Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет»

На правах рукописи

CEN

Ермолаев Антон Николаевич

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМ ГАЗОВОГО ИНФРАКРАСНОГО ОБОГРЕВА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ

Специальность 05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

> Научный руководитель кандидат физико-математических наук, доцент Куриленко Николай Ильич

СОДЕРЖАНИЕ

Содержание	2
Перечень сокращений и обозначений	4
Введение	6
Глава 1. Современное состояние систем газового инфракрасного обогрева	17
1.1 Обзор научных исследований	17
1.2 Исследование современных газовых инфракрасных горелок	24
1.3 Состояние практики проектирования газолучистых систем	37
1 лава 2. Повышение эффективности расоты высокотемпературных газовых	43
горелок инфракрасного излучения	
Глава 3. Численные исследования тепломассообмена и горения при работе	60
высокотемпературных газовых инфракрасных излучателей	
3.1 Методология численных исследований	60
3.2 Математическая формализация задачи исследования	61
3.2.1 Модель турбулентности	61
3.2.2 Модель горения	65
3.2.3 Модель излучения	66
3.3 Граничные условия	68
3.4 Дискретизация расчетной области	70
3.5 Верификация модели	73
3.6 Вариативное исследование построенной параметрической модели	77
3.7 Газодинамика и тепломассоперенос в вентилируемом помещении,	70
оборудованном ГИИ	79
Глава 4. Экспериментальные исследования	83
4.1 Стендовые испытания высокотемпературных газовых горелок	85
инфракрасного излучения	05
4.2 Исследование работы систем газового лучистого отопления на базе	102
производственных зданий	103

4.3 Математическая обработка результатов экспериментальных 114 исследований

4.3.1 Определение регрессионных зависимостей, описывающих 117 распределение температур по высоте в центре над излучателями

4.3.2 Определение регрессионных зависимостей, описывающих 123 распределение температур по горизонтали над излучателями
 Глава 5. Практическое использование и оценка экономической 131 эффективности результатов исследований......

5.1 Методика проектирования высокотемпературных газовых горелок 131 инфракрасного излучения.

 5.2
 Оценка экономической эффективности высокотемпературного
 138

 газового инфракрасного излучателя изолированной модели
 141

 Заключение
 141

 Список литературы
 143

 Приложение А. Материалы по использованию результатов работы
 159

 Приложение Б. Патент на полезную модель
 162

 Приложение В. Результаты численных исследований
 164

 Приложение Г. Результаты экспериментальных исследований
 173

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

Сокращения:

- ФЗ федеральный закон;
- РФ Российская Федерация;
- СССР Союз Советских Социалистических Республик;

ТО – Тюменская область;

ГИО – газовое инфракрасное отопление, газовый инфракрасный обогрев;

ГЛО – газовое лучистое отопление, газовый лучистый обогрев;

ГИИ – газовый инфракрасный излучатель, горелка инфракрасного излучения;

ГИГ – газовая инфракрасная горелка;

ГГИИ – газовая горелка инфракрасного излучения;

ГИИи – изолированная модель газового инфракрасного излучателя;

ГИИм – усовершенствованная модель газового инфракрасного излучателя согласно патента на полезную модель RU № 167233;

КПД – коэффициент полезного действия;

АСУ – автоматизированные системы управления;

ТЭЦ – теплоэлектроцентрали;

ПДК – предельно допустимая концентрация;

САПР – системы автоматизированного проектирования;

НПА – нормативно-правовой акт;

НТД – нормативно-техническая документация;

АО – акционерное общество.

Обозначения:

- *Q* тепловой поток, тепловая мощность, Вт;
- η коэффициент полезного действия, %;
- I_{s} интенсивность теплового потока, BT/м²;

- α коэффициент теплообмена, Вт/м²·К;
- K коэффициент теплопередачи, Bт/м²·K;
- *є* степень черноты поверхности;
- C_0 коэффициент излучения абсолютно черного тела (5,67), Вт/м²·K⁴;
- φ относительная влажность воздуха, %;
- λ коэффициент теплопроводности, Bт/м²·K;
- δ толщина, мм;
- *с* теплоемкость, Дж/кг·К;
- *G* массовый расход, кг/с;
- *T*_{*r*} радиационная температура, К;
- *T*_{*n*} температура помещения, К;
- *T_в* температура внутреннего воздуха, К;
- *T*_o температура окружающего воздуха, К;
- *T_н* температура наружного воздуха, К;
- \mathcal{G}_{s} скорость движения воздуха, м/с;
- ρ плотность, кг/м³;
- F площадь, м²;
- $V объем, м^3;$
- а длина газового инфракрасного излучателя, мм;
- b ширина газового инфракрасного излучателя, мм;
- h высота газового инфракрасного излучателя, мм.

ВВЕДЕНИЕ

Важной задачей, стоящей в настоящее время перед наукой и техникой, является рациональное и эффективное использование топливно-энергетических ресурсов. Актуальность энергосбережения в России подтвердилась принятием ряда федеральных и региональных НПА [1-7], направленных на повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов и, как результат, на устойчивый рост экономики и улучшение качества жизни населения страны.

Сбережение энергетических ресурсов является особенно актуальным вопросом для всех отраслей промышленности. Когда у промышленных предприятий наблюдается дефицит финансовых средств, затраты на потребленную энергию выступают серьезным обременением из-за отсутствия спроса на конечную продукцию, рост цен на которую во многом обусловлен ростом тарифов на первичные энергоресурсы [8].

Развитие промышленности непременно характеризуется увеличением производственных площадей. Основными особенностями планировки современных промышленных зданий являются большие площади и высокие потолки, как правило, свыше 8 метров, в которых зачастую для поддержания оптимального теплового режима применяют системы централизованного теплоснабжения от ТЭЦ или децентрализовано от котельных [9].

Многолетняя практика показывает, что использование традиционных конвективных систем отопления для обогрева помещений периодического и кратковременного использования; помещений с частично используемой площадью; помещений значительной высоты; помещений, удалённых от тепловых сетей, а также открытых площадок приводит к значительному перерасходу энергетических ресурсов [9].

В последние десятилетия в России для экономии энергетических ресурсов при обогреве производственных зданий как альтернативу конвективному обогреву применяют системы газового лучистого отопления на базе газовых

горелок инфракрасного излучения [10]. На российском рынке первые ГИИ появились в результате создания в 1996 году совместного российско-германского предприятия Сибшванк (ОАО «Запсибгазпром» и Schwank GmbH), г. Тюмень. Предлагаемая предприятием линейка ГИИ изготавливается по технологиям и из комплектующих деталей германского предприятия Schwank GmbH [11].

В настоящее время рынок ГИИ развивается очень активно и является достаточно конкурентным. За двадцать лет, прошедших с момента появления первого совместного предприятия по производству ГИИ, российский рынок освоили еще около 20 зарубежных компаний–производителей ГГИИ из таких стран как Америка, Англия, Германия, Франция, Италия, Словакия, Венгрия и Чехия. Предлагаемые компаниями излучатели отличаются друг от друга применяемыми материалами, геометрическими параметрами, конструкциями, назначением. В целом, большая часть имеет сопоставимые типовые модели.

Большинство зарубежных официальные компании имеют представительства в России. Часть из них работает посредством налаженных дистрибьюторских или дилерских сетей, продукция других импортируется конечным потребителям без посредников. В то же время, действующие цены на системы газового инфракрасного обогрева являются достаточно закрытой информацией и у большинства компаний не публикуются. Компании, стремясь сохранить коммерческую тайну в отношении цен на свою продукцию, работают с каждым конкретным заказчиком индивидуально, при необходимости понижая цены. Такая гибкость ценовой политики, с одной стороны, свидетельствует о достаточно сильной конкуренции на рынке, с другой стороны – характеризует рынок как еще не устоявшийся, где продолжается активная борьба компаний за свою рыночную долю.

Доминирование зарубежных поставщиков на рынке ГИИ обусловлено целым рядом факторов. За время своей работы эти компании добились формирования определенной репутации. Производственный, научно-технический И технологический потенциал этих компаний сформирован благодаря значительным капиталовложениям В научно-исследовательские работы И

совершенствование технологий производства, что обеспечивает постоянное повышение качественных характеристик выпускаемой продукции. Кроме того, существенную роль играют такие составляющие коммерческой деятельности, как кадровый, маркетинговый, финансовый, сбытовой потенциал и т.д.

В текущей рыночной ситуации российские производители с трудом выдерживают конкуренцию с западными производителями, поскольку, как правило, это молодые компании с небольшим опытом работы на данном рынке, которым еще предстоит серьезная борьба за рыночную долю.

По оценкам экспертов, динамика ежегодного увеличения продаж систем ГЛО будет составлять в среднем 10 % [12, 13]. Такой прогноз, в целом, является оправданным еще и ввиду принятой в Российской Федерации стратегии по повышению энергетической эффективности, разработке мероприятий по контролю невозобновляемых источников энергии и повышению цен на энергетические ресурсы.

По результатам анализа мирового рынка производителей систем ГЛО автор выделяет следующие ключевые факторы, повышающие привлекательность излучателей на российском рынке теплоэнергетического оборудования: рост тарифов на энергетические ресурсы вынуждает использовать оборудование с максимально возможным уровнем энергетической эффективности (коэффициент преобразования энергии топлива в тепловую энергию ГИИ достигает 95 %); низкие эксплуатационные затраты и, как следствие, короткий срок окупаемости капиталовложений; возможность позонного регулирования температуры; прямой обогрев без теплопотерь в теплотрассах и теплообменниках; экономия пространства в отапливаемом помещений за счет размещения ГИИ под кровлей; возможность создания повышенного теплового комфорта на рабочих местах при минимальной температуре внутреннего воздуха.

Ключевые факторы, наоборот, затрудняющие внедрение радиационных систем на объект: трудности с лимитами на газ; отсутствие газовых сетей; отсутствие обученного и аттестованного персонала; отсутствие информации о сравнительной характеристике оборудования разных производителей; отсутствие

информации о самих производителях; прямая зависимость стоимости систем газового инфракрасного обогрева от курса зарубежной валюты.

