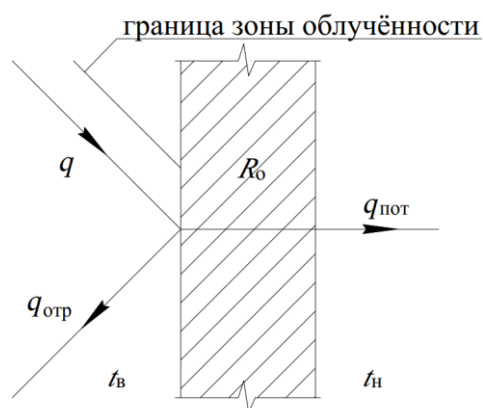


Рисунок 1.14 – Тепловой режим наружного ограждения в здании с системой лучистого отопления

По итогам проведённого анализа стоит отметить, что процесс проектирования систем отопления на базе инфракрасных излучателей является многоэтапной, трудоёмкой и уникальной инженерной задачей. Решением по сокращению трудозатрат может являться математическое моделирование теплового режима обогреваемого помещения, которое в каждом конкретном случае позволит определить оптимальную мощность системы лучистого отопления и расположении ИИ в объёме отапливаемого помещения. Только учёт всех критически важных факторов при разработке проекта лучистой системы отопления может привести к гарантированной энергоэффективности решения.

Выводы по 1 главе

1. Лучистое отопление является энергоэффективным решением для ряда типов помещений: крупнообъёмные помещения различного назначения; помещения периодического использования (в т.ч. с дежурным режимом); помещения, поддающиеся микроклиматическому зонированию; открытые площадки.

2. Системы отопления, построенные на базе ВИИ обладают неоспоримым преимуществом по сравнению с системами, которые построены с применением ГИИ в виде отсутствия ограничения применения в различных производственных помещениях.

3. Существующие методы расчёта и проектирования систем лучистого отопления имеют сложную структуру и требуют больших трудозатрат, либо подходят только для конкретных типов помещений, и при распространении их результатов на другие типы – теряют достаточный уровень достоверности.

4. Современные нормативные документы не учитывают особенности формирования теплового режима в производственном помещении, в котором для обогрева используется лучистая система отопления, что не позволяет использовать все преимущества лучистых систем, ведущих к энергосбережению.

ГЛАВА 2. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ПОМЕЩЕНИЙ С СИСТЕМАМИ ОТОПЛЕНИЯ НА БАЗЕ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

2.1. Методы расчёта лучистых систем отопления

Методики определения мощности лучистых систем отопления описаны в работах следующих авторов [1, 2...9, 15, 21, 22, 40, 48, 51, 60...63, 66, 70...76, 89, 90, 92, 94, 98, 123, 127]. Также, существует множество работ, посвящённых расположению излучателей [17, 98], способу учёта особенностей, возникающих при распределении теплоты дымовых газов [6, 8, 71, 73], а также вентиляции в помещениях с применением лучистого отопления [38, 82, 102].

Определение тепловых потерь помещения проводится по общепринятой методике, посредством уравнения теплового баланса в отапливаемом помещении [50]:

$$Q = \sum_{i=1}^n k_i F_i (t_b - t_n), \text{ Вт}, \quad (2.1)$$

где: n – количество наружных ограждающих конструкций в помещении;

k_i – коэффициент теплопередачи i -того ограждения, Вт/м²·°С;

F_i – площадь i -того ограждения, м²;

t_b – внутренняя комфортная температура помещения, °С, которая принимается сниженной на 1...4 °С согласно требованиям нормативных документов [86];

t_n – расчётная температура наружного воздуха, °С.

Если добавить затраты теплоты на вентиляцию обслуживаемого помещения, то уравнение (2.1) приобретёт следующий вид [88, 90]:

$$Q = \sum_{i=1}^n k_i F_i (t_b - t_n) + c G_b (t_{b.3} - t_n), \text{ Вт}, \quad (2.2)$$

где: c – теплоемкость воздуха, Дж/кг·°С;

G_b – количество вентиляционного воздуха, которое рассчитывается по нормативам воздухообмена, кг/с;

$t_{b.3}$ – температура верхней зоны помещения, °С.

Системы лучистого отопления имеют свои особенности, которые не учитываются в классических уравнениях (2.1) и (2.2). Различные авторы в своих трудах используют разные подходы, которые учитывают особенности лучистых систем отопления. А.К. Родин в своей работе [71] при определении требуемой мощности системы отопления заменяет комфортную температуру, которая была найдена на основе диаграмм, температурой, зависящей от степени воздействия на человека, а также применяет коэффициент полезного действия системы, значение которого находится в диапазоне 0,7...0,9. Также, метод корректировки тепловой мощности системы на базе ИИ используется в труде [17]. В этой работе принято, что степень облучения человека прямо пропорциональна облучению пола отапливаемого помещения. Однако стоит отметить, что такая корректировка мощности системы лучистого отопления является релевантной только для тех условий, в которых они были получены.

В ряде трудов [4, 91] вместо одного уравнения для определения требуемой тепловой мощности лучистой системы отопления, используют систему балансовых уравнений. Автор [4] использует следующую систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q = \sum_{i=1}^n k_i F_i (t_B - t_H) + c G_B (t_{B.3} - t_H), \text{Вт}, \\ L_{\text{пр}} + L_{\text{Г}} = L_{\text{ух}}, \text{м}^3/\text{ч}, \\ A_{\text{CO}_2} = G_{\text{CO}_2}^{\text{ух}} - G_{\text{CO}_2}^{\text{пр}}, \text{м}^3/\text{ч}, \\ Q = \sum_{i=1}^n k_i F_i (t_B - t_H) + \sum Q_p + \sum Q_k, \text{Вт}, \\ t_{\text{пр}} = \frac{t_B + t_R}{2}, \text{°C}, \end{array} \right. \quad (2.3)$$

где: $L_{\text{пр}}$ – количество приточного воздуха, $\text{м}^3/\text{ч}$;

$L_{\text{Г}}$ – количество природного газа, $\text{м}^3/\text{ч}$;

$L_{\text{ух}}$ – количество вытяжного воздуха, $\text{м}^3/\text{ч}$;

A_{CO_2} – количество углекислого газа, выделяемого в помещение, $\text{м}^3/\text{ч}$;

$G_{\text{CO}_2}^{\text{ух}}$, $G_{\text{CO}_2}^{\text{пр}}$ – соответственно количество углекислого газа в вытяжном и приточном воздухе, $\text{кг}/\text{ч}$;

$\sum Q_p, \sum Q_k$ – соответственно теплоты лучистого и конвективного теплообмена, просуммированные по всем внутренним поверхностям ограждающих конструкций, Вт;

$t_{пр}$ – нормированная температура помещения для конвективного отопления, °С.

В системе уравнений (2.3) первая зависимость характеризует общий тепловой баланс в отапливаемом помещении, вторая – баланс воздуха в помещении, третья – баланс углекислого газа, четвертая – тепловой баланс внутренних поверхностей ограждений, пятая – температура в отапливаемом помещении, удобном для самочувствия человека.

Для определения комфортной температуры в помещении необходимо определить радиационную температуру по формуле [17]:

$$t_R = \frac{\sum t_i F_i + \sum t_{п} F_{п}}{\sum F_i + \sum F_{п}}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (2.4)$$

где индекс «i» – относится к ограждающей конструкции, а «п» – к отопительным приборам.

Для определения температуры поверхности i -той ограждающей конструкции необходимо найти её из теплового баланса [50]:

$$k_i F_i (t_b - t_n) = q_i + C_o \varepsilon_{пр} (1 - \varphi_r) F_i \left[\left(\frac{T_i}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_j}{100} \right)^4 \right] + \alpha_b F_i (t_i - t_b), \text{ Вт}, \quad (2.5)$$

где: q_i – освещенность i -той поверхности излучателем, Вт;

$\varepsilon_{пр}$ – приведенная степень серости;

φ_r – коэффициент облучённости i -той поверхности;

α_b – коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности ограждения внутреннему воздуху, Вт/м²·°С.

Система уравнений (2.3) не обеспечивает достаточный уровень достоверности результатов ввиду того, что в ней применяются нормативные значения, разработанные для конвективных систем отопления, а также игнорируется четвертая степень температуры в зависимости (2.5). Применение полного коэффициента теплопередачи помещения из-за того, что не учитываются

особенности формирования теплового режима в помещении с системой лучистого отопления, приводит к завышению требуемой мощности системы отопления.

Авторы [51] используют для определения требуемой мощности лучистой системы отопления систему уравнений:

$$\begin{cases} k_i F_i (t_B - t_H) = q_i + C_o \varepsilon_{\text{пр}} (1 - \varphi_r) F_i \left[\left(\frac{T_i}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_j}{100} \right)^4 \right] + \alpha_B F_i (t_i - t_B), \text{ Вт,} \\ \sum \alpha_B F_i (t_i - t_B) + \alpha_{\text{п}} F_{\text{п}} (t_{\text{п}} - t_B) = 0, \\ 0,46 \cdot t_B + 0,54 \cdot t_R = t_p, \text{ } ^\circ\text{C.} \end{cases} \quad (2.6)$$

где t_p – результирующая температура, $^\circ\text{C}$.

В системе (2.6) при помощи первого уравнения описывается тепловой баланс внутренней поверхности i -того ограждения, данное уравнение записывается для каждого ограждения в обслуживаемом помещении, второе уравнение описывает тепловой баланс в отапливаемом помещении, третье уравнение – комфортную температуру, которая определяется и из диаграмм П. Фангера [108].

Основным недостатком данной системы уравнений является неучтённый процесс вентиляции. Принято, что система вентиляции подаёт необходимый объём воздуха в помещении с температурой, которая равна температуре воздуха в отапливаемом помещении. Расход теплоты на нагрев воздуха в системе вентиляции не входит в расчёт и не учитывается при расчёте общей экономии тепловой энергии. Также, стоит учитывать, что комфортная температура помещения, определённая по диаграммам П. Фангера не учитывает условия в обслуживаемом помещении на начальной стадии, которые, ко всему прочему, в основном находятся вне пределов полученных автором диаграмм [108].

Стоит отметить, что системы ГЛЮ могут быть применены для локального обогрева отдельных зон помещения, однако достаточно точные методы расчёта для такого типа обогрева отсутствуют. Приблизительные системы расчёта, предлагаемые П. Фангером [108], А.А. Худенко [97], А.Е. Ковалёвым [39] используют параметр дополнительной облучённости человеческого тела.

А.Е. Ковалёв в своей работе объединяет аспекты формирования теплового микроклимата в отапливаемом помещении и комфортный аспект расчёта. Однако, в своей работе он исследует только общий тепловой баланс в отапливаемом помещении, что не позволяет определить температуру поверхностей ограждений и температуру воздуха в помещении. Также в расчётах не разделены лучистый и конвективный тепловые потоки в помещении. Из вышесказанного следует, что решение подобной системы могут быть верными только в тех граничных условиях, для которых были введены поправки на расчёт. А.А. Худенко в своих расчётах не разделяет облучённую и необлучённую зоны помещения, а также исследует только общий тепловой баланс отапливаемого помещения. П. Фангер в работе принимает, что локальная система обогрева не влияет на общий микроклимат в помещении и концентрируется только на комфортном аспекте расчёта. Также стоит отметить, что в указанных работах не учитывается фактор, характерный для систем локального обогрева – отсутствие равномерности распределения температуры на облучённых поверхностях.

2.2. Тепловой баланс и температурный режим в помещениях с конвективным отоплением

Недостатки конвективных систем отопления особенно проявляются в помещениях с большой высотой потолка [15]. Нагреваемый воздух перемещается из нижней зоны помещения, в которой расположены отопительные приборы, непосредственно в верхнюю зону под перекрытие образуя «тепловую подушку». Системы лучистого обогрева лишены данного недостатка, так как в них теплота направляется инфракрасным излучением непосредственно в рабочую зону, что благоприятно сказывается на значении температурного градиента по высоте помещения (рисунок 2.1).

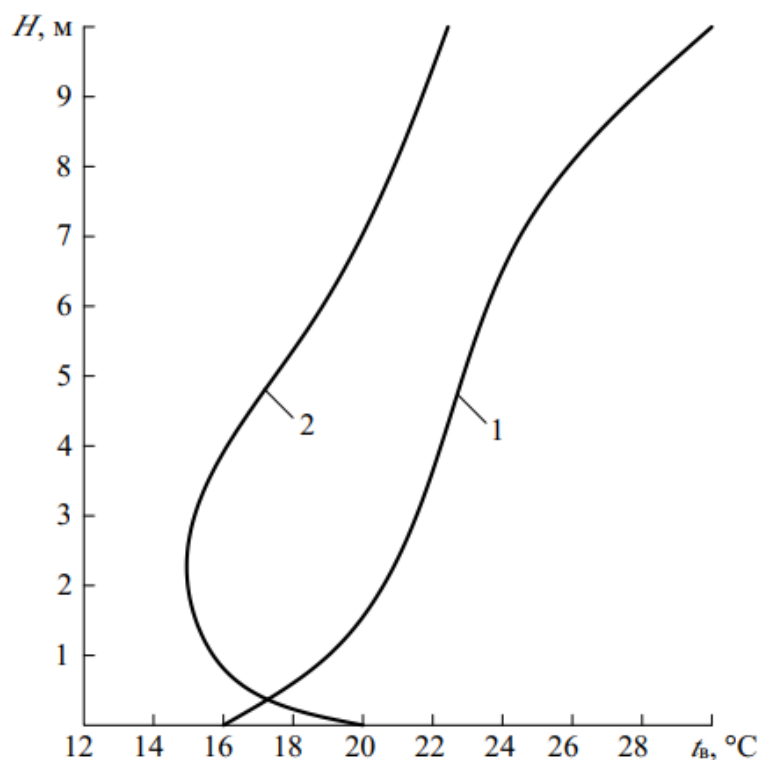


Рисунок 2.1 – Температурный градиент в помещении при: 1 – конвективной системе отопления; 2 – лучистой системе отопления

Тепловая мощность системы отопления в первую очередь определяется тепловыми потерями помещения. В холодный период года они в основном происходят через ограждающие конструкции в помещении и частично компенсируются теплопоступлениями от людей, оборудования, освещения, нагретых материалов и солнечной радиации. При стационарном режиме теплопотери равным теплопоступлениям, а наличие дефицита теплоты ΔQ показывает, что в помещении необходимо обустройство системы отопления. Для нахождения требуемой тепловой мощности системы отопления необходимо составить балансовое уравнение [50]:

$$Q_{от} = \Delta Q = Q_{огр} + Q_{и(вент)} \pm Q_{т(быт)}, \quad (2.7)$$

где: $Q_{огр}$ – теплопотери через наружные ограждающие конструкции, Вт;

$Q_{и(вент)}$ – расход теплоты на нагрев поступающего в помещение наружного воздуха, Вт;

$Q_{т(быт)}$ – технологические тепловыделения, или потери теплоты, Вт.

Чаще всего в производственных зданиях при расчёте теплового баланса при проектировании системы отопления принимается период технологического цикла с меньшими тепловыделениями, максимальные тепловыделения учитывают при проектировании системы вентиляции. Тепловой баланс составляется для стационарных условий, а нестационарность процессов теплообмена учитывается специальными расчётами, построенными на основе теории теплоустойчивости.

2.3. Тепловой баланс и температурный режим в помещениях с лучистым отоплением

Требуемая мощность лучистой системы отопления Q_0 и температурный режим наружных ограждений определяются из системы уравнений теплового баланса поверхностей ограждающих конструкций, излучающих поверхностей и объемов воздуха в облученных и необлученных зонах помещения (рисунок 2.2).

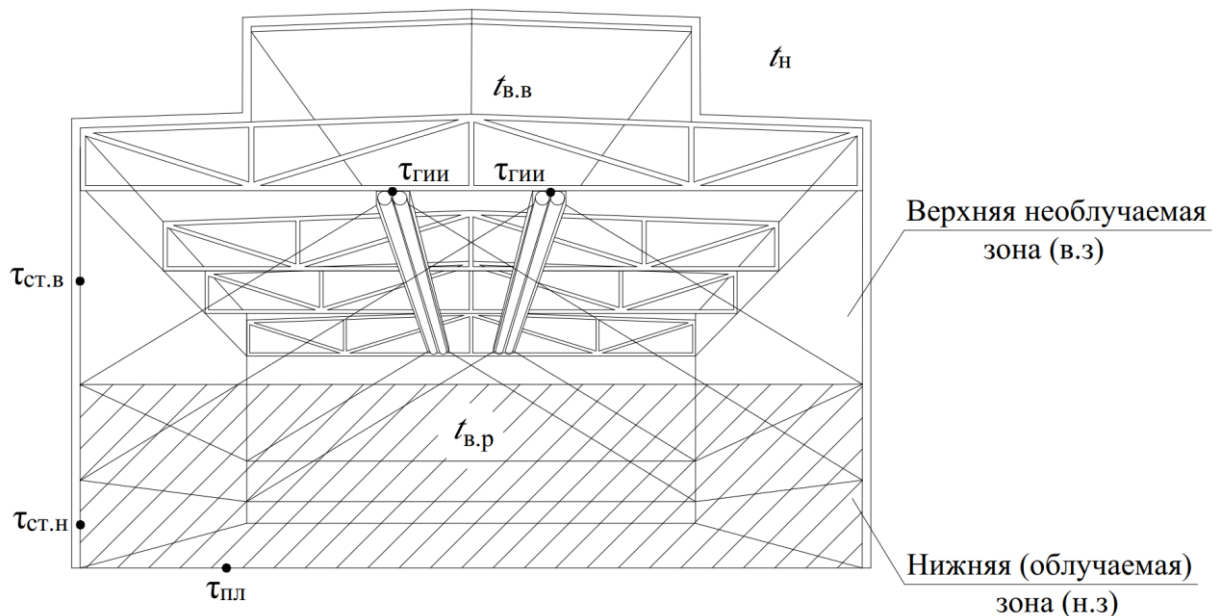


Рисунок 2.2 – Температурный режим в помещении при лучистом отоплении

С учётом исследований [13, 61, А1] уточнённая система уравнений имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^7 Q_{1-i}^{\text{л}} = 0; \quad (2.8) \\ \sum_{i=1}^5 Q_{2-i}^{\text{л}} + Q_{1-2}^{\text{л}} + Q_{2-6}^{\text{к}} + Q_{2-\text{н}}^{\text{тп}} = 0; \quad (2.9) \\ \sum_{i=1}^5 Q_{3-i}^{\text{л}} + Q_{1-3}^{\text{л}} + Q_{3-7}^{\text{к}} + Q_{6-7}^{\text{м}} = 0; \quad (2.10) \\ \sum_{i=1}^3 Q_{4-i}^{\text{л}} + Q_{1-4}^{\text{л}} + Q_{5-7}^{\text{к}} + Q_{5-\text{н}}^{\text{тп}} = 0; \quad (2.11) \\ \sum_{i=1}^3 Q_{5-i}^{\text{л}} + Q_{1-5}^{\text{л}} + Q_{5-6}^{\text{к}} + Q_{5-\text{н}}^{\text{тп}} = 0; \quad (2.12) \\ Q_{1-6}^{\text{к}} + Q_{6-2}^{\text{к}} + Q_{6-5}^{\text{к}} + Q_{6-7}^{\text{и}} + Q_{6-7}^{\text{м}} = 0; \quad (2.13) \\ Q_{7-1}^{\text{л}} + Q_{7-\text{н}}^{\text{и}} + Q_{3-7}^{\text{к}} + Q_{4-7}^{\text{к}} + Q_{8-7}^{\text{к}} = 0; \quad (2.14) \\ \Delta P_{\text{в.з-н.з}} = sG_{\text{в.з-н.з}}^2; \quad (2.15) \\ t_R + At_{\text{в.р}} = B. \quad (2.16) \end{array} \right.$$

В системе уравнений (2.8)...(2.16):

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, определяющий воздухообмен между зонами, Па;

s – характеристика сопротивления Па/(кг/с)²;

$G_{\text{в.з-н.з}}$ – воздухообмен между зонами, кг/ч;

A, B – постоянные в уравнении теплового комфорта;

$t_{\text{в.р}}$ – температура воздуха рабочей зоны, °С;

t_R – радиационная температура, °С.

Тепловой поток от ИИ в помещение определяется по формуле (2.8). Теплообмен на поверхностях пола, потолка, стен обеих зон описывается уравнениями (2.9), (2.10), (2.11), (2.12), которые учитывают взаимное облучение каждой отдельной поверхности помещения с остальными, включая искусственный интеллект. Тепловой баланс воздуха верхней и рабочей зоны рассмотрен в (2.13) и (2.14). Уравнение (2.15) дает величину воздухообмена между верхней и рабочей зонами. Первое условие комфорта (2.16) принимается в качестве граничных условий для решения системы.

Для упрощения и получения однозначного решения системы уравнений (2.8)...(2.16) 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 (2.8)...(2.16) запишется в развернутом виде:

$$Q_0 = 0,125 \frac{\sum F_1}{f_3} Q_H^c \psi / 3600; \quad (2.17)$$

$$C_{B.3-3} \varphi_{3-2} (F_2 - \sum F_1) (\tau_3 - \tau_{B.3}) + (\alpha_2 F_2 + \alpha_5 F_5) (t_6 - \tau_{B.3}) - \left(\frac{F_2}{(\delta_2/\lambda_2 + 1/\alpha_H)} + \frac{F_5}{(\delta_5/\lambda_5 + 1/\alpha_H)} \right) (t_6 - t_H) = 0; \quad (2.18)$$

$$(1 - k_{B.П}) (1 - \mu) \psi Q_0 + C_{3-4} \varphi_{3-4} F_3 (\tau_3 - \tau_4) - F_4 \alpha_{K4} (\tau_4 - t_{B.П}) - F_4 \frac{(\tau_4 - t_H)}{(\delta_4/\lambda_4 + 1/\alpha_H)} = 0; \quad (2.19)$$

$$Q_8 + F_4 \alpha_4 (\tau_4 - t_{B.П}) + F_3 \alpha_3 (\tau_3 - t_{B.П}) - G_{B.3-H.3} c_p (t_6 - t_{B.П}) - c_p G_H (t_{B.П} - t_8) + \psi Q_0 = 0; \quad (2.20)$$

$$(1 - \psi) Q_0 - (F_5 \alpha_{K5} + F_2 \alpha_{K2}) (t_6 - \tau_5) - c_p G_H (t_6 - t_{B.П}) = 0; \quad (2.21)$$

$$\psi Q_0 - F_3 \alpha_{K3} (\tau_3 - t_{B.П}) - C_{B.3-3} \varphi_{3-2} (F_2 - \sum F_1) (\tau_3 - \tau_{B.3}) - C_{3-4} \varphi_{3-4} F_3 (\tau_3 - \tau_4) - F_3 \frac{(\tau_3 - t_H)}{(\delta_3/\lambda_3 + 1/\alpha_H)} = 0; \quad (2.22)$$

$$\psi Q_0 = C_{1-3} \mu \sum F_1 (\tau_1 - \tau_3) + C_{1-4} (1 - \mu) \sum F_1 (\tau_1 - \tau_4); \quad (2.23)$$

$$\left[\varphi_{ч-2} \frac{\tau_1 \sum F_1 + \tau_{B.3} (F_2 - \sum F_1)}{F_2} + \varphi_{ч-4} \tau_4 + \varphi_{ч-3} \tau_3 - \tau_{ч} \right] + A t_{B.П} = B. \quad (2.24)$$

В системе (2.17)...(2.24) дополнительно:

α_K – коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м²·°C);

α_B, α_H – коэффициенты теплоотдачи внутренней и наружной поверхностями ограждения Вт/(м²·°C);

φ – коэффициент облучённости соответствующих ограждений;

$\varphi_{ч-2}, \varphi_{ч-3}, \varphi_{ч-4}$ – коэффициенты облучённости с поверхности тела человека (животного) на соответствующее ограждение;

$C_{3-4}, C_{B.3-3}$ – коэффициенты, равные $C_0 \varepsilon b$, Вт/(м²·°C);

b – температурный коэффициент, К³;

δ, λ – условные толщина, м, и коэффициент теплопроводности Вт/(м·°C) наружного ограждения;

Q_8 – тепловыделения от оборудования, Вт;

ψ – лучистый КПД излучателя;

ΣF_1 – суммарная площадь излучающих поверхностей излучателя, м²;

F_2, F_3, F_4, F_5 – площади потолка (покрытия), пола и стен нижней и верхней зон, м²;

$t_{\text{ч}}$ – температура тела человека или животного, °С;

c_p – теплоёмкость воздуха, Дж/(кг·°С);

$Q_{\text{н}}^{\text{с}}$ – низшая теплота сжигания газа, Дж/м³.

Физико-математическая модель температурного режима в помещении с лучистой системой отопления, которая описана в системе уравнений (2.17)...(2.24), позволяет с высокой достоверностью моделировать температурный режим в производственных помещениях.

2.4. Тепловой режим наружных ограждающих конструкций в облучаемой и необлучаемой зонах помещений, оборудованных лучистым отоплением

При анализе исследований, посвящённых температурному режиму помещений, оборудованных лучистыми системами отопления [10...13], остаётся открытым вопрос требуемых теплотехнических характеристик наружных ограждающих конструкций. Как уже было сказано ранее. Нормативные документы допускают снижение температуры воздуха рабочей зоны $t_{\text{в.р}}$ в помещениях с лучистым отоплением, однако это может привести к снижению температуры и в верхней зоне помещения $t_{\text{в.в}}$, которая, в свою очередь, повлечёт снижение температуры поверхностей верхней зоны $t_{\text{в.з}}$, она может опуститься до значений точки росы, что приведёт к конденсации водяных паров на строительных конструкциях (рисунок 2.2, 2.3) [13, А2].

Для того, чтобы избежать процесса конденсации водяных паров в верхней зоне помещения при лучистом отоплении, необходимо проводить расчёт теплотехнических характеристик ограждений отдельно для рабочей (облучаемой) и верхней (необлучаемой) зон. Практическое определение требуемого сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций в

помещениях с лучистым отоплением затруднено из-за нестационарности протекающих процессов теплообмена [11]. Переменным значением является значение нормированного потока теплоты $q^H = \alpha_B \Delta t^H$.

Автор [6] рекомендует для помещений с лучистым отоплением пренебречь теплообменом на внутренних поверхностях, находя значение требуемого сопротивления теплопередаче от внутренней поверхности ограждения с температурой $\tau_B^{\text{доп}} = t_{B,p} - \Delta t^H$ к наружному воздуху $R_o^{\text{тп}}$ по зависимости $R_o^{\text{тп}} = R_o - 1/\alpha_B$. В заданных условиях это значение можно определить по следующей формуле:

$$R_o^{\text{тп}} = \frac{(\tau_B^{\text{доп}} - t_H)n}{q^H}, \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}. \quad (2.25)$$

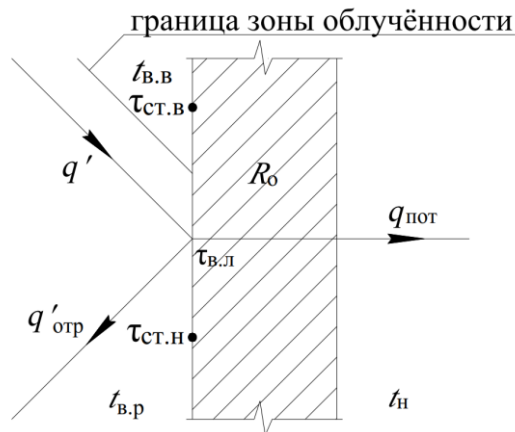


Рисунок 2.3 – Тепловой режим наружного ограждения в здании с лучистой системой отопления

Заявленное упрощение, согласно которому $\tau_B^{\text{доп}}$ определяется по зависимости $\tau_B^{\text{доп}} = t_{B,p} - \Delta t^H$ позволяет предположить, что значение $R_o^{\text{тп}}$, определённое по формуле (2.25) может быть недостаточно точным, ввиду того, что температура облучённых ограждений в зданиях с лучистыми системами отопления, как показывает практика, наоборот будет выше температуры внутреннего воздуха.

2.5. Численный эксперимент

Автором был проведен численный эксперимент, направленный на исследование температурного режима наружных ограждающих конструкций в зданиях с системами отопления на базе ИИ. Были введены следующие обозначения:

- радиационный тепловой поток от точечного источника излучения [11]:

$$q' = \frac{W_{\text{общ}}}{4\pi r^2} \cos \varphi, \text{ Вт/м}^2, \quad (2.26)$$

где: $W_{\text{общ}}$ – мощность ИИ, Вт;

φ – угол между нормалью и направлением потока излучения на данную точку поверхности;

- мощность точечного источника излучения [6]:

$$W_{\text{точ}} = \frac{W_{\text{общ}}}{l_{\text{общ}}} l_{\text{точ}}, \text{ Вт}, \quad (2.27)$$

где: $l_{\text{общ}}$ – длина ИИ, м;

$l_{\text{точ}}$ – принятая длина точечного ИИ, м;

- поток теплоты, равный потерям через наружное ограждение с заданным коэффициентом теплопередачи K , Вт/м²·°С, условно без учета радиационного теплового потока [6];

$$q_{\text{пот}} = K(t_{\text{в.р}} - t_{\text{н}}), \text{ Вт/м}^2, \quad (2.28)$$

- суммарный поток теплоты через ограждение, условно принято, что отдача теплоты с поверхности к воздуху рабочей зоны отсутствует [6]:

$$q'_{\text{пот}} = q'\varepsilon + q_{\text{пот}}, \text{ Вт/м}^2, \quad (2.29)$$

где ε – степень черноты ограждающей конструкции;

- температурный напор между температурой поверхности в облучаемой зоне $t^{\text{л}}$ и температурой наружного воздуха $t_{\text{н}}$ в здании с лучистой системой отопления [6]:

$$\Delta t' = \frac{q'_{\text{осн}}}{K'}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (2.30)$$

где K' – коэффициент теплопередачи ограждающей конструкции, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, за исключением теплообмена поверхности ограждения с внутренним воздухом $\alpha_{\text{в}}$;

- разница между температурными напорами в случае применения лучистого отопления $\Delta t'$ и конвективного отопления Δt [6]:

$$\Delta \tau^{\text{л}} = \Delta t' - \Delta t, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (2.31)$$

- температура необлученной поверхности наружного ограждения – $\tau^{\text{к}}$, $^\circ\text{C}$.

Для расчёта были приняты излучатели номинальной мощностью $W_{\text{общ}} = 5$ кВт, 10 кВт и 20 кВт; коэффициент теплопередачи $K = 0,33$ $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$; длина линейного источника излучения $l_{\text{общ}} = 5$ м; условная длина точечного источника излучения $l_{\text{точ}} = 0,1$ м; значения радиуса r и угла φ изменяются в зависимости от геометрических параметров помещения: высота подвеса инфракрасного излучателя (ИИ) $H = 10$ м, расстояние от ИИ до ближайшей стены $l = 5$ м.

Полученные данные значений $\Delta \tau^{\text{л}}$, $^\circ\text{C}$ может быть основой для уточнённой методики определения требуемого сопротивления теплопередачи наружных ограждений в помещениях с лучистым отоплением. Предлагается рассчитывать температуру внутренней поверхности наружных ограждающих конструкций $\tau'_{\text{в}}{}^{\text{доп}}$, $^\circ\text{C}$ по формуле:

$$\tau'_{\text{в}}{}^{\text{доп}} = t_{\text{в,р}} + \Delta \tau^{\text{л}}. \quad (2.32)$$

С учётом уравнения (2.32) выражение (2.25) имеет вид:

$$R'_{\text{о}}{}^{\text{тр}} = \frac{(\tau'_{\text{в}}{}^{\text{доп}} - t_{\text{н}})n}{q^{\text{н}}}, \text{ } \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}. \quad (2.33)$$

В результате постановки численного эксперимента были получены графики (рисунки 2.4, 2.5, 2.6), на которых наглядно можно проанализировать различие температуры наружных ограждений в помещениях с лучистым и конвективным отоплением.

Для наглядного представления полученных результатов был построен график зависимости величин требуемого сопротивления теплопередаче наружной

стены от климатических условий расположения объекта строительства (рисунок 2.7), в качестве исходных данных было принято, что $t_{в,р} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta\tau^{\text{л}} = 3,82 \text{ }^\circ\text{C}$ (наихудший случай, полученный в результате аналитического расчёта).

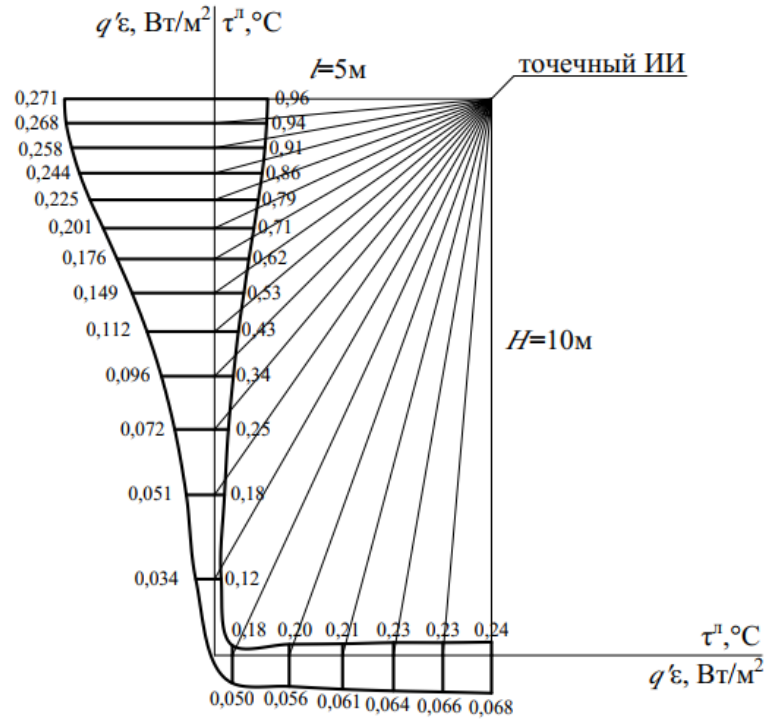


Рисунок 2.4 – Приращение температуры на наружных ограждениях в помещении с лучистым отоплением, $W_{\text{общ}} = 5 \text{ кВт}$

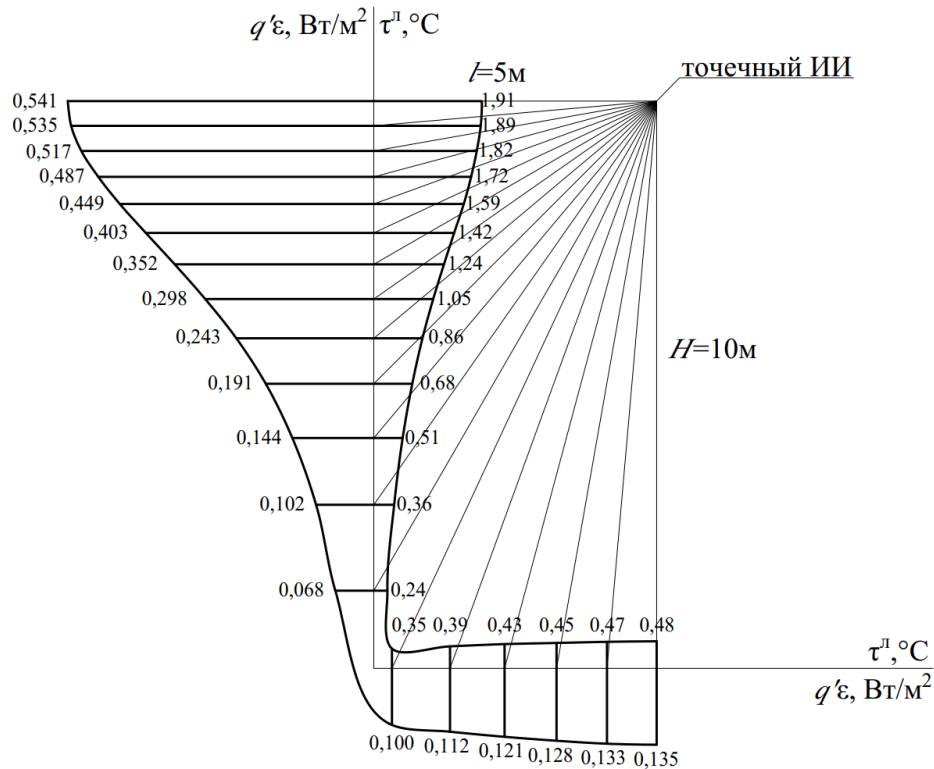


Рисунок 2.5 – Приращение температуры на наружных ограждениях в помещении с лучистым отоплением, $W_{\text{общ}} = 10 \text{ кВт}$

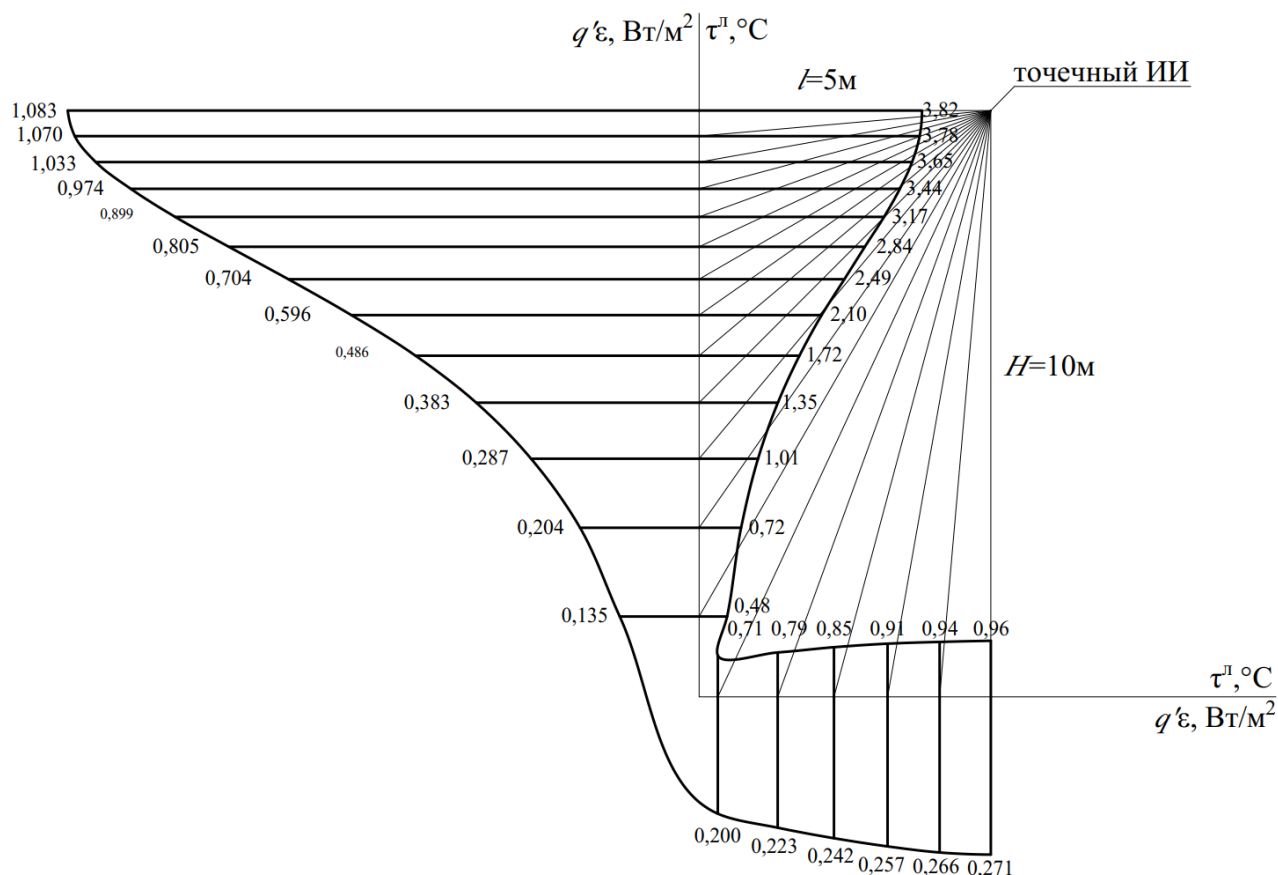
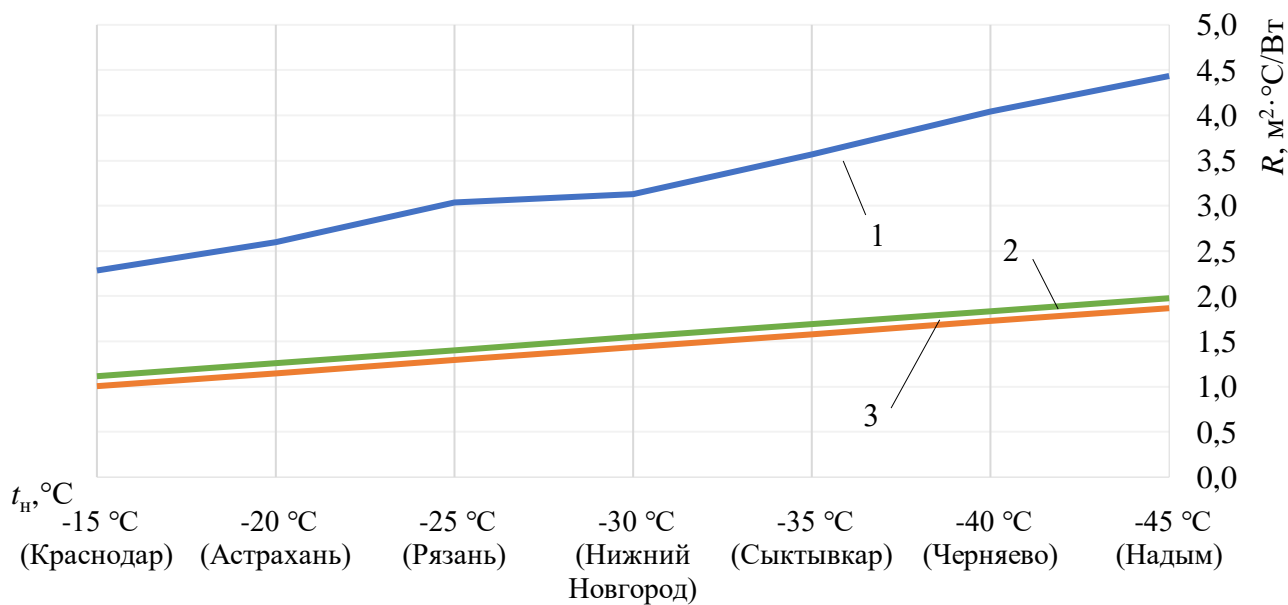


Рисунок 2.6 – Приращение температуры на наружных ограждениях в помещении с лучистым отоплением, $W_{\text{общ}} = 20 \text{ кВт}$



1 – $R^{\text{ГОП}}$, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$; 2 – $R_0^{\text{ТР}}$, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$; 3 – $R_0^{\text{ТР}'}$, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$

Рисунок 2.7 – Требуемое сопротивление теплопередаче стены в различных климатических условиях, где: $R^{\text{ГОП}}$ – требуемое сопротивление теплопередаче, рассчитанное по нормативной методике [85]; $R_0^{\text{ТР}}$ – требуемое сопротивление теплопередаче из санитарно-гигиенических требований; $R_0^{\text{ТР}'}$ – требуемое сопротивление теплопередаче из санитарно-гигиенических требований, с учётом поправки $\Delta t^{\text{л}}$

Выводы по 2 главе

1. Установлено, что существующие методы расчёта требуемой мощности систем лучистого отопления не позволяют достоверно спрогнозировать тепловой и воздушный режим в производственных помещениях.
2. В результате проведённого анализа были показаны принципиальные различия в формировании теплового режима в помещении с использованием лучистого и конвективного отопления.
3. Разработана и представлена уточнённая математическая модель, описывающая тепловой режим помещения с системой лучистого отопления.
4. Разработана уточнённая методика, позволяющая определять требуемое сопротивление теплопередаче из санитарно-гигиенических требований.
5. Проведённый численный эксперимент показал, что требуемое сопротивление теплопередачи из санитарно-гигиенических требований для производственных помещений, оборудованных системами лучистого отопления выше, чем для помещений с конвективными системами отопления.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДЯНЫХ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ И ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ПОМЕЩЕНИЙ С СИСТЕМАМИ ЛУЧИСТОГО ОТОПЛЕНИЯ

Для того, чтобы в помещениях с лучистым отоплением построить общую картину формирования теплового режима был проведён ряд лабораторных и натуральных экспериментов (приложение В) [105, 107, 109.115, 117.122, 124, 125, 128, А3...А 12, А33...А51]:

эксперимент № 1 – исследование тепловых характеристик водяного инфракрасного излучателя;

эксперимент № 2 – исследование лучистых характеристик водного инфракрасного излучателя;

эксперимент № 3 – исследование теплового режима в помещениях с системами отопления на основе водяных инфракрасных излучателей;

эксперимент № 4 – исследование температурного режима в помещениях, оборудованных системами лучистого отопления на основе водяных инфракрасных излучателей;

эксперимент № 5 – представляет собой исследование теплового режима наружных ограждающих конструкций в помещениях с системами отопления на основе водяных инфракрасных излучателей.

Исследования, посвящённые изучению особенностей работы лучистой системы отопления на базе водяных инфракрасных излучателей, были проведены в стенах Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета. Для проведения этих исследований в университете был основан Учебно-научно-исследовательский центр «Системы отопления с использованием низкотемпературных инфракрасных излучателей» (УНИЦ «СОНИИ»). В основу центра легла Лаборатория лучистого отопления, созданная совместно с индустриальным партнёром компанией ООО «Флайг+Хоммель» (г. Заволжье,

Нижегородская обл.) – единственным производителем водяных излучающих профилей на территории России [10, 12].

Лаборатория лучистого отопления в своём составе имеет поверенную и сертифицированную приборную базу (таблица Г1, приложение Г).

3.1. Планирование экспериментальных исследований

При определении перечня эмпирических исследований необходимо определить методику применения аппарата математической статистики для формализации результатов исследований, и, как следствие, минимально достаточное число опытов. В данном исследовании применяется общепринятая методика определения минимально допустимого числа измерений, $n_{\text{изм}}$ [31, 33].

Для начала определяется среднее значение измеренной величины \bar{x} , далее, исходя из следующих зависимостей, определяют исправленную дисперсию s^2 и среднеквадратическое отклонение σ [33]:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{изм}}} x_i}{n_{\text{изм}}}; \quad (3.1)$$

$$s^2 = \frac{1}{n_{\text{изм}} - 1} \sum_{i=1}^{n_{\text{изм}}} (x_i - \bar{x})^2; \quad (3.2)$$

$$\sigma = \sqrt{s^2}. \quad (3.3)$$

Минимальное количество измерений должно отвечать следующему требованию:

$$n_{\text{изм}} \geq \left(\frac{t_{\text{расп}} \alpha}{\beta_0} \right)^2, \quad (3.4)$$

где: $t_{\text{расп}}$ – величина, распределенная по закону Стьюдента [33], которая определяется в зависимости от количества степеней свободы $\nu = n_{\text{изм}} - 1$ и уровня значимости $q = (1 - \alpha) \cdot 100 \%$;

α – доверительная вероятность;

β_0 – доверительный интервал.

Далее, для величины x оценивается при помощи безразмерных комбинаций центральных моментов распределения A и E нормальность распределения по закону Стьюдента [33]:

$$A = \frac{1}{s^3 (n_{\text{изм}} - 1)} \sum_{i=1}^{n_{\text{изм}}} (x_i - \bar{x})^3 ; \quad (3.5)$$

$$E = \frac{1}{s^4 (n_{\text{изм}} - 1)} \sum_{i=1}^{n_{\text{изм}}} (x_i - \bar{x})^4 . \quad (3.6)$$

Для нормально распределённых величин центральные моменты A и E равны нулю. Если в ходе определения определяется, что центральные моменты не равны нулю, то необходимо провести оценку собственной дисперсии D полученных значений [33]:

$$D(A) = \frac{6(n_{\text{изм}} - 1)}{(n_{\text{изм}} + 1)(n_{\text{изм}} + 3)} ; \quad (3.7)$$

$$D(E) = \frac{24n_{\text{изм}}(n_{\text{изм}} - 2)(n_{\text{изм}} - 3)}{(n_{\text{изм}} + 1)^2 (n_{\text{изм}} + 3)(n_{\text{изм}} + 5)} . \quad (3.8)$$

Нормальным считается распределение значений, соответствующее следующим условиям [33]:

$$|A| \leq 3\sqrt{D(A)} ; \quad (3.9)$$

$$|E| \leq 5\sqrt{D(E)} . \quad (3.10)$$

При проведении эмпирических исследований автором было принято следующее количество измерений: измерение температуры теплоносителя T_1 , °С, T_2 , °С, проводить три раза; расхода теплоносителя G_1 , кг/ч, G_2 , кг/ч, проводить три раза; измерение общей мощности системы $Q_{\text{общ}}$, Вт проводить три раза; измерение лучистого теплового потока $E_{\text{изл}}$, Вт/м² проводить три раза. Полный перечень проведённых измерений приведён в приложении Д.

3.2. Исследование теплотехнических характеристик водяных инфракрасных излучателей (эксперимент № 1)

Целью эксперимента является определение значений удельной мощности 1 п.м водяного инфракрасного излучателя. Объект исследований – водяные инфракрасные излучатели, выполненные в виде излучающих профилей марок Helios 750 и Flower 125 производства ООО «Флайг+Хоммель».

На рисунках 3.1 и 3.2 представлены 3D-модели из созданного ВМ-семейства отопительных приборов. Характеристики исследуемых излучателей приведены в таблице 3.1.

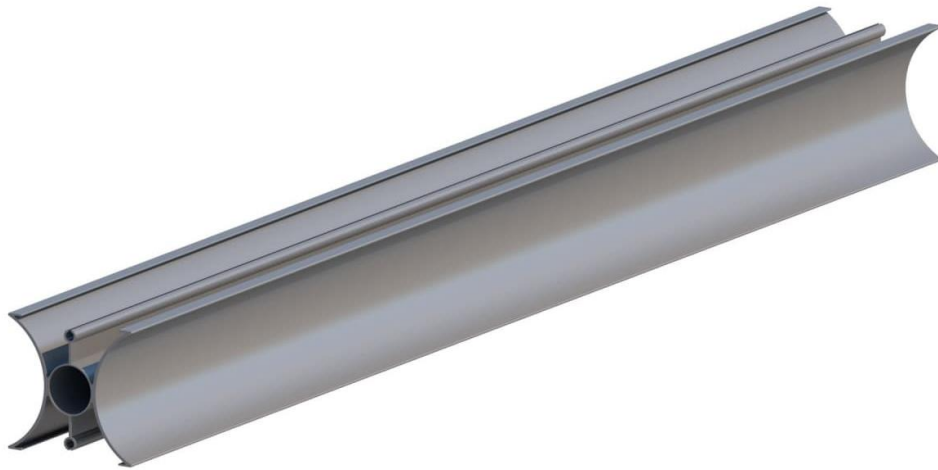


Рисунок 3.1 – Водяной инфракрасный излучатель марки Helios 750

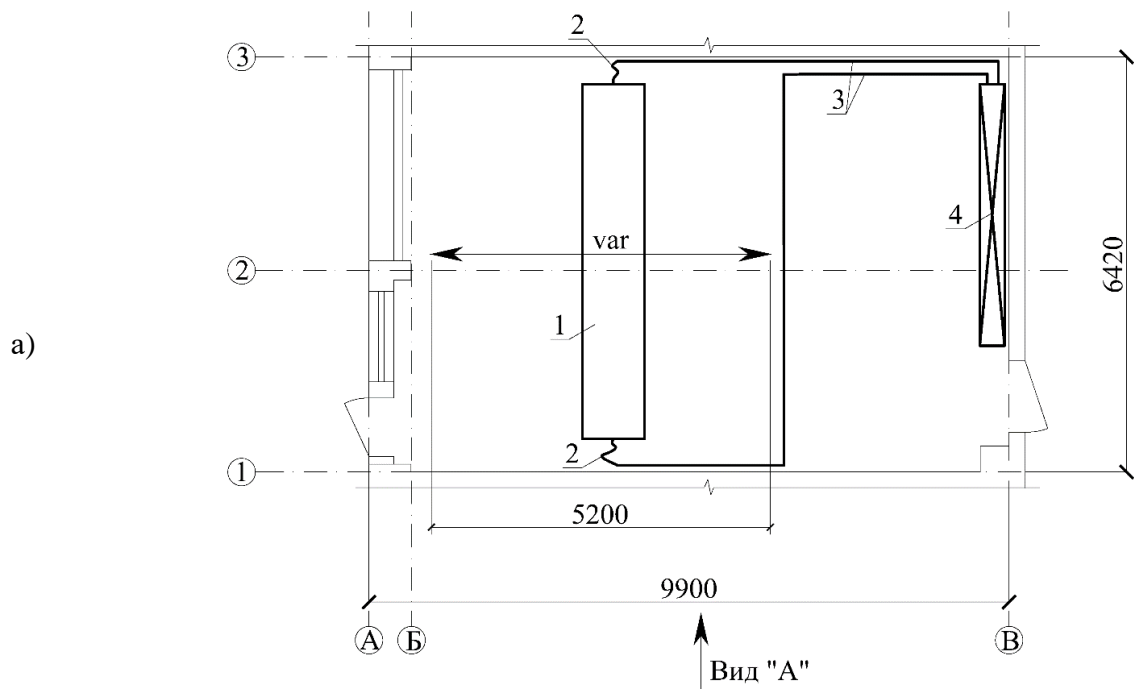


Рисунок 3.2 – Водяной инфракрасный излучатель марки Flower 125

Для проведения эмпирических исследований была создана оригинальная экспериментальная установка (рисунок 3.3, 3.4).



Рисунок 3.3 – Общий вид Лаборатории лучистого отопления



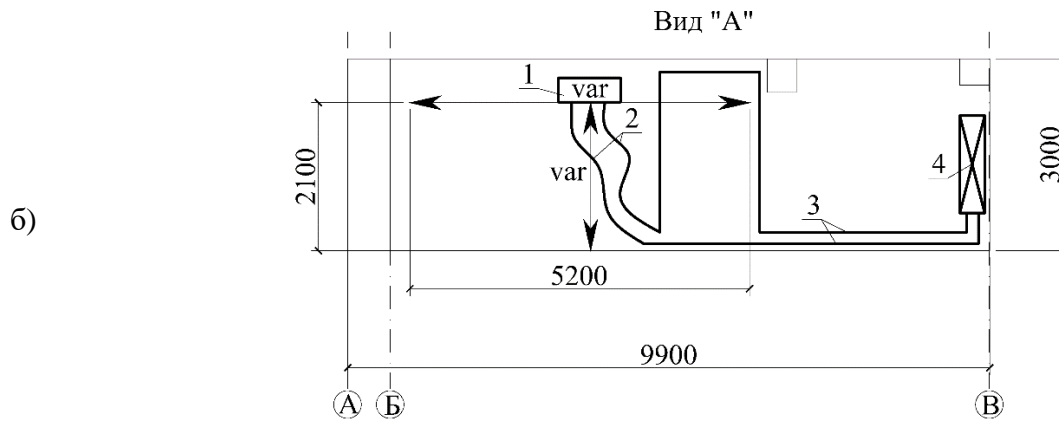


Рисунок 3.4 – Экспериментальная установка Лаборатории лучистого отопления; а – план лаборатории, б – вид «А»; 1 – передвижная установка с излучателями; 2 – гибкие подводки; 3 – трубопроводы; 4 – индивидуальный тепловой пункт

Экспериментальная установка позволяет смоделировать фрагмент лучистой системы отопления, использующей в качестве отопительных приборов водяные инфракрасные излучатели, применить известные методы испытаний и получить достоверные экспериментальные данные, которые впоследствии можно использовать в инженерной практике.

В ходе эксперимента также было проведено термографирование экспериментальной установки (рисунок 3.5). Панорамная термограмма Лаборатории лучистого отопления (рисунок 3.6) была получена путем обработки трёх изображений нейросетевым алгоритмом программы Image Composite Editor 2.0 от Microsoft.

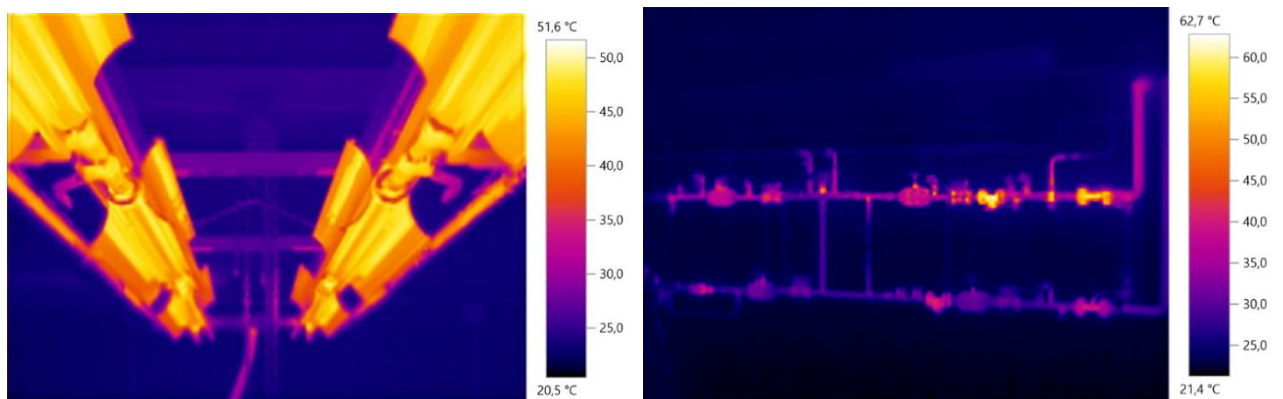


Рисунок 3.5 – Термограммы экспериментальной установки Лаборатории лучистого отопления



Рисунок 3.6 – Панорамная термограмма Лаборатории лучистого отопления

Измерение удельной мощности 1 п.м водяного инфракрасного излучателя $q_{\text{изл}}$ производилось при помощи вычислителя количества теплоты ТРСВ-026М и электромагнитного расходомера-счётчика марки ЭРСВ-570Ф (ЗАО «Взлёт»). Измеряемые, в ходе эксперимента, величины:

G_1 – массовый расход теплоносителя в подающем трубопроводе экспериментальной установки, кг/ч;

G_2 – массовый расход теплоносителя в обратном трубопроводе экспериментальной установки, кг/ч;

T_1 – температура теплоносителя в подающем трубопроводе экспериментальной установки, °С;

T_2 – температура теплоносителя в обратном трубопроводе экспериментальной установки, °С;

N – количество включённых излучателей, шт.;

$Q_{\text{тр}}$ – транзитные тепловые потери, Вт, измеренные экспериментально.

Уравнение удельной мощности 1 п.м водяного инфракрасного излучателя выглядит следующим образом:

$$q_{\text{изл}} = \left(\frac{G_1 \cdot c_{T_1} \cdot T_1}{3,6} - \frac{G_2 \cdot c_{T_2} \cdot T_2}{3,6} - Q_{\text{тр}} \right) / N, \text{ Вт/п.м}, \quad (3.11)$$

где c_{T_1} и c_{T_2} – теплоёмкость воды в подающем и обратном трубопроводе, соответственно, кДж/кг·°С.

Результаты экспериментального исследования по определению удельной мощности 1 п.м водяного инфракрасного излучателя Helios 750 приведены в приложении Д, результаты, прошедшие первичную математическую обработку, представлены в таблице 3.2 и на рисунке 3.7.

Таблица 3.2 – Экспериментальное определение удельной мощности водяного инфракрасного излучателя марки Helios 750

№ опыта п/п	N, шт	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$G_1, \text{кг/ч}$	$G_2, \text{кг/ч}$	$c_{T_1}, \text{кДж/кг}\cdot^\circ\text{C}$	$c_{T_2}, \text{кДж/кг}\cdot^\circ\text{C}$	$Q_{\text{общ}}, \text{Вт}$	$Q_{\text{тр}}, \text{Вт}$	$q_{\text{изл}}, \text{Вт/п.м}$	$t_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T, ^\circ\text{C}$
1	6	31,00	28,75	262,74	262,02	4,178	4,179	708,01	523,21	30,80	23,1	6,775
2	6	40,15	36,61	269,95	268,27	4,179	4,178	1183,44	677,64	84,30	23,5	14,880
3	6	51,33	46,12	272,48	269,49	4,181	4,179	1815,79	866,33	158,24	23,6	25,125
4	6	61,73	55,44	273,87	268,42	4,185	4,18	2374,49	1041,86	222,10	25,5	33,085
5	6	69,93	62,82	278,98	271,21	4,19	4,183	2909,86	1180,26	288,27	25,6	40,775

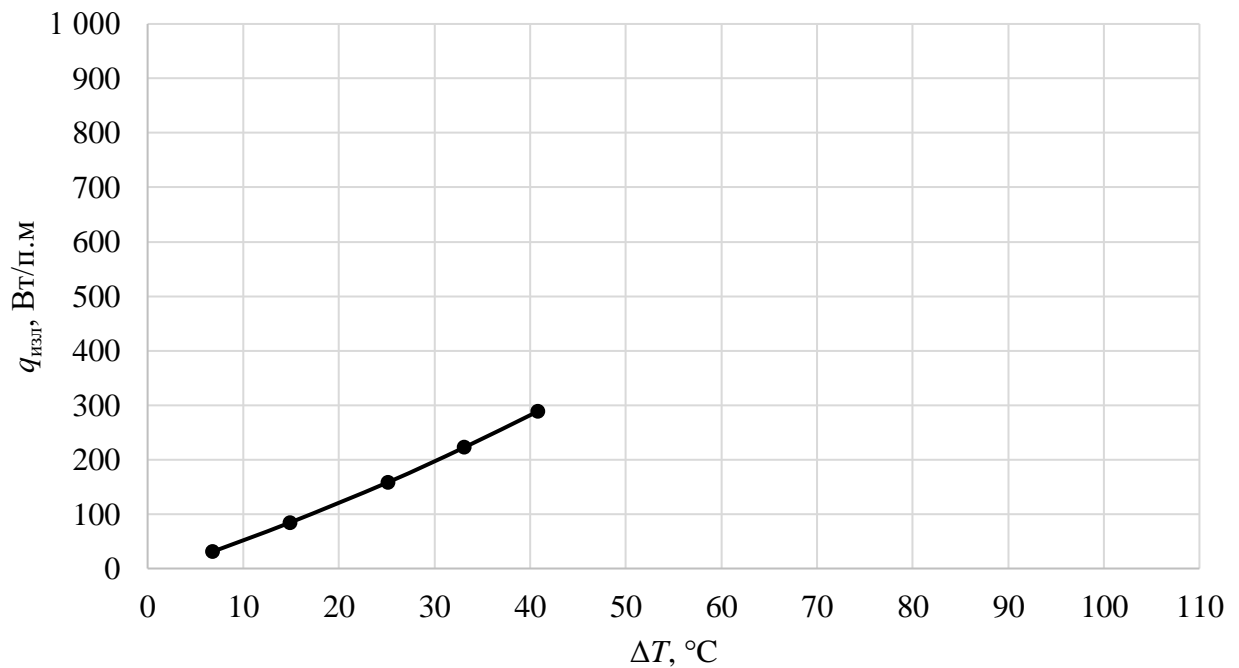


Рисунок 3.7 – Результаты исследований удельной мощности водяного инфракрасного излучателя марки Helios 750

Результаты экспериментального исследования по определению удельной мощности 1 п.м водяного инфракрасного излучателя Flower 125 также приведены в приложении Д, а результаты, прошедшие первичную математическую обработку, представлены в таблице 3.3 и на рисунке 3.8.

Таблица 3.3 – Экспериментальное определение удельной мощности водяного инфракрасного излучателя марки Flower 125

№ опыта п/п	N, шт	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$G_1,$ кг/ч	$G_2,$ кг/ч	$c_{T_1},$ кДж/кг \cdot °C	$c_{T_2},$ кДж/кг \cdot °C	$Q_{\text{общ}},$ Вт	$Q_{\text{гр}},$ Вт	$q_{\text{изл}},$ Вт/п.м	$t_{\text{в}},$ °C	$\Delta T,$ °C
1	6	29,95	28,16	203,77	196,88	4,178	4,179	646,94	523,21	20,62	23,10	5,96
2	6	43,32	39,73	210,43	202,43	4,179	4,178	1248,14	756,78	81,89	23,50	18,03
3	6	50,87	46,57	236,33	228,22	4,181	4,179	1624,77	888,67	122,68	23,60	25,12
4	6	59,78	54,62	252,82	244,94	4,185	4,180	2035,47	1044,32	165,19	25,50	31,70
5	6	69,93	63,88	269,23	260,33	4,190	4,183	2589,83	1221,64	228,03	25,60	41,31

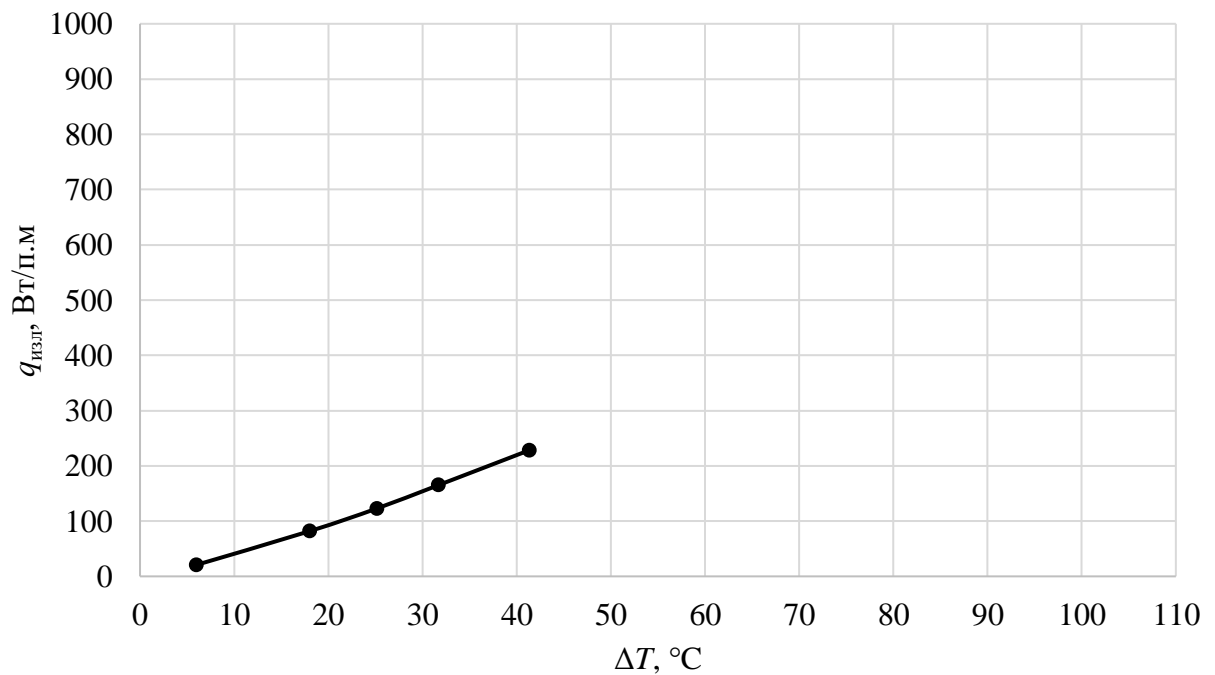


Рисунок 3.7 – Результаты исследований удельной мощности водяного инфракрасного излучателя марки Flower 125

Математическая обработка полученных данных проводится в п. 3.7.

Выводы по эксперименту № 1: впервые получены объективные данные по теплотехническим характеристикам (удельной мощности) водяных инфракрасных излучателей – излучающих профилей моделей Helios 750 и Flower 125. Данные могут быть использованы при проектировании систем отопления на базе исследуемых излучателей.

3.3. Исследование лучистых характеристик водяных инфракрасных излучателей (эксперимент № 2)

Целью эксперимента является определение построение эпюры излучающей способности водяного инфракрасного излучателя. Объект исследований – водяные инфракрасные излучатели, выполненные в виде излучающих профилей марок Helios 750 и Flower 125 производства ООО «Флайг+Хоммель».

Измерение лучистого теплового потока проводилось с помощью неселективного радиометра «Аргус-03», координаты точек измерения определялись с помощью лазерного дальномера Bosch GLM 50 C. Измеряемые, в ходе эксперимента, величины:

l_x – расстояние от поверхности излучателя до точки измерения, м;

φ_x – угол между нормалью излучателя и плоскостью измерения, град.;

$\tau_{\text{изл}}$ – температура поверхности излучателя, °С;

T_1 – температура теплоносителя в подающем трубопроводе экспериментальной установки, °С;

$E_{\text{изл}}$ – плотность лучистого теплового потока, Вт/м².

Результаты проведенных исследований по определению плотности потока лучистой тепловой энергии для излучателей марок Helios 750 и Flower 125 приведены в приложении Д.

Результаты, прошедшие первичную математическую обработку, представлены в таблицах 3.4, 3.5 и на рисунках 3.9, 3.10.

Таблица 3.4 – Экспериментальное измерение плотности потока тепловой энергии для водяного инфракрасного излучателя марки Helios 750

№ опыта п/п	l_x , м	$E_{\text{изл}}$, Вт/м ²			
		$T_1 = 60$ °С; $\tau_{\text{изл}} = 56,2$ °С		$T_1 = 90$ °С; $\tau_{\text{изл}} = 88,7$ °С	
		$\varphi_x = 0^\circ$	$\varphi_x = 90^\circ$	$\varphi_x = 0^\circ$	$\varphi_x = 90^\circ$
1	2	3	4	5	6
1	0,1	95,0	90,5	145,7	145,5
2	0,2	83,5	71,1	114,5	112,1

3	0,3	55,0	61,6	95,5	93,2
4	0,4	41,5	50,7	81,6	78,2
5	0,5	32,3	43,1	69,4	63,8
1	2	3	4	5	6
6	0,6	26,5	36,2	58,3	54,2
7	0,7	24,0	32,0	51,5	48,0
8	0,8	20,0	28,3	45,6	41,1
9	0,9	17,2	24,8	39,9	37,5
10	1,0	16,3	22,4	38,1	32,8
11	1,1	16,0	18,2	29,3	27,8
12	1,2	16,0	16,0	24,6	24,5
13	1,3	16,0	12,2	19,6	19,0
14	1,4	15,5	10,1	16,3	17,3
15	1,5	14,5	8,7	14,0	14,3
16	1,6	13,5	7,1	11,4	11,3
17	1,7	13,5	6,5	10,5	10,2
18	1,8	12,7	5,0	8,1	8,6
19	1,9	12,1	4,1	6,6	7,4
20	2,0	11,4	4,0	6,4	6,6

Таблица 3.5 – Экспериментальное измерение плотности потока тепловой энергии для водяного инфракрасного излучателя марки Flower 125

№ опыта п/п	l_x , м	$E_{изл}$, Вт/м ²			
		$T_1 = 60\text{ }^\circ\text{C}; \tau_{изл} = 57,3\text{ }^\circ\text{C}$		$T'_1 = 90\text{ }^\circ\text{C}; \tau_{изл} = 88,2\text{ }^\circ\text{C}$	
		$\varphi_x = 0^\circ$	$\varphi_x = 90^\circ$	$\varphi_x = 0^\circ$	$\varphi_x = 90^\circ$
1	0,1	66,9	65,2	103,1	101,0
2	0,2	50,6	49,1	80,7	78,5
3	0,3	42,2	40,8	67,6	65,2
4	0,4	36,6	34,9	56,1	54,0
5	0,5	28,3	26,8	46,9	44,7
6	0,6	24,5	23,1	40,3	37,9
7	0,7	23,1	21,4	34,9	32,8
8	0,8	19,8	18,3	31,0	28,8
9	0,9	17,2	15,8	28,7	26,3
10	1,0	16,8	15,1	24,6	22,5
11	1,1	13,9	12,4	21,7	19,5
12	1,2	12,0	10,6	19,6	17,2
13	1,3	10,2	8,5	15,4	13,3
14	1,4	9,0	7,5	14,3	12,1
15	1,5	7,8	6,4	12,1	9,7
16	1,6	6,7	5,0	10,0	7,9
17	1,7	6,3	4,8	9,2	7,0
18	1,8	5,3	3,9	8,4	6,0
19	1,9	5,0	3,3	7,3	5,2
20	2,0	4,4	2,9	6,8	4,6

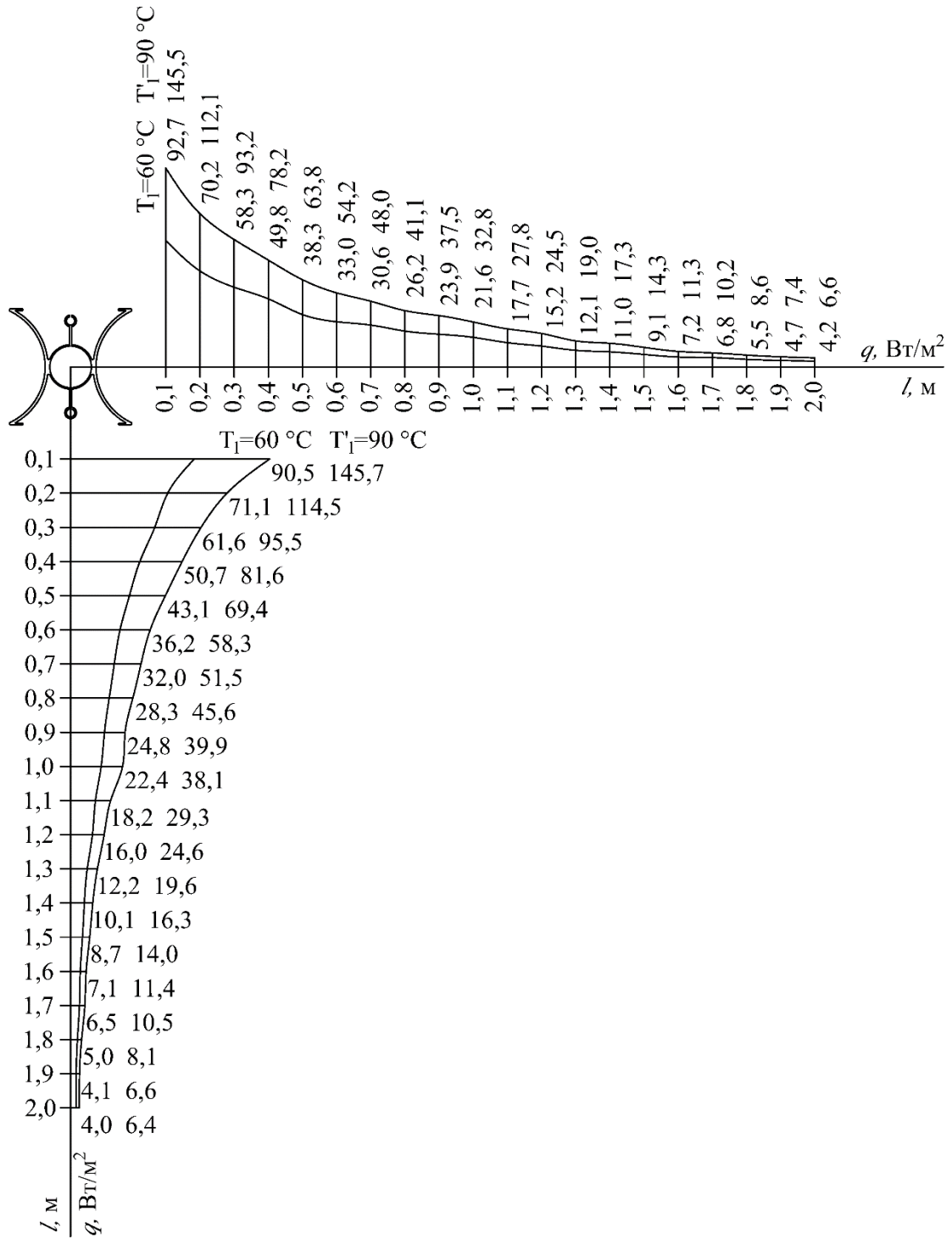


Рисунок 3.9 – Результаты экспериментальных исследований плотности теплового потока

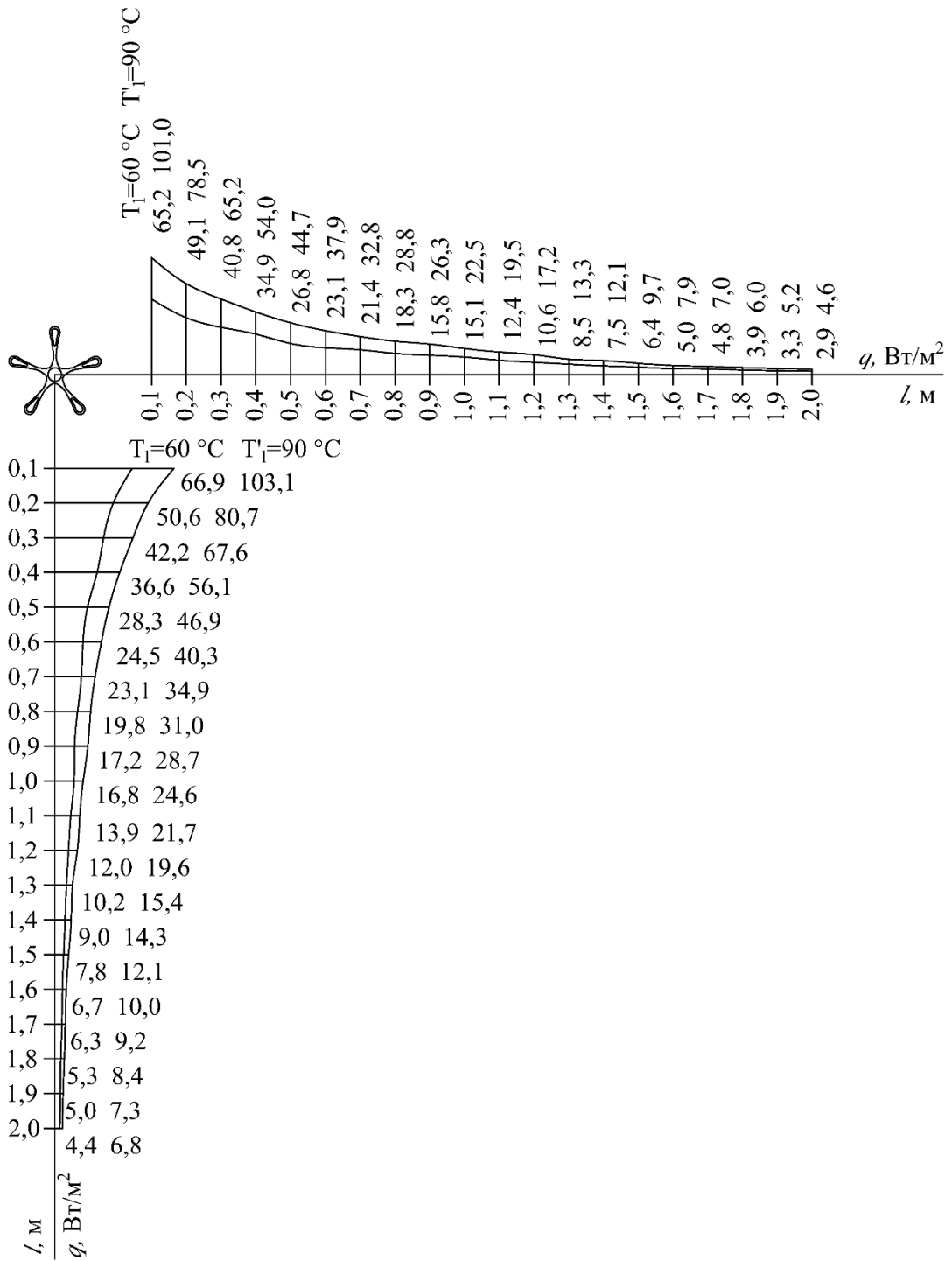


Рисунок 3.10 – Результаты экспериментальных исследований плотности теплового потока

Обработка полученных данных приведена в п. 3.7.

Выводы по эксперименту № 2: впервые получены объективные данные по лучистым характеристикам водяных инфракрасных излучателей – излучающих профилей марок Helios 750 и Flower 125. Данные могут быть использованы при проектировании систем отопления на базе исследуемых излучателей.

3.4. Исследование теплового режима в помещениях с системами отопления на базе водяных инфракрасных излучателей (эксперимент № 3)

3.4.1. Лабораторные исследования

Цель эксперимента – анализ особенностей формирования теплового режима производственных помещений, оборудованных системами лучистого отопления на базе водяных инфракрасных излучателей.

Объектом исследования теплового режима стало помещение Лаборатории лучистого отопления УНИЦ «СОНИИ» ННГАСУ. В помещении высотой 3,0 м, помимо установки с инфракрасными излучателями и двух радиаторов, подключённых к резервному источнику теплоснабжения, размещены 16 датчиков ТС-1388/12 подключенных к многоканальному термометру ТМ 5104Д/В/t1050/ГП производства ООО НПФ «Элемер». План помещения и схема размещения датчиков приведены на рисунке 3.11.