Главным недостатком современных ГГИИ типовых моделей являются высокие затраты тепловой энергии на лучисто-конвективный теплообмен с верхней зоной помещения. В случае применения высокотемпературных излучателей лучисто-конвективный тепловой поток значительно усиливается за счет поступления продуктов сгорания в помещение. Потери тепловой энергии при этом весьма значительны, поскольку существенное количество тепла поступает в верхнюю зону помещения, т.е. в пространство, заключенное между излучателем и кровлей, где в последствии часть тепла аккумулируется ограждающими конструкциями верхней зоны (затем возможен интенсивный теплоотвод в атмосферу), а большая часть тепла удаляется системой вентиляции. Условия такой работы существенно снижают коэффициент полезного действия системы ГЛО и, как показали исследования, приводят к нарушению требований эксплуатации ограждающих конструкций, расположенных в непосредственной близости, к появлению копоти на их поверхностях и разрушению [14].

В настоящее время в России отсутствует единая утвержденная методика проектирования систем ГЛО. Существующие методики носят рекомендательный характер и являются не достаточно эффективными. Так, при проектировании систем газолучистого отопления зачастую предусматривается завышенное количество излучателей и выбирается некорректное размещение ГГИИ в объеме помещения, что приводит к повышенным капитальным и эксплуатационным затратам, неравномерному облучению площади пола.

Таким образом, повышение эффективности обогрева производственных помещений является актуальной задачей. Для решения этой задачи необходимо провести большой объем теоретических и экспериментальных исследований, приводящих к максимальному энергосбережению при применении систем газолучистого отопления.

Степень разработанности темы исследований.

Основным фактором при выборе темы исследования послужили работы таких известных российских и зарубежных ученых, как В. Н. Богословский, А. К. Родин, О. Н. Брюханов, А. М. Левин, А. И. Богомолов, А. Мачкаши, Л. Банхиди, А. Миссенар, А. Н. Сканави, Е. О. Шилькрот, М. Б. Равич и др., посвященных конструктивным особенностям излучателей и возможности их ЛЛЯ обогрева крупногабаритных помещений. Дополнительно, применения необходимо упомянуть работы Р. Р. Давлятчина, Б. М. Зиганшина, Н. Н. Болотских, Н. С. Болотских, А. Ф. Редько, направленные на изучение теплообмена излучателей с верхней зоной помещения И повышение энергетической эффективности ГГИИ.

На основе накопленного опыта отечественных и зарубежных исследователей в области лучистого отопления установлено, что для дальнейшего расширения внедрения ГГИИ и повышения эффективности их работы требуется выполнить ряд теоретических и экспериментальных исследований, направленных на совершенствование высокотемпературных ГГИИ и получение зависимостей применимых в практике проектирования систем ГЛО.

Исходя из вышеизложенного, определена **цель диссертационной работы**: повышение эффективности работы высокотемпературных газовых горелок инфракрасного излучения за счет сокращения их тепловых потерь при обеспечении теплового режима в объеме производственного помещения.

Цель согласуется с целями федеральных и региональных НПА в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности и находится в сфере приоритетных направлений развития науки, технологий и техники РФ «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика».

Для достижения заданной цели определены следующие задачи:

1. Выполнить исследование современного состояния систем ГЛО.

2. Разработать новые эффективные технические решения, направленные на рекуперацию тепла продуктов сгорания и снижение тепловых потерь

конструкцией современного высокотемпературного газового инфракрасного излучателя.

3. Провести экспериментальные исследования работы ГГИИ на базе производственных зданий.

4. Разработать многопараметрическую модель производственного помещения, обогреваемого высокотемпературными ГГИИ с последующим численным исследованием и верификацией.

5. На основе численных и экспериментальных исследований определить эффективность высокотемпературных ГГИИ и установить зависимости формирования воздушно-теплового режима в объеме помещения, применимые в практике проектирования систем ГЛО.

6. Предложить методику проектирования высокотемпературных ГГИИ.

Объект исследования: системы газового инфракрасного обогрева производственных зданий.

Предмет исследования: высокотемпературные газовые горелки инфракрасного излучения и формируемый в процессе их работы воздушнотепловой режим производственных зданий.

Научная новизна:

1. На основе математического моделирования разработаны параметрические модели высокотемпературных ГГИИ, описывающие закономерности их работы и позволяющие оценить работоспособность и эффективность технических решений на стадии конструирования.

2. На основе математического моделирования разработана многопараметрическая модель производственного помещения, описывающая закономерности формирования воздушно-теплового режима при работе высокотемпературных ГГИИ.

3. Установлены зависимости, описывающие распределение плотности теплового потока и температурных полей в объеме производственного помещения при различной тепловой мощности высокотемпературных ГГИИ и их высоты подвеса.

4. Составлены уравнения теплового баланса высокотемпературных ГГИИ, учитывающие движение продуктов сгорания и тепломассообмен с их участием.

5. Предложены новые технические решения высокотемпературных ГГИИ, позволяющие повысить их коэффициент полезного действия и исключить образование циркуляционной области горячего воздуха в верхней зоне отапливаемого помещения за счет частичной рекуперации тепла уходящих газов и сокращения тепловых потерь.

Теоретическая и практическая значимость работы:

технические решения Предложены излучателей: С теплоизоляцией наружной поверхности конструкции и с водяным охлаждением рефлектора, обогрева крупногабаритных помещений. Установлена применимые ЛЛЯ зависимость, описывающая распределение температуры ПО высоте перфорированного керамического насадка современной высокотемпературной ГГИИ. Получена зависимость диаметра теплового пятна под ГГИИ от тепловой мощности. Определены оптимальные высоты подвеса высокотемпературных излучателей в объеме помещения. Предложена методика проектирования высокотемпературных излучателей.

Практическая значимость работы обусловлена возможностью использования полученных результатов проектными и эксплуатирующими организациями на стадии конструирования высокотемпературных ГГИИ, проектирования и эксплуатации систем ГЛО производственных зданий.

Положения, выносимые на защиту:

1. Новые технические решения высокотемпературных ГГИИ, позволяющие повысить их коэффициент полезного действия и исключить образование циркуляционной области горячего воздуха в верхней зоне отапливаемого помещения за счет частичной рекуперации тепла уходящих газов и сокращения тепловых потерь.

2. Уравнения теплового баланса высокотемпературных газовых инфракрасных излучателей, учитывающие движение продуктов сгорания и тепломассообмен с их участием.

3. Многопараметрическая модель производственного помещения, описывающая закономерности формирования воздушно-теплового режима при работе высокотемпературных систем газового инфракрасного обогрева.

4. Зависимости, описывающие распределение плотности теплового потока и температуры газового объема в производственном помещении при различной тепловой мощности излучателей и их высоты подвеса.

5. Методика проектирования высокотемпературных ГГИИ.

Методология и методы исследования.

Методологической основой исследования послужили закономерности Стефана - Больцмана, Вина, Ламберта, Кирхгофа, Ньютона - Рихмана, Навье – Стокса и работы ученых в области лучистого отопления. В работе использовались как теоретические, так и эмпирические методы исследования.

К теоретическим методам относится: анализ литературы, документов и результатов деятельности предшественников в области лучистого отопления; подбор программного обеспечения; подбор и настройка математических моделей; разработка на основе математического моделирования параметрических моделей высокотемпературных излучателей, производственного помещения с последующим их численным исследованием и верификацией; математическая обработка результатов экспериментальных исследований.

Эмпирические методы исследования заключались в наблюдении за работой систем ГЛО производственных зданий; подборе необходимой приборной конструировании экспериментального аппаратуры; стенда И высокотемпературных ГГИИ; проведении ряда стендовых испытаний И экспериментальных исследований на базе действующих производственных зданий.

Достоверность работы обеспечивается использованием сертифицированного поверенного измерительного оборудования; использованием лицензионных программных продуктов; использованием фундаментальных законов при численных исследованиях И применением апробированных математических моделей; согласованием результатов численных И

экспериментальных исследований; согласованием результатов работы с работами других исследователей.

Личный вклад:

Состоит в разработке технических решений ГГИИ; в выполнении стендовых испытаний и экспериментальных исследований на базе действующих производственных зданий; в обработке полученных результатов; в разработке базы для моделирования современного высокотемпературного излучателя и производственного здания; в подборе и настройке математических моделей при выполнении адаптационного исследования; в установлении зависимостей, описывающих распределение плотности теплового потока и температуры газового объема в производственном помещении при различной тепловой мощности излучателей и их высоты подвеса; в разработке методики проектирования высокотемпературных ГГИИ; в оформлении результатов в виде научных докладов и публикаций.

Реализация результатов работы:

С предложенной применением методики проектирования высокотемпературных ГГИИ проведена реконструкция ГЛО. системы направленная на снижение энергозатрат при обеспечении теплового режима производственного помещения территориальной фирмы «Мостоотряд-36» АО «Мостострой-11». Выполненные работы позволили определить оптимальную тепловую мощность системы ГЛО и подобрать рациональные решения по размещению излучателей в помещении и, как следствие, снизить капитальные и эксплуатационные затраты на сумму 1 499,726 тыс. руб.

научно-исследовательской работы Результаты внедрены компанией АО «Сибшванк»: проектирования высокотемпературных методика ГГИИ разработанные используется при проектировании систем ГЛО; многопараметрические модели излучателя и производственного помещения позволили компании уйти от создания физических прототипов, необходимых для проверки эффективности и работоспособности тех или иных технических решений на стадии конструирования излучателей; техническое решение:

теплоизоляция наружной поверхности конструкции высокотемпературной ГГИИ внедрено для обогрева производственного помещения компании, что позволило на 96,481 тыс.руб. сократить затраты на систему ГЛО.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности:

Представленные В диссертационной работе научные положения соответствуют области исследования специальности 05.23.03 «Теплоснабжение, кондиционирование воздуха, газоснабжение вентиляция. И освешение» (пункт 1 «Совершенствование, оптимизация и повышение надежности систем теплогазоснабжения, отопления, вентиляции и кондиционирования, методов их расчета И проектирования», пункт 2 «Технологические вопросы теплогазоснабжения. вентиляции и кондиционирования воздуха», пункт 3 «Создание и развитие эффективных методов расчета и экспериментальных исследований систем теплоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха, газоснабжения, освещения, защиты от шума») по номенклатуре специальностей научных работников «Технические науки».