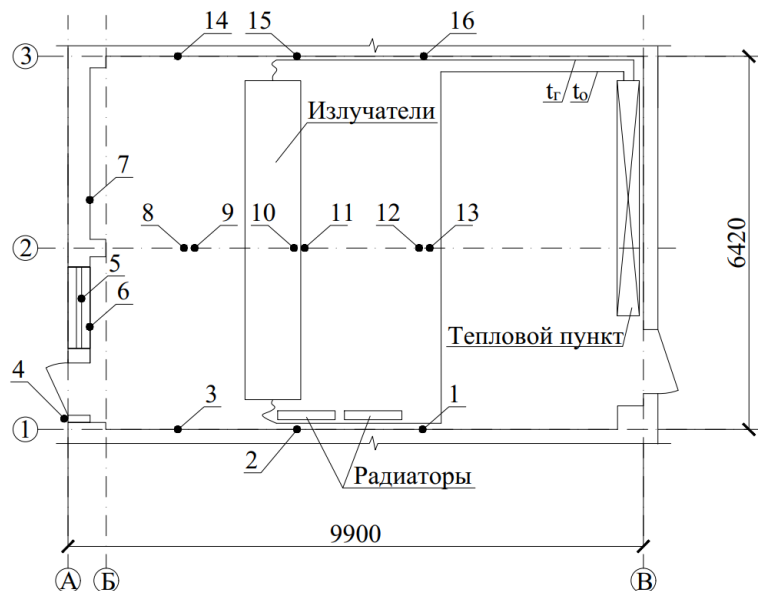


Рисунок 3.11 – План помещения Лаборатории лучистого отопления и схема размещения датчиков температуры: 1 – на стене, 2 – на стене, 3 на стене, 4 – на улице, 5 – на окне, 6 – под окном на стене, 7 – на стене (под утеплителем), 8 – на полу, 9 – на потолке, 10 – на полу, 11 – на потолке, 12 – на полу, 13 – на потолке, 14 – на стене, 15 – на стене, 16 – на стене

Эксперименты проводились в два этапа: на 1 этапе (лучистое отопление) для отопления помещения использовалась подвесная установка с водяными

инфракрасными излучателями марки Flower 125; на 2 этапе (конвективное отопление) помещение отапливалось двумя радиаторами марки Calidor, по 12 секций каждый.

Результаты экспериментов приведены на рисунках 3.12 и 3.13, результаты за весь период измерения приведены в приложении Г.

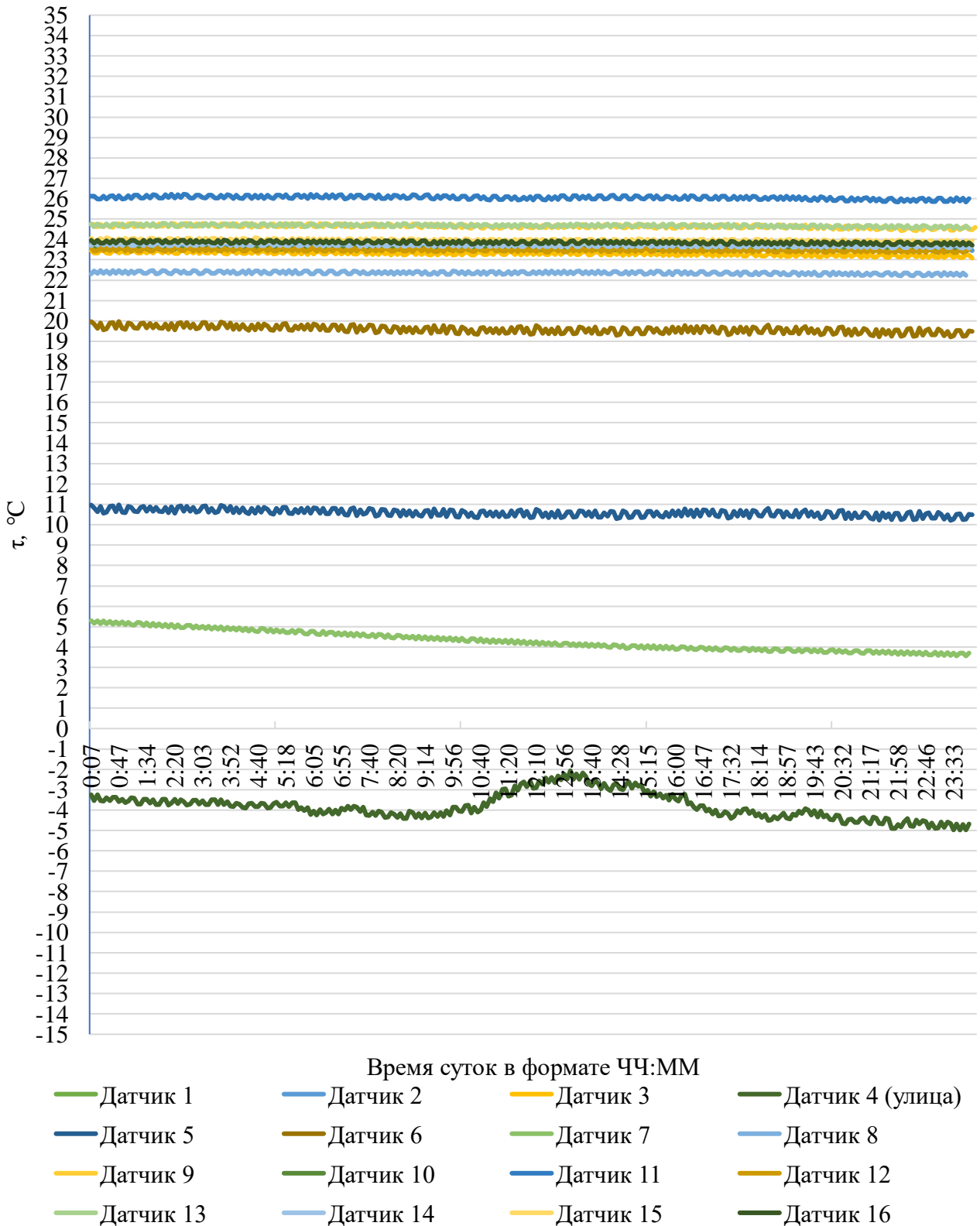


Рисунок 3.12 – Показания датчиков 1-16 в ходе 1 этапа эксперимента (01.12.2020)

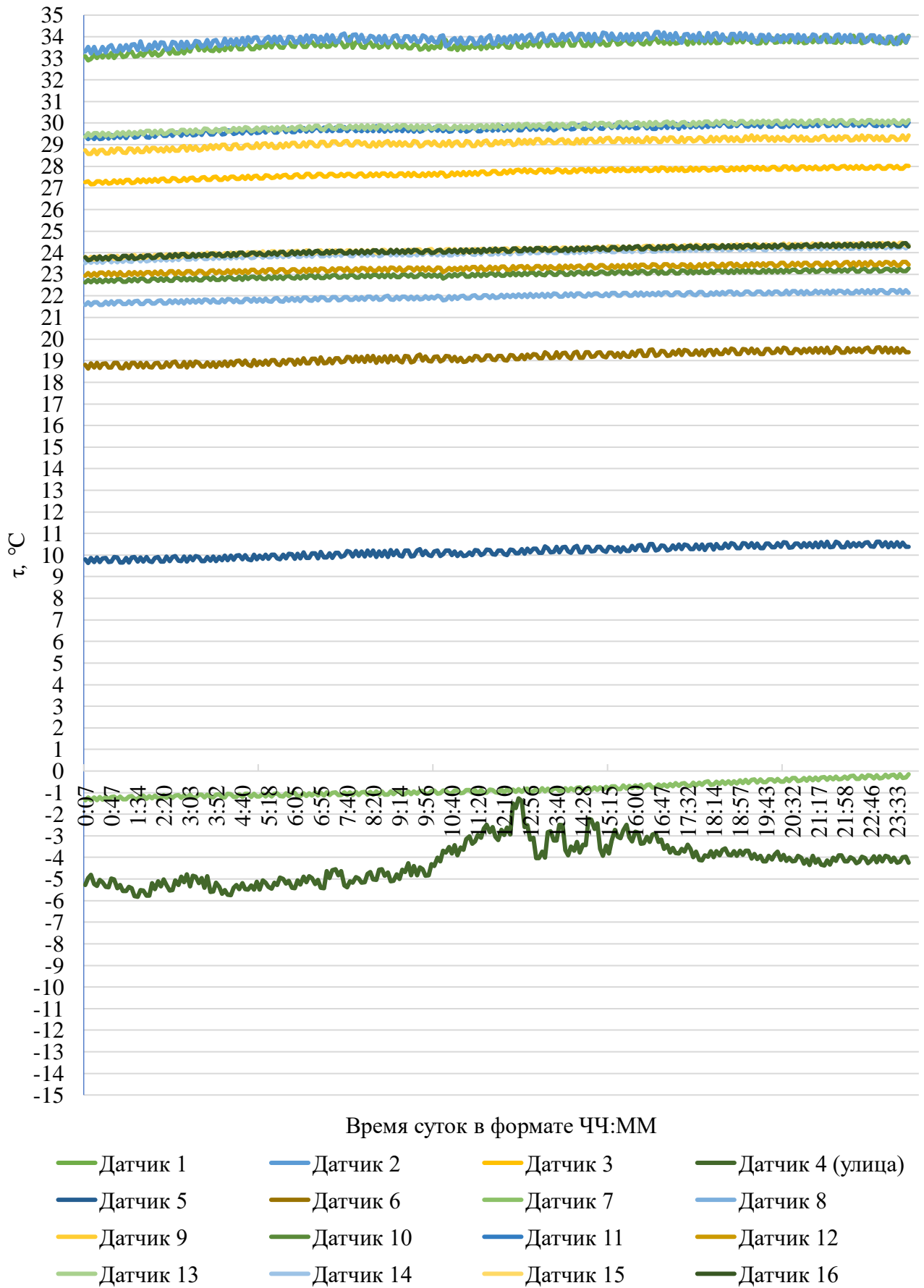


Рисунок 3.13 – Показания датчиков 1-16 в ходе 2 этапа эксперимента (23.01.2021)

3.4.2. Натурные исследования

Объектом натурных исследований теплового режима помещения, оборудованного системой лучистого отопления, был производственный объект - цех металлообработки компании ООО «Флайг+Хоммель», расположенный в городе Заволжье Нижегородской области (рисунки 3.14, 3.15). Для определения координат измеряемой точки использовался лазерный дальномер Bosch GLM 80. Измерения проводились в сечениях 1-1, 2-2 и 3-3 (рисунок 3.14).



Рисунок 3.14 – Объект исследований – цех металлообработки ООО «Флайг+Хоммель»



Рисунок 3.15 – Общий вид цеха металлообработки компании ООО «Флайг+Хоммель»

На производственной площадке был выполнен ряд исследований: тепловизионное обследование ограждений; измерение температуры внутренних

поверхностей ограждений; исследование основных параметров микроклимата внутреннего воздуха помещения. Основные характеристики объекта исследований (рисунок 3.14): размеры в плане 126 м на 24 м (до 33 м с учётом пристроев), высота в коньке 10 м, площадь – 3456 м², объём – 41472 м³, пол выполнен из бетонного монолита с наливным полимерным покрытием, стены выполнены из сэндвич-панелей.

Эксперименты проводились в два этапа: на 1 этапе (лучистое отопление) для отопления помещения использовалась система отопления, построенная на базе ВИИ марки Helios 750 (рисунок 3.16).

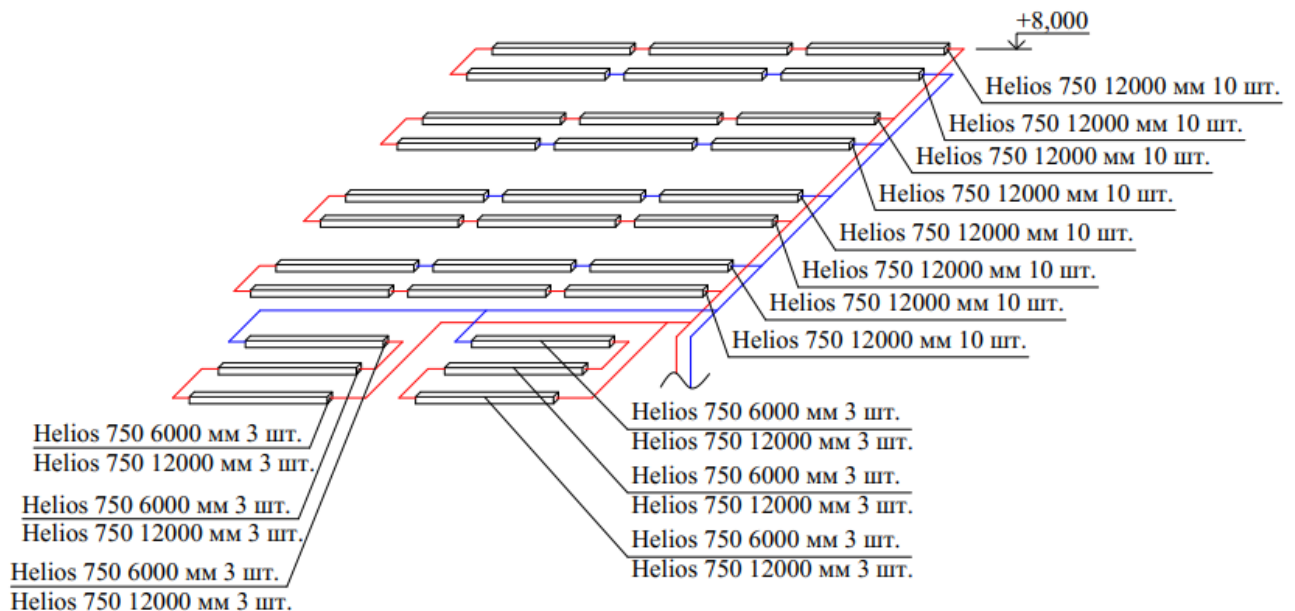


Рисунок 3.16 – Схематическое изображение системы отопления цеха

На 2 этапе (конвективное отопление) помещение отапливалось чугунными радиаторами марки МС-140-500. Измерение температуры поверхности ограждений проводились с помощью 16 датчиков ТС-1388/12 подключенных к многоканальному термометру ТМ 5104Д/В/t1050/ГП производства ООО НПП «Элемер», план помещения и схема размещения датчиков приведены на рисунке 3.17.

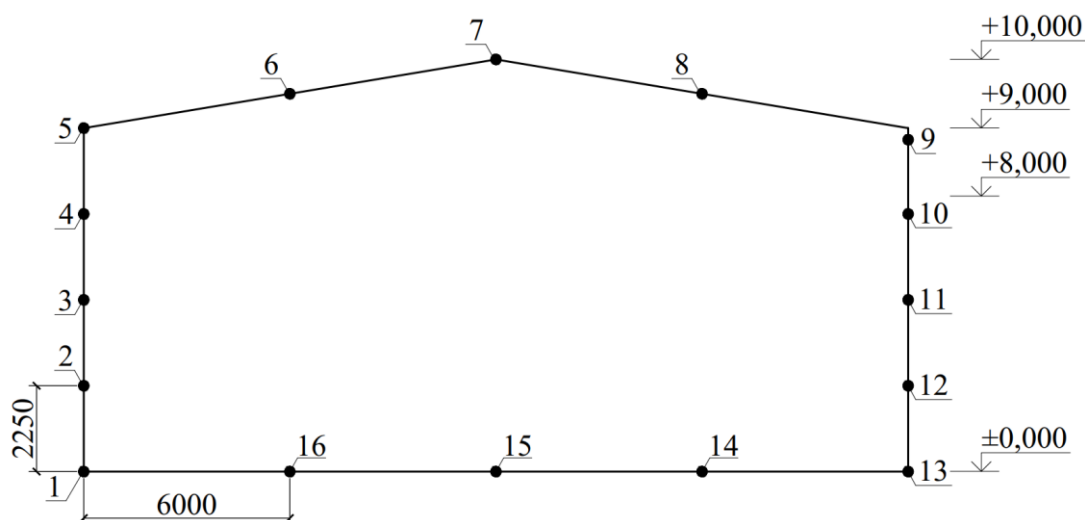


Рисунок 3.17 – Схема размещения датчиков температуры в сечениях

Результаты экспериментов приведены на рисунках 3.18 и 3.19.

В рамках этого исследования было проведено тепловизионное исследование системы лучистого отопления на основе водяного инфракрасного излучателя и теплового режима наружных ограждающих конструкций. Тепловизионная съемка проводилась с использованием тепловизора марки Testo 875-2i и выполнялась в соответствии с методикой ГОСТ [26].

Во время проведения измерений температура наружного воздуха находилась в пределах $t_{\text{н}} = -8,1$ °С; температура внутреннего воздуха, $t_{\text{в}} = 22,1$ °С; относительная влажность внутреннего воздуха $\varphi_{\text{в}} = 35,1$ %; подвижность воздуха в помещении, $v_{\text{в}} = 0,1$ м/с. На момент проведения тепловизионной съёмки температура в системе отопления, согласно данным контрольно-измерительных приборов в индивидуальном тепловом пункте составляла $t_{\text{т}} = 55,0$ °С, $t_{\text{о}} = 37,5$ °С.

Полученные результаты термографирования были проанализированы и обработаны в программном комплексе Testo IRSoft версии 4.5.3997.34051. Полученные термограммы представлены на рисунках 3.20...3.23.

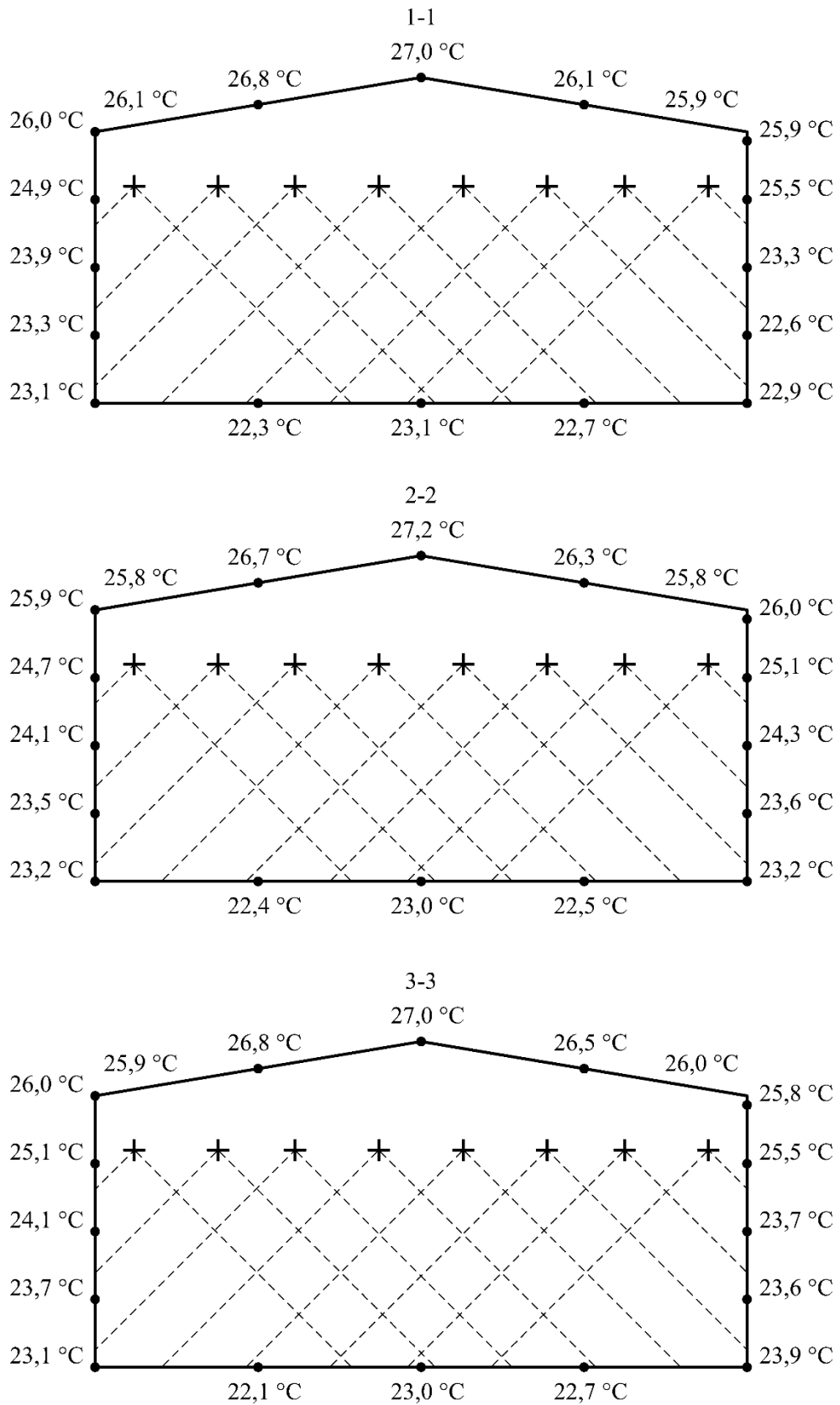


Рисунок 3.18 – Показания датчиков 1-16 в ходе 1 этапа эксперимента

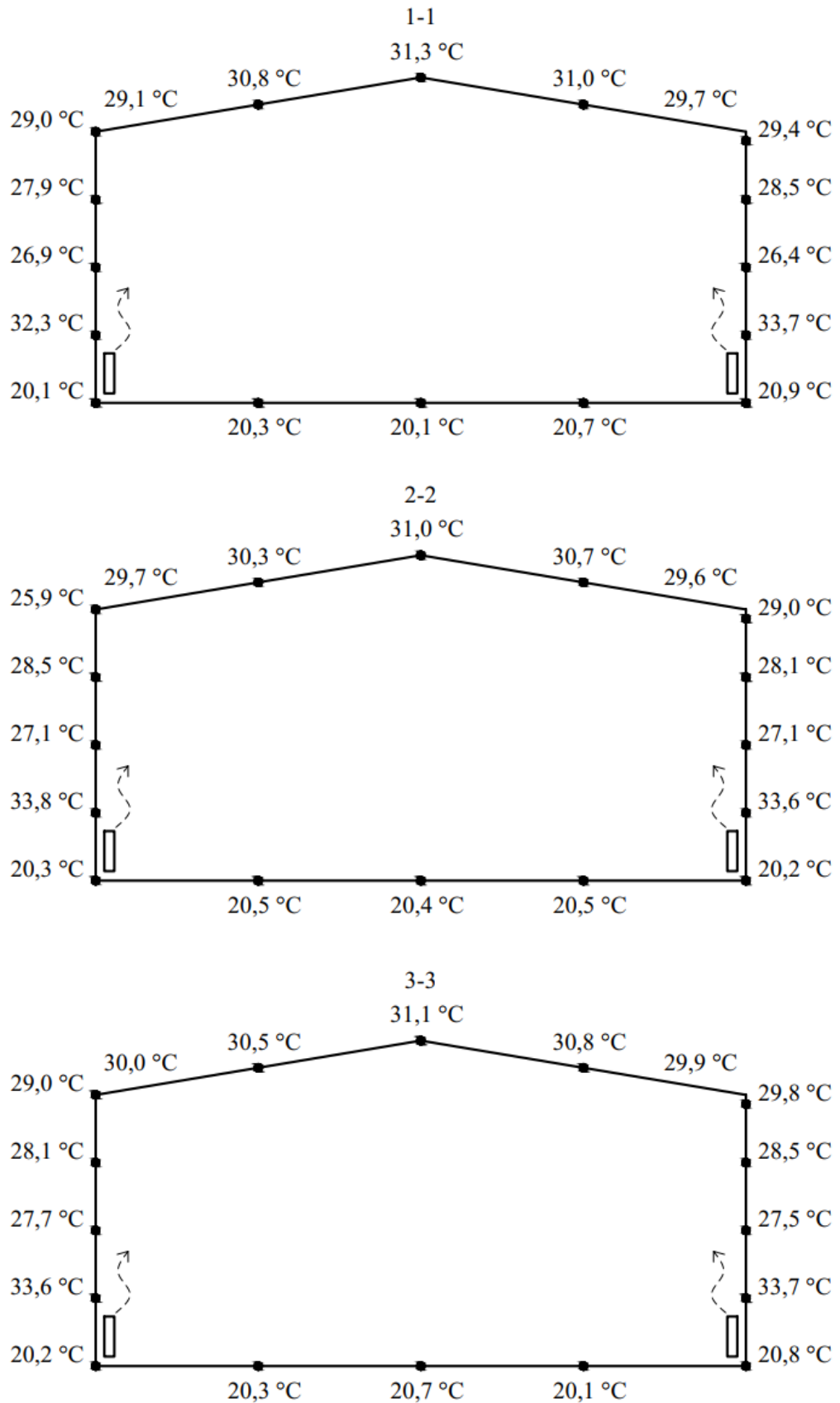


Рисунок 3.19 – Показания датчиков 1-16 в ходе 2 этапа эксперимента

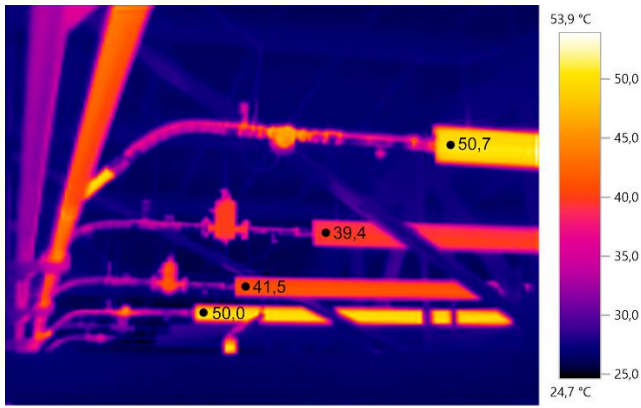


Рисунок 3.20 – Результат термографического обследования

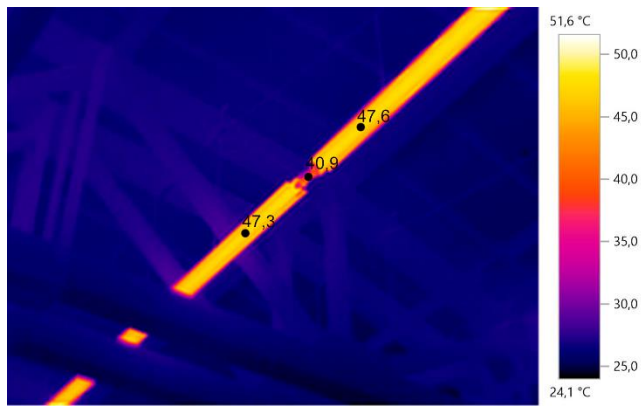


Рисунок 3.21 – Результат термографического обследования

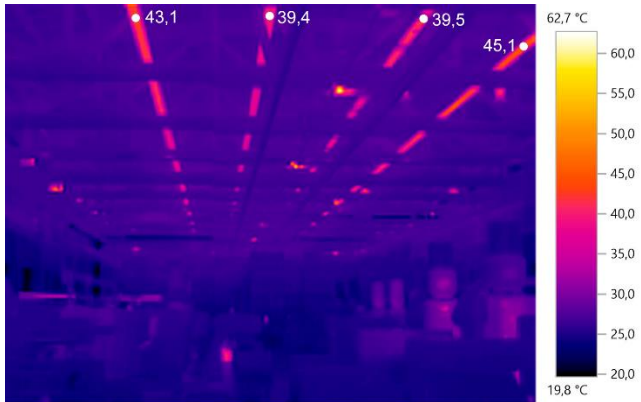


Рисунок 3.22 – Результат термографического обследования

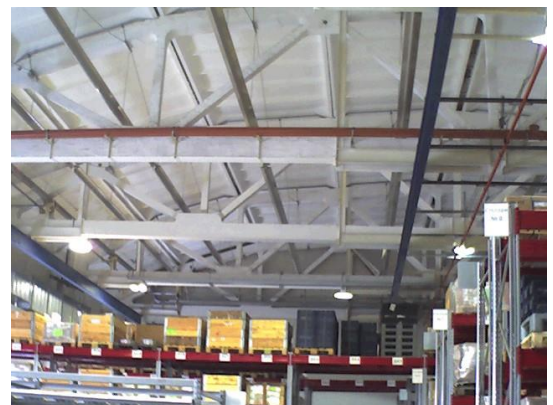
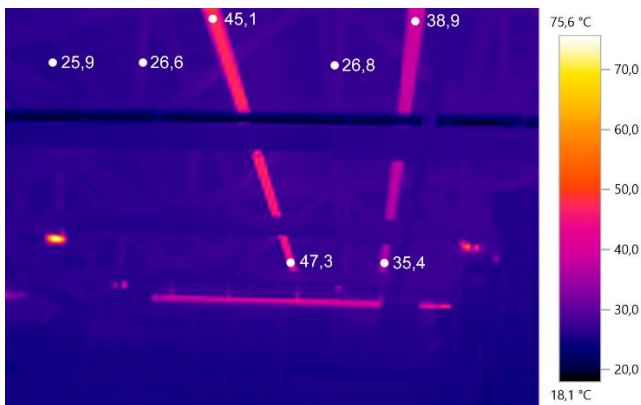


Рисунок 3.23 – Результат термографического обследования

3.4.3. Выводы по эксперименту № 3

По итогам проведения экспериментов автором сделаны следующие выводы:

- показания датчиков, расположенных на стене в ходе 1 (лучистое отопление) и 2 (конвективное отопление) этапов экспериментов отличались незначительно, что свидетельствует о подобном температурном режиме в рабочей зоне помещения;

- показания датчиков, расположенных на полу, в случае с использованием лучистого отопления выше, чем в случае конвективного, что обуславливается большей плотностью облучения поверхности пола в первом случае;

- показания датчиков, расположенных на потолке отапливаемого помещения, в случае использования лучистого отопления значительно ниже, чем при использовании конвективного. Как следствие, мы можем говорить о меньшем градиенте температур при использовании лучистого отопления, даже несмотря на то, что в ходе 1 этапа экспериментов (лучистое отопление) датчики дополнительно облучались.

На основании полученных данных, автором сделан вывод о сходимости данных лабораторного и натурного экспериментов, а также о том, что применение систем лучистого отопления действительно позволяет добиться более равномерного теплового режима в крупнообъемном помещении.

3.5. Исследование температурного режима в помещениях, оборудованных системами лучистого отопления на базе водяных инфракрасных излучателей (эксперимент № 4)

3.5.1. Лабораторные исследования

Цель эксперимента – анализ особенностей формирования температурного режима производственных помещений, оборудованных системами лучистого отопления на базе водяных инфракрасных излучателей.

Объектом исследования температурного режима стало помещение Лаборатории лучистого отопления УНИЦ «СОНИИ» ННГАСУ. В помещении высотой 3,0 м, помимо установки с инфракрасными излучателями и двух радиаторов, подключённых к резервному источнику теплоснабжения, в ходе каждого измерения по высоте помещения были размещены 10 датчиков ТС-1388/12 подключенных к многоканальному термометру ТМ 5104Д/В/t1050/ГП производства ООО НПП «Элемер», план помещения и схема размещения датчиков температуры в сечениях 1-1 и 2-2

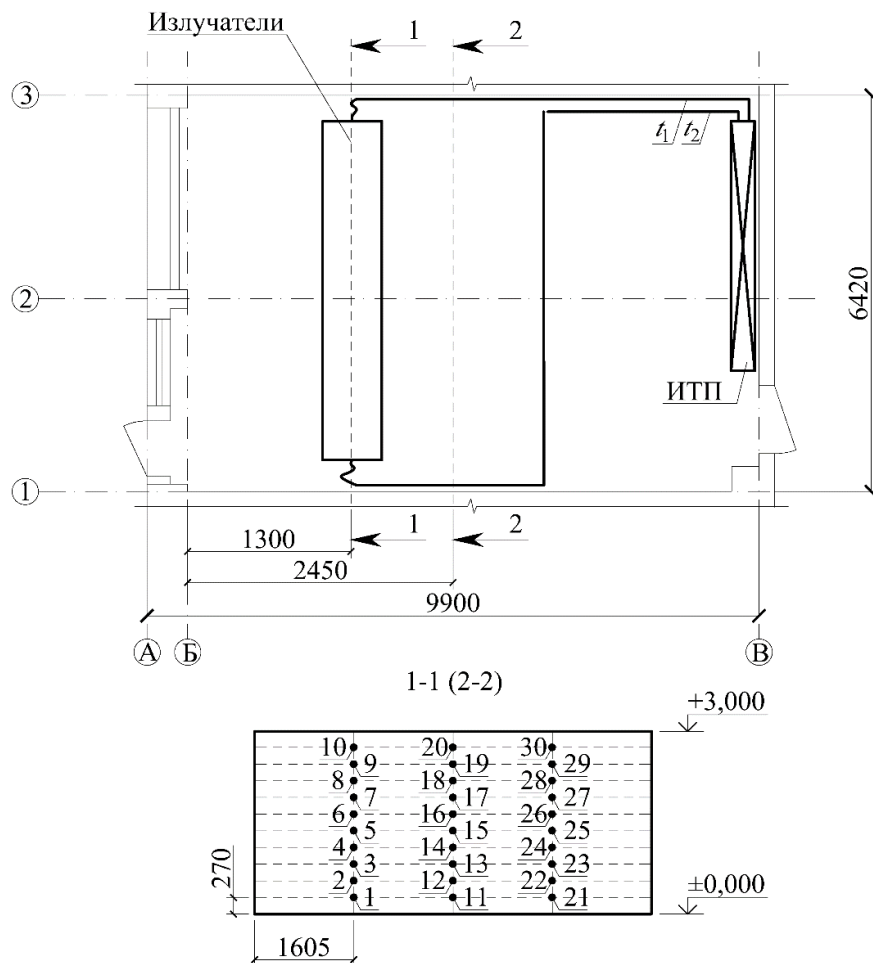


Рисунок 3.24 – План помещения Лаборатории лучистого отопления и схема размещения датчиков температуры в сечениях 1-1 и 2-2

Эксперименты проводились в два этапа: на 1 этапе (лучистое отопление) для отопления помещения использовалась подвесная установка с водяными инфракрасными излучателями марки Flower 125; на 2 этапе (конвективное отопление) помещение отапливалось двумя радиаторами марки Calidor, по 12 секций каждый. Результаты экспериментов приведены в таблице 3.7 и на рисунках 3.25 и 3.26.

Таблица 3.7 – Распределение температуры воздуха в помещении по высоте в сечениях 1-1 и 2-2

h, мм	№№ точек						t _в , °C	$\Delta(\overline{t_N^I} - \overline{t_N^K})$
	Лучистое отопление			Конвективное отопление				
	N1-10	N11-20	N21-30	N1-10	N11-20	N21-30		
	t _N , °C							
Сечение 1-1								
270	22,31	22,22	21,98	22,92	22,87	22,9	24,07	-0,73
540	22,62	22,67	22,51	23,05	23,21	23,11		-0,52
810	22,95	23,06	22,97	23,11	23,25	23,31		-0,23
1080	23,33	23,52	23,44	23,32	23,33	23,45		0,06
1350	23,67	23,78	23,7	23,79	23,89	23,79		-0,11
1620	24,02	24,22	24,1	24,65	24,87	24,75		-0,64
1890	24,32	24,32	24,45	25,32	25,51	25,61		-1,12
2160	24,56	24,51	24,61	26,55	26,59	26,39		-1,95
2430	24,62	24,55	24,7	27,95	28,02	27,91		-3,34
2700	24,72	24,78	24,81	29,36	29,51	29,61		-4,72
Сечение 2-2								
270	23,62	23,55	23,59	22,61	22,21	22,41	24,33	1,18
540	23,77	23,81	23,7	22,89	22,74	22,8		0,95
810	23,95	24	24,02	23,11	23,01	23,25		0,87
1080	24,01	24,21	24,11	23,56	23,6	23,76		0,47
1350	24,05	24,25	24,19	23,8	24	24,12		0,19
1620	24,38	24,61	24,51	24,59	24,95	24,98		-0,34
1890	24,67	24,71	24,82	25,21	25,32	25,42		-0,58
2160	25,00	25,02	25,11	26,95	27,12	26,99		-1,98
2430	25,47	25,69	25,58	27,88	28,22	28,12		-2,49
2700	26,11	26,01	26,05	29,54	29,78	29,95		-3,70

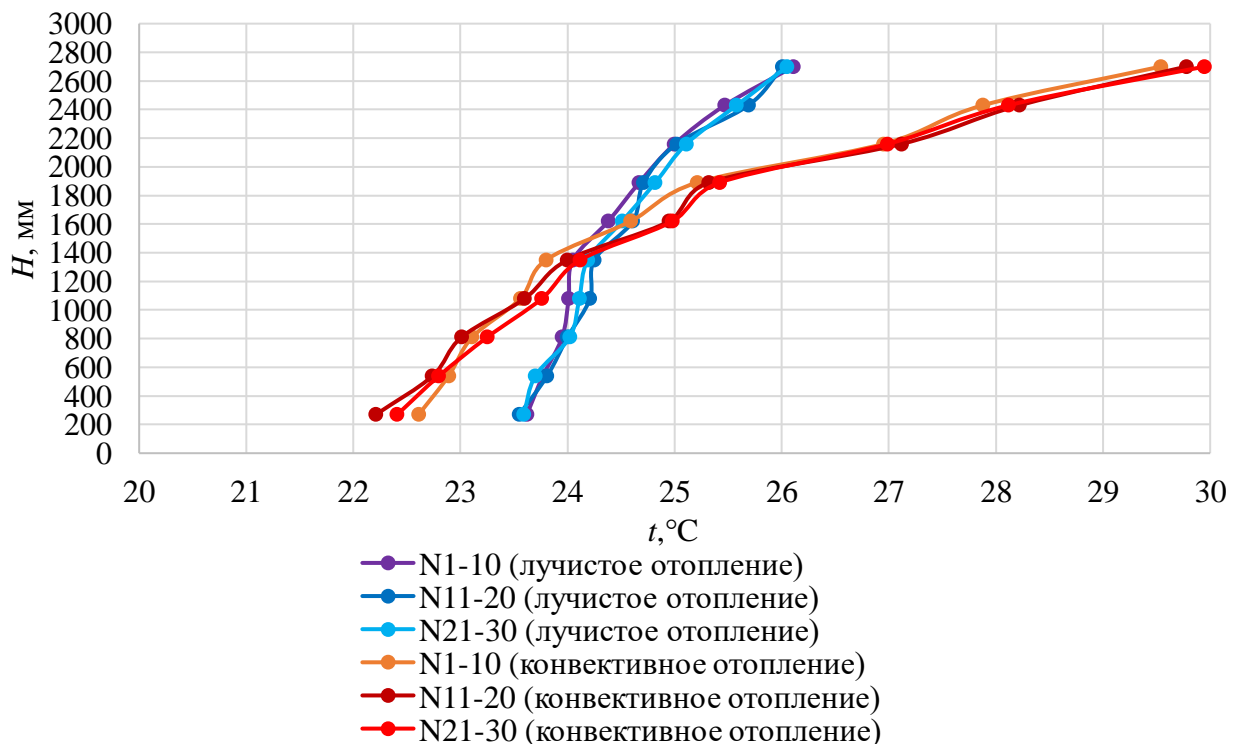


Рисунок 3.25 – Распределение температуры воздуха в помещении по высоте в сечении 1-1

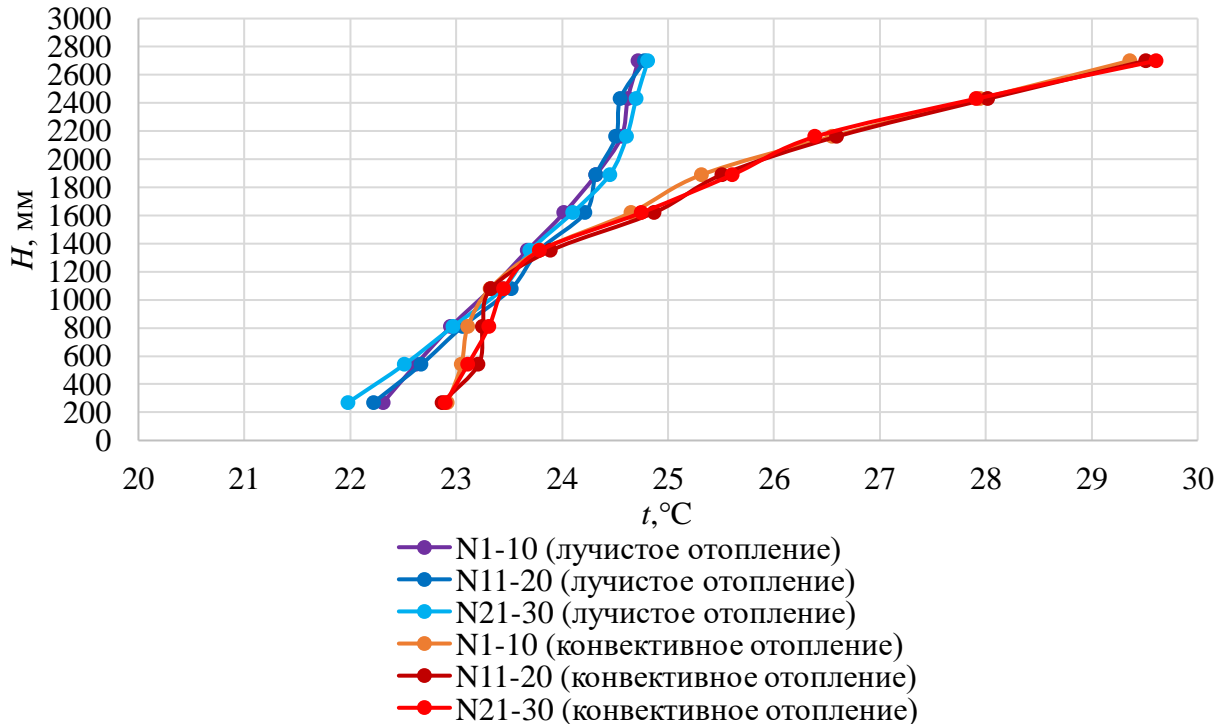


Рисунок 3.26 – Распределение температуры воздуха в помещении по высоте в сечении 2-2

3.5.2. Натурные исследования

Объектом натурных исследований температурного режима помещения, оборудованного системой лучистого отопления стало производственное помещение – цех металлообработки компании ООО «Флайг+Хоммель», расположенный в г. Заволжье, Нижегородской области (рисунки 3.14, 3.15). В помещении высотой 10,0 м, помимо системы отопления на базе водяных инфракрасных излучателей и радиаторной системы отопления, в ходе каждого измерения по высоте помещения были размещены 10 датчиков ТС-1388/12 подключенных к многоканальному термометру ТМ 5104Д/В/t1050/ГП производства ООО НПП «Элемер», схема размещения датчиков приведены на рисунке 3.27.

Эксперименты проводились в два этапа: на 1 этапе (лучистое отопление) для отопления помещения использовалась система отопления на базе водяных инфракрасных излучателей марки Helios 750; на 2 этапе (конвективное отопление) помещение отапливалось системой конвективного отопления на базе чугунных радиаторов марки МС-140-500. Результаты экспериментов приведены в таблице 3.8 и на рисунке 3.28.

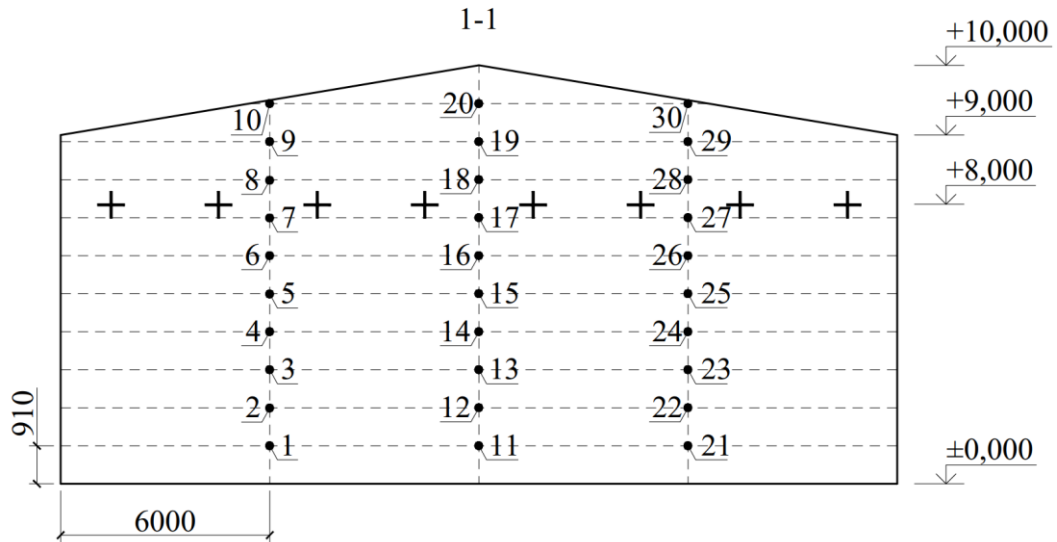


Рисунок 3.27 – Схема размещения датчиков температуры в сечении 1-1

Таблица 3.8 – Распределение температуры воздуха в помещении по высоте в сечении 1-1

$h, \text{ мм}$	№№ точек						$t_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta(\overline{t_{\text{N}}^{\text{л}}} - \overline{t_{\text{N}}^{\text{к}}})$
	Лучистое отопление			Конвективное отопление				
	N1-10	N11-20	N21-30	N1-10	N11-20	N21-30		
	$t_{\text{N}}, ^\circ\text{C}$							
Сечение 1-1								
910	23,25	23,55	23,12	21,16	21,02	21,21	25,71	2,18
1820	23,55	23,71	23,32	22,12	21,95	22,26		1,42
2730	23,87	24,01	23,8	23,11	23,08	23,33		0,72
3640	24,32	24,55	24,35	24,25	24,01	24,41		0,18
4550	25,02	25,41	25,25	25,45	25,17	25,89		-0,28
5460	25,55	25,78	25,69	26,98	26,81	27,11		-1,29
6370	26,05	26,14	26,11	28,23	28,14	28,52		-2,20
7280	26,58	26,81	26,77	29,56	29,32	29,74		-2,82
8190	27,23	27,77	27,23	31,11	30,96	31,55		-3,80
9100	28,33	28,95	28,39	32,85	32,85	32,86		-4,30

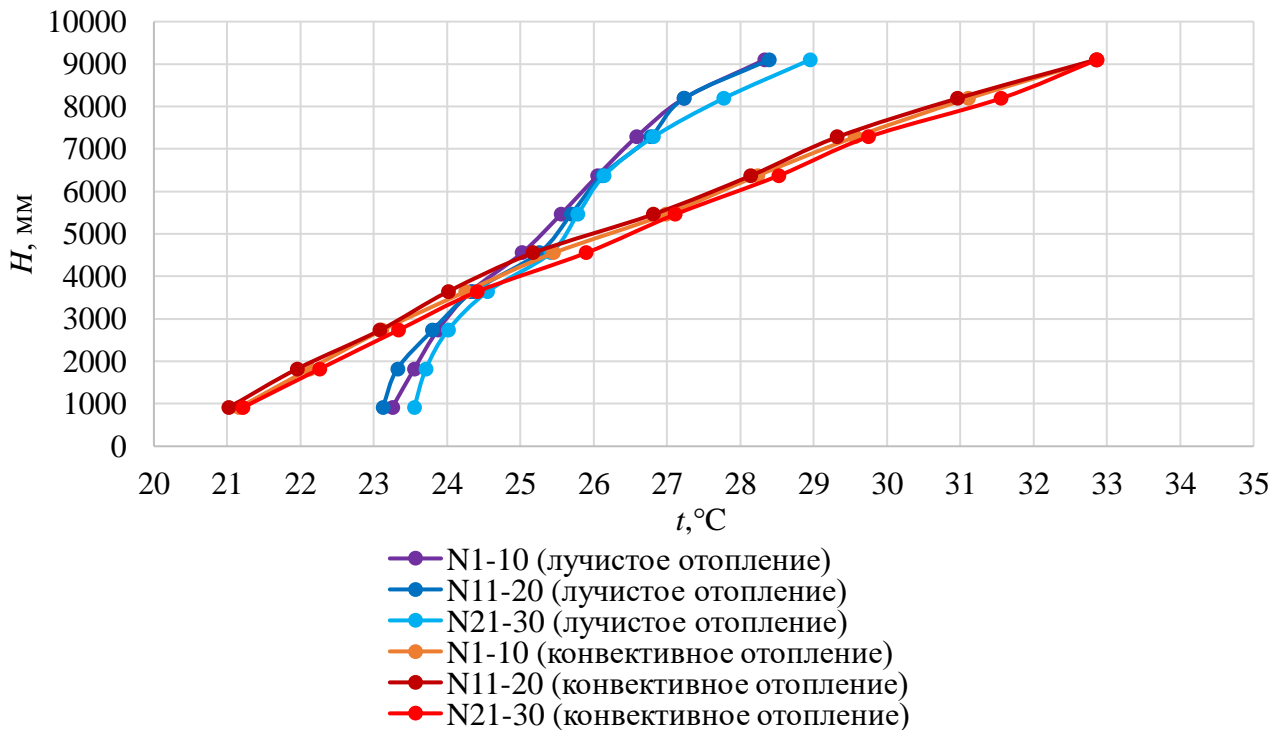


Рисунок 3.28 – Распределение температуры воздуха в помещении по высоте в сечении 1-1

3.5.3. Выводы по эксперименту № 4

По итогам проведения экспериментов, автором сделан вывод о подобном тепловом режиме, формирующимся и в помещении лаборатории, и в помещении цеха металлообработки. На основе полученных данных, сделан вывод 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.

3.6. Исследование теплового режима наружных ограждающих конструкций в помещениях с системами отопления на базе водяных инфракрасных излучателей (эксперимент № 5)

3.6.1. Лабораторные исследования

Цель эксперимента – исследование основных закономерностей формирования теплового режима наружных ограждающих конструкций в помещениях, оборудованных системами лучистого отопления на базе водяных инфракрасных излучателей.

Объектом исследования теплового режима была выбрана стена Лаборатории лучистого отопления ННГАСУ, она является частью лабораторной установки и оборудована системой, позволяющей варьировать толщину утеплителя от 0 до 150 мм. Во время эксперимента были установлены изоляционные панели марки «Пеноплэкс Основа» с коэффициентом теплопроводности $\lambda_B = 0,032 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$. В качестве измерительного оборудования использовался измеритель теплового потока марки «Теплограф» (рисунок 3.29), который включает в себя модуль-02. Измерения проводились в соответствии с методикой [53]. Схема эксперимента показана на рисунке 3.30.

В ходе 1 и 2 этапов эксперимента (лучистое и конвективное отопление, соответственно) были выбраны двое суток, похожие по климатической обстановке – 10 января 2021 года $t_{н1}^{\text{сред}} = -13,17 \text{ }^\circ\text{С}$ и 12 января 2021 года $t_{н2}^{\text{сред}} = -14,48 \text{ }^\circ\text{С}$. Температура в подающем трубопроводе систем отопления составляла $t_{г1} = 59,97 \text{ }^\circ\text{С}$ и $t_{г2} = 60,73 \text{ }^\circ\text{С}$, мощность лучистой и конвективной систем отопления $Q_1 = 1565 \text{ Вт}$ и $Q_2 = 1624 \text{ Вт}$ соответственно. Толщина утеплителя $\delta_{ут} = 0,05 \text{ м}$. Результаты исследований представлены на рисунке 3.31.

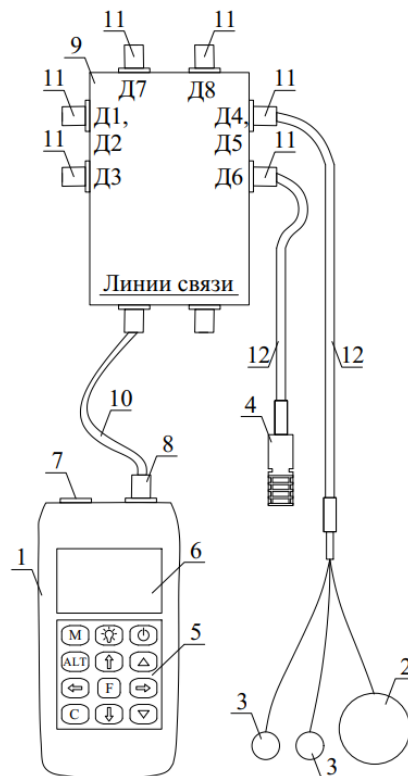


Рисунок 3.29 – Состав измерителя плотности теплового потока: 1 – регистратор; 2 – преобразователь плотности теплового потока; 3 – датчики температуры; 4 – датчик температуры и влажности; 5 – клавиатура; 6 – дисплей; 7 – вход для ПК; 8 – вход для измерительного модуля; 9 – измерительный модуль-02; 10 – соединительный кабель модуля; 11 – адаптеры; 12 – соединительные кабели датчиков; 13 – разъемы

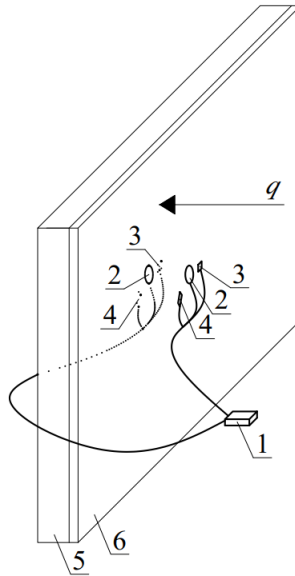


Рисунок 3.30 – Испытательная установка в составе: 1 – прибор «Теплограф»; 2 – датчики плотности теплового потока; 3 – датчики температуры поверхности; 4 – датчики температуры воздуха; 5 – стена из силикатного кирпича; 6 – утеплитель «Пеноплэкс Основа»

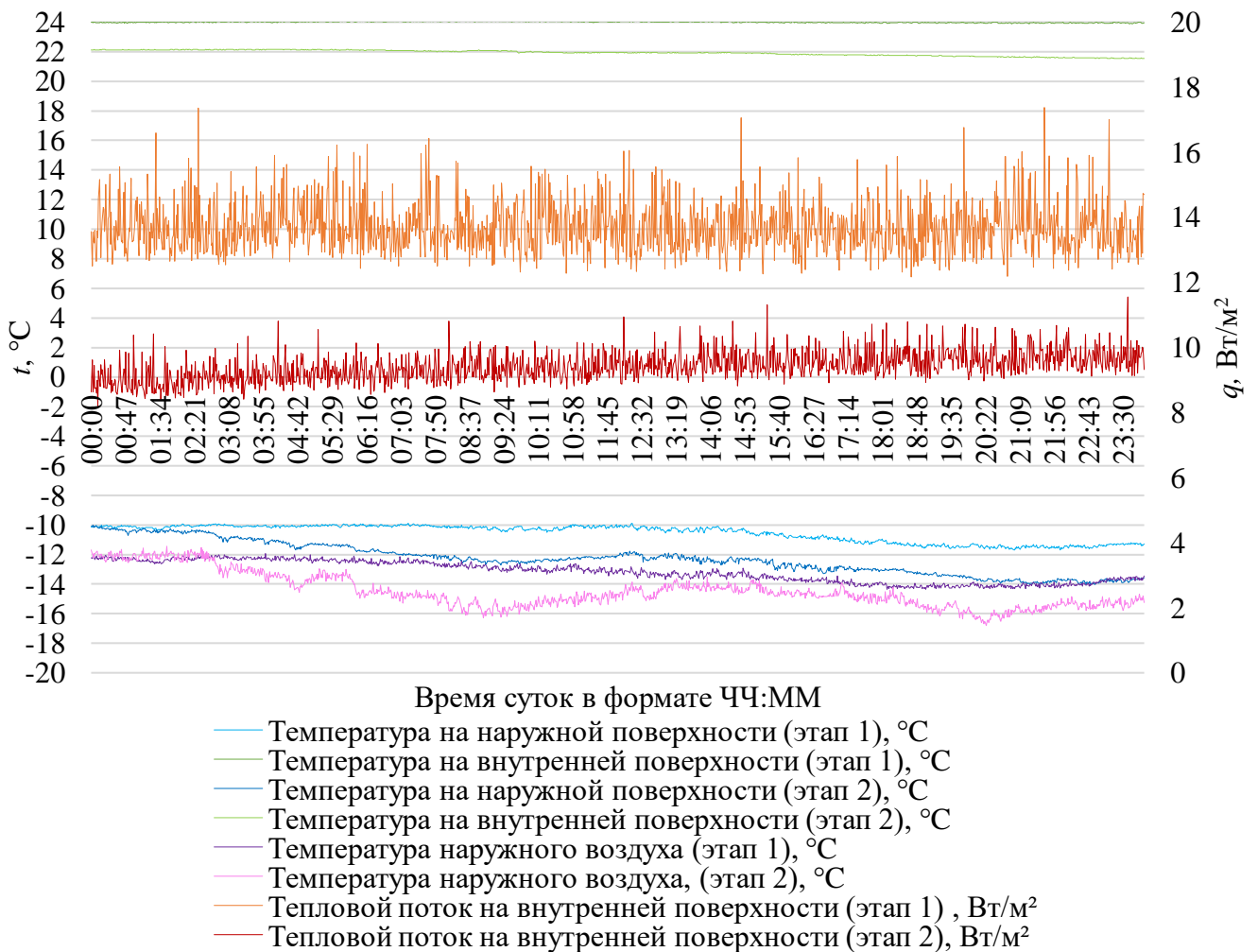


Рисунок 3.31 – Показания датчиков в ходе 1 и 2 этапов эксперимента ($\delta_{\text{ут}} = 0,05 \text{ м}$)

Для уточнения результатов было проведено два дополнительных эксперимента с толщиной утеплителя $\delta_{ут} = 0,1$ м. Также, в ходе 1 и 2 этапов эксперимента (лучистое и конвективное отопление, соответственно), были выбраны двое суток, похожие по климатической обстановке – 14 января 2021 года $t_{н1}^{сред} = -12,54$ °С и 16 января 2021 года $t_{н2}^{сред} = -13,43$ °С. Температура в подающем трубопроводе систем отопления составлял $t_{г1} = 59,91$ °С и $t_{г2} = 59,85$ °С, мощность лучистой и конвективной систем отопления $Q_{1эт} = 1559$ Вт и $Q_{2эт} = 1577$ Вт соответственно. Результаты исследований представлены на рисунке 3.32.

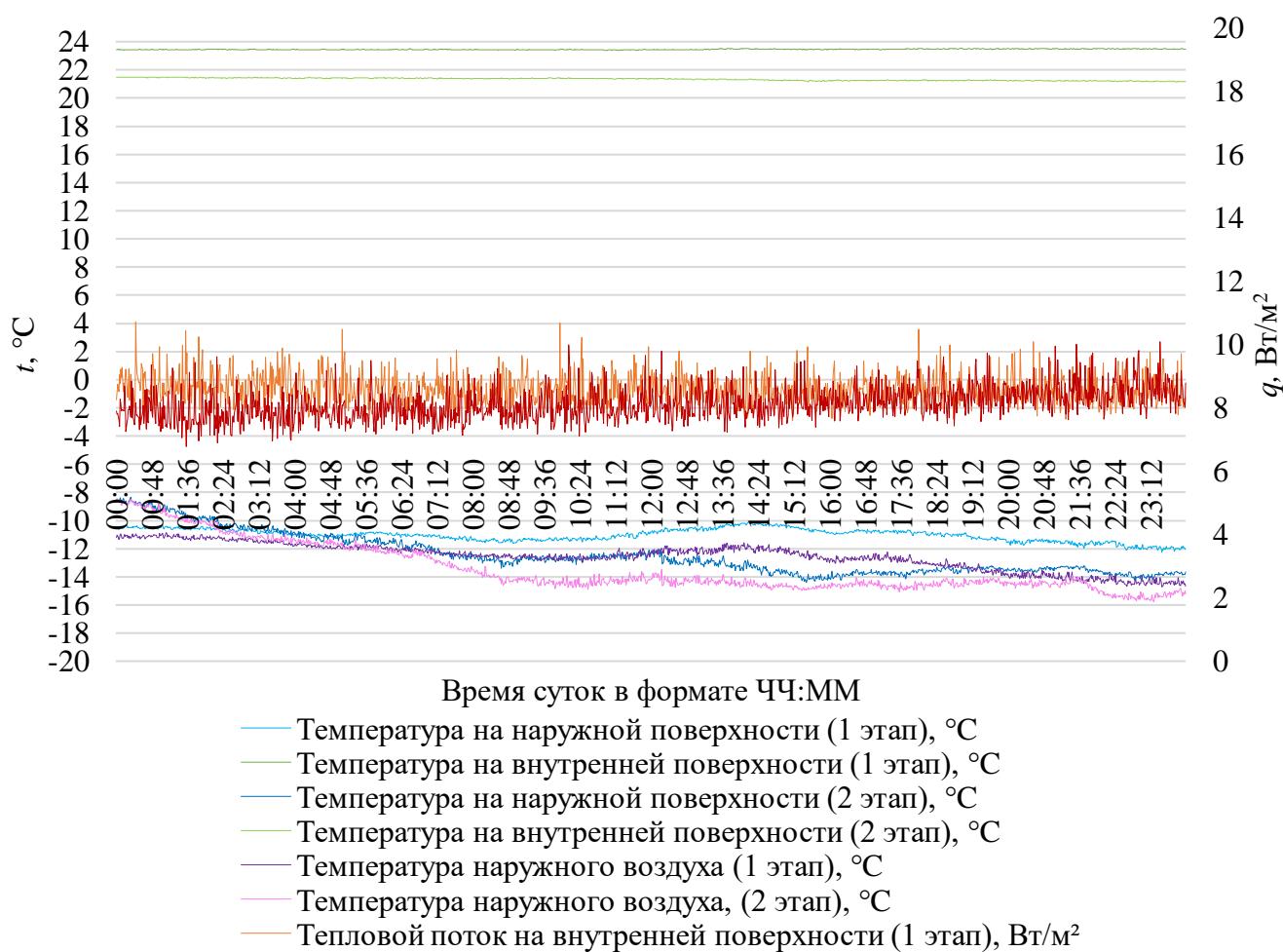


Рисунок 3.32 – Показания датчиков в ходе 1 и 2 этапов эксперимента ($\delta_{ут} = 0,1$ м)

3.6.2. Натурные исследования

Объектом натурных исследований теплового режима наружной ограждающей конструкции помещения, отапливаемого системой лучистого отопления стало

производственное помещение – цех металлообработки компании ООО «Флайг+Хоммель», расположенный в г. Заволжье, Нижегородской области.

В качестве наружных ограждающих конструкций в данном помещении используются сэндвич-панели с применением утеплителя «Rockwool Венти Баттс» с коэффициентом теплопроводности $\lambda_B = 0,039$ Вт/(м·°С). Порядок проведения исследований соответствовал порядку, применённому при лабораторных исследованиях, указанном в разделе 3.6.1. Для измерений также использовался измеритель теплового потока марки «Теплограф» (рисунок 3.29), включающий в себя модуль-02, и комплект датчиков, которые также позволяют измерять температуру поверхностей и окружающей среды.

В ходе 1 и 2 этапов эксперимента (лучистое и конвективное отопление, соответственно) были выбраны двое суток, похожие по климатической обстановке – 22 января 2021 года $t_{н1}^{сред} = -5,87$ °С и 29 января 2021 года $t_{н2}^{сред} = -5,81$ °С. Результаты исследований представлены на рисунке 3.33.



Рисунок 3.33 – Показания датчиков в ходе 1 и 2 этапов эксперимента

3.6.3. Выводы по эксперименту № 5

По итогам анализа полученных, в ходе лабораторного и натурального экспериментов графиков можно сделать вывод о сходимости данных, полученных в лабораторных и натуральных условиях. На основе анализа полученных графиков можно сделать следующие выводы:

- при использовании лучистого отопления, температура на внутренней (облучаемой) поверхности наружной стены выше, чем в случае использования конвективного отопления;

- разница температур на наружной и внутренней поверхностях наружной стены и тепловой поток в ходе 1 этапа эксперимента (лучистое отопление) были выше, чем в ходе 2 этапа (конвективное отопление);

- разница между температурой внутреннего воздуха и температурой наружной поверхности и в ходе 1 этапа эксперимента (лучистое отопление) была выше, чем в ходе 2 этапа (конвективное отопление), что говорит о более высокой относительной температуре наружной поверхности облучаемого ограждения;

- в случае использования утеплителя толщиной $\delta_{ут} = 0,1$ м различия нивелируются, тепловой поток через наружную стену на 1 и 2 этапе (лучистое и конвективное отопление, соответственно) практически не различается. При этом температура на внутренней поверхности ограждения, в случае применения лучистого отопления, остаётся более высокой, что благоприятно сказывается на уровне комфорта в помещении.

3.7. Математическая обработка результатов экспериментальных исследований

Основной задачей математической обработки результатов исследований является построение регрессионных зависимостей, позволяющих определение теплотехнических параметров не только при исследованных значениях температурного напора, но и при любых других возможных значениях.

Для определения удельной теплоотдачи водяного инфракрасного излучателя марки Helios 750 при различном температурном напоре ΔT , необходимо определить показатели a и m для степенного уравнения:

$$q_{\text{изл}} = a \cdot \Delta T^m. \quad (3.12)$$

Основным условием построения зависимости на основе полученных данных является определение показателей a и m . Автором были использованы две методики: математическое моделирование линии тренда в программном комплексе MathCAD и построение линейной регрессии в логарифмическом масштабе (рисунок 3.34).

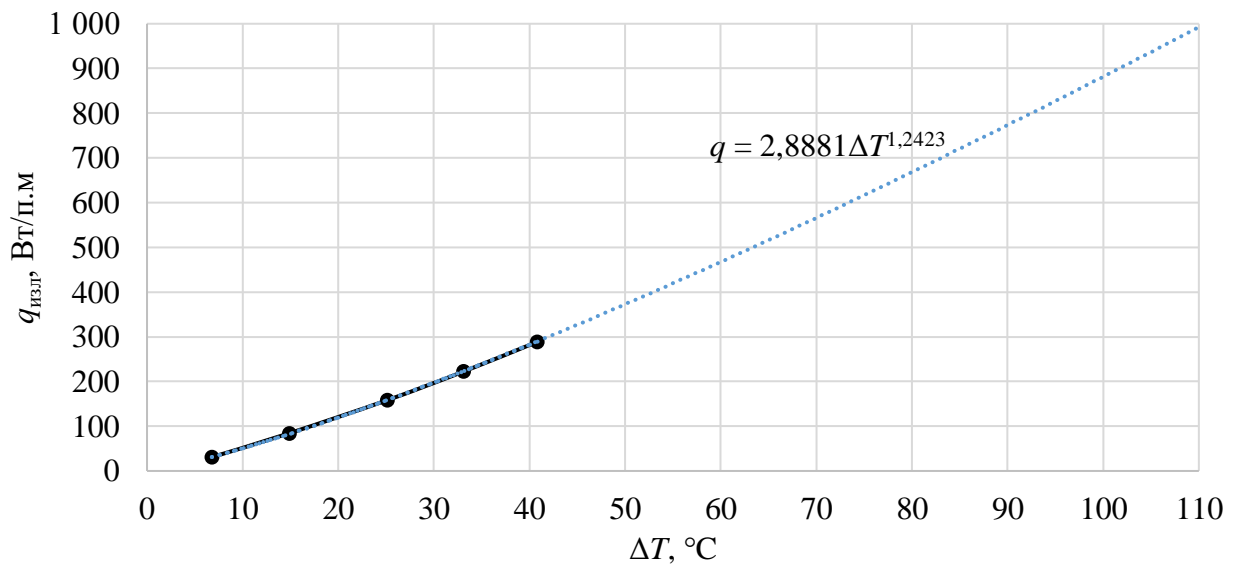


Рисунок 3.34 – Результаты моделирования степенной линии тренда в программном комплексе MathCAD для результатов испытания излучателя марки Helios 750

Для проверки полученных значений строим линейную регрессию в логарифмическом масштабе (таблица 3.8).

Таблица 3.8 – Линейная регрессия для Helios 750

$\Delta T, ^\circ\text{C}$	$q_{\text{emi}}, \text{Вт/п.м}$	$x = \ln \Delta T$	$y = \ln q_{\text{emi}}$	x^2	y^2	$x \cdot y$	$y = k \cdot x + b$	$k = (x \cdot y_{\text{ср}} - x_{\text{ср}} \cdot y_{\text{ср}}) / (x^2_{\text{ср}} - x_{\text{ср}}^2)$
6,775	30,80	1,9132	3,4275	3,6605	11,7479	6,5577	3,4375	$b = y_{\text{ср}} - k \cdot x_{\text{ср}}$
14,880	84,30	2,7000	4,4344	7,2901	19,6638	11,9729	4,4149	$m = k = 1,2423$
25,125	158,24	3,2239	5,0641	10,3933	25,6454	16,3261	5,0657	$b = 1,0606$
33,085	222,10	3,4991	5,4031	12,2436	29,1940	18,9060	5,4076	$a = 2,8881$
40,775	288,27	3,7081	5,6639	13,7498	32,0796	21,0021	5,6673	
		3,0089	4,7986	9,4674	23,6661	14,9530		
		$x_{\text{ср}}$	$y_{\text{ср}}$	$x^2_{\text{ср}}$	$y^2_{\text{ср}}$	$x y_{\text{ср}}$		

Данные, полученные с применением обоих методов, не имеют расхождения. В результате построения линейной регрессии уравнение (3.2) для нашего случая будет выглядеть следующим образом:

$$q_{\text{изл}}^{H750} = 2,8881 \cdot \Delta T^{1,2423}. \quad (3.13)$$

По итогу проведённых преобразований удельная мощность ВИИ Helios 750 представлена в таблице 3.9 и на рисунке 3.35.

Таблица 3.9 – Удельная мощность Helios 750 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
$q_{\text{изл}}, \text{Вт/л.м}$	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

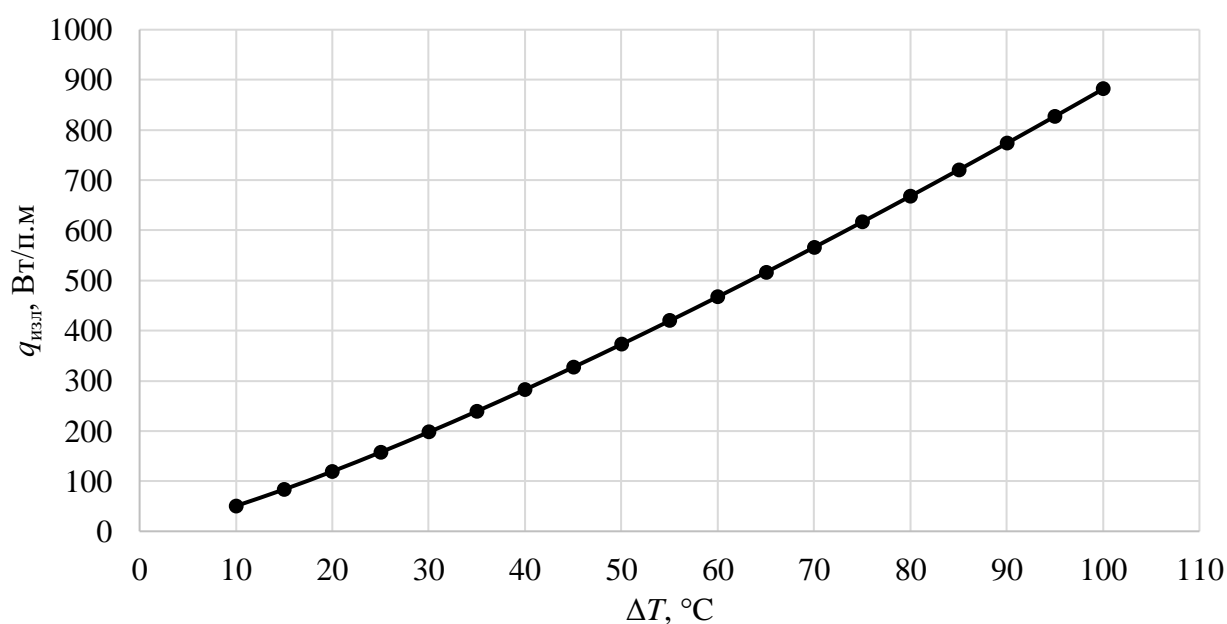


Рисунок 3.35 – Результаты исследований удельной тепловой мощности Helios 750

Для определения удельной теплоотдачи водяного инфракрасного излучателя марки Flower 125 при различном температурном перепаде ΔT , также необходимо определить показатели a и t для уравнения (3.12).

Для определения показателей a и m строим степенную линию тренда в программном комплексе MathCAD (рисунок 3.36).

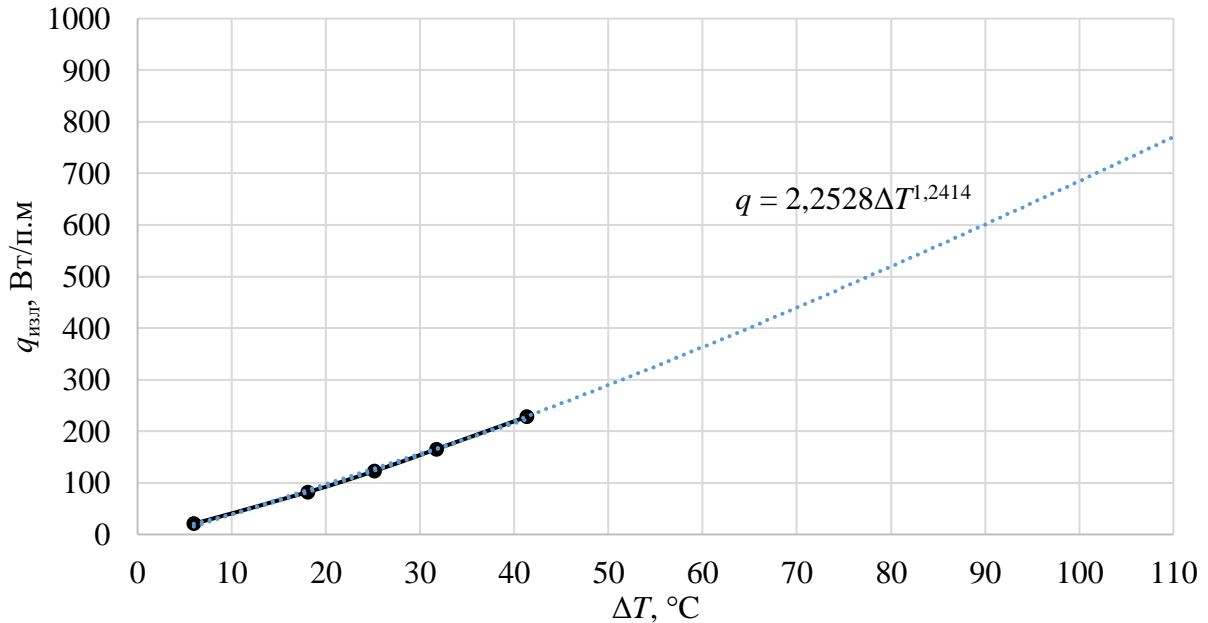


Рисунок 3.36 – Результаты моделирования степенной линии тренда в программном комплексе MathCAD для результатов испытания излучателя марки Flower 125

Для проверки полученных значений строим линейную регрессию в логарифмическом масштабе (таблица 3.10).

Таблица 3.10 – Линейная регрессия для Flower 125

$\Delta T, ^\circ\text{C}$	$q_{\text{emi}}, \text{Вт/п.м}$	$x = \ln \Delta T$	$y = \ln q_{\text{emi}}$	x^2	y^2	$x \cdot y$	$y = k \cdot x + b$	$k = (x \cdot y_{\text{ср}} - x_{\text{ср}} \cdot y_{\text{ср}}) / (x^2_{\text{ср}} - x_{\text{ср}}^2)$
5,955	20,62	1,7842	3,0264	3,1835	9,1590	5,3998	3,0272	$b = y_{\text{ср}} - k \cdot x_{\text{ср}}$
18,025	81,89	2,8918	4,4054	8,3623	19,4077	12,7394	4,4021	$m = k = 1,2414$
25,12	122,68	3,2237	4,8096	10,3920	23,1323	15,5045	4,8142	$b = 0,8121$
31,7	165,19	3,4563	5,1071	11,9461	26,0825	17,6518	5,1030	$a = 2,2528$
41,305	228,03	3,7210	5,4295	13,8457	29,4793	20,2030	5,4315	
		3,0154	4,5556	9,5459	21,4522	14,2997		
		$x_{\text{ср}}$	$y_{\text{ср}}$	$x^2_{\text{ср}}$	$y^2_{\text{ср}}$	$x y_{\text{ср}}$		

Данные, полученные с применением обоих методов, не имеют расхождения. В результате построения линейной регрессии уравнение (3.12) для нашего случая будет выглядеть следующим образом:

$$q_{\text{излр}}^{F125} = 2,2528 \cdot \Delta T^{1,2414} \quad (3.14)$$

По итогу проведённых преобразований удельная мощность ВИИ Flower 125 представлена в таблице 3.11 и на рисунке 3.37.

Таблица 3.11 – Удельная мощность Flower 125 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
$q_{\text{излр}}, \text{Вт/П.М}$	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

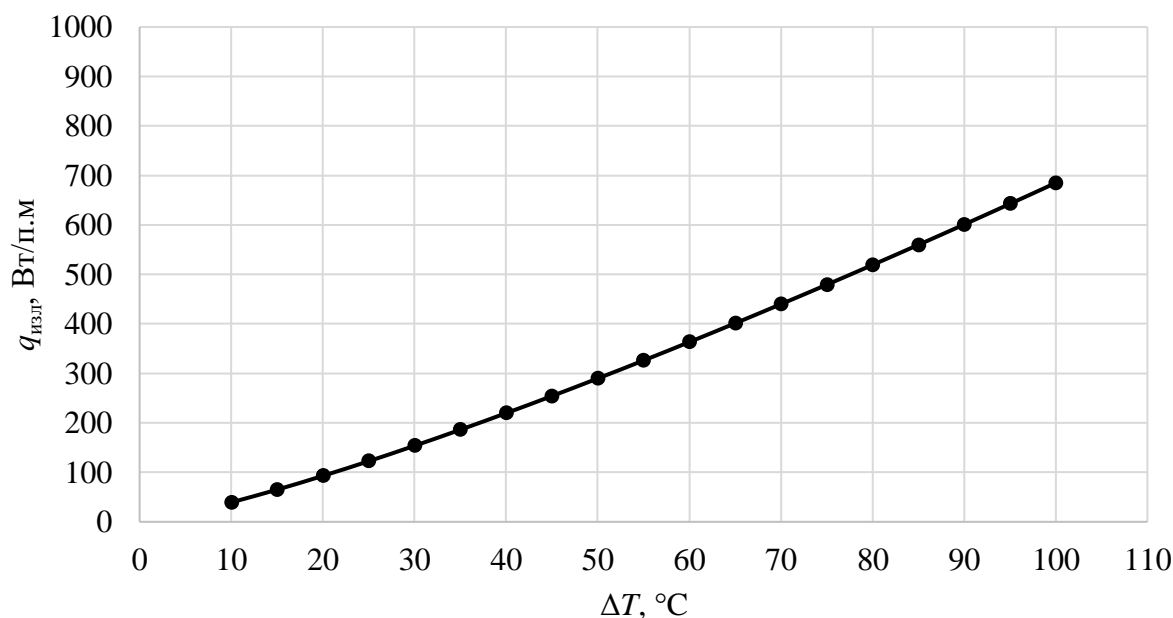


Рисунок 3.37 – Результаты исследований удельной тепловой мощности Flower 125

Для определения зависимостей, характеризующих кривые изменения плотности лучистого теплового потока (эпюра лучистой теплоты), была проведена математическая обработка результатов эксперимента (таблицы 3.3, 3.4). В результате обработки результатов в программном комплексе MathCAD были получены полиномиальные уравнения четвёртой степени для кривых плотности лучистого теплового потока при разных параметрах излучателей (рисунки 3.38...3.41).

Выводы по 3 главе

1. Энергоэффективность использования систем лучистого отопления, построенных на базе водяных инфракрасных излучателей может быть достигнута за счёт:

- меньшей тепловой инерции, что позволяет увеличить время ожидания системы отопления и сократить продолжительность переходного режима;

- снижением температуры воздуха рабочей зоны без снижения уровня комфорта, достигаемым за счёт более высокой температурой излучения, что также снижает потери тепла при передаче;

- меньшего температурного градиента по высоте помещения и отсутствия «тепловой подушки», что снижает потери тепла через покрытие помещения.

2. Система водяного лучистого отопления позволяет снизить градиент температуры воздуха по высоте не только в крупнообъёмных помещениях, таких как: цеха, депо, спортзалы, но и в помещениях с малой высотой расположения покрытия. Данная особенность позволяет снизить тепловые потери через покрытие.

3. Система лучистого отопления, построенная на базе водяных инфракрасных излучателей за счёт высокой плотности лучистого теплового потока в помещении, нагревающего окружающие поверхности, повышает общую радиационную температуру помещения, что позволяет снизить вероятность образования конденсата на ограждениях, однако может несколько увеличить трансмиссионные потери теплоты.