Апробация работы:

Результаты диссертационной работы докладывались на следующих мероприятиях: научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов, соискателей и магистров ТюмГАСУ (г. Тюмень, 2013, 2015 г.); международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы строительства, архитектуры, экологии и энергосбережения в условиях Западной Сибири» (г. Тюмень, 2014-2015 г.); региональный энергетический форум в сфере энергосбережения и повышения энергетической эффективности (г. Тюмень, образовательные семинары «Практические 2014 г.); вопросы реализации государственной политики В области энергосбережения И повышения энергетической эффективности», реализуемые В рамках подпрограммы «Энергосбережение повышение энергетической эффективности» И Государственной программы Российской Федерации «Энергоэффективность и развитие энергетики» (г. Тюмень, 2014 г.); всероссийский конкурс «Лучший молодой работник в сфере ЖКХ и строительства» (г. Тюмень (региональный

этап) – г. Ульяновск (окружной этап) – г. Казань (федеральный этап), 2014 г.); всероссийский форум «Кадры для модернизации ЖКХ» (г. Ульяновск, 2014 г.); ІІ-ая Всероссийская Ассамблея «ЖКХ-2024» (г. Казань, 2014 г.); всероссийский конкурс молодежных авторских проектов и проектов в сфере образования, направленных на социально-экономическое развитие российских территорий «Моя страна – моя Россия» (г. Тюмень (региональный этап) – г. Москва (федеральный этап), 2016 г.); международная научно-практическая конференция «Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе» (г. Тюмень, 2016 г.); международная молодежная научная конференция «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» (г. Томск, 2017 г.); семинары кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция» Тюменского индустриального университета; семинар кафедры парогенераторостроения и Томского парогенераторных установок Национального исследовательского политехнического университета.

Публикации: по результатам выполненной диссертационной работы опубликовано 12 научных статей, в том числе 5 статей из перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК, и 2 статьи, индексируемых Scopus. Получен патент на полезную модель RU 167233.

Структура и объем диссертации: диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (152 наименования), четырех приложений. Работа представлена на 191 странице, содержит 62 рисунка и 17 таблиц.

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СИСТЕМ ГАЗОВОГО ИНФРАКРАСНОГО ОБОГРЕВА

1.1 Обзор научных исследований

Активное применение систем лучистого отопления начинается в России с 1950-х годов, хотя о радиационном обогреве известно уже около двух тысячелетий, прежде всего в виде отопительных устройств, установленных в стенах и полу. Его следы находят в Азии и Европе на территории Римской империи [15].

В XX веке интенсивно решается круг задач, связанных с теорией переноса лучистой энергии [16-22]. Основы лучистого отопления были сформированы в работах таких ученых и инженеров, как А. Мачкаши, А. К. Родин, П. Фангер, А. И. Богомолов, А. Миссенар, В. Н. Богословский, А. Н. Сканави, М. Б. Равич, А. М. Левин, Г. Н. Северинец, О. Н. Брюханов, Ж. В. Мирзоян, С. А. Оцеп, А. Коллмар, А. Банхиди и др. [23-64], работы которых базируются на законах Стефана-Больцмана, Кирхгофа, Ламберта, Вина, Планка, Ньютона – Рихмана, а также на собственном опыте.

Основной задачей системы отопления производственного здания является создание теплового комфорта для находящихся в нем людей и выполнения протекающего технологического процесса [31]. Поэтому тематика использования радиационного отопления в работах указанных авторов сводилась к изучению вопросов влияния на организм человека микроклимата рабочей зоны, расчета тепловой мощности, разработки конструкций ГИИ и определения их характеристик.

В работе [15] А. Мачкаши рассматривает теоретические основы расчета теплоощущения, методы определения параметров тела человека, уравнение теплового комфорта, расчет системы лучистого отопления и многое другое.

В работах А.К. Родина [24-29], наряду с информацией о ГГИИ и особенностях их расчета, представлены гигиенические и биологические особенности инфракрасного обогрева. Установлено, что биологическое

воздействие радиационного отопления в большей степени благоприятно. Если тепловое излучение с длиной волны больше 2 мкм генерируется в основном поверхностью кожи, то излучение с длиной до 1,5 мкм проникает через поверхность кожи, частично нагревает ее и повышает температуру крови. При определенной интенсивности теплового потока его взаимодействие оказывает приятное тепловое ощущение. При лучистом отоплении человек отдает большую часть избыточного тепла путем конвекции окружающему воздуху, что благоприятно влияет на его самочувствие.

Изучением санитарно - гигиенических аспектов теплообмена человека с окружающей средой занимались М.С. Горомосов, Н.К. Пономарева, А.Е. Малышева и др. [65-67], в результате чего доказана эффективность лучистого обогрева, а именно возможность снижения температуры воздуха без нарушения условий теплового комфорта. Причем уменьшение температуры воздуха на 1 °C позволит сэкономить 7 % энергии [68, 69]. Согласно нормативу [70], температуру воздуха в обслуживаемой или рабочей зоне производственного здания допускается понижать на 4 °C ниже минимально допустимой температуры в холодный период года.

Основными параметрами, характеризующими микроклимат в производственных зданиях, являются: температура воздуха, скорость движения воздуха, относительная влажность воздуха, радиационная температура [30-34].

Оценка параметров микроклимата при радиационном отоплении велась по сочетанию температуры воздуха и средней температуры ограждающих конструкций, а также по выявлению максимально допустимой интенсивности теплового потока на уровне головы человека. Работами данного характера занимались многие исследователи. В качестве примера можно выделить исследования [48, 49].

При работе радиационной системы отопления главным критерием комфортности в помещении выступает температура помещения [30-33]. Для наиболее распространенных случаев температуру помещения принимают равной

среднеарифметическому значению температуры воздуха и радиационной температуры.

При проектировании и исследовании газолучистой системы отопления особое внимание обращают на параметр плотности облучения площадей, который нормируется по максимальному значению и не может превышать определённого уровня при определённых условиях труда [15, 35, 37, 67, 70, 71, 72, 73], а именно, согласно своду правил [70], максимальная интенсивность инфракрасного облучения поверхности туловища, рук и ног не должна превышать 150 Вт/м² на постоянных и 250 Вт/м² на непостоянных рабочих местах.

По данным Брадке интенсивность лучистой теплоты, достигающей лица, не должна превышать 350 Вт/м² [15]. Громосов [67] считает, что для создания комфортных условий до головы человека должна доходить теплота в количестве 112 – 175 Вт/м², по мнению Коллмара [38] – до 550 Вт/м²; по данным Бедфорда, на уровне головы средняя интенсивность не должна превышать 126 Вт/м² [15].

Чрезмерная концентрация лучистой энергии и, как следствие, нарушение норм облучённости площадей помещения приводит ко многим негативным последствиям, как технологическим, так и гигиеническим. Так, например, под действием инфракрасного облучения интенсивностью 308 Вт/м² в течение 20 минут у двух человек появились симптомы шока, связанного с потерей сознания. Неакклиматизировавшиеся люди жалуются на сердечную аритмию, боли в животе, спазмы кишечника, сонливость и многое другое [15].

В работах [24, 25, 29, 53] описаны экспериментальные и теоретические методы определения плотности лучистого теплового потока от излучающих горелок, а также приведены их результаты. Однако применение полученных результатов в настоящее время может привести к погрешностям ввиду модернизации конструкций газовых горелок.

Определение интенсивности теплового облучения экспериментальным путем – процесс достаточно сложный и трудоемкий. Этим, по-видимому, объясняется отсутствие эпюр облучения в паспортах современных излучателей, серийно выпускаемых промышленностью. Расчетным путем поверхностную плотность энергии под излучателем можно определить согласно выражения [10, 29]:

$$q = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left(\frac{T_u}{100}\right)^4 \cdot \left(\frac{a \cdot b}{\pi \cdot h^2}\right)$$
(1.1)

где T_u – температура излучающей поверхности, К; $a \cdot b$ – размеры излучающего насадка, м; h – высота подвески излучателя, м.

Сравнение экспериментальных и расчетных исследований интенсивности теплового потока, проведенное в работе [10], показало приемлемую сходимость результатов (погрешность не более 10 %). Сложность аналитического расчета обусловлена тем, что излучатели по отношению к облучаемым поверхностям могут быть расположены под различными углами и на разном расстоянии, число ГИИ может быть от нескольких штук до нескольких десятков, сотен, тысяч.

Многие исследователи стремились определить, каково влияние теплового излучения на человека [15, 35, 36, 37, 38, 74]. Так, Фангером на основании анализа теплового баланса человека и экспериментов, проведенных в климатической камере, составлены специальные диаграммы, по которым можно определять сочетания температуры воздуха и радиационной температуры, обеспечивающие состояние теплового комфорта человека для различных степеней тяжести работы и различного термического сопротивления одежды [36]. Критерием оценки комфортности тепловой обстановки при проведении физиолого-гигиенических исследований служила субъективная оценка теплоощущений испытуемых.

Мнения исследователей теории Фангера [73]. ПО не однозначны А. Мачкаши [15] отмечал, что теория Фангера учитывает лучистый теплообмен всего тела человека и не придает решающего значения влиянию тепловой радиации, достигающей головы. По данным Л. Банхиди, метод применим для расчета радиационного отопления, но экспериментальные исследования, подтверждающие достоверность, не представлены [35]. Туркевич К. установил, что использование средних по высоте рабочей зоны значений температуры и скорости воздуха в методе может привести к погрешностям при оценке тепловой обстановки помещения [75]. Однако все исследователи признают, ЧТО

разработанный Фангером метод оценки воздействия теплового излучения на человека является одним из научно обоснованных методов.

Использование газового лучистого отопления не должно подвергать человека опасности и создавать дискомфортный микроклимат в помещении [29]. Создание оптимального теплового режима в помещении будет определяться тепловой мощностью системы отопления, необходимой для подержания условий теплового баланса помещения [71, 73].

Так, по утверждению Михайловой Л. Ю. [73], тепловой баланс помещения записывается системой уравнений:

$$Q_{zuu-nm}^{n} + Q_{nm-n\pi}^{n} + Q_{nm-cm,n\beta}^{n} + Q_{nm-cm,n\beta}^{n} + Q_{nm-cm,n\beta}^{n} + Q_{nm-zuu}^{n} + Q_{nm-e,n\beta}^{\kappa} + Q_{nm-n,c}^{mn} = 0$$
(1.2)

$$Q_{zuu-cm.63}^{n} + Q_{cm.63-nn}^{n} + Q_{cm.63-nm}^{n} + Q_{cm.63-zuu}^{n} + Q_{cm.63-6.63.}^{\kappa} + Q_{cm.63-6.63.}^{mn} + Q_{cm.63-H.c}^{mn} = 0$$
(1.3)

$$Q_{6.63-6.18}^{\mu} + Q_{6.63-nm}^{\kappa} + Q_{2uu-6.63}^{\kappa} + Q_{6.63-cm.63}^{\kappa} + Q_{6.63-6.18}^{M} = 0$$
(1.4)

$$Q_{zuu-n\pi}^{n} + Q_{n\pi-nm}^{n} + Q_{n\pi-cm,\mu_{3}}^{n} + Q_{n\pi-cm,e_{3}}^{n} + Q_{n\pi-zuu}^{n} + Q_{n\pi-e_{4}\mu_{3}}^{\kappa} + Q_{n\pi-\mu,c}^{mn} = 0$$
(1.5)

$$Q_{zuu-cm,i\beta}^{n} + Q_{cm,i\beta-n\pi}^{n} + Q_{cm,i\beta-nm}^{n} + Q_{cm,i\beta-zuu}^{n} + Q_{cm,i\beta-6,i\beta}^{k} + Q_{cm,i\beta-4,ic}^{mn} = 0$$
(1.6)

$$Q_{6,B-H}^{u} + Q_{R,B-G,B}^{\kappa} + Q_{CM,B-G,B}^{\kappa} + Q_{OO-G,B}^{\kappa} + Q_{G,B-CUU}^{n} = 0$$
(1.7)

$$Q_{zuu-n\pi}^{n} + Q_{zuu-n\pi}^{n} + Q_{zuu-cm.63}^{n} + Q_{zuu-cm.63}^{n} + Q_{zuu-cm.63}^{n} + Q_{zuu-6.63}^{n} = Q_{O}$$
(1.8)

где ст. вз – ограждающие конструкции верхней зоны помещения от ГИГ до кровли; ст. нз – ограждающие конструкции нижней зоны помещения от пола до ГИГ; пт – потолок помещения; пл – пол помещения; в. вз – воздух верхней зоны от ГИГ до кровли; в. нз – воздух нижней зоны от пола до ГИГ; л – лучистый тепловой поток; к – конвективный тепловой поток.

Автор [73] при решении предложенной системы уравнений не учитывает конструкцию излучателя. При применении различного вида ГГИИ необходимо уделять особое внимание тепломассообмену в верхней зоне помещения. Неточности при составлении уравнений теплового баланса при работе системы отопления с ГИИ наблюдаются повсеместно. В работе [76] при разработке алгоритма программы расчета нестационарного теплового режима зданий использованы уравнения лучисто-конвективного теплообмена в помещении с учетом допущения, что в каждый момент времени температура воздуха во всем

объеме помещения имеет одинаковые значения. Банхиди [35] в системе уравнений теплового баланса помещения не учитывает затраты на систему вентиляции. А. Миссенар при расчете теплообмена в помещении полагает, что всё излучение от панели попадает только на пол помещения [37].

Основы теплового баланса помещения были введены и подробно рассмотрены в работах авторов В. Н. Богословский [30-33], А. Миссенар [37], А. Мачкаши [15]. Однако работы были выполнены при панельно-лучистом отоплении с учетом допущений: тепловой поток направлен только в рабочую зону помещения, температура воздуха и температура ограждающих конструкций по высоте помещения равны [73].

Авторы [15, 64], исследуя тепловой режим в помещениях, отапливаемых ГГИИ, приходят к выводу, что температура воздуха и ограждающих конструкций по высоте помещения значительно отличается. При высоте помещения 10 метров температура воздуха в рабочей зоне составила 12 °C, под потолком 28 °C. При тех же условиях, температура стены в рабочей зоне равна 18 °C, вблизи кровли 30 °C. Таким образом, вводить допущение о том, что при работе ГИИ температуры воздуха и ограждающих конструкций по высоте помещения равны, не корректно.

Введением дополнительных критериев и коэффициентов в уравнение теплового баланса занимались В. В. Шиванов и В. В. Пяточков [71, 77]. В работе В. В. Шиванова широко рассмотрены вопросы обеспечения теплового режима производственных помещений системами ГЛО и, в частности, составлен тепловой баланс помещения и алгоритм его расчета. Как отмечает автор работы [71], разработанная модель отличается тем, что в ней используется другой критерий комфортности, который дает возможность отделить облученность человека газовым излучателем от других тепловых потоков.

В. В. Пяточков [77] вводит в уравнение теплового баланса коэффициент загруженности при условии, что фактическое количество часов работы низкоинтенсивных ГИИ в сутки больше предельно допустимого количества часов их работы в сутки (от 16,8 до 21,6 ч. в зависимости от класса оборудования):

$$\begin{cases} Q_p = K_3 \cdot \sum_{i=1}^n Q_i^{2uu} + Q_m & npu \quad K_3 \ge 1 \\ Q_p = \sum_{i=1}^n Q_i^{2uu} + Q_m & npu \quad K_3 < 1 \end{cases}$$
(1.9)

где K_{3} – коэффициент загруженности низкоинтенсивных ГИИ; Q_{1}^{zuu} – поступления теплового потока от ГИИ, Вт; Q_{m} – поступления теплового потока в помещение от технологического оборудования и процессов, освещения и персонала и др., Вт; Q_{p} – теплопоступления равные тепловым потерям, Вт.

$$K_{_{3}} = 1 - \frac{T_{_{n\partial}} - T_{_{\phi}}}{T_{_{n\partial}}} \tag{1.10}$$

где $T_{n\partial}$ – предельно допустимое количество часов работы низкоинтенсивных ГИИ в сутки; T_{ϕ} – фактическое количество часов работы низкоинтенсивных ГИИ в сутки.

По мнению В. В. Пяточкова, в существующих методиках расчета мощности радиационной системы отопления с применение низкоинтенсивных «темных» ГИИ не учитывается фактор максимально допустимой загрузки оборудования, что при понижении температуры наружного воздуха приводит к сокращению срока их эксплуатации и, как результат, преждевременному выходу из строя. Им были исследованы производственные здания, отапливаемые низкоинтенсивными ГИИ одной ценовой категории и одного производителя. Установлено, что в одном из спроектированном без учета коэффициента загруженности, цехов, 3a 30-40 % излучателей отопительный сезон выходят ИЗ строя ИЗ 30 низкоинтенсивных ГИИ [77].

По всей видимости, выход из строя оборудования обусловлен неэффективной работой системы автоматизации или полным её отсутствием в рассматриваемых помещениях, что привело к работе излучателей 24 часа в сутки. Системы управления работой ГИИ в современном исполнении включают в себя термоконтроллеры, датчики температуры помещения и одно-, двухступенчатое или плавномодулируемое регулирование установочной мощности системы отопления. Применение коэффициента загруженности при использовании такой контролирующей аппаратуры не имеет большого значения, так как система автоматически позволяет поддерживать заданную дневную, ночную и иную другую температуру в помещении, запускать систему отопления до начала рабочего дня с целью достижения нормируемой температуры в помещении в рабочее время. Происходит автоматическое включение, плавное уменьшение и увеличение тепловой мощности, выключение излучателей. Следовательно, фактическое количество часов работы излучателей в сутки будет меньше предельно допустимого количества часов работы излучателей в сутки даже при понижении температуры наружного воздуха.

Оба автора [71, 77] решают систему уравнений теплового баланса внутренних ограждающих поверхностей, воздуха и теплового состояния человека, не уделяя должного внимания рассмотрению вопросов лучистого и конвективного теплообмена ГИИ с верхней зоной помещения.

Таким образом, начиная с девятнадцатого века, предпринимались попытки уйти от недостатков конвективной системы отопления.

1.2 Исследование современных газовых инфракрасных горелок

За много лет эксплуатации ГГИИ зарекомендовали себя как энергоэффективный, надежный и экологичный источник преобразования энергии топлива в тепловую энергию, используемую в дальнейшем для поддержания теплового режима крупногабаритных помещений: производственных цехов, складов, крупных павильонов, ангаров и т.п. [78].

Газовые инфракрасные горелки выпускаются рядом ведущих мировых компаний Schwank GmbH (Германия), Carlieuklima (Италия), Fraccaro (Италия), GoGas (Германия), Roberts Gordon (США), Adrian (Словакия), Kubler (Германия), SBM (Франция), Mandik (Чехия), Pakole (Венгрия), Systema (Италия), Solaronics SP.Z.O.O (Польша), Fired Products (Франция), San Beam Gas LTD (Великобритания). Предлагаемые компаниями излучатели отличаются друг от друга применяемыми материалами, геометрическими параметрами,

конструкциями, назначением. В целом большая часть имеет сопоставимые типовые модели.

Выделим два основных конструктивных решения современных ГГИИ.

Закрытой конструкции «темный» или низкотемпературный, при котором происходит сгорание газовоздушной смеси в радиационной трубе при температуре менее 700 °C с организованным отводом продуктов сгорания за пределы помещения. Длина электромагнитной волны от 3 до 6 мкм.

Классификация радиационных труб, их конструкции, преимущества и недостатки представлены в работах [42, 79-82]. Излучающая труба может быть различного исполнения. На практике наиболее распространено L – образное и U – образное исполнение. Первые конструкции U, L, W, S, P, – образных, рекуперативных и других радиационных труб были разработаны в 60-е годы Институтом газа УССР [82]. Лучистый КПД таких конструкций колеблется в диапазоне 30 - 45 %. Исследования показали, что при работе радиационных труб могут возникнуть следующие трудности: прогар труб; отложения сажи на внутренней поверхности труб; неравномерность прогрева, достигающая 100 – 120 °C; перегрев поворотного калача при U – образном исполнении; трудность монтажа и эксплуатации ввиду существенных габаритов [82].