4. Температурный режим в рабочей зоне помещения с применением водяного лучистого отопления, по сравнению с конвективным, остаётся неизменным, но, в соответствии с рядом исследований и требованиями нормативных документов, можно снизить температуру внутреннего воздуха помещения, что не скажется на тепловом ощущении человека, находящегося в нём, за счёт более высокой радиационной температуры, и позволит несколько снизить трансмиссионные тепловые потери.

ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ И ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛУЧИСТЫХ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ НА БАЗЕ ВОДЯНЫХ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

Для повышения качества проектирования системы отопления помещения и улучшения точности расчётов автором была разработана методика проектирования систем лучистого отопления производственных помещений.

В качестве апробации результаты численных и эмпирических исследований были применены автором при разработке проекта системы отопления вновь возводимого склада сухого хранения с административно-бытовой частью ООО «Флайг+Хоммель», расположенного в г. Заволжье Нижегородской обл. (далее – г. Заволжье). Автором проводилась оценка экономической эффективности применения систем лучистого отопления в производственных помещениях на примере построенного здания.

4.1. Методика проектирования системы лучистого отопления на базе водяных инфракрасных излучателей

1) Общие требования. Системы отопления должны быть рассчитаны на поддержание в обслуживаемых помещениях при расчетной температуре наружного воздуха t_n , °С температуры внутреннего воздуха t_v , °С в допустимых пределах в соответствии с требованиями [84...87].

Комфортность тепловой обстановки в помещении при отоплении профилями оценивается по следующим факторам:

- комфортное сочетание температуры воздуха t_v , °С и радиационной температуры помещения t_R , °С;
- максимально допустимая температура поверхности панели τ_n , °С;

- локальная асимметрия результирующей температуры нагретых и охлажденных поверхностей помещения, окружающих человека $\Delta t_{\text{п}}$, °С.

2) Определение требуемой мощности системы отопления. Для расчёта тепловой мощности Q_o , Вт, необходимо учитывать следующие переменные:

- а) тепловые потери через наружные ограждающие конструкции $Q_{\text{но}}$, Вт;
- б) расход теплоты на нагревание наружного инфильтрующегося воздуха $Q_{\text{инф}}$, Вт [50].

$$Q_o = Q_{\text{но}} + Q_{\text{инф}}, \text{ Вт.} \quad (4.1)$$

Трансмиссионные теплопотери помещения, которые учитываются при расчёте требуемой мощности системы отопления, можно условно разделить на основные и добавочные, они определяются путём расчёта тепловых потерь через отдельные ограждающие конструкции и затем суммируются по следующей зависимости [50]:

$$Q_{\text{огр}} = \frac{A}{R_o} (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}^{\text{Б}}) (1 + \sum \beta) n = K \cdot A (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}^{\text{Б}}) (1 + \sum \beta) n, \text{ Вт,} \quad (4.2)$$

где: A – расчетная площадь ограждающей конструкции, м²;

R_o – сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, (м²·°С)/Вт;

$t_{\text{н}}^{\text{Б}}$ – расчетная температура наружного воздуха для холодного периода года (по параметрам Б) при расчете потерь теплоты через наружные ограждения или температура воздуха более холодного помещения при расчете потерь теплоты через внутренние ограждающие конструкции;

K – коэффициент теплопередачи ограждающей конструкции, Вт/(м²·°С);

$t_{\text{в}}$ – расчетная температура воздуха помещения, °С, с учетом повышения ее по высоте (для помещений высотой более 4 м);

β – добавочные потери теплоты в долях от основных потерь.

Для определения теплопотерь помещения, необходимо знать величины A , K (либо R_o), $t_{\text{в}}$, $t_{\text{н}}^{\text{Б}}$, n и β . Коэффициент теплопередачи K (либо R_o) ограждений определяется теплотехническим расчетом [85].

Расход теплоты на нагрев инфильтрующегося воздуха $Q_{\text{инф}}$, Вт определяется по формуле [50]:

$$Q_{\text{инф}} = 0,278 \cdot \Sigma G_{\text{инф}} \cdot c_{\text{в}} \cdot (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) \cdot k, \text{ Вт}, \quad (4.3)$$

где: $G_{\text{инф}}$ – расход инфильтрующегося воздуха, кг/ч, через ограждающие конструкции помещения;

$c_{\text{в}}$ – удельная теплоемкость воздуха, кДж/(кг·°С);

k – коэффициент учета влияния встречного теплового потока в конструкциях, равный 0,7 для стыков панелей стен и окон с тройными переплетами, 0,8 – для окон и балконных дверей с отдельными переплетами и 1,0 – для одинарных окон, окон и балконных дверей со спаренными переплетами и открытых проемов.

Расход инфильтрующегося воздуха $G_{\text{инф}}$, кг/ч [50]:

$$G_{\text{инф}} = 0,215 \Sigma A_1 \Delta p^{0,67} / R_{\text{инф}}, \text{ кг/ч}, \quad (4.4)$$

где: A_1 – площадь светопрозрачной конструкции, м²;

Δp – расчетная разность давлений, Па, определяемая по [50]:

$$\Delta p = 0,5 \cdot (H - h) \cdot (\rho_{\text{н}} - \rho_{\text{в}}) \cdot g + 0,25 \cdot \rho_{\text{н}} \cdot v_{\text{б}}^2 \cdot (c_{\text{н}} - c_{\text{з}}) \cdot K_{\text{дин}}, \text{ Па}, \quad (4.5)$$

где: H – высота здания от отметки пола 1-го этажа до оголовка вытяжной шахты или верхней отметки здания, м;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

v – скорость движения наружного воздуха по параметрам Б, м/с;

$c_{\text{н}}$, $c_{\text{з}}$ – аэродинамические коэффициенты, соответственно на наветренной и заветренной поверхностях фасадов здания;

$K_{\text{дин}}$ – поправочный коэффициент, учитывающий изменение скорости ветра в различных типах местности и по высоте;

$R_{\text{инф}}$ – сопротивление воздухопроницанию окон, м²·ч·Па/кг [50]:

$$R_{\text{инф}} = \frac{1}{G_{\text{н}}} \left(\frac{\Delta p_1}{\Delta p_{\text{о}}} \right)^{0,67}, \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па/кг}, \quad (4.6)$$

где Δp_1 – разность давлений воздуха на наружной и внутренней поверхностях ограждающих конструкций, Па [50]:

$$\Delta p_1 = 0,55 \cdot H \cdot (\rho_n - \rho_v) \cdot g + 0,03 \cdot \rho_n \cdot v^2 \cdot g, \text{ Па}, \quad (4.7)$$

где: Δp_0 – разность давлений воздуха на наружной и внутренней поверхностях ограждающих конструкций, $\Delta p_0 = 10$ Па;

G_n – нормируемая воздухопроницаемость ограждения, $\text{кг/м}^2 \cdot \text{ч}$.

3) Размещение профилей. Исходя из условия обеспечения максимальной плотности потока инфракрасного излучения в рабочей зоне помещения – высоту подвеса излучающих профилей следует определять как минимально возможную, исходя из геометрических характеристик помещения и особенностей технологического процесса.

Излучающие профили должны располагаться в плане таким образом, чтобы граница нижнего сектора облучения под углом 90° пересекала верхнюю границу рабочей зоны, а точка пересечения границ нижнего сектора соседних излучателей находилась на верхней границе рабочей зоны. Схема размещения излучающих профилей приведена на рисунке 4.1.

Соответственно, исходя из геометрических закономерностей, максимальное расстояние до ограждающей конструкции L_1 будет равно одному расстоянию от излучателя до верхней границы рабочей зоны H , а между соседними излучателями L_2 будет равно двум расстояниям от излучателя до верхней границы рабочей зоны $2H$.

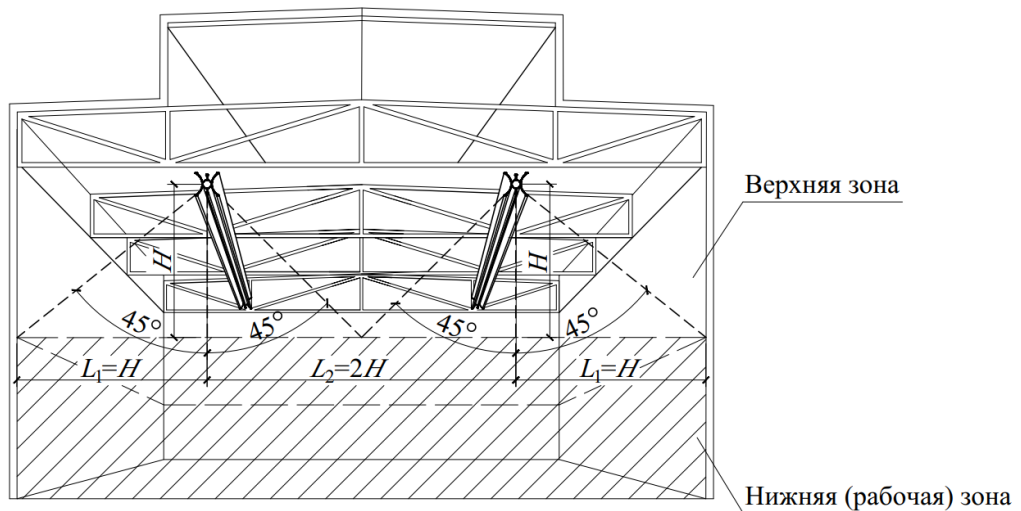


Рисунок 4.1 – Схема размещения излучающих профилей

4) Компенсация тепловых удлинений элементов системы. При проектировании системы отопления на базе ВИИ следует предусматривать компенсацию теплового удлинения излучающих профилей.

Удлинение профилей при нагревании (приращение длины) составляет [5]:

$$\Delta l = 0,0267 \cdot (t_t - 5) \cdot l, \text{ мм}, \quad (4.8)$$

где: t_t – расчетная температура теплоносителя, °С;

l – длина прямого участка профиля, м.

Для компенсации теплового расширения трубопроводов системы отопления и излучающих профилей следует применять: естественную компенсацию за счёт геометрических особенностей системы; П-образные компенсаторы; сильфонные компенсаторы.

5) Тепловой поток с поверхности профилей. Удельный тепловой поток профилей был определён экспериментально в лаборатории УНИЦ «СОНИИ» ННГАСУ.

По данным испытаний, удельный (на 1 м длины) тепловой поток профилей в стандартных условиях определяется, в зависимости от температурного напора [5]:

$$\Delta T = \frac{t_1 + t_2}{2} - t_b, \text{ °С}, \quad (4.9)$$

где: t_1 – температура теплоносителя на подаче, °С;

t_2 – температура теплоносителя на обратке, °С;

t_b – температура внутреннего воздуха в помещении, °С.

Для определения величины удельного теплового потока профиля используем данные, представленные на рисунках 3.35, 3.37 и в таблицах 3.9, 3.11.

Тепловой поток профиля рассчитывается по зависимости [5]:

$$Q_{\text{пр}} = q_{\text{уд.пр}} \cdot l, \text{ Вт}, \quad (4.10)$$

где: l – длина профиля, м;

$q_{\text{уд.пр}}$ – удельная мощность профиля, Вт/п.м.

б) Рекомендации по гидравлическому расчету. Потери давления на трение в каналах круглого сечения профилей [5]:

$$\Delta P_{\text{тр}} = R \cdot l, \text{ Па}, \quad (4.11)$$

где: R – удельные потери давления на трение в канале профиля, Па/м;

l – длина профиля, м.

В таблице 4.1. представлены технические характеристики каналов профилей.

Таблица 4.1 – Технические характеристики каналов профилей для гидравлического расчета

Характеристики	Ед. изм.	Helios 750	Flower 125
Внутренний диаметр	мм	57	25
Количество каналов для теплоносителя	шт.	1	1

Удельные потери давления на трение [5]:

$$R = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2} = \frac{\lambda}{d} \cdot P_d, \text{ Па/м}, \quad (4.12)$$

где: λ – коэффициент сопротивления трения канала профиля;

d – диаметр канала профиля, м;

w – скорость движения воды в канале, м/с;

ρ – плотность воды, кг/м³;

P_d – удельное динамическое давление, Па/м.

Потери давления, которые возникают в циркуляционном кольце, должны быть меньше расчетного давления циркуляции, установленного для этой системы, примерно на 10%.

$$\sum (Rl + Z)_{\text{г.ц.к.}} = 0,9 \Delta p_p. \quad (4.13)$$

Коэффициент сопротивления трения рассчитывается по зависимости Альтшуля [5]:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{K_s}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}, \quad (4.14)$$

где: K_s – абсолютная эквивалентная шероховатость поверхности каналов профилей, мм для алюминиевой технически гладкой трубы – $K_s = 0,015$ мм.;

Re – число Рейнольдса.

Число Рейнольдса определяется по зависимости [5]:

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d}{\nu}, \quad (4.15)$$

где ν – кинематическая вязкость воды, $\text{м}^2/\text{с}$.

При проведении гидравлических расчетов следует пользоваться графиками (рисунок 4.2, 4.3).

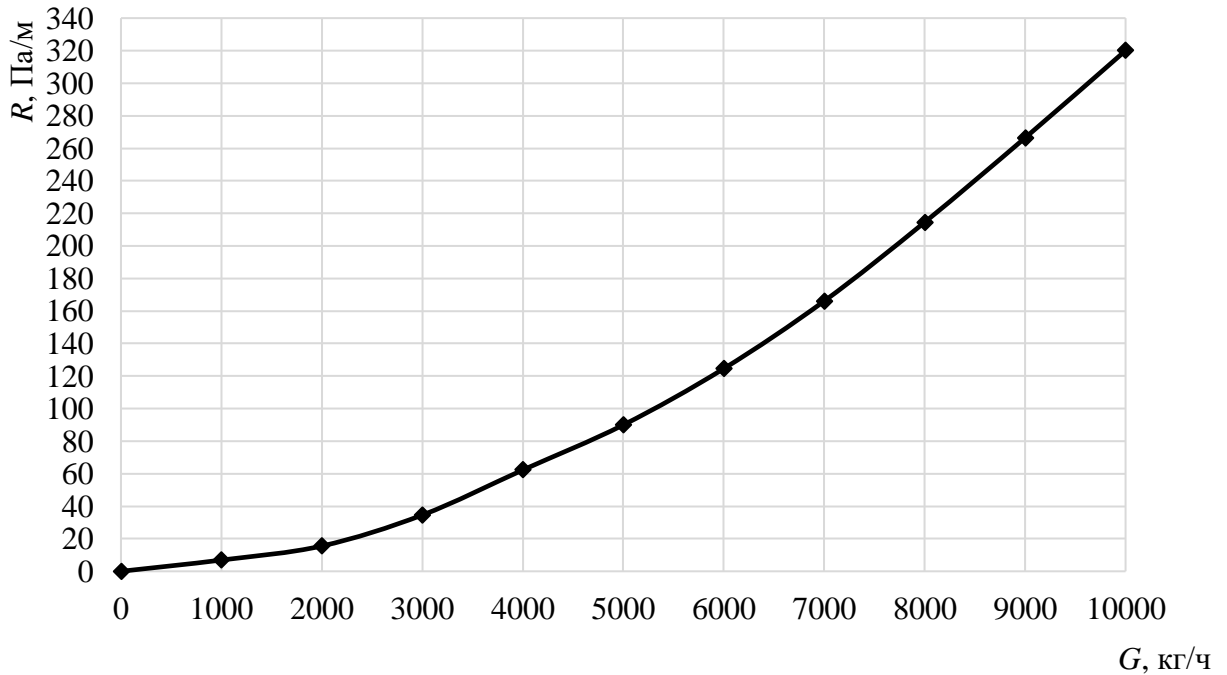


Рисунок 4.2 – График удельных потерь давления на трение для гидравлического расчета профилей Flower 125

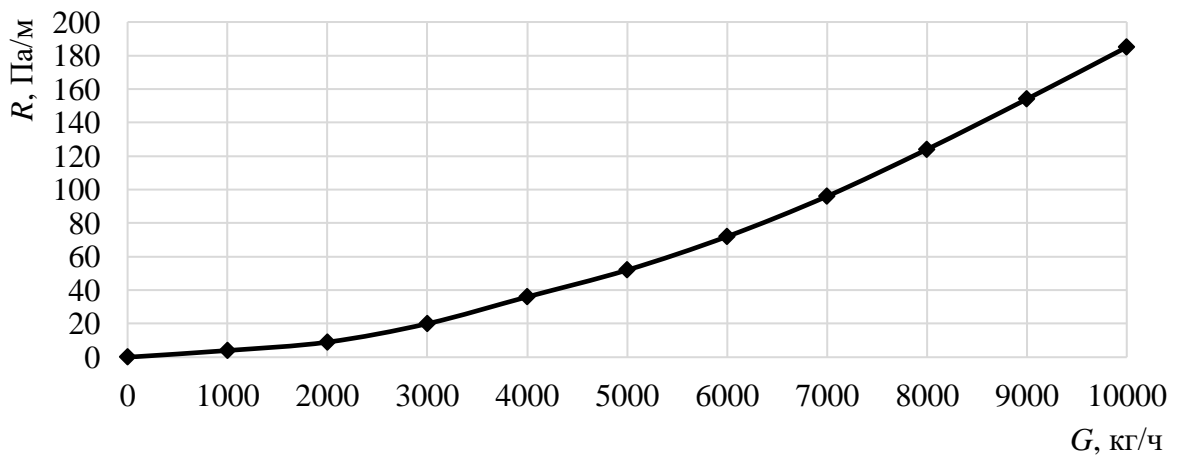


Рисунок 4.3 – График удельных потерь давления на трение для гидравлического расчета профилей Helios 750

Автором была разработана блок-схема проектирования системы отопления на базе водяных инфракрасных излучателей, приведённая на рисунке 4.4.



Рисунок 4.4 – Блок-схема расчёта системы лучистого отопления

4.2. Экономическая эффективность применения систем лучистого отопления на базе водяных инфракрасных излучателей

Для оценки экономической эффективности использования систем лучистого отопления на основе водяных инфракрасных излучателей были применены следующие методы оценки:

- оригинальная методика определения экономически обоснованной толщины утеплителя на основе расчёта срока окупаемости капитальных затрат;
- методология определения общих дисконтированных капитальных и эксплуатационных затрат за определенный период [77];
- методология Госстроя РФ [54] определения годовых потоков теплоты, которая широко применяется ресурсоснабжающими организациями.

4.2.1. Методика определения экономически-обоснованного утепления контура здания

Для подробного исследования методов обоснования энергоэффективности систем лучистого отопления производственных помещений на базе водяных инфракрасных излучателей был проведён системный анализ определения теплотехнических характеристик наружных ограждений на примере склада сухого хранения с административно-бытовой частью ООО «Флайг+Хоммель» в г. Заволжье, план вновь возведённого здания приведен на рисунке 4.5, общий вид – на рисунке 4.6.

При проектировании утепления необходимо учитывать как климатические особенности региона строительства, так и экономические, такие как стоимость тепловой энергии $C_{\text{тепл}}$, руб./Гкал и стоимость теплоизоляционного материала $C_{\text{ут}}$, руб.

Приведенное сопротивление теплопередаче фрагмента теплозащитной оболочки здания в целом $R_o^{\text{пр}}$, $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$, без учета теплотехнических неоднородностей, сводится к определению условного сопротивления теплопередаче однородной части фрагмента теплозащитной оболочки здания i -го вида $R_o^{\text{усл}}$, $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$, которое рассчитывается по формуле [85]:

$$R_o^{\text{усл}} = \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \sum R_s + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}}, \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}, \quad (4.16)$$

где: α_B – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м²·°C), принимается по [85];

R_s – термическое сопротивление слоя однородной части фрагмента, м²·°C/Вт;

α_H – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м²·°C), принимается по [85].

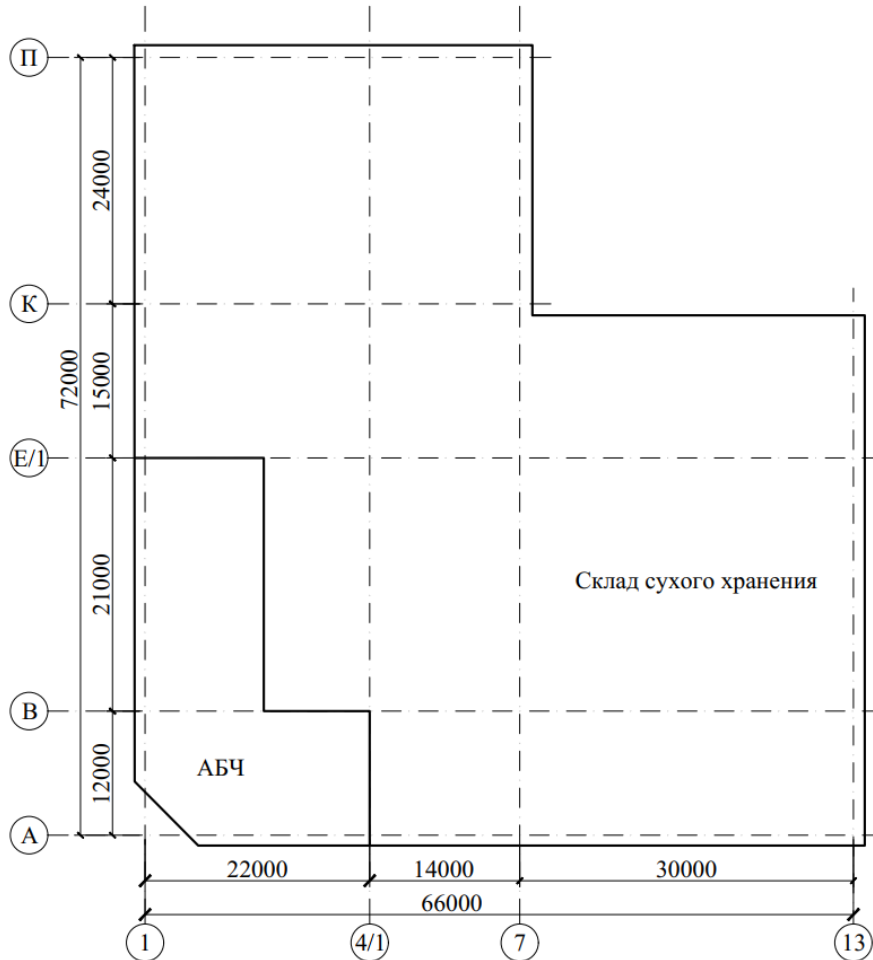


Рисунок 4.5 – План вновь возведённого здания склада сухого хранения с административно-бытовой частью ООО «Флайг+Хоммель» в г. Заволжье

Удельная теплозащитная характеристика здания $k_{об}$, Вт/(м³·°C), равна:

$$k_{об} = \frac{1}{V_{от}} \sum \left(n_{t,i} \frac{A_{\phi,i}}{R_{o,i}^{пр}} \right) = K_{общ} K_{комп}, \text{ Вт/(м}^3 \cdot \text{°C)}, \quad (4.17)$$

где: $R_{o,i}^{пр}$ – приведенное сопротивление теплопередаче i -го фрагмента теплозащитной оболочки здания, м²·°C/Вт;

$A_{\phi,i}$ – площадь соответствующего фрагмента теплозащитной оболочки здания, м²;

$V_{от}$ – отапливаемый объем здания, м³;

$n_{t,i}$ – коэффициент учитывающий отличие внутренней или наружной температуры у конструкции от принятых в расчете ГСОП;

$K_{\text{общ}}$ – общий коэффициент теплопередачи здания, Вт/(м²·°С) [85]:

$$K_{\text{общ}} = \frac{1}{A_{\text{н}}^{\text{сум}}} \sum_i n_{t,i} \left(\frac{A_{\text{ф},i}}{R_{\text{о},i}^{\text{пр}}} \right), \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°С)}, \quad (4.18)$$

$K_{\text{комп}}$ – коэффициент компактности здания, м⁻¹, равный по формуле [85]:

$$K_{\text{комп}} = \frac{1}{A_{\text{н}}^{\text{сум}}} \sum_i n_{t,i} \left(\frac{A_{\text{н}}^{\text{сум}}}{V_{\text{от}}} \right), \text{ м}^{-1}, \quad (4.19)$$

где $A_{\text{н}}^{\text{сум}}$ – сумма площадей (по внутреннему обмеру всех наружных ограждений теплозащитной оболочки здания, м².

Общие потери теплоты зданием за годовой отопительный период $Q_{\text{общ}}^{\text{год}}$, кВт·ч/год [85]:

$$Q_{\text{общ}}^{\text{год}} = 0,024 \cdot \text{ГСОП} V_{\text{от}} k_{\text{об}}, \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}. \quad (4.20)$$

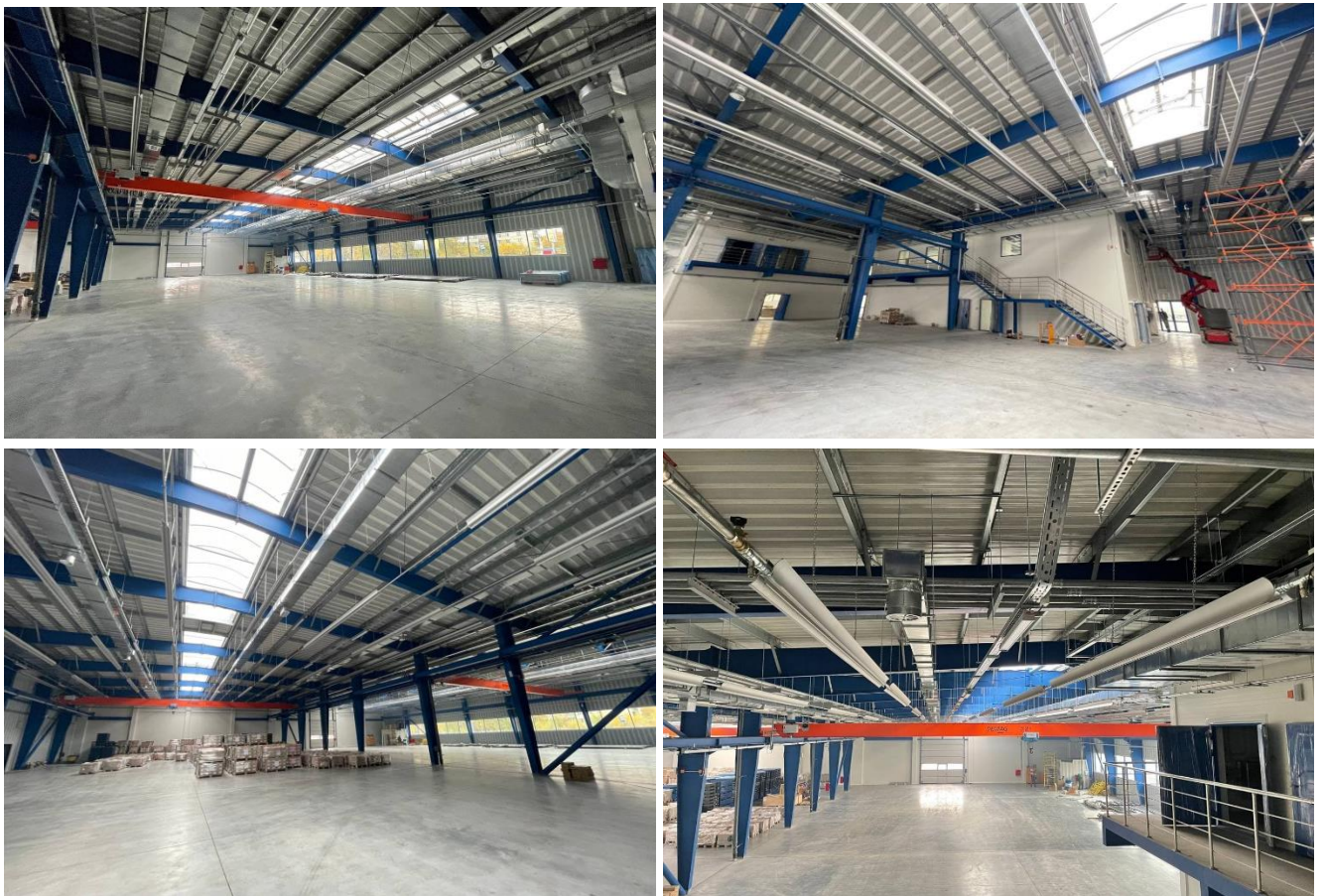


Рисунок 4.6 – Общий вид вновь возведённого здания склада сухого хранения с административно-бытовой частью ООО «Флайг+Хоммель» в г. Заволжье

Экономия денежных средств, которая достигается за счет разницы в потерях тепловой энергии через ограждающие конструкции с разной толщиной изолирующего слоя с учетом климатических и тарифных условий, определяется по формуле:

$$\mathcal{E} = 0,86 \cdot C_{\text{тепл}} \Delta Q_{\text{тп}}^{\Gamma}, \text{ руб./год}, \quad (4.21)$$

где $C_{\text{тепл}}$ – действующий тариф на тепловую энергию, руб./Гкал.

Бездисконтный срок окупаемости $T_{\text{ок}}$, лет, рассчитывается по формуле

$$T_o = \frac{\sum K}{\Delta \mathcal{E}}, \text{ лет}, \quad (4.22)$$

где $\sum K$ – капитальные затраты, которые складываются из затрат на монтажные работы и стоимости теплоизоляционного материала, определяются по формуле:

$$\sum K = C_{\text{ут}} V_{\text{ут}} + C_{\text{раб}} V_{\text{раб}}, \text{ руб.} \quad (4.23)$$

Стоимость работ для региона принимаем по территориальным единичным расценкам на строительные работы. Стоимость утеплителя принимаем по средним расценкам по региону. Стоимость тепловой энергии принимаем по тарифу на текущий период в соответствующем регионе.

Расчётный срок окупаемости капитальных затрат на утепление производственного здания необходимо рассчитывать с учётом нормы дисконтирования p , %, которая принимается в размере не менее действующей ключевой ставки Центрального банка Российской Федерации [85]:

$$T_{\text{ок}} = \frac{-\ln(1 - pT_o / 100)}{\ln(1 + p / 100)}, \text{ лет}. \quad (4.24)$$

Максимально-возможный срок окупаемости утепления производственного здания устанавливается по согласованию с собственником строения $T_{\text{уст}}$, лет, но не более 15 лет.

Экономия денежных средств за установленный период с учетом вычета срока окупаемости определяется по формуле [85]:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{уст}} = \Delta \mathcal{E}(T_{\text{уст}} - T_{\text{ок}}), \text{ руб.} \quad (4.25)$$

Автором была разработана блок-схема расчета, представленная на рисунке 4.7.

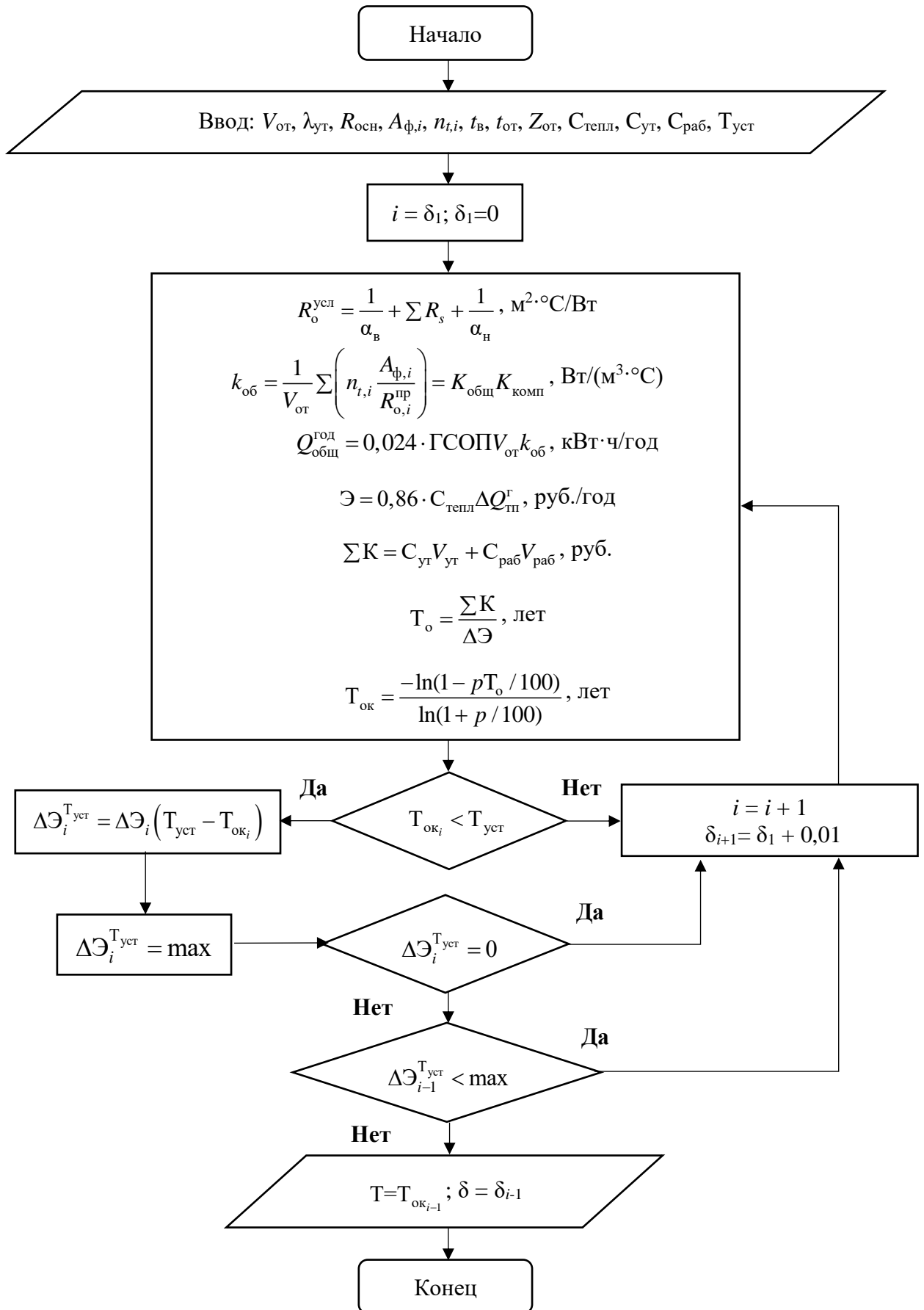


Рисунок 4.7 – Блок схема расчёта экономически-обоснованного утепления контура здания

В качестве примера расчёта экономической эффективности утепления контура здания было принято здание склада сухого хранения с административно-бытовой частью ООО «Флайг+Хоммель» в г. Заволжье. Здание имеет отапливаемый объём $V_{от} = 36288 \text{ м}^3$; площадь стен $A_{ф\text{ стен}} = 2484 \text{ м}^2$; площадь покрытия $A_{ф\text{ покр}} = 4032 \text{ м}^2$; площадь пола $A_{ф\text{ пол}} = 4032 \text{ м}^2$; площадь светопрозрачных ограждающих конструкций $A_{ф\text{ ветопрозр}} = 556 \text{ м}^2$.

Проведем расчет по данной схеме для шести городов при изменении толщины утеплителя с 0,01 до 0,3 м с шагом 0,01 м, принимаем утеплитель с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 0,04 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$.

Определение удельной теплозащитной характеристики здания $k_{об}$, $\text{Вт/(м}^3\cdot\text{°C)}$ проведено по формуле 4.17 и представлено в приложении Е.

Расчет срока окупаемости капитальных вложений на утепление, при различных вариантах толщины утепляющего слоя определяется по зависимости $T_{ок}$, лет и представлен в таблицах Е2...Е7 приложения Е. Расчёт произведён для различных районов строительства: г. Заволжье, г. Хабаровск, г. Орск Оренбургской области (далее – г. Орск), г. Красноярск, г. Сургут, г. Якутск (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Исходные данные для расчёта срока окупаемости [83, 95]

Район строительства	$t_{в}$, °C	$t_{н}$, °C	$t_{оп}$, °C	$Z_{оп}$, сут.	ГСОП	$C_{тепл}$, руб./Гкал	$C_{сут}$, руб.	p , %
г. Заволжье	16	-30	-3,6	209	4096	1467,30	8000	6,75
г. Хабаровск	16	-29	-9,5	204	5202	2853,85	8000	6,75
г. Орск	16	-31	-7,0	205	4715	1740,00	8000	6,75
г. Красноярск	16	-37	-6,6	234	5288	923,39	8000	6,75
г. Сургут	16	-42	-9,3	254	6426	1734,72	8000	6,75
г. Якутск	16	-52	-20,6	252	9223	3443,75	8000	6,75

График зависимости сроков окупаемости от толщины дополнительного слоя теплоизоляции ограждения для выбранных городов представлен на рисунке 4.8. График зависимости экономии денежных средств на оплату тепловой энергии от толщины утепляющего слоя (для г. Заволжье) представлен на рисунке 4.9.

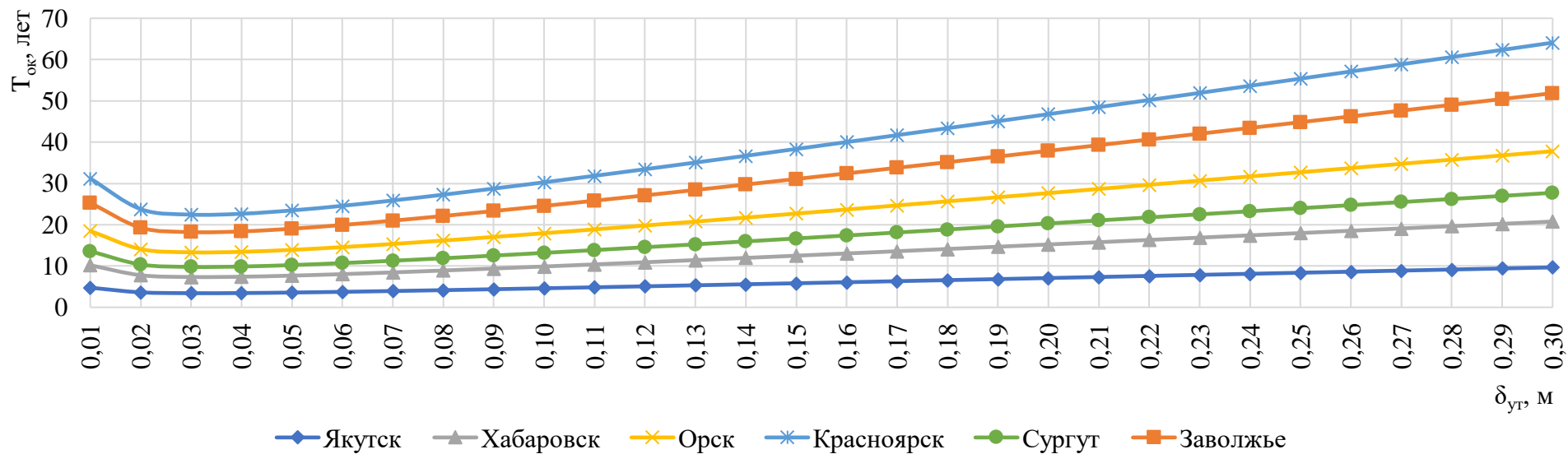


Рисунок 4.8 – Зависимость прогнозируемого срока окупаемости от толщины утепляющего слоя

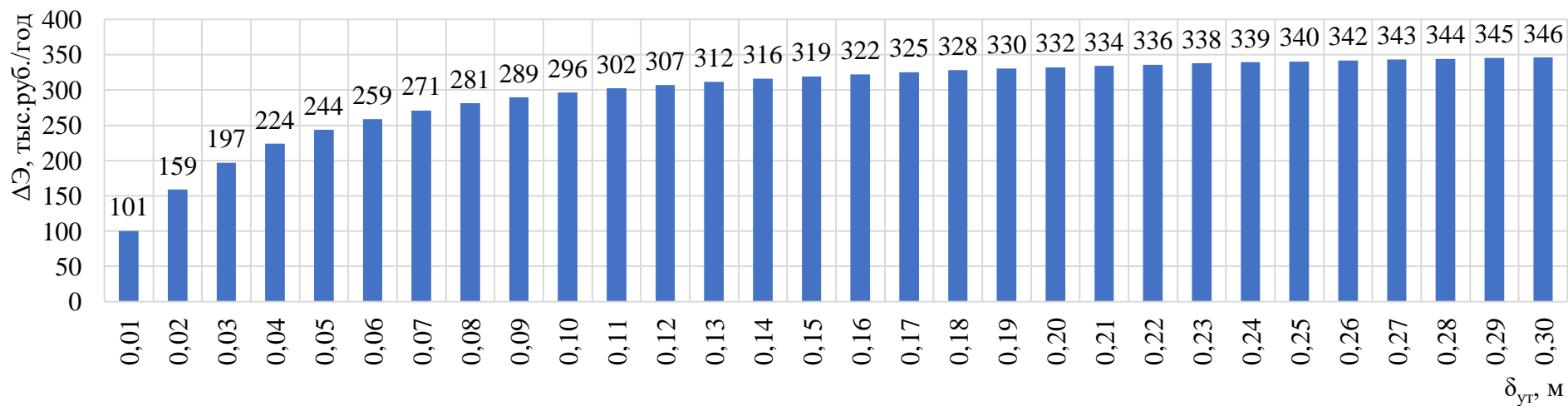


Рисунок 4.9 – Зависимость экономии денежных средств на оплату тепловой энергии от толщины утепляющего слоя (для г. Заволжье)

На основе анализа полученных графиков можно сделать вывод, что с учетом экономических параметров, в большинстве случаев, величина экономически обоснованного слоя утеплителя меньше толщины утепления по нормативной методике [85], что приводит к необоснованным затратам.