Конструктивная схема типовой низкотемпературной ГГИИ U-образного исполнения на примере российского филиала компании Schwank GmbH – АО «Сибшванк» представлена на рисунке 1.1.



Рис. 1.1. Конструктивная схема низкотемпературной ГГИИ U-образного исполнения

«Темный» излучатель современного типа представляет собой радиационную трубу различного диаметра, у которой с одной стороны устанавливается дутьевой вентилятор с горелкой. В качестве материала трубы используется сталь, обработанная термостойким покрытием с высокой степенью черноты до 0,97, благодаря чему проявляется инфракрасный спектр излучения. Над трубой устанавливается рефлектор из стали или в исключительных случаях из ферана, который представляет собой плакированный с двух сторон холоднокатаный композитный материал, объединяющий в себе обрабатываемость и механические свойства низкоуглеродистой глубокотянутой нелегированной стали с механическими и эстетическими свойствами алюминия. Излучатель работает с закрытой системой сжигания, где для отвода продуктов сгорания за пределы помещения на воздуховодах устанавливается дымосос. Продукты сгорания с температурой до 380 °С отводятся за пределы помещения (отвод продуктов сгорания производится через крышу, наружную стену или с воздухом помещения).

Порядок работы «темного» ГИИ представлен на рисунке 1.2. После включения и продувки излучающей трубы в течение 25 - 30 секунд автоматически включается зажигание и открываются электромагнитные клапаны, газ поступает в смесительную камеру через сопло и смешивается с воздухом, подаваемым вентилятором, а смесь подается к горелке с керамическим перфорированным насадком, где и воспламеняется от свечи зажигания. Воздух для сжигания берется из помещения или снаружи. Пламя горелки контролируется ионизационным электродом. Ламинарное пламя горелки и продукты сгорания газа направляются в излучающую трубу, которая нагревается и испускает лучистый тепловой поток. Рефлектор направляет лучистый тепловой поток в заданном направлении и уменьшает долю конвективной теплоотдачи. Кроме направленного теплового излучения разогретый в процессе работы корпус излучателя вступает в лучистый и конвективный теплообмен с ограждающими конструкциями и воздухом, находящимися в непосредственной близости. В определённой степени «темный» излучатель работает на обогрев верхней зоны помещения и наружного воздуха,

что, ввиду роста цен на энергоносители и ужесточение экологических требований в России и за рубежом, является неэффективным. Существенный экологический и энергосберегающий эффект можно достичь путем утилизации (рекуперации) продуктов сгорания и тепла, переданного в зону выше установки ГИИ.



Рис. 1.2. Схема работы низкотемпературной ГГИИ U-образного исполнения

Открытой конструкции, «светлый», или высокотемпературный с беспламенным сгоранием газовоздушной смеси на поверхности пористой керамической плитки при температуре более 700 °C с участием продуктов сгорания в общем тепломассообмене помещения. Длина электромагнитной волны от 1,5 до 2,5 мкм.

Исследования конструкций высокотемпературных ГГИИ выполнены в работах [12, 15, 23, 26-29, 37, 39-47, 50, 55-60, 64, 77, 83-86]. На протяжении десятка лет предлагались различные их модификации, которые широко представлены в авторских свидетельствах №№ 800491, 877234, 1070380, 1070380, 1820152, 149846, 844928, 1455136, 228884, 1104984, 314970, 805007 и патентах RU №№ 2497044, 2084762, 2127849, 2137040, 2057989, 2057983, 2094703, 2151956, 2151956, 2151957, 2272219, 2151956, 2151957, 2272219, 2234028; US №№ 2775294, 3437415, 5326631; DE № 1914615, UA №№ 104043, 87028, 102649 и др.

Первое изобретение ГГИИ в СССР отмечено в 1950 году – «Горелка беспламенного сжигания газа низкого давления», авторы Правоверов К. Н. и Шорин С. Н., свидетельство № 87854. За рубежом газовая инфракрасная горелка с керамическим насадком впервые запатентована в 1933 году, автор Г. Шванк. Лучистый КПД колеблется в диапазоне 45 – 50 %.

При всем многообразии, не обнаружено работ, направленных на совершенствование ГГИИ с целью расширения диапазона тепловой нагрузки и давления газа. При выполнении такого вида работ появляется возможность регулировать тепловую мощность системы ГЛО и, как следствие, температурный режим помещения в каждой рабочей зоне за счет изменения давления газа перед излучателем.

Современный «светлый» излучатель типовой модели представляет собой корпус горелки со смесительной трубой, которая крепится при помощи присоединительной трубы. Ha присоединительную трубу крепится соединительная деталь, в резьбовом отверстии которой установлено сопло для подачи газа в смесительную трубу. Сопло с определенным диаметром отверстия и собой Для обеспечения смесительная камера представляют инжектор. необходимого для горения соотношения газа и воздуха в соединительную деталь устанавливается воздушно – дроссельная шайба с заданным диаметром. В корпусе устанавливаются распределители и перфорированные керамические плитки. Мощность одной керамической плитки в среднем составляет 1,5 кВт. На заданном расстоянии от керамической плитки устанавливается металлическая сетка, изготовленная из жаростойкого сплава, обеспечивающая равномерный нагрев плитки и предотвращающая выпадение плитки в случае поломки. К корпусу крепится рефлектор и торцевые щитки. В отверстии торцевого щитка устанавливается изолированная кожухом свеча зажигания с датчиком наличия Все детали излучателя изготавливаются из листовой стали с пламени. алюминиевым покрытием, что придает требуемую жаростойкость и увеличивает полезную лучистую составляющую теплового потока. Перед корпусом горелки устанавливается блок автоматики, который представляет собой блок клапанов для управления и регулирования давления газа на входе в горелку, а также контроллер для управления процессом розжига И контроля горения

газовоздушной смеси. Блок клапанов состоит из двух электромагнитных клапанов и регулятора давления газа.

Конструктивная схема высокотемпературной ГГИИ типовой модели (серия 2100) на примере АО «Сибшванк» представлена на рисунке 1.3.



Рис. 1.3. Конструктивная схема высокотемпературной ГГИИ типовой модели

Принцип работы высокотемпературного излучателя представлен на рисунке 1.4. Газ из газопровода подается на вход блока клапанов, который снижает давление до требуемой величины. После газ, проходя сопло, попадает в смесительную камеру, в процессе чего инжектируется необходимое количество воздуха для горения при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1.05$ и смешивается. Газовоздушная смесь равномерно распределяется по керамическим плиткам и выходит из отверстий. Контроллер посредством высоковольтного разряда на свече зажигания воспламеняет газовоздушную смесь. После появления пламени, контролируемого датчиком наличия пламени, контроллер отключает свечу зажигания. Газовоздушная смесь горит в отверстиях диаметром 1-2 мм у наружной поверхности керамических плиток, которые разогреваются до 700 – 1200 °С в зависимости от материала плитки и давления газа перед соплом. сгорания (углекислый Продукты газ, водяной пар, азот) поступают непосредственно в помещение (преимущественно в верхнюю зону) и удаляются

системой вентиляции. Вследствие продолжительной работы корпус излучателя разогревается до температуры более 200 °С и становится дополнительным источником лучисто-конвективной теплоотдачи. Тепловой поток от корпуса нагревает внутренние конструктивные элементы здания, находящиеся в непосредственной близости от горелки, и воздух, циркулирующий в верхней зоне помещения.



Рис. 1.4 Схема работы высокотемпературной ГГИИ типовой модели

Коэффициент преобразования энергии топлива в тепловую энергию ГГИИ достигает 98 %. Однако ряд фирм для увеличения продаж представляют информацию таким образом, что КПД излучателей составляет 98 % и весь тепловой поток от ГГИИ передается только излучением и только в рабочую зону отапливаемого помещения. Такое утверждение ошибочно.

«Газовая инфракрасная горелка является не только источником тепловой радиации, но и генератором совокупной лучистой и конвективной энергии, которая передается посредством излучения и конвекции от нагретых поверхностей излучателя» [87]. В случае применения «светлых» ГИИ лучисто-конвективный тепловой поток значительно усиливается за счет поступления продуктов сгорания в объем обогреваемого помещения. Потери энергии при этом весьма значительны, поскольку существенное количество тепла передается в

верхнюю зону помещения, а именно в пространство между излучателем и кровлей, где впоследствии большая часть тепла удаляется системой вентиляции в атмосферу [88-90]. Согласно требованиям [70, 91] ГГИИ допускается применять при условии удаления продуктов сгорания, обеспечивая ПДК вредных веществ. Размещение вытяжных устройств следует предусматривать выше установки излучателей, а приточных - вне зоны излучения.

В инженерной практике долю теплового потока, переданного в рабочую зону, принято называть лучистым КПД излучателя. Исходя из того, что главной целью работы ГГИИ являет зонный обогрев рабочих мест и производственных зон, можно заключить, что чем выше лучистый КПД, тем выше эффективность ГЛО работы системы В целом. Олнако увеличение лучистого КПЛ сопровождается повышением стоимости единицы ГИИ. К примеру, в России стоимость «темных» излучателей марки novoSchwank (лучистый КПД – 52 %) и superTube (лучистый КПД – 77,5 %) по состоянию курса доллара и евро на сентябрь 2016 года в среднем отличается в три раза, а именно на стоимость одного superTube можно приобрести три novoSchwank. Аналогичная ситуация при сравнении «светлых» типов ГИИ серии 2100 (лучистый КПД - 57 %) и supraSchwank (лучистый КПД - 80,9 %). В действующих производственных помещениях при применении ГЛО выбор делают в пользу типовых решений излучателей как наиболее оптимальных по цене и качеству. Однако у типовых моделей в среднем доля лучистого теплового потока, переданного в рабочую зону, туда, где это необходимо, составляет не более 61 %. Потери тепла с уходящими газами составляют около 30 %, конструкцией излучателя - около 9 % [90]. А при увеличении угла наклона излучателя, а именно угла между полом и излучающим насадком, конвективные тепловые потери конструкцией излучателя и с уходящими газами существенно возрастают [82, 87]. К выводу о существенных потерях тепла корпусом горелки и с уходящими газами при работе ГГИИ приходят в [64, 82, 87, 92-97].

Несмотря на то, что условия такой работы не противоречат требованиям ГОСТ [98-101], это приводит к высоким потерям тепловой энергии и, как

показала практика, к нарушению требований эксплуатации ограждающих конструкций, расположенных в непосредственной близости, с появлением копоти на их поверхностях и разрушением.

Без преувеличения можно сделать вывод, что доля теплового потока, переданного от ГИИ в верхнюю зону помещения, является в большей степени неэффективным использованием энергии топлива [14, 88-90].

лучистой Изучению вопроса влияния системы отопления на теплоизолирующие свойства покрытий производственных зданий и сооружений посвящены работы Р. Р. Давлятчина [87, 102, 103]. Решаемые в работах задачи сводятся К определению тепловлажностного состояния многослойной конструкции кровли производственных зданий при работе высокотемпературных ГИИ. Давлятчин Р. Р. приходит к выводу, что основной причиной образования различного рода разрушений кровли является её увлажнение вследствие таяния снежного покрова и конденсации водяного пара. Для решения такой проблемы рекомендует выполнить реконструкцию кровельного покрытия путем применения материалов кровли из напыляемого пенополиуретана, полимерных мембран и отражающей изоляции. Однако данных о технико-экономическом обосновании предлагаемого решения приводит, позволяет оценить не ЧТО не его экономическую эффективность. Кроме того, предлагаемое решение направлено на устранение следствия, а не самой причины возникновения проблемы.

Численные экспериментальные И исследования радиационной И конвективной теплоотдачи от ГИИ «темного» исполнения в замкнутом объеме подробно рассмотрены в работах Б.М. Зиганшина [82, 104-106]. Для повышения эффективности ГИИ рассматриваются такие варианты модернизации как удлинение боковин рефлектора до уровня нижней кромки опорного кронштейна; установка ритардера, а именно легкого прокатного профиля, закрепленного на уровне осей греющих элементов, позволяющего задерживать конвективные тепловые потоки под рефлектором (рисунок 1.5); установка панелей с бортовыми ограждениями над отражателями (рисунок 1.6). Все предлагаемые решения реализуются с одной целью – понизить конвективную составляющую трубчатого

излучателя и тем самым повысить его лучистый КПД. Б.М. Зиганшин приходит к выводу, что исследованные способы оптимизации конструкции позволят повысить лучистый КПД «темного» ГИИ на 7,9 - 8,5 %.



Рис. 1.5 Конструктивная схема трубного ГИИ с ритардером:

1 – экран; 2 – радиационные U-образные трубы; 3, 4 – боковины экрана; 5 – полка экрана; 6 – ритардер



Рис. 1.6 Конструктивная схема системы отопления с панелями над «темными» ГИИ: 1 – отражатели; 2 – радиационные трубы; 3 – подвески; 4 – панели; 5 – бортовые ограждения

Выполненное исследование и предлагаемые решения обладают высокой актуальностью по настоящее время, однако Б. М. Зиганшин рассматривает работу горелок темного исполнения в условиях замкнутого объема. Это значит, что теплоотвод через ограждающие конструкции и воздухообмен в рассматриваемом помещении отсутствуют. На практике, условия работы в замкнутых пространствах мало возможны. Следовательно, решение предлагаемых моделей и использование полученных результатов может привести к погрешностям.

Практически идентичные способы для уменьшения лучисто-конвективной теплоотдачи по направлению в верхнюю зону помещения при работе «темных» ГИИ предлагает А. Миссенар [37], а именно использовать панели, прикрывающие радиационные трубы с расстоянием между ними 3-5 см. Борта панели опустить ниже минимального уровня поверхности нагрева с установкой излучателей в горизонтальном положении или с удлиненным бортом на приподнятой стороне. Приводится информация о том, что несоблюдение последнего условия ведет к высоким теплопотерям от 20 до 30 % за счет конвективной теплоотдачи. Автор [37] приходит к выводу, что теплоотдача конвекцией при температуре поверхности 400 °C составляет около 20 %, а при температуре 100 °C примерно равна лучистой теплоотдаче.

Работы по повышению энергетической эффективности ГИИ путем уменьшения потерь конвективного тепла велись в Харьковском национальном университете строительства и архитектуры, результаты которых представлены в работах [92-95, 97].

Авторы работы [97] считают, что потери конвективного тепла можно снизить за счет организованного забора нагретого воздуха излучателя и направления его в зону пребывания людей в помещении. Что увеличит температуру воздуха в области пребывания людей и, в конце концов, снизит расход газа на отопление. Ими предложена схема инфракрасного трубчатого нагревателя согласно патенту на изобретение UA № 87028 (рисунок 1.7). В данной конструкции для сбора и отвода нагретого воздуха в рабочую зону предусмотрен канальный вентилятор и зонт, который запроектирован из трех секций по 4 метра с отводящими патрубками диаметром 100 мм. По мнению авторов, с использованием зонта ожидается возврат в рабочую зону до 15 % тепла, обычно теряемого через перекрытия производственных помещений. Но в таком случае возникают существенные затраты на электроэнергию И

предлагаемое оборудование. Проблеме лучистого теплообмена корпуса ГИИ с окружающими конструкциями и экологии не уделяется должного внимания.



Рис. 1.7 Конструктивная схема трубчатого излучателя по патенту UA № 87028: 1 – серийно-выпускаемый трубчатый нагреватель; 2 – зонт; 3 – патрубок

В работе [94] для использования конвективного тепла и части тепла продуктов сгорания, полученных при работе «темного» ГИИ, предлагается модернизация конструкции согласно патенту на изобретение UA № 104043 (рисунок 1.8). Трубчатый ГИИ выполнен в виде спирали, над которой последовательно расположен газовоздушный рекуператор и вогнутая двухслойная перфорированная часть отражателя тепловых потоков. Боковая часть выполнена в виде усеченного конуса, соединенного с помощью отверстий с рекуператором.

Предполагается, что полученная воздушная система задействует конвективную тепловую энергию конструкции ГИИ и часть тепловой энергии уходящих газов. Хотя автором при анализе работы [94] не обнаружены результаты численных и экспериментальных исследований, подтверждающих эффективность предлагаемого технического решения, это не снижает её актуальность.



Рис. 1.8 Конструктивная схема трубчатого излучателя по патенту UA № 104043: 1 – горелка; 2 – трубчатый излучатель; 3 – боковая часть отражателя тепловых потоков; 4 – перфорированная часть отражателя; 5 – вентилятор; 6 – газовый рекуператор; 7 – воздуховод

На основе анализа работ установлено, что большинство предлагаемых технических решений направлено на повышение энергетической эффективности низкотемпературных («темных») излучателей, обеспечить рекуперацию тепла уходящих газов которых значительно проще ввиду сгорания газовоздушной смеси в замкнутом пространстве (радиационной трубе) и организованного отвода продуктов сгорания за пределы помещения. В то же время существенным потенциалом для энергосбережения обладают высокотемпературные («светлые») излучатели, при работе которых поверхность излучающего насадка разогревается до температуры около 1000 °С, а продукты сгорания попадают непосредственно в объем обогреваемого помещения. Но в этом случае организовать рекуперацию тепла уходящих газов гораздо сложнее.

В работе [107] предлагается организовать сбор уходящих газов посредством установки вблизи «светлых» ГГИИ местных отсосов. Авторы работ [12, 47] предлагают установить жаропрочное стекло (экран) с отверстием для выпуска продуктов сгорания на выходе из области, ограниченной рефлектором. В первом случае [47] в качестве излучающего насадка рассматривается металлическая сетка с удалением продуктов сгорания через отверстия выше её установки, а во втором случае [12] – перфорированная керамическая плитка с удалением продуктов
сгорания через отверстие в установленном экране. Большинство производителей считают, что снизить конвективную теплоотдачу при работе ГГИИ можно за счет изоляции корпуса и рефлектора. К такому выводу приходят авторы работ [108, 109]. Однако, автор [87] считает, что даже при изоляции с течением времени корпус излучателя подвержен, также, значительному нагреву ввиду теплопроводности и конвективного теплообмена.

Можно заключить, что, несмотря на достаточно большой опыт, накопленный в области газового инфракрасного обогрева, для дальнейшего расширения внедрения ГГИИ и повышения эффективности их работы требуется выполнить большой объем теоретических и экспериментальных исследований, направленных на снижение доли лучисто-конвективной теплоотдачи в зону, расположенную выше излучателей.

1.3 Состояние практики проектирования газолучистых систем отопления

Внедрение систем ГЛО на производственный объект является сложной инженерной задачей, решение которой сводится к выполнению работ по сбору исходной документации, расчету технико-экономического обоснования, проектированию, изготовлению и поставки оборудования, монтажу внутренней сети газопроводов и оборудования, выполнению пусконаладочных работ, техническому обслуживанию.

В процессе сбора исходной документации определяют характеристики ограждающих конструкций (материал, толщина и т.п.); геометрические характеристики и назначение помещения; тип остекления и его площадь; требуемую температуру внутреннего воздуха в помещении; климатические характеристики наружного воздуха; кратность воздухообмена; тип вентиляции; получают разрешительную документацию.

На стадии технико-экономического обоснования определяют целесообразность применения систем ГЛО. Проводят расчет капитальных и эксплуатационных затрат на систему с излучателями и срока её окупаемости.

Выполняют сравнительный анализ полученных данных с данными для систем конвективного отопления: ТЭЦ, собственная котельная, воздушные теплогенераторы и т.п. Для уточнения полученных данных расчеты повторяют после выполнения проектных работ.

На этапе проектирования выполняются фундаментальные работы, от которых в дальнейшем будет зависеть эффективность системы радиационного отопления в целом. Проектные работы подразделяются на три этапа. Первый этап – это расчет тепловой мощности радиационной системы отопления. Второй этап - подбор газогорелочного устройства по типу исполнения и тепловой мощности; подбор регулирующей аппаратуры; определение высоты подвески, угла наклона, мест установки ГИИ, расстояний между ними и конструктивными элементами помещения. Третий этап включает в себя проверочный расчет на удовлетворение полученной суммарной тепловой нагрузки санитарно-гигиеническим требованиям в отношении облученности человека и требованиям в отношении температуры воздуха, окружающих предметов и конструкций.