4.2.2. Расчёт по методике совокупных дисконтированных затрат

В качестве объекта исследований было взято здание вновь возводимого склада сухого хранения с административно-бытовой частью ООО «Флайг+Хоммель» в г. Заволжье.

Температура воздуха в рабочей зоне $t_{в,р}$, °С принимается согласно требованиям ГОСТ [25]. Категория работ по уровню энергозатрат – Пб, следовательно $t_{в,р} = 17...19$ °С. Для расчёта мощности конвективной системы отопления принимаем $t_{в,р} = 18$ °С. В рабочей зоне производственных помещений, которые оборудованы системой отопления на базе инфракрасных излучателей допускается понижение температуры внутреннего воздуха $t_{в,р}$ на величину до 4 °С по сравнению со значениями, предусмотренными [86]. При определении мощности лучистой системы отопления принимаем $t'_{в,р} = 14$ °С.

Сравнительный анализ конвективной и лучистой систем отопления проведён в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Сравнительная характеристика конвективной и лучистой систем отопления

№ п/п	Сравниваемый параметр	Конвективная система отопления	Лучистая система отопления
1	Температура воздуха рабочей зоны $t_{в,р}$, °С	18	14
2	Требуемое сопротивление теплопередаче стены $R_0^{тр ст}$, м ² ·°С/Вт	1,915	1,748
3	Требуемое сопротивление теплопередаче покрытия $R_0^{тр покр}$, м ² ·°С/Вт	2,644	2,435
4	Сопротивление теплопередаче дверей и ворот $R_0^{тр дв}$, м ² ·°С/Вт	0,473	0,433
5	Требуемая мощность системы отопления, $Q_{от}$, Вт	271559	261942

Затраты на устройство теплоизоляции $K_{ут}$, руб., вычисляются по формуле [77]:

$$K_{ут} = C_{ут} \cdot V_{ут}, \text{ руб.}, \quad (4.26)$$

где: $C_{ут}$ – удельная стоимость тепловой изоляции с работами по его установке (в деле), руб./м³. Ее значения на стадии разработки ТЭО или бизнес-плана проекта принимаются по справочным данным;

$V_{ут}$ – суммарный объем тепловой изоляции в ограждающих конструкциях здания, м³. Его можно определить по выражению [77]:

$$V_{ти} \approx 0,8 \sum (\lambda_{ут} R_i A_i / r_i), \text{ руб.} \quad (4.27)$$

где: $\lambda_{ут}$ – теплопроводность используемой тепловой изоляции, Вт/(м·°C), принимается по данным производителя;

r_i – коэффициент теплотехнической однородности соответствующего ограждения;

A_i и R_i – площадь, м² и сопротивление теплопередаче, м²·°C/Вт, ограждающих конструкций, подлежащих тепловой изоляции: наружных стен, перекрытия над неотапливаемым подвалом или техническим подпольем, пола по грунту, чердачного перекрытия или покрытия и др. Значения A_i , принимаются по архитектурно-строительным чертежам, R_i – по нормативным документам.

Результаты расчёта капитальных затрат на обустройство тепловой изоляции приведены в таблицах 4.4 и 4.5.

Таблица 4.4 – Капитальные затраты на устройство теплоизоляции для помещения, оборудованного конвективной системой отопления

Тип утепляемого ограждения	$\lambda_{ут}$, Вт/(м·°C)	R_i , (м ² ·°C)/Вт	δ_i , м	A_i , м ²	r_i	$V_{ут}$, м ³	$C_{ут}$, руб./м ³	$K_{ут}$, руб.
Стены	0,041	1,915	0,079	2484	0,70	222,89	8000	5086809
Покрытие	0,046	2,644	0,122	4032	0,95	412,96		
$\Sigma V_{ти}$, м ³						635,85		

Таблица 4.5 – Капитальные затраты на устройство теплоизоляции для помещения, оборудованного лучистой системой отопления

Тип утепляемого ограждения	$\lambda_{ут},$ Вт/(м·°С)	$R_i,$ (м ² ·°С)/Вт	$\delta_i,$ м	$A_i,$ м ²	r_i	$V_{ут},$ м ³	$C_{ут},$ руб./м ³	$K_{ут},$ руб.
Стены	0,041	1,748	0,072	2484	0,70	203,46	8000	4670163
Покрытие	0,046	2,435	0,112	4032	0,95	380,32		
$\Sigma V_{ти},$ м ³						583,77		

На стадии ТЭО затраты тепловой энергии в отопительный период при известной мощности системы отопления $\sum Q_{от}$, кВт определяются по зависимости [77]:

$$\mathcal{E}_{т.от} = 0,0864 \cdot \frac{\sum Q_{от}}{4,19 \cdot (t_b - t_n)} \cdot \text{ГСОП} \cdot C_T, \text{ руб./год}, \quad (4.28)$$

где: $0,0864 = 86\,400 \cdot 10^{-6}$, где 86 400 – число секунд в сутках;

C_T – стоимость тепловой энергии, руб./Гкал, для г Заволжье на 1-е полугодие 2021 г. – 1467,3 руб./Гкал (без НДС).

Для конвективной системы отопления:

$$\mathcal{E}_{т.от}^к = 0,0864 \cdot \frac{271,559}{4,19 \cdot (18 - (-30))} \cdot 4577,1 \cdot 1467,3 = 783486 \text{ руб./год.}$$

Для лучистой системы отопления:

$$\mathcal{E}_{т.от}^л = 0,0864 \cdot \frac{261,942}{4,19 \cdot (14 - (-30))} \cdot 3741,1 \cdot 1467,3 = 673862 \text{ руб./год.}$$

Совокупные дисконтированные затраты СДЗ, приведённые к концу расчётного срока (10 лет), определяются по следующей формуле:

$$\text{СДЗ} = K \cdot (1 + p/100)^T + \sum_{i=1}^T \mathcal{E}_i \cdot (1 + p/100)^i, \text{ руб.}, \quad (4.29)$$

где: K – капитальные единовременные затраты, руб.,

\mathcal{E}_i – суммарные годовые эксплуатационные затраты за i -й год, руб./год;

p – норма дисконта, %.

В расчётах норму дисконта принимать на уровне не ниже ставки рефинансирования ЦБ РФ, которая по состоянию на 2021 год она равна 6,75 %.

Результаты расчета по формуле (4.29) приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Сравнение технико-экономических показателей

Тип системы	$K \cdot (1 + p/100)^T$, руб.	$\sum_{i=1}^T \mathcal{E}_i \cdot (1 + p/100)^i$, руб.	СДЗ, руб.
Конвективное отопление	9775169	11420130	21195300
Лучистое отопление	8974513	9822240	18796753
		Разница, руб.	2398547
		Разница, %	11,32

Таким образом, можно сделать вывод, что с использованием лучистой системы отопления вместо традиционной конвективной можно получить преимущество по совокупным дисконтированным затратам за 10 лет в 2,4 млн. руб. или же 11,32 %, или 595 руб./м².

4.2.3. Расчёт по методике определения годовых потоков теплоты

Обоснование экономической эффективности использования систем лучистого отопления на основе возобновляемых источников энергии в отопительный сезон может быть проведено с использованием общепринятой методологии, утвержденной Госстроем РФ [54]. Методика используется представителями ресурсоснабжающих организаций для расчета нормативного расхода тепловой энергии на нужды отопления. Данный расчет может быть обоснованием для заключения энергосервисного контракта.

В качестве примера было взято здание вновь возводимого склада сухого хранения с административно-бытовой частью ООО «Флайг+Хоммель» в г. Заволжье.

Категория работ по уровню энергозатрат – Пб, следовательно температура воздуха рабочей зоны $t_{в.р} = 17...19$ °С [25]. Для Расчёта мощности конвективной системы отопления принимаем $t_{в.р} = 18$ °С [25]. В рабочей зоне производственных помещений, которые оборудованы системой отопления на базе инфракрасных излучателей допускается понижение температуры внутреннего воздуха $t_{в.р}$ на

величину до 4 °С по сравнению со значениями, предусмотренными [86]. При определении мощности лучистой системы отопления принимаем $t'_{в,р} = 14$ °С.

Тепловой поток на отопление здания может быть определён по формуле укрупнённых расчётов [54]:

$$Q_{o\max} = a q_o V_H (t_B - t_o) k_{пт} \cdot 10^{-6}, \text{ МВт}, \quad (4.24)$$

где: a – поправочный коэффициент, учитывающий район строительства здания [54];

q_o – удельная отопительная характеристика здания, Вт/(м³·°С) [54];

V_H – объем здания по наружному обмеру выше отметки ±0,000 (надземная часть), м³;

$k_{пт}$ – повышающий коэффициент для учета потерь теплоты теплопроводами, проложенными в неотапливаемых помещениях [54];

t_B – средняя расчетная температура внутреннего воздуха, °С;

t_o – расчетная температура наружного воздуха для проектирования отопления, °С.

Для конвективной системы отопления:

$$Q_{o\max}^к = 0,98 \cdot 0,44 \cdot 36288 \cdot (18 - (-30)) \cdot 1,05 = 788628 \text{ Вт}.$$

Для лучистой системы отопления:

$$Q_{o\max}^л = 0,98 \cdot 0,44 \cdot 36288 \cdot (14 - (-30)) \cdot 1,05 = 722909 \text{ Вт}.$$

Величина нормативного потребления тепловой энергии на нужды отопления Q_o , Гкал, определяется по формуле [54]:

$$Q_o = Q_{o\max} \frac{(t_B - t_{ср.ф})}{(t_B - t_o)} z \cdot 24, \text{ Гкал}, \quad (4.25)$$

где: $t_{ср.ф}$ – средняя температура наружного воздуха за расчётный период, °С;

z – продолжительность работы системы отопления за расчетный период, сут.;

24 – продолжительность работы системы отопления в сутки, ч, в случае расчёта нормативного потребления тепловой энергии на нужды отопления для системы с несколькими режимами работы, принимается равной продолжительности режима.

В первую очередь проводится расчёт нормативного потребления теплоты на нужды отопления по месяцам со средней суточной температурой наружного воздуха менее +8 °С [83]. Во вторую очередь проводится расчёт отдельно для рабочего, дежурного и переходного режимов. Результаты расчётов приведены в таблицах 4.7 и 4.8.

Таблица 4.7 – Продолжительность режимов работы системы отопления

Режим	Примеч.	Продолжительность работы в сутки, ч	$t_{в}, ^\circ\text{C}$
Рабочий режим	Лучистое отопление	10	14
	Конвект. отопление	10	18
Дежурный режим	Лучистое отопление	13	10
	Конвект. отопление	11	14
Переходный режим	Лучистое отопление	1	14
	Конвект. отопление	3	18

Таблица 4.8 – Расчёт нормативного потребления теплоты на нужды отопления в отопительный период

Наименование	Примеч.	Янв.	Фев.	Мар.	Апр.	Окт.	Ноя.	Дек.	Год	Эффект, %
$t_{ср.ф.}, ^\circ\text{C}$	Волжская ГМО*	-8,5	-4,1	-0,4	6,5	7,7	-0,3	-1,6	-	-
$Q_o, \text{Гкал}$	Конвект. отопление	278,53	209,80	193,39	116,97	108,26	186,14	206,01	1299,10	
	Лучистое отопление	236,49	171,83	151,35	76,29	66,22	145,45	163,96	1011,59	22,13
$z_{р.р.}, \text{ч}$	Конвект. отопление	170	200	200	220	230	200	220	1440	-
	Лучистое отопление	170	200	200	220	230	200	220	1440	
$z_{д.р.}, \text{ч}$	Конвект. отопление	557	452	524	478	491	500	502	3504	-
	Лучистое отопление	523	412	484	434	445	460	458	3216	
$z_{п.р.}, \text{ч}$	Конвект. отопление	17	20	20	22	23	20	22	144	-
	Лучистое отопление	51	60	60	66	69	60	66	432	
$Q_{о.р.р.}, \text{Гкал}$	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	
$Q_{о.д.р.}, \text{Гкал}$	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	
$Q_{о.п.р.}, \text{Гкал}$	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	
$Q_{о.смеш.}, \text{Гкал}$	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; $Q_{о р.р}$ – потребление тепловой энергии в рабочем режиме, Гкал; $Q_{о д.р}$ – потребление тепловой энергии в дежурном режиме, Гкал; $Q_{о п.р}$ – потребление тепловой энергии в переходном режиме, Гкал; $Q_{о смеш}$ – потребление тепловой энергии в смешанном режиме, Гкал

Анализ годового нормативного потребления тепловой энергии показал, что при использовании лучистого отопления можно достичь значения энергосбережения 22,13 %, при использовании режима ожидания в нерабочее время эффект от использования системы лучистого отопления достигнет 27,19 %, а максимальная разница между постоянным режимом работы конвективного отопления и режима работы лучистого отопления с использованием перехода в режим ожидания составит 37,37 %.

Выводы по 4 главе

1. На основании проведенных исследований автором были разработаны рекомендации по проектированию помещения с лучистыми системами отопления на базе водяных инфракрасных излучателей.

2. Обоснована необходимость проводить выбор экономически-обоснованной толщины утеплителя по результатам оценки экономической целесообразности, с учётом климатических и экономических особенностей региона строительства.

3. На основании проведенного сравнительного анализа по трем различным методикам была доказана экономическая эффективность применения лучистых систем отопления на базе водяных инфракрасных излучателей. Согласно методике определения экономически-обоснованного утепления контура здания на основе расчёта срока окупаемости капитальных затрат на обустройство утепления теплового контура здания была определена оптимальная толщина утеплителя. По методике определения совокупных дисконтированных капитальных и эксплуатационных затрат общий эффект от применения лучистой системы отопления на базе водяных инфракрасных излучателей составил 11,32 %, или 595 руб./м². При расчёте по методике определения годовых потоков теплоты рассчитанный эффект составил 37,37 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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»).

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, перечень которых устанавливает Минобрнауки России**

А1. 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.

А2. 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.

А3. 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.

А4. 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.

А5. 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.

А6. 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.

А7. 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.

А8. 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.

А9. 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.

А10. 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

А11. 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.

А12. 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.

Статьи в нерецензируемых научных изданиях

А13. Смыков, А.А. Теплофизические требования к конструкциям теплового контура зданий при лучистом отоплении / А.А. Смыков, В.И. Бодров // Вестник

Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. – 2014. – № 17. – С. 177...180.

A14. Смыков, А.А. Теплофизические характеристики теплового контура зданий с газовыми инфракрасными излучателями / А.А. Смыков, В.И. Бодров // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2014. – № 7 (151). – С. 52...55.

A15. Смыков А.А. Температурный режим помещения при лучистом отоплении / А.А. Смыков // Сб. докл. IV Всерос. фестиваль науки: сб. докл. – Н.Новгород, 2014. С. 65-69.

A16. Смыков, А.А. Температурный режим помещений с системами лучистого отопления / А.А. Смыков, В.И. Бодров // Великие реки 2015: Тр. конгресса 17-го Междунар. науч.-промышленного форума. – Н.Новгород, 2015. – С. 76...80.

A17. Смыков, А.А. Различия температурного режима наружных ограждающих конструкций в зданиях с конвективными и лучистыми системами / А.А. Смыков, В.И. Бодров // Великие реки 2016: тр. 18-й Междунар. науч.-промышленного форума. – Н.Новгород, 2016. – С. 35...39.

A18. Смыков, А.А. Температурный режим наружных ограждающих конструкций при направленном инфракрасном излучении / А.А. Смыков // Великие реки 2016: тр. 18-й Междунар. науч.-промышленного форума. – Н.Новгород, 2016. – С. 337...340.

A19. Смыков, А.А. Тепловой и температурный режим наружных ограждающих конструкций в зданиях с лучистыми системами отопления / А.А. Смыков, В.И. Бодров // VI Всерос. фестиваль науки: сб. докл. – Н.Новгород: ННГАСУ, 2016. – С. 310...314.

A20. Смыков, А.А. Система уравнений теплового режима помещений при лучистом отоплении / А.А. Смыков, В.И. Бодров, Л.Ю. Михайлова // Промышленная безопасность. Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2015. – С. 62...65.

A21. Смыков, А.А. Температурный режим помещений с системами лучистого отопления / А.А. Смыков, В.И. Бодров // Экология и энергосбережение: проблемы и перспективы: сб. докл. региональной науч. студенческой конф. – Н.Новгород, 2015. – С. 6...8.

A22. Смыков, А.А. Требуемое сопротивление теплопередаче в зданиях с лучистыми системами отопления / А.А. Смыков // Тепломассообмен: сб. студенческой кафедральной конф. – Н.Новгород, 2016. – С. 15...17.

A23. Смыков, А.А. Теплотехнический расчет наружных ограждающих конструкций в зданиях с системами отопления на базе инфракрасных излучателей / А.А. Смыков, В.И. Бодров // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды – 2016: сб. ст. XIV междунар. науч. конф. – Волгоград, 2016. – С. 155...161.

A24. Смыков, А.А. К методике определения сопротивления теплопередаче в зданиях с лучистыми системами отопления на базе инфракрасных излучателей / А.А. Смыков // Технические науки: сб.ст. сессии молодых ученых. – Н.Новгород, 2016. – С. 22...25.

A25. Смыков, А.А. Тепловой баланс и теплофизические характеристики наружных ограждающих конструкций в зданиях с системами отопления на базе инфракрасных излучателей / А.А. Смыков // Сб. тр. аспирантов и магистрантов. – Н.Новгород: ННГАСУ, 2016. – С. 52...55.

A26. Смыков, А.А. Особенности температурного режима наружных ограждающих конструкций в зданиях с лучистыми системами отопления / А.А. Смыков, В.И. Бодров // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: матер. Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием (Екатеринбург, 12–16 декабря 2016 г.). – Екатеринбург: УрФУ, 2016. – С. 264...268.

A27. Смыков, А.А. Тепловой режим наружных ограждающих конструкций в зданиях с лучистыми системами отопления на базе инфракрасных излучателей / А.А. Смыков // Наука, мысль: электронный периодический журнал. – 2017. – № 5. – С. 5...8.

A28. Смыков, А.А. Методика определения требуемого сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций в помещениях с системами отопления на базе инфракрасных излучателей / А.А. Смыков, В.И. Бодров, А. В. Каликин, В. В. Сухов // Великие реки 2017: тр. 19 Междунар. науч.-промышленного форума. – Н.Новгород, 2017. – С. 35...38.

A29. Смыков, А.А. Особенности применения лучистого отопления на базе низкотемпературных инфракрасных излучателей / А.А. Смыков, И.О. Забабурин, Д.Е. Седнев, И.А. Сюткин // VII Всерос. фестиваль науки: сб. докл. – Н.Новгород: ННГАСУ, 2017. – С. 354...358.

A30. Смыков, А.А. Определение требуемых теплотехнических характеристик наружных ограждающих конструкций в помещениях с лучистым отоплением / А.А. Смыков // VII Всерос. фестиваль науки: сб. докл. – Н.Новгород: ННГАСУ, 2017. – С. 381...385.

A31. Смыков, А.А. Методика теплотехнического расчёта наружных ограждающих конструкций зданий, отапливаемых инфракрасными излучателями / А.А. Смыков, В.И. Бодров // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2017. – № 1 (181). – С. 92...95.

A32. Смыков, А.А. Определение требуемых теплотехнических характеристик наружных ограждающих конструкций в помещениях с лучистым отоплением / А.А. Смыков // Экологическая безопасность и устойчивое развитие урбанизированных территорий: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. – Н.Новгород, 2018. – С. 341...345.

A33. Смыков, А.А. Особенности применения низкотемпературных систем инфракрасного отопления в производственных сельскохозяйственных помещениях / А.А. Смыков, В.И. Бодров, В.Ф. Бодрова // Великие реки 2018: тр. 20 Междунар. науч.-промышленного форума. – Н.Новгород, 2018. – С. 363...365.

A34. Смыков, А.А. Особенности применения низкотемпературных систем инфракрасного отопления в производственных сельскохозяйственных помещениях / А.А. Смыков, В.И. Бодров, М.В. Бодров // Качество внутреннего воздуха и

окружающей среды – 2018: сб. ст. XVI междунар. науч. конф. – Волгоград, 2018. – С. 199...205.

A35. Смыков, А.А. Особенности использования систем лучистого отопления на базе низкотемпературных инфракрасных излучателей / А.А. Смыков, В.И. Бодров, В.Ф. Бодрова // Технические, естественные, математические науки: сб. тр. сессии молодых ученых. – Н.Новгород, 2018. – С. 193...197.

A36. Смыков, А.А. Перспективы применения систем лучистого отопления на базе низкотемпературных инфракрасных излучателей / А.А. Смыков, И.В. Схуландзе, М.А. Логинов // VIII Всерос. фестиваль науки: сб. докл. – Н.Новгород: ННГАСУ, 2018. – С. 193...197.

A37. Смыков, А.А. Особенности применения лучистого отопления на базе низкотемпературных инфракрасных излучателей / А.А. Смыков, И.В. Схуландзе, М.А. Логинов // Великие реки 2019 : тр. 21 Междунар. науч.-промышленного форума. – Н.Новгород, 2019. – С. 356...359.

A38. Смыков, А.А. Перспективы внедрения энергоэффективных систем отопления / А.А. Смыков, А.П. Титаев, М.А. Логинов // Великие реки 2019: тр. 21 Междунар. науч. - промышленного форума. – Н.Новгород, 2019. – С. 295...298.

A39. Смыков, А.А. Исследование системы отопления на базе низкотемпературных инфракрасных излучателей / А.А. Смыков, М.В. Бодров, А.П. Титаев, М.А. Логинов // Экологическая безопасность и устойчивое развитие урбанизированных территорий: сб. тр. II Междунар. науч.-практ. конф. – Н.Новгород, 2019. – С. 360...363.

A40. Смыков, А.А. Особенности и перспективы применения лучистого отопления на базе низкотемпературных инфракрасных излучателей / А.А. Смыков // Технические, естественные, математические науки: сб. тр. сессии молодых ученых. – Н.Новгород, 2019. – С. 76...78.

A41. Смыков, А.А. Исследование теплотехнических характеристик низкотемпературных инфракрасных излучателей / А.А. Смыков, В.И. Бодров, М.В.

Бодров // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды – 2019: сб. ст. XVII междунар. науч. конф. – Волгоград, 2019. – С. 131...137.

A42. Смыков, А.А. Определение требуемых теплотехнических характеристик наружных ограждающих конструкций в помещениях с лучистым отоплением / А.А. Смыков, И.В. Схуландзе, М.А. Логинов, А.П. Титаев // IX Всерос. фестиваль науки: сб. докл. – Н.Новгород: ННГАСУ, 2019. – С. 133...138.

A43. Смыков, А.А. Особенности применения низкотемпературных инфракрасных излучателей для отопления помещений / А.А. Смыков, М.В. Бодров // Строительство: новые технологии – новое оборудование. – 2019. – №10. – С. 26...34.

A44. Смыков, А.А. Опыт и перспективы использования систем отопления на базе водяных инфракрасных излучателей / А.А. Смыков, М.В. Бодров, А.П. Титаев, Д.Е. Седнев // Великие реки 2020: тр. 22 Междунар. Науч.-промышленного форума. – Н.Новгород, 2020. – С. 337...340.

A45. Смыков, А.А. Перспективы внедрения систем лучистого отопления на базе водяных инфракрасных излучателей / А.А. Смыков, М.В. Бодров, В.Ю. Кузин, М.С. Морозов // Вода. Газ. Тепло 2020. Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию Белорусского национального технического университета, 100-летию кафедры «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика», 90-летию кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция», 2020. – С. 28...31.

A46. Смыков, А.А. Исследование теплотехнических характеристик инфракрасных излучающих профилей отечественного производства / А.А. Смыков, М.В. Бодров // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды = Indoor air quality and environment. материалы XVIII Международной научной конференции. – Волгоград, 2020. – С. 109...114.

A47. Смыков, А.А. Определение экономического преимущества использования лучистых систем отопления на базе водяных инфракрасных излучателей / А.А. Смыков, М.В. Бодров, В.Ю. Кузин, М.С. Морозов //

Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции. Сборник докладов VIII Всероссийской научно-технической конференции, посвященной столетию МИСИ-МГСУ. – Москва, 2020. – С. 14...19.

А48. Смыков, А.А. Особенности применения систем лучистого отопления на базе водяных инфракрасных излучателей в текстильной промышленности / А.А. Смыков, Д.А. Линёв, А.П. Титаев // X Всероссийский фестиваль науки. Сборник докладов. Редколлегия: А.А. Лапшин, И.С. Соболев, Д.В. Мониц, А.А. Смыков [и др.]. – Н.Новгород, 2020. – С. 117...121.

А49. Смыков, А.А. Экономическая эффективность применения систем отопления на базе водяных инфракрасных излучателей / А.А. Смыков // Технические, естественные, математические науки: сб. тр. сессии молодых ученых. – Н.Новгород, 2020. – С. 131...135.

А50. Смыков, А.А. Особенности формирования температурного режима в помещениях с лучистой системой отопления на базе водяных инфракрасных излучателей / А.А. Смыков, А.Е. Руин, А.Н. Пылаев // Технические, естественные, математические науки: сб. тр. сессии молодых ученых. – Н.Новгород, 2021. – С. 128...132.

А51. Смыков, А.А. Исследование характеристик различных потолочных излучателей в системах лучистого отопления / А.А. Смыков, А.Е. Руин, М.В. Бодров // Строительство – формирование среды жизнедеятельности: сб. мат. семинара молодых учёных XXIV Международной научной конференции. – Москва, 2021. – С. 173...179.

А52. Смыков, А.А. Исследование температурного режима ограждающих конструкций в помещениях с лучистой системой отопления на базе водяных инфракрасных излучателей / А.А. Смыков, М.В. Бодров, А.Е. Руин // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды = Indoor air quality and environment. материалы XIX Международной научной конференции. – Волгоград, 2021. – С. 52...57.

Свидетельства о результатах интеллектуальной деятельности

A53. Свидетельство о регистрации результата интеллектуальной деятельности, охраняемого в режиме коммерческой тайны ННГАСУ (объект «НОУ-ХАУ»). Способ создания и поддержания расчётных параметров микроклимата в спортивных залах образовательных учреждений / А.А. Смыков, М.В. Бодров, М.С. Морозов. № 10 от 23.03.20. – 4 с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Банхиди, Л. Тепловой микроклимат помещений / Л. Банхиди. – М.: Стройиздат, 1981. – 247 с.
2. Батулин, В.В. Аэрация промышленных зданий / В.В. Батулин, В.М. Эльтерман. – М.: Госстройиздат, 1963. – 320 с.
3. Батулин, В.В. Отопление, вентиляция и газоснабжение / В.В. Батулин – М.: Госстройиздат, 1965. – 292 с.
4. Богомолов, А.И. Газовые горелки инфракрасного излучения и их применение / А.И. Богомолов, Д.Я. Виноградчик, М.А. Маевский – М.: Стройиздат, 1967. – 254 с.
5. Богословский, В.Н. Отопление / В.Н. Богословский, А.Н. Сканави. – М.: Стройиздат, 1991. – 735 с.
6. Богословский, В.Н. Строительная теплофизика / В.Н. Богословский. – Изд. 2-е перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1982. – 415 с.
7. Богословский, В.Н. Тепловой режим зданий: автореферат дис. ... д-ра. техн. наук: 05.23.03 / Богословский Вячеслав Николаевич. – М., 1970. – 30 с.
8. Богословский, В.Н. Тепловой режим помещения. / В.Н. Богословский. – М.: Стройиздат, 1979. – 248 с.
9. Богословский, В.Н. Теплообмен в помещении с панельно-лучистой системой обогрева / В.Н. Богословский // Водоснабжение и санитарная техника. – 1961. – № 9. – С. 23...28.
10. Бодров В.И. Исследование систем лучистого отопления на базе низкотемпературных инфракрасных излучателей / В.И. Бодров, М.В. Бодров, А.А. Смыков // Приволжский научный журнал. – 2019. – № 3 (51). – С. 52...57.
11. Бодров, В.И. Теплофизические характеристики теплового контура зданий с газовыми инфракрасными излучателями / В.И. Бодров, А.А. Смыков // Сантехника, отопление, кондиционирование, энергосбережение. – 2014. – № 7. – С. 52...54.

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

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

14. Борхерт, Р. Техника инфракрасного нагрева / Р. Борхерт, В. Юбиц – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 265 с.

15. Брюханов, О.Н. Радиационный газовый нагрев / О.Н. Брюханов, Э.В. Крайний, Б.С. Мاستрюков. – Л.: Недра, 1989. – 296 с.

16. Брюханов, О.Н. Газовый инфракрасный излучатель с изолированной зоной горения / О.Н. Брюханов, В.Г. Харюков // Газовая промышленность. – 1977. – № 3. – С. 32...34.

17. Булатов, А.Л. Эффективность использования инфракрасных газовых излучателей для отопления производственных помещений ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» / А.Л. Булатов, Е.В. Загребина // АВОК. – 2007. – № 2. – С. 36...40.

18. Бураковский, Т. Инфракрасные излучатели / Т. Бураковский, К. Гизинский, А. Саля – Л.: Энергия, 1978. – 408 с.

19. Бухмиров, В.В. Экспериментальное исследование системы отопления инфракрасными излучателями / В.В. Бухмиров, М.В. Пророкова, Ю.С. Солнышкова // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2011. – Вып. 3. – С. 12...16.

20. Бухмиров, В.В. Алгоритм расчёт систем лучистого отопления помещений / В.В. Бухмиров, С.А. Крупенников, Ю.С. Солнышкова // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2010. – Вып. 4. – С. 23...25.

21. Вентиляция, кондиционирование воздуха и отопление в животноводческих и птицеводческих зданиях: Обзор / Центр. ин-т научной информации по строительству и архитектуре. – М., 1971. – 50 с.

22. Голик, В. Г. Обобщение опыта применения газовых горелок инфракрасного излучения для отопления сельскохозяйственных объектов / В. Г. Голик, А. К. Родин // Газовое хозяйство. – 1966. – Вып. 5. – С. 3...27.

23. Горомосов, М. С. К вопросу о гигиенической оценке систем лучистого отопления / М. С. Горомосов, Н. А. Ципер // Гигиена и санитария. – 1967. – № 22/6 – С. 20...28.

24. Горомосов, М.С. Микроклимат жилищ и его гигиеническое нормирование / М.С. Горомосов. – М.: Медгиз, 1960. – 340 с.

25. ГОСТ 12.1.005-88. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. – М.: Стандартиформ, 2008. – 95 с.

26. ГОСТ Р 54852-2011. Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций. – М.: Стандартиформ, 2012. – 20 с.

27. Губернский, Ю.Д. Биологическое воздействие инфракрасной радиации и гигиеническое нормирование микроклимата при лучистом обогреве жилищ / Ю.Д. Губернский // Гигиена и санитария. – 1965. – № 30/4. – С. 81...85.

28. Давлятчин, Р.Р. Лучисто-конвективный теплообмен газовых инфракрасных излучателей с многослойной конструкцией кровли / Р.Р. Давлятчин, Н.И. Куриленко // Приволжский научный журнал. – 2009. – № 2. – С. 74...78.

29. Дребенцов, В.Ф. Эффективность работы газовых радиационных горелок при сжигании природного газа / В.Ф. Дребенцов // Газовая промышленность. – 1964. – № 11. – С. 21...25.

30. Дульднер, А.М. Влияние инфракрасной радиации на иммунобиологическую реактивность организма / А.М. Дульднер // Гигиена и санитария. – 1965. – № 5. – С. 27...29.

31. Ермаков, С.М. Математическая теория планирования эксперимента / С.М. Ермаков. – М.: Наука, 1983. – 392 с.
32. Ермолаев, А.Н. Повышение эффективности работы систем газового инфракрасного обогрева производственных зданий: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / Ермолаев Антон Николаевич. – Тюмень, 2017. – 191 с.
33. Зайдель, А.Н. Погрешность измерений физических величин / А.Н. Зайдель – Л.: Наука, 1985. – 112 с.
34. Зигель, Р. Теплообмен излучением / Р. Зигель, Дж. Хауэлл. – М.: Изд-во «Мир», 1975. – 934 с.
35. Иссерлин, А.С. Газовые горелки. Издание 2-е, переработанное и дополненное / А.С. Иссерлин. – М.: Недра, 1966. – 154 с.
36. Ициксон, Б.С. Инфракрасные газовые излучатели / Б.С. Ициксон, Ю.Л. Денисов. – Л.: Недра, 1969. – 280 с.
37. Киссин, М.И. Расчет нагревательных панелей при лучистом отоплении / М.И. Киссин // Сб. науч. тр. ЦНИИПС: Вопросы отопления и вентиляции. – 1951. – № 1. – С. 13...21.
38. Киссин, М.И. Расчёт потерь тепла при лучистом отоплении. / М.И. Киссин // Сб. науч. тр. ЦНИИПС: Вопросы отопления и вентиляции. – 1952. – № 3. – С. 26...31.
39. Ковалёв, А. Е. Расчет мощности инфракрасных облучательных установок / А. Е. Ковалев // Водоснабжение и санитарная техника. – 1983. – № 2. – С. 27...28.
40. Колпаков, Г.В. Лучистое отопление / Г.В. Колпаков – М.: Гос. изд-во литературы по строительству, 1945. – 147 с.
41. Кривоногов, Б.М. Исследование и разработка газовых инфракрасных излучателей: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / Б.М. Кривоногов. – Л., 1970. – 32 с.
42. Куриленко Н. И. Тепловой режим производственных помещений с системами отопления на базе газовых инфракрасных излучателей / Н. И. Куриленко,

В. И. Максимов, Г. Я. Мамонтов, Т. А. Нагорнова. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 101 с.

43. Куриленко, Н.И. Теплообмен газовых инфракрасных излучателей с многослойной конструкцией кровли / Н.И. Куриленко, Р.Р. Давлятчин // Вестник ТГАСУ. – 2009. – № 4. – С. 132...141.

44. Левин, А. М. Принципы рационального сжигания газа / А. М. Левин. – Л.: Недра, 1977. – 247 с.

45. Левин, А. М. Исследование плотности излучения газовых горелок инфракрасного излучения / А. М. Левин, Г. М. Оксюта // Газовая промышленность. – 1963. – № 5. – С. 21...23.

46. Левин, А.М. Размещение газовых инфракрасных излучателей в обогреваемом помещении / А.М. Левин, А.К. Родин, Л.А. Кулагин // Водоснабжение и санитарная техника. – 1968. – № 5. – С. 15...17.

47. Леонтьев, А.И. Научные основы технологий XXI века. / А.И. Леонтьев, Н.Н. Пилюгин, Ю.В. Полежаев, В.М. Поляев – М.: УНПЦ «Энергомаш», 2000. – 136 с.

48. Листов, А. М. Метод расчёта теплового режима вентилируемых помещений при лучистом отоплении / А. М. Листов // Сб. науч. тр. Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного строительства и проектирования. – 1955. – С. 68...86.

49. Малышева, А.Е. Гигиеническая оценка радиационного охлаждения зданий. / А.Е. Малышева // Сб. Исследования по строительной теплофизике. – 1959. – С. 259...263.

50. Малявина, Е. Г. Теплопотери здания: справочное пособие / Е. Г. Малявина. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2007. – 144 с.

51. Мачкаши, А. Лучистое отопление / А. Мачкаши, Л. Банхиди; под ред. В.Н. Богословского и Л.М. Махова [пер. с венгерского В.М. Беляева] – М.: Стройиздат, 1985. – 464 с.

52. Мачкаши, А. Лучистое отопление периметральными зонами потолка / А. Мачкаши // Водоснабжение и санитарная техника. – 1959. – № 8. – С. 34...38.

53. МДС 23-1.2007 Методические рекомендации по комплексному теплотехническому обследованию наружных ограждающих конструкций с применением тепловизионной техники. – М.: ФГУП «НИЦ «Строительство», 2008. – 20 с.

54. Методические указания по определению расходов топлива, электроэнергии и воды на выработку теплоты отопительными котельными коммунальных теплоэнергетических предприятий (издание 4-ое). – М.: АКХ им. К. Д. Памфилова, 2002. – 128 с.

55. Минчук, В.И. Исследование теплового режима жилых зданий, оборудованных системами радиационного охлаждения и отопления: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / В.И. Минчук. – М., 1970. – 28 с.

56. Мирзоян, Ж.В. Пути унификации газовых инфракрасных излучателей / Ж.В. Мирзоян, М.А. Каленик, Ю.Л. Денисов // Газовая промышленность. – 1984. – № 12. – С. 38...40.

57. Мирзоян, Ж.В. Газовые инфракрасные излучатели с пористыми насадками / Ж.В. Мирзоян, О.В. Рогинский // Газовая промышленность. – 1985. – № 12. – С. 34...35.

58. Мирзоян, Ж.В. Исследование особенностей газового инфракрасного отопления: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / Ж.В. Мирзоян – М., 1966. – 23 с.

59. Мирзоян, Ж. В. Анализ выбросов при работе газовых инфракрасных излучателей / Ж. В. Мирзоян, Э. В. Петухов, Г. П. Комина // Газовая промышленность. – 1983. – № 7. – С. 35...37.

60. Миссенар, А. Лучистое отопление и охлаждение / А. Миссенар – М.: Стройиздат, 1961. – 229 с.

61. Михайлова, Л.Ю. Разработка методики расчета радиационного отопления зданий производственного назначения: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / Михайлова Лариса Юрьевна. – Тюмень, 2006. – 114 с.

62. Наумов, А.Л. Рекомендации по применению и расчету газо-воздушных систем лучистого отопления / А. Л. Наумов, О. П. Булычева, М. С. Климовицкий, Е.О. Шилькрот, И.Ю. Алексеева. – М.: ООО «НПО ТЕРМЭК» и ОАО «ЦНИИПРОМЗДАНИЙ», 2002. – 27 с.

63. Оцеп, С.А. Лучистое отопление / С.А. Оцеп – М.: Гос. изд-во литературы по строительству, 1945. –147 с.

64. Поляк, Г.Л. Методика расчета лучеиспускания в пучках / Г.Л. Поляк // Изв. АН СССР, ОТН. – 1937. – С. 332...361.

65. Пономарева, Н. К. Основные гигиенические параметры систем лучистого отопления / Н.К. Пономарева // Водоснабжение и санитарная техника. – 1957. – № 8. – С. 19...24.

66. Пятачков, В.В. Совершенствование систем радиационно-конвективного отопления производственных объектов: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / Пятачков Виктор Владимирович. – Магнитогорск, 2012. – 170 с.

67. Равич, М.Б. Газ и эффективность его использования в народном хозяйстве / М. Б. Равич. – М: Недра, 1987. – 238 с.

68. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 01.12.2009 № 1830-р «Об утверждении плана мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности в Российской Федерации» // СПС «Консультант Плюс».

69. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 13.11.2009 № 1715-р «Об Энергетической стратегии России на период до 2030 года» // СПС «Консультант Плюс».

70. Редько, А.Ф. Совершенствование систем отопления производственных помещений газовыми трубчатыми инфракрасными нагревателями / А.Ф. Редько, Н.Н. Болотских. // Журнал «Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит». – 2010. – № 4 (74). – С. 36...47.

71. Родин, А.К. Газовое лучистое отопление / А.К. Родин – Л.: Недра, 1987. – 191 с.

72. Родин, А.К. К вопросу определения лучистого коэффициента полезного действия излучающих горелок / А.К. Родин, В.И. Биргин // Сб. Горелочные устройства и тепловые агрегаты для газообразного топлива. – 1982. С. 132...142.

73. Родин, А.К. Определение основных теплотехнических параметров систем лучистого отопления с газовыми инфракрасными излучателями / А.К. Родин // Распределение и сжигание газа. – 1976. – № 2. – С. 14...24.

74. Родин, А.К. Применение газовых инфракрасных излучателей для обогрева производственных помещений и открытых площадок: автореф. дис. ... канд. техн. наук.: 05.23.03 / Артур Константинович Родин. – Саратов, 1968. – 23 с.

75. Родин, А.К. Применение излучающих горелок для отопления / А.К. Родин – Л.: Недра, 1976. – 117 с.