Сложность заключается в том, что по настоящее время в России отсутствует единая утвержденная методика проектирования и расчета системы отопления с ГГИИ. Действующей нормативно-технической [70] документацией предусмотрено только то, что системы отопления должны обеспечивать нормируемую температуру воздуха в помещениях, учитывая: потери теплоты через ограждающие конструкции; расход теплоты на нагревание наружного воздуха, проникающего в помещения за счет инфильтрации или путем организованного притока через оконные клапаны, форточки, фрамуги и другие вентиляции помещений; расход теплоты на нагревание устройства для материалов, оборудования и транспортных средств; тепловой поток, регулярно поступающий ОТ электрических приборов, освещения, технологического оборудования, трубопроводов, людей и других источников тепла. Однако такой принцип не в полной мере учитывает всю специфику радиационных систем отопления.

Принято считать, что основной задачей, которую необходимо решить при выполнении проектных работ, является расчет установочной мощности системы отопления с ГИИ. Научным и инженерным сообществом уже на протяжении десятка лет ведутся работы по разработке рекомендации по расчету тепловой мощности радиационной системы отопления [15, 26-33, 35, 37, 42, 49, 61, 62, 71, 73, 76, 77, 97, 110-118]. Однако, что в отечественной, что в зарубежной литературе предлагаемые модели чрезвычайно разнообразны. Другими словами, каждый автор при разработке и уточнении методики расчета особенности газового инфракрасного обогрева учитывает по-разному.

Известны различные способы классификации существующего многообразия моделей. Так, в [29] предлагается разделить их на две основные группы. Первая объединяет модели, базирующиеся на определении тепловых потерь с учетом норм облученности. А вторая включает модели определения комфортной облученности человека, принимая то, что доминирующим фактором комфорта является объем облученности.

Автор придерживается классификации, предложенной в работе [73], а именно: все существующие способы расчета тепловой мощности системы ГИО делятся на несколько групп.

Работы первой группы основаны на опыте проектирования и эксплуатации систем ГЛО. В качестве характерных примеров можно выделить несколько работ [114, 115]. В первой работе [114] автор предлагает тепловую мощность системы отопления определять по площади обогреваемого помещения. Мощность каждого излучателя подобрать исходя из условий, что интенсивность теплового потока должна быть в пределах 400 Вт/ M^2 при высоте подвески излучателя от 4 метров над уровнем пола. Точные данные интенсивности теплового потока определить из условий рабочего процесса. Данное решение имеет ограниченное применение, так как автор [114] делает свои выводы на основе опыта проектирования в конкретных климатических районах и при конкретных объемно-планировочных решениях зданий.

Bo второй работе [115] предложена методика расчета газового отопления зданий и инфракрасного промышленных открытых площадок, разработанная исследований на основе И анализа процессов лучистоконвективного теплообмена между излучателями, людьми, помещением или окружающей средой.

Определение тепловой мощности газолучистой системы отопления по предложенным в [114, 115] методикам может привести к существенным погрешностям, так как в них не берутся во внимание характеристики ограждающих конструкций, тепловые потери и воздухообмен.

К следующей группе относятся работы [48, 113, 116-118], в которых для вычисления тепловой мощности системы ГЛО сначала определяются тепловые потери, а потом полученные значения умножаются на поправочный коэффициент, учитывающий, по мнению авторов, особенности ГИО. Значение такого коэффициента варьируется в пределах от 0,7 до 1,2.

При всем многообразии работ наибольшее распространение в инженерном сообществе получил расчет систем лучистого отопления, выпущенный в 2006 году некоммерческим партнерством «Инженеры по отоплению, вентиляции, кондиционированию воздуха, теплоснабжению и строительной теплофизике» [113], который схож с рекомендациями по применению и расчету газо-воздушных систем лучистого отопления, выпущенными в 2002 году творческим коллективом 000 «НПО ТЕРМЭК» И OAO «ЦНИИпромзданий»: Наумов А. Л., Булычева О. П., Климовицкий М. С., Шилькрот Е. О., Алексеева И. Ю. [117]. Несмотря на это, в силу сложности процессов тепломассообмена в помещении, такой подход к расчету не учитывает многих специфических вопросов ГИО. Не уделяется должно внимания тепломассообмену в зоне выше газогорелочных устройств. В случае если при выполнении расчета тепловых потерь закладывается пониженная температура внутреннего воздуха с расчетом на компенсацию лучистым тепловым потоком, что допускается в [73], применение методик второй группы может привести к значительным погрешностям, так как возникает

дублированное занижение тепловой мощности системы ГЛО при умножении на поправочный коэффициент.

Третья группа представлена работами [15, 26-33, 35, 37, 42, 49, 71, 73, 76, 77, 97, 110], в которых требуемую мощность радиационной системы отопления определяют путем составления и решения уравнений теплового баланса помещения. Такой способ расчета является наиболее трудоемким, научно обоснованным и учитывающим специфические особенности систем ГЛО при правильной постановке задачи.

Составление и решение уравнений теплового баланса при определении тепловой мощности системы отопления с ГИИ является очень ответственной и трудоемкой работой. Любая из допущенных при их составлении и решении ошибок может обернуться неспособностью оборудования обеспечить комфортный тепловой режим в помещении и необходимостью в капитальной переделке. Поэтому инженерным сообществом преимущественно делается выбор в пользу метода расчета, предлагаемого второй группой исследователей.

Однако все существующие методики расчета систем ГЛО не позволяют спрогнозировать тепловой режим обогреваемого объекта на стадии проектных работ.

При проектировании системы ГЛО мало знать её теплопроизводительность, не маловажным является рационально выполнить подбор и размещение ГИИ в объеме помещения. Данные работы входят в состав второго этапа проектных работ, от которых впоследствии будет зависеть микроклимат обогреваемого помещения. Так, некорректное определение мест размещения ГИИ в объеме помещения даже при обоснованной теплопроизводительности системы отопления ведет к нарушению теплового режима в помещении.

Вопросы размещения ГИИ в объеме обогреваемого помещения рассмотрены в работах [15, 28, 29, 35, 54, 71, 73, 113, 119]. В [113] предлагается выбор типоразмеров и мощности, а также размещение излучателей для отопления помещения и обогрева рабочих мест производить согласно рекомендациям

производителей и с учетом санитарно-гигиенических и пожарных требований. Варианты размещения ГИИ представлены на рисунке 1.9.



Рис. 1.9 Варианты размещения ГИИ: а – «светлые» ГИИ на колоннах и стенах; б – «темные» ГИИ на нижнем поясе ферм; в – центральные газовоздушные излучатели; г – обогрев зоны «светлыми» ГИИ под навесом

Подобные схемы расположения горелок представлены в работах [71, 73], авторы которых считают, что высоту подвеса излучателей и расстояние между ними целесообразно выбирать на основе интенсивности теплового потока от ГИИ и с учетом допустимой неравномерности облучения поверхности пола. Основное отличие между работами заключается в том, что параметры размещения ГИИ в работе [73] определяются на основе полученных экспериментальным путем эпюр облучения, а в работе [71] путем численного анализа равномерности облучения человека.

Можно заключить, что инженеру-проектировщику при выполнении всех этапов проектирования систем ГЛО каждый раз приходится иметь дело с решением уникальной задачи, требующей больших трудозатрат. Для оптимизации времени выполнения проектных работ и повышения точности конструкторских и проектных расчетов необходимо на базе имитационного математического моделирования разработать методику проектирования, которая позволит в каждом индивидуальном случае подбирать оптимальную тепловую мощность системы ГЛО, определять рациональные решения по размещению ГГИИ в объеме помещения и делать выводы об эффективности системы отопления на стадии проектных работ. Только в этом случае можно говорить о максимальном энергосбережении при применении систем газолучистого отопления.

ГЛАВА 2 ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗОВЫХ ГОРЕЛОК ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Для определения энергетической эффективности современного высокотемпературного ГИИ необходимо составить его тепловой баланс. Отметим, что ранее в работах [15, 29, 35] был рассмотрен тепловой баланс «светлого» излучателя типовой модели 60-90 годов XX-го века, конструкция которого не предполагала многих специфических особенностей современного излучателя, а предлагаемые уравнения не учитывали раздельную теплоотдачу от продуктов сгорания.

Уравнение теплового баланса современной ГГИИ типовой модели запишем следующим образом:

$$Q_{\text{rur}} = \sum Q_{\text{лучист}} + \sum Q_{\text{конвек}}$$
(2.1)

где $Q_{_{ZUZ}}$ – общее количество теплоты, которое вырабатывает конструкция современной ГГИИ типовой модели в единицу времени (тепловая мощность), Вт; $\sum Q_{_{ЛУЧИСТ}}$ – сумма всех тепловых потоков, переданных излучением в окружающее пространство, Вт; $\sum Q_{_{ROHBEK}}$ – сумма всех тепловых потоков, переданных конвекцией в окружающее пространство, Вт.