76. Родин, А.К. Расчет лучистого (инфракрасного) отопления / А.К. Родин // Использование газа в народном хозяйстве. – 1966. – Вып. 5. – С. 293...299.

77. Самарин, О.Д. Вопросы экономики в обеспечении микроклимата зданий. Научное издание. 2-е изд., перераб. и доп. / О.Д. Самарин – М.: АСВ, 2015. – 136 с.

78. Сандер, А.А. Теплообмен в приборах панельно-лучистого отопления. Учебное пособие / А.А. Сандер. – Новосибирск: изд-во НИСИ им. Куйбышева, 1983. – 76 с.

79. СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах» // СПС «Консультант Плюс».

80. Северинец, Г. Н. Применение газовых горелок инфракрасного излучения для сушки и нагрева / Г. Н. Северинец. – Л.: Недра, 1970. – 128 с.

81. Северинец, Г. Н. Применение газовых излучающих горелок для сушки и нагрева / Г. Н. Северинец. – Л.: Недра, 1980. – 167 с.

82. Солнышкова, Ю. С. Совершенствование систем радиационного отопления зданий с целью сбережения энергетических ресурсов: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04 / Солнышкова Юлия Сергеевна. – Иваново, 2012. – 169 с.

83. СП 131.13330.2020. Строительная климатология. – М.: Стандартинформ, 2021. – 110 с.

84. СП 347.1325800.2017. Внутренние системы отопления, горячего и холодного водоснабжения. Правила эксплуатации. – М.: Стандартинформ, 2018. – 49 с.
85. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. – М.: Стандартинформ, 2012. – 25 с.
86. СП 60.13330.2020 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. – М.: Стандартинформ, 2021. – 25 с.
87. СП 73.13330.2016 Внутренние санитарно-технические системы зданий. – М.: Стандартинформ, 2017. – 45 с.
88. Сперроу, Э.Г. Теплообмен излучением / Э.Г. Сперроу, Р.Д. Сесс – Л.: Энергия, 1971. – 294 с.
89. СТО Газпром 2-1.9-440-2010 Методика расчета систем лучистого отопления. – М.: ОАО «Газпром», 2010. – 58 с.
90. СТО НП «АВОК» 4.1.5-2006 Системы отопления и обогрева с газовыми инфракрасными излучателями. – М.: НП «АВОК», 2006. – 10 с.
91. Стриж, Э.Я. О влиянии разных по горизонтали температурных условий на тепловое состояние учащихся / Э.Я. Стриж // Гигиена и санитария. – 1965. – № 30/3. – С. 32...37.
92. Табунщиков, Ю.А. Расчеты температурного режима помещения и требуемой мощности для его отопления или охлаждения / Ю.А. Табунщиков. – М.: Стройиздат, 1981. – 80 с.
93. Тиатор, И. Отопительные системы / И. Тиатор – М.: Техносфера, 2006. – 272 с.
94. Тилин, Л.А. Лучистое отопление нагретым воздухом / Л.А. Тилин – М.: Гос. изд-во литературы по строительству и архитектуре, 1955. – 153 с.
95. ТСН 31-301-96 НН Строительная климатология для пунктов Нижегородской области. – Н.Новгород, 1997. – 5 с.

96. Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» // СПС «Консультант Плюс».

97. Худенко, А.А. Исследование процессов радиационного теплообмена в сложных системах и разработка систем лучистого отопления зданий: автореф. дис. ... д-ра техн. Наук: 05.23.03 / А.А. Хёденко. – Киев, 1993. – 40 с.

98. Шиванов, В.В. Обеспечение теплового режима производственных помещений системами газового лучистого отопления: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / Шиванов Владимир Владимирович. – Нижний Новгород, 2007. – 134 с.

99. Шилькрот, Е.О. Дальнейшее совершенствование газового инфракрасного отопления зданий и открытых площадок / Е.О. Шилькрот. – М.: НИИСТ, 1965. – 62 с.

100. Шилькрот, Е.О. Методика расчета газового инфракрасного отопления промышленных зданий и открытых площадок / Е.О. Шилькрот. – М.: НИИСТ, 1968. – 15 с.

101. Шилькрот, Е.О. Системы лучистого отопления с высокотемпературными излучателями / Е.О. Шилькрот. – М.: НИИСТ, 1963. – 38 с.

102. Шорин, С.Н. Теплопередача излучением при лучистом отоплении / С.Н. Шорин // Сб. Современные вопросы отопления и вентиляции. – 1949. – С. 14...27.

103. Andreas Kampf. Behaglichkeit wird neu definiert [Электронный ресурс] // Know-How. – 2004. – Режим доступа: <https://clck.ru/YdKZw> (дата обращения: 14.09.2021).

104. Andreas Kampf. Energetische und physiologische Untersuchungen bei der Verwendung von Gasinfrarotstrahlern im Vergleich zu konkurrierenden Heizsystemen für die Beheizung großer Räume: dissertation zur Erlangung des Grades Doktor Ingenieur der Fakultät für Maschinenbau der Ruhr-Universität Bochum. – Bochum, 1994. – 195 p.

105. Bojić, M. Performances of low temperature radiant heating systems / M. Bojić, D. Cvetković, V. Marjanović, M. Blagojević, Z. Djordjević // Energy and Buildings. – 2013. – № 61. – P. 233...238.

106. Chrenko, F.A. Heated ceiling and comfort / F.A. Chrenko // Journal IHVE. – 1973. – № 20 – P. 68...75.
107. Dudkiewicz, E. The influence of orientation of a gas-fired direct radiant heater on radiant temperature distribution at a work station / E. Dudkiewicz, J. Jezowiecki // Energy and Buildings. – 2011. – № 6 (43). – P. 1222...1230.
108. Fanger, P.O. Calculation of thermal comfort: introduction of a basic comfort equation / P.O. Fanger // ASHRAE Transaction. – 1967. – Vol. 73. – P. III4.1...III4.20.
109. Fonseca, N. Experimental analysis and modeling of hydronic radiant ceiling panels using transient-state analysis / N. Fonseca // International Journal of Refrigeration. – 2011. – № 4(34). – P. 958...967.
110. Fonseca, N. Radiant ceiling systems coupled to its environment part 1: Experimental analysis / N. Fonseca, C. Cuevas, V. Lemort // Applied Thermal Engineering. – 2010. – № 14-15(30). – P. 2187...2195.
111. Fonseca, N. Radiant ceiling systems coupled to its environment part 2: Dynamic modeling and validation / N. Fonseca, S. Bertagnolio, C. Cuevas // Applied Thermal Engineering. – 2010. – № 14-15(30). – P. 2196...2203.
112. Imanari, T. Thermal comfort and energy consumption of the radiant ceiling panel system. Comparison with the conventional all-air system / T. Imanari, T. Omori, K. Bogaki // Energy and Buildings. – 1999. – № 2(30). – P. 167...175.
113. Jia, H. Experimentally-determined characteristics of radiant systems for office buildings / H. Jia, X. Pang, P. Haves // Applied Energy. – 2018. – № 221. – P. 41...54.
114. Jung, N. Energy performance analysis of an office building in three climate zones / N. Jung, S. Paiho, J. Shemeikka, R. Lahdelma, M. Airaksinen // Energy and Buildings. – 2018. – № 158. – P. 1023...1035.
115. Kavga, A. Performance of an infrared heating system in a production greenhouse / A. Kavga, E. Karanastasi, I. Konostas, T. Panidis // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). – 2013. – № 18 Part 1 (46). – P. 235...240.

116. Kollmar, A. Die Strahlungsheizung / A. Kollmar, W. Liese – Munchen: Springer, 1957. – 142 p.

117. Kurilenko, N.I. Temperature patterns in the gas infrared radiator heating area / N.I. Kurilenko, G.Y. Mamontov, L.Y. Mikhaylova // EPJ Web of Conferences. – 2015. – № 82 – 01006p.1...01006.p.4.

118. Kurilenko, N.I. Comparative analysis of methods of calculating the systems for radiation heating / N.I. Kurilenko, D.M. Zverev, A.Z. Idrisov // Gazovaya Promyshlennost. – 2001. – № 5. – P. 58...60.

119. Kuznetsov, G.V. Heat transfer under heating of a local region of a large production area by gas infrared radiators / G.V. Kuznetsov, N.I. Kurilenko, V.I. Maksimov, G.Y. Mamontov, T.A. Nagornova // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2013. – № 3(86). – P. 519...524.

120. Kuznetsov, G.V. Experimental determination of the temperature in a small neighborhood of the gas infrared sources / G.V. Kuznetsov, N.I. Kurilenko, G.Y. Mamontov, L.Y. Mikhaylova // EPJ Web of Conferences. – 2015. – № 82 – 01021p.1...01021.p.4.

121. Kuznetsov, G.V. Mathematical modelling of conjugate heat transfer and fluid flow inside a domain with a radiant heating system / G.V. Kuznetsov, N.I. Kurilenko, A.E. Nee // International Journal of Thermal Sciences. – 2018. – № 131. – P. 27...39.

122. Maksimov, V.I. Verification of Conjugate Heat Transfer Models in a Closed Volume with Radiative Heat Source / V.I. Maksimov, T.A. Nagornova, N.I. Kurilenko // MATEC Web of Conferences. – 2016. – № 72. – 01061p.1...01061.p.5.

123. Pollman, F. Heizen Infrared / F. Pollman // Maschinenmarkt. – 1969. – № 55. – P. 1261...1262.

124. Rhee, K.N. A 50 year review of basic and applied research in radiant heating and cooling systems for the built environment / K.N. Rhee, K.W. Kim // Building and Environment. – 2015. – № 91. – P. 166...190.

125. Rhee, K.N. Ten questions about radiant heating and cooling systems / K.N. Rhee, B.W. Olesen, K.W. Kim // *Building and Environment*. – 2017. – № 112. – P. 367...381.

126. Skunce, G. Warmetechnischer, Vergleich zwischen Warmluft – und Strahlungsheizung / G. Skunce // *Gaswarme international*. – 1973. – № 7. – P. 252...255.

127. Yaglou, C.P. A method of improving the effective temperature index / C.P. Yaglou – ASHRAE, 1974 – 307 p.

128. Yin, Y.L. Experimental investigation on the heat transfer performance and water con-densation phenomenon of radiant cooling panels / Y.L. Yin, R.Z. Wang, X.Q. Zhai, T.F. Ishugah // *Building and Environment*. – 2014. – № 71. – P. 15...23.

АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ

Общество с ограниченной ответственностью

Флайг+Хоммель

Группа компаний «Flaig+Hommel»

Соединительные элементы · крепеж · металлообработка



DIN ISO 9001 ISO TS 16949
 Поставщик кат. А группы Фольксваген
 Поставщик кат. L1
 Немецких Железных Дорог

Акт о внедрении результатов диссертационной работы аспиранта А.А. Смыкова
 «Тепловой и температурный режим производственных помещений с системами отопления на базе
 инфракрасных излучателей»

Настоящий акт составлен о том, что результаты научно-исследовательской работы Смыкова Александра Анатольевича на тему «Тепловой и температурный режим производственных помещений с системами отопления на базе инфракрасных излучателей», представленной на соискание степени кандидата технических наук, используются в настоящее время в ООО «Флайг+Хоммель» при конструировании модельного ряда водяных инфракрасных излучателей и проектировании систем лучистого отопления.

Использование результатов позволило:

1. Оптимизировать процесс конструирования излучателей. Произвести расчёты и оценить эффективность конструкторских решений, применяемых при производстве водяных инфракрасных излучателей, выпускаемых ООО «Флайг+Хоммель».
2. На базе результатов исследований было осуществлено оборудование объекта «Склад сухого хранения с административно-бытовой частью». Вследствие проведённой экономической оценки был достигнут эффект от предложенных решений в размере 2835 тыс. руб. (703 руб./м²)

Генеральный директор



Д. Кузнецов

Нижегородская обл. · г. Завольжье 606524 · ул. Баумана д.7 · Тел/факс: 8 (83161) 2-17-80

· info@flaig-hommel.ru · www.flaign-hommel.ru

ИНН/КПП 5260227404/524801001 · ОГРН 1085260008272 · ОКПО 86296665 · ОКВЭД 28.75

р/с 40702810923000411223 в Поволжском филиале ЗАО «Райффайзенбанк» г.Н.Новгород · БИК 042202847 · к/с 3010181030000000847



Научно-производственное объединение ООО «Аспирация»
ИНН 5260462528, КПП 526001001, ОГРН 1195275019280, ОКПО 81039745
г. Нижний Новгород, ул. Алексеевская, д. 26, офис 109

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательской работы
Смыкова Александра Анатольевича на тему
«Тепловой и температурный режим производственных помещений с системами
отопления на базе инфракрасных излучателей»

В практику ООО «Аспирация» были внедрены результаты исследования Смыков А.А. на тему «Тепловой и температурный режим производственных помещений с системами отопления на базе инфракрасных излучателей».

Внедрение результатов позволило повысить энергоэффективность предлагаемых проектных решений отопления крупнообъемных помещений, работа над которыми велась специалистами организации. В каждом конкретном случае предложенные рекомендации позволили подобрать оптимальную модель организации системы отопления и оценить её эффективность.

Экономическая оценка показала, что рекомендации по проектированию производственных помещений с системами отопления на базе инфракрасных излучателей позволяет снизить капитальные и эксплуатационные затраты, как следствие, повысить показатели энергоэффективности.

Экономический эффект, на примере одного из реализованных объектов (цех металлообработки в г. Дзержинск) составил 3237,73 тыс. руб.

Директор



В.Ф. Осин



**Министерство
строительства
Нижегородской области**

Адрес места нахождения: ул. Ошарская, д. 63
г. Нижний Новгород, 603115
Почтовый адрес: Кремль, корп. 14
г. Нижний Новгород, 603082
тел. 462-22-00, факс 462-22-01
e-mail: official@minstr.kreml.nnov.ru

№ _____
на № _____ от _____

АКТ

о внедрении результатов научно-исследовательской работы аспиранта кафедры отопления и вентиляции Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» А.А. Смыкова

Настоящим подтверждаем, что на объектах капитального строительства Нижегородской области при проектировании и разработке современных энергоэффективных систем обеспечения параметров микроклимата крупнообъемных помещений используются следующие разработки аспиранта А.А. Смыкова:

1. Рекомендации по проектированию систем лучистого отопления на базе водяных инфракрасных излучателей.
2. Методика технико-экономического расчёта эффективности применения систем лучистого отопления на базе водяных инфракрасных излучателей.
3. Результаты исследований теплотехнических характеристик водяных инфракрасных излучателей марок Helios 750 и Flower 125.

Министр

А.В. Молев



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
 «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» (ННГАСУ)
 Ильинская ул., д. 65, Нижний Новгород, 603950. Тел./факс: (831) 434-02-91, (831) 430-53-48. E-mail: srec@nngasu.ru
 ОКПО 02068150, ОГРН 1025203021007, ИНН/КПП 5260002707/526001001

АКТ

о внедрении в учебный процесс результатов научных исследований
 ассистента кафедры отопления и вентиляции
 Александра Анатольевича СМЫКОВА

Результаты научно-исследовательских разработок ассистента кафедры отопления и вентиляции Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета А.А. Смыкова по теме «Тепловой и температурный режим производственных помещений с системами отопления на базе инфракрасных излучателей» успешно используются в лекционных и практических занятиях при обучении студентов бакалавриата по направлению подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника (профиль) Промышленная теплоэнергетика (дисциплина Б.1.В.43), а также для студентов магистратуры, обучающихся по направлениям 08.04.01 Строительство, направленность (профиль) Системы обеспечения микроклимата зданий и сооружений (дисциплины Б.1.В.17.01, Б.1.В.18.01) и 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника, направленность (профиль) Тепломассообменные процессы и установки (дисциплины Б.1.В.16).

Результаты теоретических и экспериментальных исследований автора включены в следующие дисциплины.

1) Б.1.В.43. Отопление промышленных зданий, части блока Б1 «Дисциплины (модули)» ОПОП в объеме 5 зачетных единиц, в виде лекционных и практических занятий. Компетенции, формирующиеся у обучающихся, при изучении предложенного модуля: ПК-1, ПК-2.

2) Б.1.В.17.01 Методы повышения энергоэффективности систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха гражданских и промышленных зданий, относящейся к дисциплинам по выбору вариативной части блока Б1 «Дисциплины (модули)» ОПОП в объеме 4 зачетных единиц, в виде лекционных и практических занятий. Компетенции, формирующиеся у обучающихся, при изучении предложенного модуля: ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-4.

3) Б.1.В.18.01 Энергосбережение в системах отопления и вентиляции, относящейся к дисциплинам по выбору вариативной части блока Б1 «Дисциплины (модули)» ОПОП в объеме 3 зачетных единиц, в виде лекционных и практических занятий. Компетенции, формирующиеся у обучающихся, при изучении предложенного модуля: ПК-1, ПК-2, ПК-3.

4) Б.1.В.16 Энергоэффективные отопительно-вентиляционные системы производственных зданий, относящейся к обязательным дисциплинам вариативной части блока Б1 «Дисциплины (модули)» ОПОП в объеме 4 зачетных единиц, в виде лекционных и практических занятий. Компетенции, формирующиеся у обучающихся, при изучении предложенного модуля – ПК-2.

И.о. ректора



Д.Л. Щёголев

**СВИДЕТЕЛЬСТВА О РЕГИСТРАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» (ННГАСУ)

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о регистрации результата интеллектуальной деятельности,
охраняемого в режиме коммерческой тайны ННГАСУ
(объект «НОУ-ХАУ»)

№ 10

Утверждено приказом Об установлении режима коммерческой тайны в отношении служебного результата интеллектуальной деятельности № 120 от 23.03.2020 г.

Название:
«Способ создания и поддержания расчётных параметров микроклимата в спортивных залах образовательных учреждений»

Правообладатель:
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» (ННГАСУ)

Авторский коллектив:
**заведующий кафедрой отопления и вентиляции
Михаил Валерьевич Бодров,
ассистент кафедры отопления и вентиляции
Максим Сергеевич Морозов,
ассистент кафедры отопления и вентиляции
Александр Анатольевич Смыков**

Результат интеллектуальной деятельности получен в рамках выполнения авторским коллективом научно-исследовательской работы кафедры отопления и вентиляции

Ректор  **А.А. Лапшин**



ПРИЛОЖЕНИЕ В




ПЕРЕЧЕНЬ ПРОВЕДЁННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Таблица В1 – Перечень проведённых экспериментальных исследований

№ эксперимента	Наименование	Тип эксперимента	Даты проведения	Место проведения (локация, объект)
1	Исследование теплотехнических характеристик водяных инфракрасных излучателей	Лабораторный	03.01.2020 – 14.03.2020	Нижегородская обл., г. Нижний Новгород, Лаборатория лучистого отопления УНИЦ «СОНИИ» ННГАСУ
2	Исследование лучистых характеристик водяных инфракрасных излучателей	Лабораторный	14.01.2020 – 07.03.2020	Нижегородская обл., г. Нижний Новгород, Лаборатория лучистого отопления УНИЦ «СОНИИ» ННГАСУ
3	Исследование теплового режима в помещениях с системами лучистого отопления	Лабораторный	30.11.2020 – 26.01.2021	Нижегородская обл., г. Нижний Новгород, Лаборатория лучистого отопления УНИЦ «СОНИИ» ННГАСУ
		Натурный	21.01.2021 – 26.01.2021	Нижегородская обл., г. Заволжье, цех металлообработки ООО «Флайг+Хоммель»
4	Исследование температурного режима в помещениях, оборудованных системами лучистого отопления	Лабораторный	07.01.2021 – 09.01.2021	Нижегородская обл., г. Нижний Новгород, Лаборатория лучистого отопления УНИЦ «СОНИИ» ННГАСУ
		Натурный	21.01.2021 – 23.01.2021	Нижегородская обл., г. Заволжье, цех металлообработки ООО «Флайг+Хоммель»
5	Исследование теплового режима наружных ограждений в помещениях с системами отопления	Лабораторный	10.01.2021 – 16.01.2021	Нижегородская обл., г. Нижний Новгород, Лаборатория лучистого отопления УНИЦ «СОНИИ» ННГАСУ
		Натурный	22.01.2021 – 29.01.2021	Нижегородская обл., г. Заволжье, цех металлообработки ООО «Флайг+Хоммель»

ЛАБОРАТОРИЯ ЛУЧИСТОГО ОТОПЛЕНИЯ

Таблица Г1 – Перечень измерительных приборов Лаборатории лучистого отопления

№	Наименование, марка оборудования	Изображение	Кол-во	Производитель	Заводской номер	Комплектация с прибором	Погрешность измерений
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Радиометр Аргус-03		1	ФГУП «ВНИИОФИ»	289	Документация, батарейка 9В	±6 %
2	Теплограф – измеритель теплофизических величин		1	НПП «Интерприбор»	643 регистратор 27 модуль-02	Регистратор в чехле, руководство, свидетельство о поверке, программное обеспечение, модуль-02, кабель соединительный «регистратор-модуль» 1 шт., датчик совмещенный ДТГ+ПДТ 2 шт., датчик температуры поверхности платиновый ПДТ 2 шт., датчик температуры цифровой ЦДТ совмещенный с датчиком влажности ДТГ 1 шт.	±6 %
3	Термометр многоканальный ТМ 5104Д/В/т1050/ГП		1	ООО НПП «Элемер»	063-10341	Руководство, комплект монтажных частей: планки для крепления в щит, розетки, USB – карта памяти, программное обеспечение, комплект датчиков ТС-1388/12 16 шт.	±0,1 %

1	2	3	4	5	6	7	8
4	Лазерный дальномер Bosch GLM 50C		1	Robert Bosch Power Tools GmbH	804519840	Руководство, сертификат, гарант. талон, батарейка 2xAAA, чехол.	$\pm 1,5$ мм
5	Термоанемометр Testo 405 V1		1	Testo SE&Co.KGaA	41542304 807	Руководство, зажим, держатель, зонд D12 мм, батарейка 3xAAA	$\pm 0,3$ %
6	Инфракрасный термометр Testo 830-T4		1	Testo SE&Co.KGaA	42019429	Руководство, протокол о калибровке, батарейка 9В	± 2 °C
7	Термогигрометр Testo 625		1	Testo SE&Co.KGaA	61570591 прибор 03370766 зонд	Прибор, зонд, руководство, протокол о калибровке, батарейка 9В	$\pm 2,5$ %

1	2	3	4	5	6	7	8
8	Поверхностный стик температуры Testo 905-T2		1	Testo SE&Co.KGaA	05604053	Руководство, протокол о калибровке, комплект батареек	$\pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$
9	Тепловизор Testo 875-2i		1	Testo SE&Co.KGaA	60354776	USB-кабель – 1 шт., блок питания – 1 шт., литиево-ионный аккумулятор – 1 шт., профессиональное ПО – 1 шт., краткое руководство пользователя – 1 шт., краткие инструкции по применению – 1 шт., протокол заводской калибровки – 1 шт., кейс – 1 шт.	$\pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$

Таблица Г2 – Поверочная документация приборной базы

ИЧ РА СС
 ФЕДЕРАЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
 «ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И
 ИСПЫТАНИЙ В НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ»
 Регистрационный номер в реестре аккредитованных лиц RA.RU.311315

СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПОВЕРКЕ
 №  Действительно до 15 сентября 2021 г.

Средство измерений Радиометр АРГУС-03
 наименование, тип, модификация средства измерений

регистрационный № 27468-04
 регистрационный номер в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений, присвоенный при утверждении типа заводской (серийный) номер 289
 в составе _____


номер знака предыдущей поверки _____
 поверено в полном объеме _____

в соответствии с см. на обороте
 наименование или обозначение документа, на основании которого выполнена поверка

с применением эталонов: см. на обороте
 регистрационный номер и (или) наименование, тип

при следующих значениях влияющих факторов: атмосферное давление 100 кПа;
 относительная влажность воздуха 54 %; температура окружающего воздуха 21,7 °С

и на основании результатов первичной (периодической) поверки признано пригодным к применению.

Знак поверки: 

Начальник отдела Кочетков Денис Александрович
 должность руководителя подразделения или другого уполномоченного лица

Поверитель Склянина Валерия Сергеевна
 должность

Дата поверки 16 сентября 2020 г.

Свидетельство о поверке прибора Аргус-03

ИЧ РА СС
 ФЕДЕРАЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
 «ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И ИСПЫТАНИЙ В НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ»
 Регистрационный номер в реестре аккредитованных лиц RA.RU.311315

СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПОВЕРКЕ
 №  Действительно до 09 ноября 2021 г.

Средство измерений Измеритель теплофизических величин "Теплограф"
 наименование, тип, модификация средства измерений

регистрационный № 17192-02
 регистрационный номер в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений, присвоенный при утверждении типа заводской (серийный) номер 643; 27
 в составе модуль-02

номер знака предыдущей поверки _____
 поверено в полном объеме _____

в соответствии с см. на обороте
 наименование или обозначение документа, на основании которого выполнена поверка

с применением эталонов: см. на обороте
 регистрационный номер и (или) наименование, тип

при следующих значениях влияющих факторов: температура окружающего воздуха: 21,8 °С;
 относительная влажность воздуха: 52,3%; атмосферное давление: 99,5 кПа

и на основании результатов первичной (периодической) поверки признано пригодным к применению.

Знак поверки: 

Начальник отдела Кочетков Денис Александрович
 должность руководителя подразделения или другого уполномоченного лица

Поверитель Артохина Галина Юрьевна
 должность

Дата поверки 10 ноября 2020 г.

Свидетельство о поверке прибора Теплограф

ИЧ РА СС
 ФЕДЕРАЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
 «ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И ИСПЫТАНИЙ В НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ»
 Регистрационный номер в реестре аккредитованных лиц RA.RU.311315

СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПОВЕРКЕ
 №  Действительно до 17 декабря 2021 г.

Средство измерений Термометр многоканальный ТМ 5104Д/В/t1050/ГП
 наименование, тип, модификация средства измерений

регистрационный № 66510-17
 регистрационный номер в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений, присвоенный при утверждении типа заводской (серийный) номер 063-10341
 в составе _____

номер знака предыдущей поверки _____
 поверено в полном объеме _____

в соответствии с см. на обороте
 наименование или обозначение документа, на основании которого выполнена поверка

с применением эталонов: см. на обороте
 регистрационный номер и (или) наименование, тип

при следующих значениях влияющих факторов: атмосферное давление 100,2 кПа;
 относительная влажность воздуха 54,6 %; температура окружающего воздуха 21,4 °С

и на основании результатов первичной (периодической) поверки признано пригодным к применению.

Знак поверки: 

Начальник отдела Кочетков Денис Александрович
 должность руководителя подразделения или другого уполномоченного лица

Поверитель Склянина Валерия Сергеевна
 должность

Дата поверки 18 декабря 2020 г.

Свидетельство о поверке прибора ТМ 5104Д/В/t1050/ГП

ИРСТ
НИЖЕГОРОДСКИЙ
ЦСМ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦИИ,
МЕТРОЛОГИИ И ИСПЫТАНИЙ В НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ»
Регистрационный номер в реестре аккредитованных лиц RA.RU.311315

СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПОВЕРКЕ

№  Действительно до
09 ноября 2021 г.

Средство измерений Лазерный дальномер Bosch GLM 50C
наименование, тип, модификация средства измерений.

регистрационный № 17192
регистрационный номер в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений, присвоенный при утверждении типа

заводской (серийный) номер _____
в составе _____

номер знака предыдущей поверки _____
поверено в полном объеме
наименование единиц величин, диапазонов измерений, на которых поверено средство измерений

в соответствии с _____ см. на обороте
наименование или обозначение документа, на основании которого выполнена поверка

с применением эталонов: см. на обороте
регистрационный номер и (или) наименование, тип

заводской номер, дата, класс или погрешность эталона, применяемых при поверке _____
при следующих значениях влияющих факторов: температура окружающего воздуха: 21,8 °С;
значения влияющих факторов

относительная влажность воздуха: 52,3%; атмосферное давление: 99,5 кПа
значения влияющих факторов

и на основании результатов внеричной (периодической) поверки признано
неужелательное замечание

пригодным к применению.

Знак поверки: 

Начальник отдела Кочетков Денис Александрович
должность руководителя подразделения или другого уполномоченного лица
подпись

Поверитель Артюхина Галина Юрьевна
подпись
подпись

Дата поверки
10 ноября 2020 г.

Свидетельство о поверке прибора
Bosch GLM 50C

ИРСТ
НИЖЕГОРОДСКИЙ
ЦСМ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И
ИСПЫТАНИЙ В НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ»
Регистрационный номер в реестре аккредитованных лиц RA.RU.311315

СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПОВЕРКЕ

№  Действительно до
01 декабря 2021 г.

Средство измерений Термоанометр Testo 405 v1
наименование, тип, модификация средства измерений

регистрационный № 66510-17
регистрационный номер в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений, присвоенный при утверждении типа

заводской (серийный) номер 41542304 807
в составе _____

номер знака предыдущей поверки _____
поверено в полном объеме
наименование единиц величин, диапазонов измерений, на которых поверено средство измерений

в соответствии с _____ см. на обороте
наименование или обозначение документа, на основании которого выполнена поверка

с применением эталонов: 3.1 ЗБН.2348.2017; Излучатель, ОИ АЧТ 50/1500
регистрационный номер и (или) наименование, тип

модификация ОИ АЧТ «Электра», Зап.№ 1502, ГОСТ 8.558-2009 «ГСИ. Государственная
поверочная схема для средств измерений температуры»
заводской номер, дата, класс или погрешность эталона, применяемых при поверке

при следующих значениях влияющих факторов: температура окружающего воздуха 21,6 °С;
значения влияющих факторов

относительная влажность окружающего воздуха 51,3 %; атмосферное давление 102,5 кПа;
напряжение питания 221,5 В
значения влияющих факторов

и на основании результатов внеричной (периодической) поверки признано
неужелательное замечание

пригодным к применению.

Знак поверки: 

Начальник отдела Кочетков Денис Александрович
должность руководителя подразделения или другого уполномоченного лица
подпись

Поверитель Ефимов Дмитрий Анатольевич
подпись
подпись


Дата поверки
02 декабря 2020 г.

Свидетельство о поверке прибора
Testo 405 V1

ИРСТ
НИЖЕГОРОДСКИЙ
ЦСМ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦИИ,
МЕТРОЛОГИИ И ИСПЫТАНИЙ В НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ»
Регистрационный номер в реестре аккредитованных лиц RA.RU.311315

СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПОВЕРКЕ

№  Действительно до
15 декабря 2021 г.

Средство измерений Инфракрасный термометр Testo 830-T4
наименование, тип, модификация средства измерений.

регистрационный № 66510-16
регистрационный номер в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений, присвоенный при утверждении типа

заводской (серийный) номер 42019429
в составе _____

номер знака предыдущей поверки _____
поверено в полном объеме
наименование единиц величин, диапазонов измерений, на которых поверено средство измерений

в соответствии с _____ см. на обороте
наименование или обозначение документа, на основании которого выполнена поверка


с применением эталонов: см. на обороте
регистрационный номер и (или) наименование, тип

заводской номер, дата, класс или погрешность эталона, применяемых при поверке _____
при следующих значениях влияющих факторов: температура окружающего воздуха 21 °С;
значения влияющих факторов

относительная влажность окружающего воздуха 36 %; атмосферное давление 100,6 кПа;
напряжение питания 226 В
значения влияющих факторов

и на основании результатов внеричной (периодической) поверки признано
неужелательное замечание

пригодным к применению.

Знак поверки: 

Начальник отдела Смыслова Татьяна Николаевна
должность руководителя подразделения или другого уполномоченного лица
подпись

Поверитель Гришвина Анна Алексеевна
подпись
подпись

Дата поверки
16 декабря 2020 г.

Свидетельство о поверке прибора
Testo 830-T4

ИРСТИ
НИЖЕГОРОДСКИЙ
ЦСМ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И ИСПЫТАНИЙ В НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ»
Регистрационный номер в реестре аккредитованных лиц RA.RU.311315

СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПОВЕРКЕ
№  20014779422

Действительно до
15 декабря 2021 г.

Средство измерений Термогигрометр Testo 625
наименование, тип, модификация средства измерений

наименование, тип, модификация средства измерений
регистрационный № 66510-16
регистрационный номер в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений, присвоенный при утверждении типа
заводской (серийный) номер 61570591; 61570591
в составе _____

номер знака предыдущей поверки _____
поверено в полном объеме _____
наименование единиц величин, диапазонов измерений, на которых поверено средство измерений

в соответствии с см. на обороте
наименование или обозначение документа, на основании которого выполнено поверение

с применением эталонов: см. на обороте
регистрационный номер и (или) наименование, тип

заводской номер, размер, класс или погрешность эталона, применяемых при поверке
при следующих значениях влияющих факторов: температура окружающего воздуха 21 °С;
перечень влияющих факторов
относительная влажность окружающего воздуха 36 %; атмосферное давление 100,6 кПа;
приведенных в документе на методику поверки, с указанием их значений
напряжение питания 226 В

и на основании результатов первичной (периодической) поверки признано
инициалы зачеркнуть

пригодным к применению.

Знак поверки:  2 01 0 БН

Начальник отдела  Смыслова Татьяна Николаевна
должность руководителя подразделения или другого уполномоченного лица подпись фамилия, имя и отчество (при наличии)

Поверитель  Гришвина Анна Алексеевна
подпись фамилия, имя и отчество (при наличии)

Дата поверки
16 декабря 2020 г.

Свидетельство о поверке прибора
Testo 625

ИРСТИ
НИЖЕГОРОДСКИЙ
ЦСМ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И ИСПЫТАНИЙ В НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ»
Регистрационный номер в реестре аккредитованных лиц RA.RU.311315

СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПОВЕРКЕ
№  20014754266

Действительно до
17 декабря 2021 г.

Средство измерений Поверхностный термометр Testo 905-T2
наименование, тип, модификация средства измерений

наименование, тип, модификация средства измерений
регистрационный № 66515
регистрационный номер в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений, присвоенный при утверждении типа
заводской (серийный) номер 056604053
в составе _____

номер знака предыдущей поверки _____
поверено в полном объеме _____
наименование единиц величин, диапазонов измерений, на которых поверено средство измерений

в соответствии с см. на обороте
наименование или обозначение документа, на основании которого выполнено поверение

с применением эталонов: см. на обороте
регистрационный номер и (или) наименование, тип

заводской номер, размер, класс или погрешность эталона, применяемых при поверке
при следующих значениях влияющих факторов: атмосферное давление 100,2 кПа;
перечень влияющих факторов
относительная влажность воздуха 54,6 %; температура окружающего воздуха 21,4 °С

приведенных в документе на методику поверки, с указанием их значений
и на основании результатов первичной (периодической) поверки признано
инициалы зачеркнуть

пригодным к применению.

Знак поверки:  2 01 0 БН

Начальник отдела  Кочетков Денис Александрович
должность руководителя подразделения или другого уполномоченного лица подпись фамилия, имя и отчество (при наличии)

Поверитель  Склянина Валерия Сергеевна
подпись фамилия, имя и отчество (при наличии)

Дата поверки
18 декабря 2020 г.

Свидетельство о поверке прибора
Testo 905-T2

ИРСТИ
НИЖЕГОРОДСКИЙ
ЦСМ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И ИСПЫТАНИЙ В НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ»
Регистрационный номер в реестре аккредитованных лиц RA.RU.311315

СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПОВЕРКЕ
№  20014746842

Действительно до
01 декабря 2021 г.

Средство измерений Тепловизор инфракрасный Testo 875-2i
наименование, тип, модификация средства измерений

наименование, тип, модификация средства измерений
регистрационный № 51415-12
регистрационный номер в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений, присвоенный при утверждении типа
заводской (серийный) номер 60354776
в составе _____

номер знака предыдущей поверки _____
поверено в полном объеме _____
наименование единиц величин, диапазонов измерений, на которых поверено средство измерений

в соответствии с МП РТ 1772-2012 «Тепловизоры инфракрасные Testo 875-1i, Testo 875-2i. Методика поверки»
наименование или обозначение документа, на основании которого выполнено поверение

с применением эталонов: см. на обороте
регистрационный номер и (или) наименование, тип

заводской номер, размер, класс или погрешность эталона, применяемых при поверке
при следующих значениях влияющих факторов: температура окружающего воздуха 21,6 °С;
перечень влияющих факторов
относительная влажность окружающего воздуха 52,1 %; атмосферное давление 102,5 кПа

приведенных в документе на методику поверки, с указанием их значений
и на основании результатов первичной (периодической) поверки признано
инициалы зачеркнуть

пригодным к применению.

Знак поверки:  2 01 0 БН

Начальник отдела  Кочетков Денис Александрович
должность руководителя подразделения или другого уполномоченного лица подпись фамилия, имя и отчество (при наличии)

Поверитель  Ефимов Дмитрий Анатольевич
подпись фамилия, имя и отчество (при наличии)

Дата поверки
02 декабря 2020 г.

Свидетельство о поверке прибора
Testo 875-2i

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Таблица Д1 – Определение удельной мощности излучателя марки Helios 750

№ опыта п/п	N, шт	T ₁ , °C	T ₂ , °C	G ₁ , кг/ч	G ₂ , кг/ч	c _{T₁} , кДж/кг·°C	c _{T₂} , кДж/кг·°C	Q _{общ} , Вт	Q _{тр} , Вт	q _{изл} , Вт/п.м	t _в , °C	ΔT, °C
1.1	6	31,09	28,65	261,95	263,01	4,178	4,179	704,44	523,21	30,21	22,93	6,94
1.2	6	30,95	28,79	263,82	261,01	4,178	4,179	753,15	514,07	39,85	23,02	6,85
1.3	6	30,96	28,81	262,45	262,04	4,178	4,179	666,48	532,45	22,34	23,34	6,55
2.1	6	40,02	36,51	269,81	268,18	4,179	4,178	1171,15	672,01	83,19	23,12	15,15
2.2	6	40,10	36,70	270,02	268,30	4,179	4,178	1141,74	678,55	77,20	23,18	15,22
2.3	6	40,33	36,62	270,02	268,33	4,179	4,178	1237,46	682,31	92,53	24,21	14,27
3.1	6	51,23	46,11	272,48	269,40	4,181	4,179	1792,09	852,25	156,64	23,93	24,74
3.2	6	51,38	46,27	272,41	269,56	4,181	4,179	1776,75	871,23	150,92	23,54	25,29
3.3	6	51,37	45,99	272,56	269,50	4,181	4,179	1873,36	870,41	167,16	23,34	25,34
4.1	6	61,82	55,21	273,81	268,35	4,185	4,180	2475,00	1025,95	241,51	25,00	33,52
4.2	6	61,68	55,61	273,95	268,44	4,185	4,180	2310,03	1049,36	210,11	25,55	33,10
4.3	6	61,70	55,49	273,84	268,46	4,185	4,180	2344,62	1056,52	214,68	25,94	32,66
5.1	6	69,93	62,89	278,95	271,15	4,190	4,183	2889,75	1168,95	286,80	25,21	41,20
5.2	6	69,85	62,83	279,02	271,25	4,190	4,183	2881,07	1169,56	285,25	25,59	40,75
5.3	6	70,00	62,75	278,97	271,22	4,190	4,183	2953,11	1196,52	292,76	25,99	40,39

Таблица Д2 – Определение удельной мощности излучателя марки Flower 125

№ опыта п/п	N, шт	T ₁ , °C	T ₂ , °C	G ₁ , кг/ч	G ₂ , кг/ч	c _{T₁} , кДж/кг·°C	c _{T₂} , кДж/кг·°C	Q _{общ} , Вт	Q _{тр} , Вт	q _{изл} , Вт/п.м	t _в , °C	ΔT, °C
1.1	6	29,91	28,10	203,85	196,85	4,178	4,179	654,95	523,39	21,93	23,15	5,86
1.2	6	29,98	28,16	203,81	196,86	4,178	4,179	656,08	514,07	23,67	23,08	5,99
1.3	6	29,95	28,21	203,65	196,92	4,178	4,179	630,04	532,45	16,26	23,08	6,00
2.1	6	43,36	39,79	210,35	202,46	4,179	4,178	1238,40	743,26	82,52	23,15	18,43
2.2	6	43,29	39,73	210,39	202,45	4,179	4,178	1237,88	754,18	80,62	23,72	17,79
2.3	6	43,32	39,68	210,55	202,39	4,179	4,178	1267,76	772,55	82,54	23,63	17,87
3.1	6	50,91	46,63	236,25	228,25	4,181	4,179	1613,50	889,10	120,73	23,42	25,35
3.2	6	50,84	46,57	236,29	228,24	4,181	4,179	1613,09	894,09	119,83	23,62	25,09
3.3	6	50,87	46,52	236,45	228,18	4,181	4,179	1647,26	882,41	127,48	23,75	24,95
4.1	6	59,82	54,68	252,74	244,97	4,185	4,180	2022,69	1024,55	166,36	25,96	31,29
4.2	6	59,75	54,62	252,78	244,96	4,185	4,180	2022,60	1094,01	154,77	25,22	31,97
4.3	6	59,78	54,57	252,94	244,90	4,185	4,180	2060,56	1062,48	166,35	25,33	31,85
5.1	6	69,97	63,94	269,15	260,36	4,190	4,183	2575,48	1223,26	225,37	25,93	41,03
5.2	6	69,90	63,88	269,19	260,35	4,190	4,183	2575,70	1214,25	226,91	25,02	41,87
5.3	6	69,93	63,83	269,35	260,29	4,190	4,183	2617,69	1232,98	230,79	25,85	41,03

Таблица ДЗ – Экспериментальное измерение плотности потока тепловой энергии для Helios 750

№ опыта п/п	$l_x, \text{ м}$	$E_{\text{изл}}, \text{ Вт/м}^2$			
		$T_1 = 60 \text{ }^\circ\text{C}; \tau_{\text{изл}} = 56,2 \text{ }^\circ\text{C}$		$T_1 = 90 \text{ }^\circ\text{C}; \tau_{\text{изл}} = 88,7 \text{ }^\circ\text{C}$	
		$\varphi_x = 0^\circ$	$\varphi_x = 90^\circ$	$\varphi_x = 0^\circ$	$\varphi_x = 90^\circ$
1	2	3	4	5	6
1.1	0,1	94,8	90,2	145,8	145,6
1.2	0,1	95,1	90,5	145,9	145,5
1.3	0,1	95,0	90,7	145,3	145,5
2.1	0,2	83,7	71,3	114,7	112,3
2.2	0,2	83,4	71,0	114,4	112,0
2.3	0,2	83,5	71,1	114,5	112,1
3.1	0,3	55,2	61,8	95,7	93,4
3.2	0,3	54,9	61,5	95,4	93,1
3.3	0,3	55,0	61,6	95,5	93,2
4.1	0,4	41,7	50,9	81,8	78,4
4.2	0,4	41,4	50,6	81,5	78,1
4.3	0,4	41,5	50,7	81,6	78,2
5.1	0,5	32,5	43,3	69,6	64,0
5.2	0,5	32,2	43,0	69,3	63,7
5.3	0,5	32,3	43,1	69,4	63,8
6.1	0,6	26,7	36,4	58,5	54,4
6.2	0,6	26,4	36,1	58,2	54,1
6.3	0,6	26,5	36,2	58,3	54,2
7.1	0,7	24,2	32,2	51,7	48,2
7.2	0,7	23,9	31,9	51,4	47,9
7.3	0,7	24,0	32,0	51,5	48,0
8.1	0,8	20,2	28,5	45,8	41,3
8.2	0,8	19,9	28,2	45,5	41,0
8.3	0,8	20,0	28,3	45,6	41,1
9.1	0,9	17,4	25,0	40,1	37,7
9.2	0,9	17,1	24,7	39,8	37,4
9.3	0,9	17,2	24,8	39,9	37,5
10.1	1,0	16,5	22,6	38,3	33,0
10.2	1,0	16,2	22,3	38,0	32,7
10.3	1,0	16,3	22,4	38,1	32,8
11.1	1,1	16,2	18,4	29,5	28,0
11.2	1,1	15,9	18,1	29,2	27,7
11.3	1,1	16,0	18,2	29,3	27,8
12.1	1,2	16,2	16,2	24,8	24,7
12.2	1,2	15,9	15,9	24,5	24,4
12.3	1,2	16,0	16,0	24,6	24,5
13.1	1,3	16,2	12,4	19,8	19,2
13.2	1,3	15,9	12,1	19,5	18,9
13.3	1,3	16,0	12,2	19,6	19,0
14.1	1,4	15,7	10,3	16,5	17,5
14.2	1,4	15,4	10,0	16,2	17,2
14.3	1,4	15,5	10,1	16,3	17,3
15.1	1,5	14,7	8,9	14,2	14,5
15.2	1,5	14,4	8,6	13,9	14,2

1	2	3	4	5	6
15.3	1,5	14,5	8,7	14,0	14,3
16.1	1,6	13,7	7,3	11,6	11,5
16.2	1,6	13,4	7,0	11,3	11,2
16.3	1,6	13,5	7,1	11,4	11,3
17.1	1,7	13,7	6,7	10,7	10,4
17.2	1,7	13,4	6,4	10,4	10,1
17.3	1,7	13,5	6,5	10,5	10,2
18.1	1,8	12,9	5,2	8,3	8,8
18.2	1,8	12,6	4,9	8,0	8,5
18.3	1,8	12,7	5,0	8,1	8,6
19.1	1,9	12,3	4,3	6,8	7,6
19.2	1,9	12,0	4,0	6,5	7,3
19.3	1,9	12,1	4,1	6,6	7,4
20.1	2,0	11,6	4,2	6,6	6,8
20.2	2,0	11,3	3,9	6,3	6,5
20.3	2,0	11,4	4,0	6,4	6,6

Таблица Д4 – Экспериментальное измерение плотности потока тепловой энергии для Flower 125

№ опыта п/п	l_x , м	$E_{изл}$, Вт/м ²			
		$T_1 = 60$ °С; $\tau_{изл} = 56,2$ °С		$T_1 = 90$ °С; $\tau_{изл} = 88,7$ °С	
		$\varphi_x = 0^\circ$	$\varphi_x = 90^\circ$	$\varphi_x = 0^\circ$	$\varphi_x = 90^\circ$
1	2	3	4	5	6
1.1	0,1	66,9	65,4	103,2	101,1
1.2	0,1	66,7	65,1	103,0	101,2
1.3	0,1	67,0	65,1	103,0	100,9
2.1	0,2	50,6	49,1	80,7	78,5
2.2	0,2	50,8	49,3	80,9	78,7
2.3	0,2	50,5	49,0	80,6	78,4
3.1	0,3	42,2	40,8	67,6	65,2
3.2	0,3	42,4	41,0	67,8	65,4
3.3	0,3	42,1	40,7	67,5	65,1
4.1	0,4	36,6	34,9	56,1	54,0
4.2	0,4	36,8	35,1	56,3	54,2
4.3	0,4	36,5	34,8	56,0	53,9
5.1	0,5	28,3	26,8	46,9	44,7
5.2	0,5	28,5	27,0	47,1	44,9
5.3	0,5	28,2	26,7	46,8	44,6
6.1	0,6	24,5	23,1	40,3	37,9
6.2	0,6	24,7	23,3	40,5	38,1
6.3	0,6	24,4	23,0	40,2	37,8
7.1	0,7	23,1	21,4	34,9	32,8
7.2	0,7	23,3	21,6	35,1	33,0
7.3	0,7	23,0	21,3	34,8	32,7
8.1	0,8	19,8	18,3	31,0	28,8
8.2	0,8	20,0	18,5	31,2	29,0
8.3	0,8	19,7	18,2	30,9	28,7

1	2	3	4	5	6
9.1	0,9	17,2	15,8	28,7	26,3
9.2	0,9	17,4	16,0	28,9	26,5
9.3	0,9	17,1	15,7	28,6	26,2
10.1	1,0	16,8	15,1	24,6	22,5
10.2	1,0	17,0	15,3	24,8	22,7
10.3	1,0	16,7	15,0	24,5	22,4
11.1	1,1	13,9	12,4	21,7	19,5
11.2	1,1	14,1	12,6	21,9	19,7
11.3	1,1	13,8	12,3	21,6	19,4
12.1	1,2	12,0	10,6	19,6	17,2
12.2	1,2	12,2	10,8	19,8	17,4
12.3	1,2	11,9	10,5	19,5	17,1
13.1	1,3	10,2	8,5	15,4	13,3
13.2	1,3	10,4	8,7	15,6	13,5
13.3	1,3	10,1	8,4	15,3	13,2
14.1	1,4	9,0	7,5	14,3	12,1
14.2	1,4	9,2	7,7	14,5	12,3
14.3	1,4	8,9	7,4	14,2	12,0
15.1	1,5	7,8	6,4	12,1	9,7
15.2	1,5	8,0	6,6	12,3	9,9
15.3	1,5	7,7	6,3	12,0	9,6
16.1	1,6	6,7	5,0	10,0	7,9
16.2	1,6	6,9	5,2	10,2	8,1
16.3	1,6	6,6	4,9	9,9	7,8
17.1	1,7	6,3	4,8	9,2	7,0
17.2	1,7	6,5	5,0	9,4	7,2
17.3	1,7	6,2	4,7	9,1	6,9
18.1	1,8	5,3	3,9	8,4	6,0
18.2	1,8	5,5	4,1	8,6	6,2
18.3	1,8	5,2	3,8	8,3	5,9
19.1	1,9	5,0	3,3	7,3	5,2
19.2	1,9	5,2	3,5	7,5	5,4
19.3	1,9	4,9	3,2	7,2	5,1
20.1	2,0	4,4	2,9	6,8	4,6
20.2	2,0	4,6	3,1	7,0	4,8
20.3	2,0	4,3	2,8	6,7	4,5

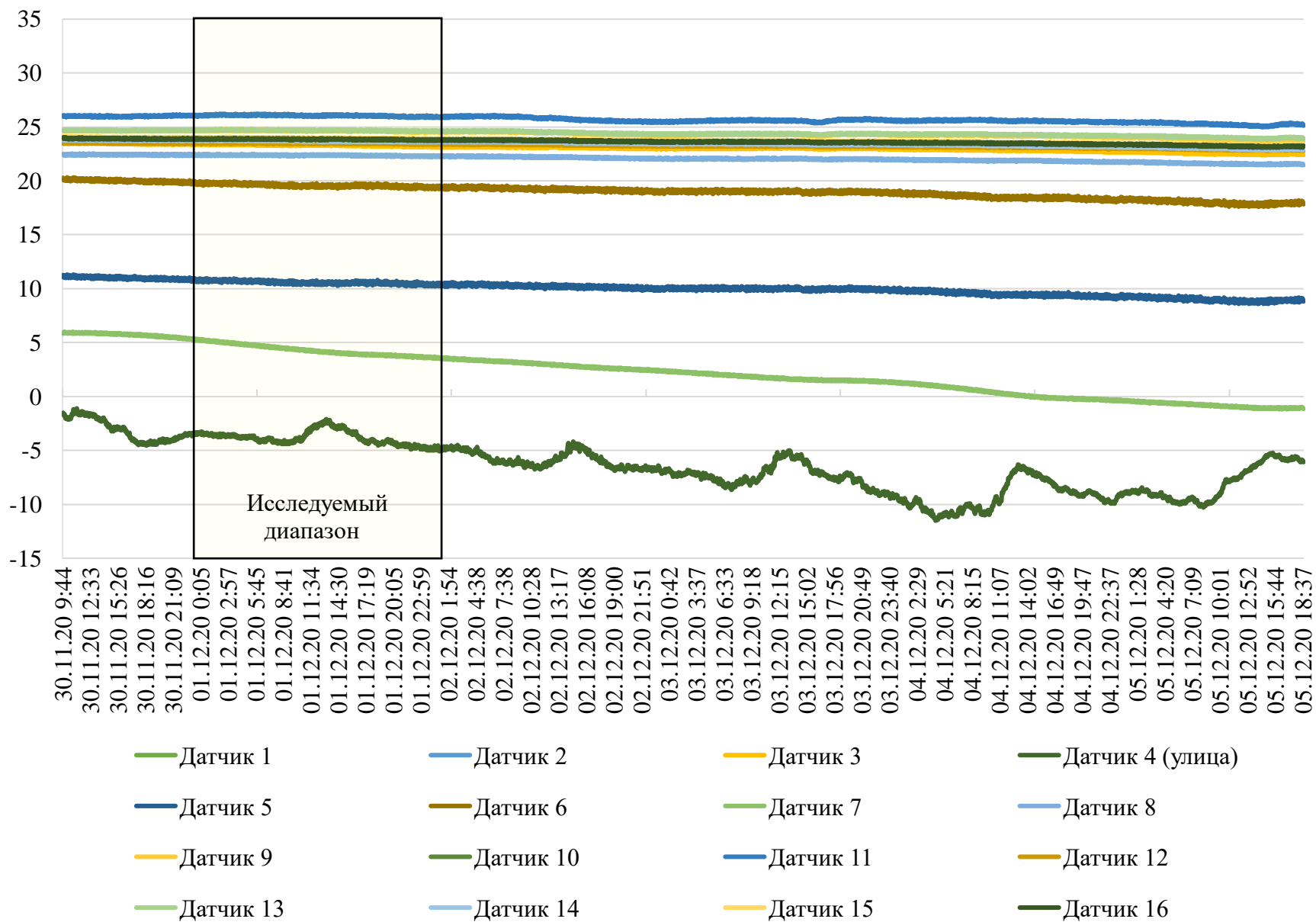


Рисунок Д1 – Показания датчиков 1-16 в ходе 1 этапа эксперимента (30.11.2020 – 05.12.2020)

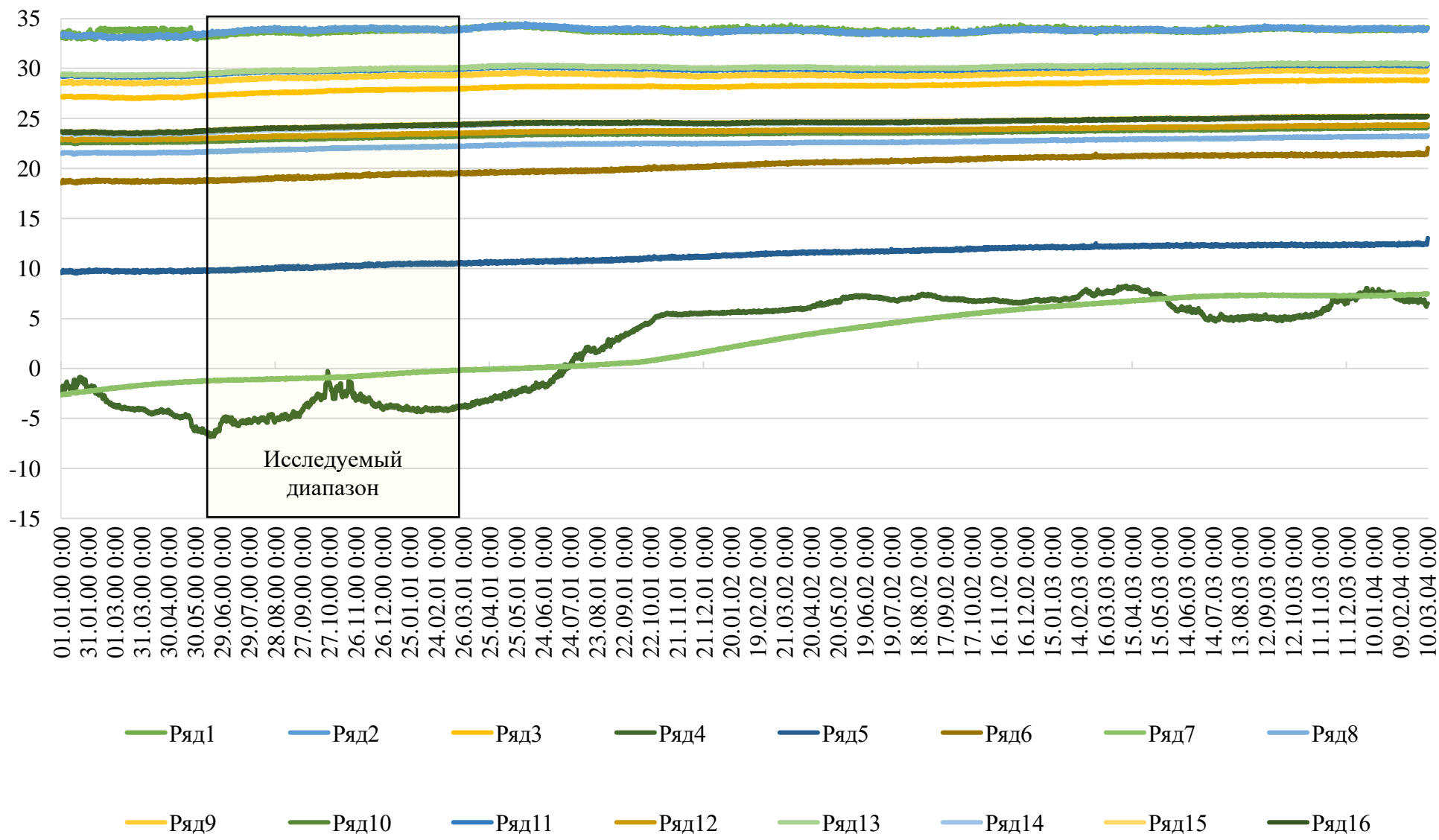


Рисунок Д2 – Показания датчиков 1-16 в ходе 2 этапа эксперимента (21.01.2021 – 26.01.2021)

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАСЧЁТА

Таблица Е1 – Нахождение удельной теплозащитной характеристики

δ , м	$A_{ст}$, м ²	$A_{ок}$, м ²	$A_{кр}$, м ²	$A_{пол}$, м ²	$R_{ст}$, м ² ·°С/ Вт	$R_{ок}$, м ² ·°С/ Вт	$R_{пол}$, м ² ·°С/ Вт	$R_{кр}$, м ² ·°С/ Вт	$V_{от}$, м ³	$k_{об}$, Вт/ (м ³ ·°С)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	2484	556	4032	4032	0,690	0,38	2,063	3,82	36288	0,206
0,01	2484	556	4032	4032	0,940	0,38	2,063	3,82	36288	0,184
0,02	2484	556	4032	4032	1,190	0,38	2,063	3,82	36288	0,171
0,03	2484	556	4032	4032	1,440	0,38	2,063	3,82	36288	0,162
0,04	2484	556	4032	4032	1,690	0,38	2,063	3,82	36288	0,156
0,05	2484	556	4032	4032	1,940	0,38	2,063	3,82	36288	0,152
0,06	2484	556	4032	4032	2,190	0,38	2,063	3,82	36288	0,148
0,07	2484	556	4032	4032	2,440	0,38	2,063	3,82	36288	0,146
0,08	2484	556	4032	4032	2,690	0,38	2,063	3,82	36288	0,144
0,09	2484	556	4032	4032	2,940	0,38	2,063	3,82	36288	0,142
0,1	2484	556	4032	4032	3,190	0,38	2,063	3,82	36288	0,140
0,11	2484	556	4032	4032	3,440	0,38	2,063	3,82	36288	0,139
0,12	2484	556	4032	4032	3,690	0,38	2,063	3,82	36288	0,138
0,13	2484	556	4032	4032	3,940	0,38	2,063	3,82	36288	0,137
0,14	2484	556	4032	4032	4,190	0,38	2,063	3,82	36288	0,136
0,15	2484	556	4032	4032	4,440	0,38	2,063	3,82	36288	0,135
0,16	2484	556	4032	4032	4,690	0,38	2,063	3,82	36288	0,134
0,17	2484	556	4032	4032	4,940	0,38	2,063	3,82	36288	0,134
0,18	2484	556	4032	4032	5,190	0,38	2,063	3,82	36288	0,133
0,19	2484	556	4032	4032	5,440	0,38	2,063	3,82	36288	0,133
0,2	2484	556	4032	4032	5,690	0,38	2,063	3,82	36288	0,132
0,21	2484	556	4032	4032	5,940	0,38	2,063	3,82	36288	0,132
0,22	2484	556	4032	4032	6,190	0,38	2,063	3,82	36288	0,131
0,23	2484	556	4032	4032	6,440	0,38	2,063	3,82	36288	0,131
0,24	2484	556	4032	4032	6,690	0,38	2,063	3,82	36288	0,131
0,25	2484	556	4032	4032	6,940	0,38	2,063	3,82	36288	0,130
0,26	2484	556	4032	4032	7,190	0,38	2,063	3,82	36288	0,130
0,27	2484	556	4032	4032	7,440	0,38	2,063	3,82	36288	0,130
0,28	2484	556	4032	4032	7,690	0,38	2,063	3,82	36288	0,130
0,29	2484	556	4032	4032	7,940	0,38	2,063	3,82	36288	0,129
0,3	2484	556	4032	4032	8,190	0,38	2,063	3,82	36288	0,129

Таблица Е2 – Расчет срока окупаемости капитальных вложений на утепление здания для г. Заволжье

δ , м	$k_{об}$, Вт/(м ³ ·°С)	$Q_{тп}$, МВ·ч/год	Э, руб./год	ΔЭ, тыс. руб./год	$V_{изол}$, м ³	$K_{ут}$, руб.	$K_{раб}$, руб.	ΣK , руб.	T_o , лет	$T_{ок}$, лет
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0,206	735	927323	-	-	-	-	-	-	-
0,01	0,184	655	826798	101	65,16	521280	2000412	2521692	25,09	25,31
0,02	0,171	609	768499	159	130,32	1042560	2000412	3042972	19,16	19,29
0,03	0,162	579	730438	197	195,48	1563840	2000412	3564252	18,10	18,22
0,04	0,156	558	703635	224	260,64	2085120	2000412	4085532	18,26	18,38
0,05	0,152	542	683739	244	325,80	2606400	2000412	4606812	18,91	19,04
0,06	0,148	530	668384	259	390,96	3127680	2000412	5128092	19,80	19,94
0,07	0,146	520	656176	271	456,12	3648960	2000412	5649372	20,84	20,99
0,08	0,144	512	646237	281	521,28	4170240	2000412	6170652	21,95	22,12
0,09	0,142	506	637988	289	586,44	4691520	2000412	6691932	23,13	23,32
0,1	0,140	500	631031	296	651,60	5212800	2000412	7213212	24,34	24,56
0,11	0,139	495	625086	302	716,76	5734080	2000412	7734492	25,59	25,82
0,12	0,138	491	619946	307	781,92	6255360	2000412	8255772	26,86	27,11
0,13	0,137	488	615458	312	847,08	6776640	2000412	8777052	28,14	28,42
0,14	0,136	485	611506	316	912,24	7297920	2000412	9298332	29,44	29,75
0,15	0,135	482	607999	319	977,40	7819200	2000412	9819612	30,75	31,09
0,16	0,134	479	604866	322	1042,56	8340480	2000412	10340892	32,07	32,43
0,17	0,134	477	602050	325	1107,72	8861760	2000412	10862172	33,39	33,79
0,18	0,133	475	599505	328	1172,88	9383040	2000412	11383452	34,72	35,15
0,19	0,133	473	597194	330	1238,04	9904320	2000412	11904732	36,06	36,52
0,2	0,132	472	595086	332	1303,20	10425600	2000412	12426012	37,40	37,89
0,21	0,132	470	593155	334	1368,36	10946880	2000412	12947292	38,74	39,27
0,22	0,131	469	591381	336	1433,52	11468160	2000412	13468572	40,09	40,66
0,23	0,131	467	589744	338	1498,68	11989440	2000412	13989852	41,44	42,05
0,24	0,131	466	588229	339	1563,84	12510720	2000412	14511132	42,79	43,44
0,25	0,130	465	586824	340	1629,00	13032000	2000412	15032412	44,15	44,83

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,26	0,130	464	585516	342	1694,16	13553280	2000412	15553692	45,50	46,23
0,27	0,130	463	584297	343	1759,32	14074560	2000412	16074972	46,86	47,64
0,28	0,130	462	583156	344	1824,48	14595840	2000412	16596252	48,22	49,04
0,29	0,129	461	582088	345	1889,64	15117120	2000412	17117532	49,58	50,45
0,3	0,129	460	581084	346	1954,80	15638400	2000412	17638812	50,94	51,86

Таблица Е3 – Расчет срока окупаемости капитальных вложений на утепление здания для г. Хабаровск

δ , м	$k_{об}$, Вт/(м ³ ·°С)	$Q_{тп}$, МВ·ч/год	\mathcal{E} , руб./год	$\Delta\mathcal{E}$, тыс. руб./год	$V_{изол}$, м ³	$K_{ут}$, руб.	$K_{раб}$, руб.	ΣK , руб.	$T_о$, лет	$T_{ок}$, лет
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0,206	933	2290400	-	-	-	-	-	-	-
0,01	0,184	832	2042113	248	65,16	521280	2000412	2521692	10,16	10,19
0,02	0,171	773	1898119	392	130,32	1042560	2000412	3042972	7,76	7,78
0,03	0,162	735	1804111	486	195,48	1563840	2000412	3564252	7,33	7,35
0,04	0,156	708	1737911	552	260,64	2085120	2000412	4085532	7,39	7,42
0,05	0,152	688	1688770	602	325,80	2606400	2000412	4606812	7,66	7,68
0,06	0,148	673	1650846	640	390,96	3127680	2000412	5128092	8,02	8,04
0,07	0,146	660	1620693	670	456,12	3648960	2000412	5649372	8,44	8,46
0,08	0,144	650	1596143	694	521,28	4170240	2000412	6170652	8,89	8,92
0,09	0,142	642	1575768	715	586,44	4691520	2000412	6691932	9,36	9,40
0,1	0,140	635	1558587	732	651,60	5212800	2000412	7213212	9,86	9,89
0,11	0,139	629	1543902	746	716,76	5734080	2000412	7734492	10,36	10,40
0,12	0,138	624	1531207	759	781,92	6255360	2000412	8255772	10,87	10,92
0,13	0,137	619	1520123	770	847,08	6776640	2000412	8777052	11,39	11,44

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,14	0,136	615	1510362	780	912,24	7297920	2000412	9298332	11,92	11,97
0,15	0,135	612	1501700	789	977,40	7819200	2000412	9819612	12,45	12,51
0,16	0,134	609	1493961	796	1042,56	8340480	2000412	10340892	12,98	13,05
0,17	0,134	606	1487005	803	1107,72	8861760	2000412	10862172	13,52	13,59
0,18	0,133	603	1480720	810	1172,88	9383040	2000412	11383452	14,06	14,13
0,19	0,133	601	1475012	815	1238,04	9904320	2000412	11904732	14,60	14,68
0,2	0,132	599	1469805	821	1303,20	10425600	2000412	12426012	15,14	15,23
0,21	0,132	597	1465037	825	1368,36	10946880	2000412	12947292	15,69	15,78
0,22	0,131	595	1460654	830	1433,52	11468160	2000412	13468572	16,23	16,33
0,23	0,131	593	1456611	834	1498,68	11989440	2000412	13989852	16,78	16,88
0,24	0,131	592	1452871	838	1563,84	12510720	2000412	14511132	17,33	17,43
0,25	0,130	591	1449400	841	1629,00	13032000	2000412	15032412	17,87	17,99
0,26	0,130	589	1446170	844	1694,16	13553280	2000412	15553692	18,42	18,55
0,27	0,130	588	1443157	847	1759,32	14074560	2000412	16074972	18,97	19,10
0,28	0,130	587	1440340	850	1824,48	14595840	2000412	16596252	19,52	19,66
0,29	0,129	586	1437701	853	1889,64	15117120	2000412	17117532	20,07	20,22
0,3	0,129	585	1435223	855	1954,80	15638400	2000412	17638812	20,63	20,78

Таблица Е4 – Расчет срока окупаемости капитальных вложений на утепление здания для г. Орск

δ , м	$k_{об}$, Вт/(м ³ ·°С)	$Q_{тп}$, МВ·ч/год	\mathcal{E} , руб./год	$\Delta\mathcal{E}$, тыс. руб./год	$V_{изол}$, м ³	$K_{ут}$, руб.	$K_{раб}$, руб.	$\sum K$, руб.	$T_о$, лет	$T_{ок}$, лет
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0,206	846	1265729	-	-	-	-	-	-	-
0,01	0,184	754	1128520	137	65,16	521280	2000412	2521692	18,38	18,50

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,02	0,171	701	1048945	217	130,32	1042560	2000412	3042972	14,04	14,11
0,03	0,162	666	996995	269	195,48	1563840	2000412	3564252	13,26	13,33
0,04	0,156	642	960411	305	260,64	2085120	2000412	4085532	13,38	13,45
0,05	0,152	624	933254	332	325,80	2606400	2000412	4606812	13,86	13,93
0,06	0,148	610	912297	353	390,96	3127680	2000412	5128092	14,51	14,59
0,07	0,146	599	895633	370	456,12	3648960	2000412	5649372	15,26	15,35
0,08	0,144	589	882066	384	521,28	4170240	2000412	6170652	16,08	16,18
0,09	0,142	582	870807	395	586,44	4691520	2000412	6691932	16,94	17,05
0,1	0,140	576	861312	404	651,60	5212800	2000412	7213212	17,84	17,95
0,11	0,139	570	853197	413	716,76	5734080	2000412	7734492	18,75	18,87
0,12	0,138	565	846181	420	781,92	6255360	2000412	8255772	19,68	19,82
0,13	0,137	561	840056	426	847,08	6776640	2000412	8777052	20,62	20,77
0,14	0,136	558	834662	431	912,24	7297920	2000412	9298332	21,57	21,74
0,15	0,135	555	829875	436	977,40	7819200	2000412	9819612	22,53	22,71
0,16	0,134	552	825598	440	1042,56	8340480	2000412	10340892	23,50	23,69
0,17	0,134	549	821754	444	1107,72	8861760	2000412	10862172	24,47	24,68
0,18	0,133	547	818281	447	1172,88	9383040	2000412	11383452	25,44	25,67
0,19	0,133	545	815126	451	1238,04	9904320	2000412	11904732	26,42	26,67
0,2	0,132	543	812249	453	1303,20	10425600	2000412	12426012	27,40	27,67
0,21	0,132	541	809614	456	1368,36	10946880	2000412	12947292	28,39	28,67
0,22	0,131	539	807192	459	1433,52	11468160	2000412	13468572	29,37	29,68
0,23	0,131	538	804958	461	1498,68	11989440	2000412	13989852	30,36	30,69
0,24	0,131	537	802891	463	1563,84	12510720	2000412	14511132	31,35	31,70
0,25	0,130	535	800973	465	1629,00	13032000	2000412	15032412	32,34	32,71
0,26	0,130	534	799188	467	1694,16	13553280	2000412	15553692	33,34	33,73
0,27	0,130	533	797523	468	1759,32	14074560	2000412	16074972	34,33	34,75
0,28	0,130	532	795966	470	1824,48	14595840	2000412	16596252	35,33	35,77

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,29	0,129	531	794508	471	1889,64	15117120	2000412	17117532	36,33	36,79
0,3	0,129	530	793138	473	1954,80	15638400	2000412	17638812	37,32	37,81

Таблица Е5 – Расчет срока окупаемости капитальных вложений на утепление здания для г. Красноярск

δ , м	$k_{об}$, Вт/(м ³ ·°С)	$Q_{тп}$, МВ·ч/год	\mathcal{E} , руб./год	$\Delta\mathcal{E}$, тыс. руб./год	$V_{изол}$, м ³	$K_{ут}$, руб.	$K_{раб}$, руб.	ΣK , руб.	T_o , лет	$T_{ок}$, лет
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0,206	949	753389	-	-	-	-	-	-	-
0,01	0,184	846	671719	82	65,16	521280	2000412	2521692	30,88	31,21
0,02	0,171	786	624355	129	130,32	1042560	2000412	3042972	23,58	23,78
0,03	0,162	747	593432	160	195,48	1563840	2000412	3564252	22,28	22,46
0,04	0,156	720	571657	182	260,64	2085120	2000412	4085532	22,48	22,66
0,05	0,152	700	555493	198	325,80	2606400	2000412	4606812	23,28	23,47
0,06	0,148	684	543018	210	390,96	3127680	2000412	5128092	24,38	24,59
0,07	0,146	671	533100	220	456,12	3648960	2000412	5649372	25,65	25,88
0,08	0,144	661	525025	228	521,28	4170240	2000412	6170652	27,02	27,28
0,09	0,142	653	518323	235	586,44	4691520	2000412	6691932	28,47	28,76
0,1	0,140	646	512671	241	651,60	5212800	2000412	7213212	29,97	30,28
0,11	0,139	640	507841	246	716,76	5734080	2000412	7734492	31,50	31,85
0,12	0,138	634	503665	250	781,92	6255360	2000412	8255772	33,06	33,45
0,13	0,137	630	500019	253	847,08	6776640	2000412	8777052	34,64	35,06
0,14	0,136	626	496808	257	912,24	7297920	2000412	9298332	36,24	36,70
0,15	0,135	622	493959	259	977,40	7819200	2000412	9819612	37,85	38,36
0,16	0,134	619	491414	262	1042,56	8340480	2000412	10340892	39,47	40,02

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,17	0,134	616	489126	264	1107,72	8861760	2000412	10862172	41,10	41,70
0,18	0,133	613	487058	266	1172,88	9383040	2000412	11383452	42,74	43,39
0,19	0,133	611	485181	268	1238,04	9904320	2000412	11904732	44,39	45,08
0,2	0,132	609	483468	270	1303,20	10425600	2000412	12426012	46,04	46,78
0,21	0,132	607	481900	271	1368,36	10946880	2000412	12947292	47,69	48,49
0,22	0,131	605	480458	273	1433,52	11468160	2000412	13468572	49,35	50,21
0,23	0,131	603	479128	274	1498,68	11989440	2000412	13989852	51,01	51,93
0,24	0,131	602	477898	275	1563,84	12510720	2000412	14511132	52,67	53,65
0,25	0,130	600	476756	277	1629,00	13032000	2000412	15032412	54,34	55,38
0,26	0,130	599	475694	278	1694,16	13553280	2000412	15553692	56,01	57,12
0,27	0,130	598	474703	279	1759,32	14074560	2000412	16074972	57,68	58,85
0,28	0,130	597	473776	280	1824,48	14595840	2000412	16596252	59,35	60,60
0,29	0,129	596	472908	280	1889,64	15117120	2000412	17117532	61,03	62,34
0,3	0,129	594	472093	281	1954,80	15638400	2000412	17638812	62,71	64,09

Таблица Е6 – Расчет срока окупаемости капитальных вложений на утепление здания для г. Сургут

δ , м	$k_{об}$, Вт/(м ³ ·°С)	$Q_{тп}$, МВ·ч/год	\mathcal{E} , руб./год	$\Delta\mathcal{E}$, тыс. руб./год	$V_{изол}$, м ³	$K_{ут}$, руб.	$K_{раб}$, руб.	ΣK , руб.	T_o , лет	$T_{ок}$, лет
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0,206	1153	1719861	-	-	-	-	-	-	-
0,01	0,184	1028	1533423	186	65,16	521280	2000412	2521692	13,53	13,59
0,02	0,171	955	1425298	295	130,32	1042560	2000412	3042972	10,33	10,37
0,03	0,162	908	1354707	365	195,48	1563840	2000412	3564252	9,76	9,80
0,04	0,156	875	1304997	415	260,64	2085120	2000412	4085532	9,85	9,88

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,05	0,152	850	1268097	452	325,80	2606400	2000412	4606812	10,20	10,24
0,06	0,148	831	1239620	480	390,96	3127680	2000412	5128092	10,68	10,72
0,07	0,146	816	1216978	503	456,12	3648960	2000412	5649372	11,23	11,28
0,08	0,144	803	1198544	521	521,28	4170240	2000412	6170652	11,84	11,89
0,09	0,142	793	1183245	537	586,44	4691520	2000412	6691932	12,47	12,53
0,1	0,140	784	1170343	550	651,60	5212800	2000412	7213212	13,13	13,19
0,11	0,139	777	1159316	561	716,76	5734080	2000412	7734492	13,80	13,87
0,12	0,138	771	1149784	570	781,92	6255360	2000412	8255772	14,48	14,56
0,13	0,137	765	1141461	578	847,08	6776640	2000412	8777052	15,17	15,26
0,14	0,136	760	1134131	586	912,24	7297920	2000412	9298332	15,87	15,97
0,15	0,135	756	1127626	592	977,40	7819200	2000412	9819612	16,58	16,68
0,16	0,134	752	1121815	598	1042,56	8340480	2000412	10340892	17,29	17,40
0,17	0,134	748	1116592	603	1107,72	8861760	2000412	10862172	18,01	18,12
0,18	0,133	745	1111872	608	1172,88	9383040	2000412	11383452	18,72	18,85
0,19	0,133	742	1107586	612	1238,04	9904320	2000412	11904732	19,44	19,58
0,2	0,132	740	1103677	616	1303,20	10425600	2000412	12426012	20,17	20,31
0,21	0,132	737	1100096	620	1368,36	10946880	2000412	12947292	20,89	21,05
0,22	0,131	735	1096805	623	1433,52	11468160	2000412	13468572	21,62	21,78
0,23	0,131	733	1093770	626	1498,68	11989440	2000412	13989852	22,34	22,52
0,24	0,131	731	1090961	629	1563,84	12510720	2000412	14511132	23,07	23,26
0,25	0,130	730	1088354	632	1629,00	13032000	2000412	15032412	23,80	24,01
0,26	0,130	728	1085929	634	1694,16	13553280	2000412	15553692	24,54	24,75
0,27	0,130	726	1083667	636	1759,32	14074560	2000412	16074972	25,27	25,49
0,28	0,130	725	1081552	638	1824,48	14595840	2000412	16596252	26,00	26,24
0,29	0,129	724	1079570	640	1889,64	15117120	2000412	17117532	26,73	26,99
0,3	0,129	722	1077709	642	1954,80	15638400	2000412	17638812	27,47	27,74

Таблица Е7 – Расчет срока окупаемости капитальных вложений на утепление здания для г. Якутск

δ , м	$k_{об}$, Вт/(м ³ ·°С)	$Q_{тп}$, МВ·ч/год	Э, руб./год	$\Delta Э$, тыс. руб./год	$V_{изол}$, м ³	$K_{ут}$, руб.	$K_{раб}$, руб.	ΣK , руб.	T_o , лет	$T_{ок}$, лет
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0,206	1655	4900305	-	-	-	-	-	-	-
0,01	0,184	1475	4369096	531	65,16	521280	2000412	2521692	4,75	4,76
0,02	0,171	1371	4061021	839	130,32	1042560	2000412	3042972	3,63	3,63
0,03	0,162	1303	3859891	1040	195,48	1563840	2000412	3564252	3,43	3,43
0,04	0,156	1255	3718256	1182	260,64	2085120	2000412	4085532	3,46	3,46
0,05	0,152	1220	3613118	1287	325,80	2606400	2000412	4606812	3,58	3,58
0,06	0,148	1193	3531981	1368	390,96	3127680	2000412	5128092	3,75	3,75
0,07	0,146	1171	3467468	1433	456,12	3648960	2000412	5649372	3,94	3,95
0,08	0,144	1153	3414944	1485	521,28	4170240	2000412	6170652	4,15	4,16
0,09	0,142	1138	3371352	1529	586,44	4691520	2000412	6691932	4,38	4,38
0,1	0,140	1126	3334592	1566	651,60	5212800	2000412	7213212	4,61	4,62
0,11	0,139	1115	3303175	1597	716,76	5734080	2000412	7734492	4,84	4,85
0,12	0,138	1106	3276014	1624	781,92	6255360	2000412	8255772	5,08	5,09
0,13	0,137	1098	3252300	1648	847,08	6776640	2000412	8777052	5,33	5,34
0,14	0,136	1091	3231415	1669	912,24	7297920	2000412	9298332	5,57	5,58
0,15	0,135	1085	3212882	1687	977,40	7819200	2000412	9819612	5,82	5,83
0,16	0,134	1079	3196325	1704	1042,56	8340480	2000412	10340892	6,07	6,08
0,17	0,134	1074	3181443	1719	1107,72	8861760	2000412	10862172	6,32	6,34
0,18	0,133	1070	3167996	1732	1172,88	9383040	2000412	11383452	6,57	6,59
0,19	0,133	1066	3155783	1745	1238,04	9904320	2000412	11904732	6,82	6,84
0,2	0,132	1062	3144645	1756	1303,20	10425600	2000412	12426012	7,08	7,10
0,21	0,132	1058	3134443	1766	1368,36	10946880	2000412	12947292	7,33	7,35
0,22	0,131	1055	3125066	1775	1433,52	11468160	2000412	13468572	7,59	7,61

Окончание таблицы Е7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,23	0,131	1052	3116416	1784	1498,68	11989440	2000412	13989852	7,84	7,87
0,24	0,131	1050	3108413	1792	1563,84	12510720	2000412	14511132	8,10	8,12
0,25	0,130	1047	3100987	1799	1629,00	13032000	2000412	15032412	8,35	8,38
0,26	0,130	1045	3094077	1806	1694,16	13553280	2000412	15553692	8,61	8,64
0,27	0,130	1043	3087631	1813	1759,32	14074560	2000412	16074972	8,87	8,90
0,28	0,130	1041	3081605	1819	1824,48	14595840	2000412	16596252	9,13	9,16
0,29	0,129	1039	3075958	1824	1889,64	15117120	2000412	17117532	9,38	9,42
0,3	0,129	1037	3070655	1830	1954,80	15638400	2000412	17638812	9,64	9,68