Уравнение теплового баланса (2.1) в развернутом виде примет вид:

$$Q_{_{\mathcal{I}}}^{_{\mathcal{I}}} + Q_{_{1_{\mathcal{I}}}}^{^{nc}} + Q_{_{1_{\mathcal{K}}}}^{^{nc}} + Q_{_{\mathcal{I}}}^{^{enp}} = Q_{_{\mathcal{I}\mathcal{I}}} - Q_{_{2_{\mathcal{I}}}}^{^{nc}} + Q_{_{2_{\mathcal{K}}}}^{^{nc}} + Q_{_{\mathcal{I}}}^{^{\mu n\kappa}} + Q_{_{\mathcal{K}}}^{^{\mu n\kappa}}$$
(2.2)

где Q_{n}^{un} – лучистое тепло от излучающего насадка, Вт; Q_{1n}^{nc} – лучистое тепло от продуктов сгорания в области, ограниченной рефлектором, Вт; $Q_{1\kappa}^{nc}$ – конвективное тепло от продуктов сгорания в области, ограниченной рефлектором, Вт; Q_{n}^{nc} – лучистое тепло от внутренней поверхности рефлектора, Вт; Q_{2n}^{nc} – лучистое тепло от продуктов сгорания за пределами области, ограниченной рефлектором, Вт; $Q_{2\kappa}^{nc}$ – конвективное тепло от продуктов сгорания за пределами области, ограниченной рефлектором, Вт; $Q_{2\kappa}^{nc}$ – конвективное тепло от продуктов сгорания за пределами области, ограниченной рефлектором, Вт; $Q_{2\kappa}^{nc}$ – конвективное тепло от продуктов сгорания за пределами области, ограниченной рефлектором, Вт; $Q_{2\kappa}^{nc}$ – конвективное тепло от продуктов сгорания за пределами области, ограниченной рефлектором, Вт; $Q_{2\kappa}^{nc}$ – конвективное тепло от продуктов сгорания за пределами области, ограниченной рефлектором, Вт; $Q_{2\kappa}^{nc}$ – конвективное тепло от продуктов сгорания за пределами области, ограниченной рефлектором, Вт; $Q_{2\kappa}^{nc}$ – конвективное тепло от продуктов сгорания за пределами области, ограниченной рефлектором, Вт; $Q_{2\kappa}^{nc}$ – конвективное тепло от продуктов сгорания за пределами области, ограниченной рефлектором, Вт; $Q_{2\kappa}^{nmk}$ – лучистое тепло от наружной

Уравнение (2.2) составлено исходя из основной цели излучателя любого конструктивного исполнения – направленного локального обогрева рабочих мест и производственных зон. В левой части уравнения представлена полезная доля теплоты (обозначим Q_1), а именно то количества теплоты, которое передается излучением на обогрев рабочей зоны помещения. В правой части – располагаемая теплота (тепловая мощность) излучателя за минусом потерь тепла с продуктами сгорания и конструкцией (обозначим Q_n).

При составлении уравнения теплового баланса высокотемпературной ГГИИ автор допускает, что топливо сгорает без химического и механического недожога. Фактически при работе высокотемпературных излучателей такие потери не превышают 1-2 %.

В работе [12] автор при составлении уравнения теплового баланса высокотемпературного излучателя учитывает тепло, возникающее при обтекании излучающего насадка окружающим воздухом и считает, что объем этого тепла значителен. На деле, такое предположение некорректно. Разность между давлением в области ограниченной рефлектором и давлением окружающего воздуха обуславливает движение продуктов сгорания по направлению к выходу из зоны рефлектора, а не наоборот (излучатель работает под избыточным давлением). Смешение продуктов сгорания и воздуха в таком случае возможно только за счет протекания процесса диффузии, масштабы которой, согласно Ландау, Лифшицу, Филлипсу и Стюарту [120-122], не будут превышать масштабы турбулентных пульсаций на выходе из зоны рефлектора излучателя.

Конвективное тепло, возникающее при обтекании воздухом излучающего насадка, необходимо учитывать только при рассмотрении теплового баланса низкотемпературных ГИИ с радиационными трубами, конструкция которых предполагает организованное удаление продуктов сгорания по воздуховодам за пределы помещения.

Схема движения тепловых потоков при работе высокотемпературного излучателя типовой модели представлена на рисунке 2.1.



Рис. 2.1 Схема движения тепловых потоков при работе типовой модели

Из рисунка 2.1 видно, что тепло керамического насадка Q_{a}^{un} за счет распространения электромагнитных волн и их отражения от внутренней поверхности рефлектора направляется в рабочую зону. Продукты сгорания области, ограниченной рефлектором, также отдают часть своего тепла Q_{1a}^{nc} излучением и переизлучением от внутренней поверхности рефлектора в рабочую зону, а тепло Q_{1k}^{nc} вступает в конвективный теплообменом с внутренней поверхностью рефлектора, которая в результате разогревается до высокой температуры и становится источником лучистой теплоотдачи в рабочую зону Q_{a}^{enp} . Частично тепло внутренней поверхности рефлектора передается к наружной за счет теплопроводности.

Продукты сгорания, отдав долю своего полезного тепла $Q_{1\pi}^{nc} + Q_{1\kappa}^{nc}$, попадают в пространство отапливаемого помещения, а именно за пределы области ограниченной рефлектором, омывают конструкцию излучателя и поступают в зону выше его размещения, где смешиваются с воздухом, уже нагретым в результате конвективного теплообмена с наружной поверхностью конструкции излучателя $Q_{\kappa}^{\mu n\kappa}$. В результате чего часть тепла продуктов сгорания поступает в рабочую зону, а часть тепла $Q_{2\pi}^{nc} + Q_{2\kappa}^{nc}$ расходуется на нагрев наружной поверхности конструкции излучателя и воздуха верхней зоны помещения. Дополнительно, нагретая наружная поверхность конструкции излучателя и продукты сгорания, вынесенные за пределы области ограниченной рефлектором, излучают тепло Q_{2n}^{nc} и $Q_{n}^{mn\kappa}$ преимущественно в зону выше установки ГИИ.

Следовательно, высокотемпературный излучатель является не только источником тепловой радиации, но и генератором совокупной лучистой и конвективной энергии, которая передается посредством излучения и конвекции от нагретых поверхностей излучателя и теплоты продуктов сгорания. Соотношение лучистой и конвективной теплоотдачи остается постоянным и в общей теплоотдаче определяется коэффициентом полезного действия ГГИИ.

Количество располагаемой теплоты (тепловая мощность) горелки определяется исходя из выражения:

$$Q_{zuz} = Q_{H} \cdot B_{p} \tag{2.3}$$

где Q_{μ} – низшая теплота сгорания газа, Дж/м³; B_{p} – расход газа, м³/с.

Потери тепла с продуктами сгорания и конструкцией излучателя рассчитываются по формуле:

$$Q_{n} = I_{2}^{nc} \cdot B_{p} + \varepsilon_{\kappa} \cdot C_{0} \cdot F_{\mu n \kappa} \cdot \left[\left(\frac{T_{\mu n \kappa}}{100} \right)^{4} - \left(\frac{T_{\kappa}}{100} \right)^{4} \right] + \alpha_{\mu n \kappa} \cdot F_{\mu n \kappa} \cdot \left(T_{\mu n \kappa} - T_{o} \right)$$
(2.4)

где I_2^{nc} – удельная энтальпия продуктов сгорания на 1 м³ газообразного топлива при их температуре на выходе из области, ограниченной рефлектором, и коэффициенте избытка воздуха, равном 1,05, Дж/м³; ε_{κ} – степень черноты конструкции излучателя; $F_{m\kappa}$ – площадь наружной поверхности конструкции излучателя, м²; $T_{m\kappa}$ – температура наружной поверхности конструкции излучателя, К; T_{κ} – средняя температура конструкций, расположенных в непосредственной близости от излучателя, К; $\alpha_{m\kappa}$ – коэффициент теплообмена конвекцией между наружной поверхностью конструкции излучателя и воздухом, Bт/(м²·K). Коэффициент конвективного теплообмена между наружной поверхностью конструкции излучателя и окружающим воздухом определим по данным [34]:

$$\alpha_{_{HIIK}} = \beta \cdot \left(T_{_{HIIK}} - T_{_o}\right)^{0.33} \tag{2.5}$$

где *β* – числовой коэффициент, равный в условиях помещения для вертикальных поверхностей 1,66, для горизонтальных 1,16 (при тепловом потоке сверху вниз) и 2,16 (при тепловом потоке снизу вверх).

Таким образом, доля полезного тепла излучателя определяется выражением:

$$Q_{1} = Q_{\mu} \cdot B_{p} - \left(I_{2}^{nc} \cdot B_{p} + \varepsilon_{\kappa} \cdot C_{0} \cdot F_{\mu\nu\kappa} \cdot \left[\left(\frac{T_{\mu\nu\kappa}}{100}\right)^{4} - \left(\frac{T_{\kappa}}{100}\right)^{4}\right] + \alpha_{\mu\nu\kappa} \cdot F_{\mu\nu\kappa} \cdot \left(T_{\mu\nu\kappa} - T_{o}\right)\right]$$
(2.6)

Коэффициент полезного действия современного высокотемпературного ГИИ типовой модели в процентах составит:

$$\eta = \frac{Q_1}{Q_p} \cdot 100 \tag{2.7}$$

Для повышения эффективности работы высокотемпературного ГИИ автор рассматривает два технических решения: теплоизоляция наружной поверхности конструкции излучателя (изолированная модель) и модернизация конструкции рефлектора (усовершенствованная модель). Последнее техническое решение защищено патентом на полезную модель RU № 167233.

Рассмотрим вариант с теплоизоляцией наружной поверхности конструкции излучателя. Схема движения тепловых потоков представлена на рисунке 2.2.



Рис. 2.2 Схема движения тепловых потоков при работе изолированной модели

Расчет изолированной модели выполняется согласно расчету типовой модели. Потребуется дополнительно выполнить расчет толщины тепловой изоляции по заданной температуре наружной поверхности согласно методике, представленной в приложении «В» СП 61.13330.2012 [123]. Расчет можно выполнить вручную или воспользоваться автоматизированной системой ISOTEC [124]. По результатам расчета, толщина тепловой изоляции принята равной 50 мм.

В расчетах необходимо учесть, что при теплоизоляции наружной поверхности конструкции излучателя передача тепла от внутренней поверхности рефлектора к наружной будет близка к нулю и, следовательно, уменьшится теплоотдача от продуктов сгорания к стенке. Таким образом, в сравнении с типовой моделью изменятся: температура продуктов сгорания в области, ограниченной рефлектором; температура продуктов сгорания, вынесенных за пределы области, ограниченной рефлектора.

В основу усовершенствованной модели поставлена идея создания низкозатратной системы рекуперации тепла, которая частично задействует тепло уходящих газов [14, 88-90]. Указанный технический результат достигается за счет смены однослойного тонкостенного рефлектора на емкостной рефлектор по принципу «водяная рубашка», которая состоит из двух стенок полированной нержавеющей стали, расположенных друг ОТ друга на расстоянии В полученную ёмкость поступает теплоноситель, 20 миллиметров. гле разогревается до температуры, не превышающей температуру кипения, и в дальнейшем может быть использован для отопления, горячего водоснабжения и вентиляции.

Схема движения тепловых потоков при работе усовершенствованной модели высокотемпературного ГИИ представлена на рисунке 2.3.



Рис. 2.3 Схема движения тепловых потоков при работе усовершенствованной модели

Модернизация конструкции излучателя позволит уменьшить теплоотдачу в зону выше его установки за счет частичной рекуперации тепла продуктов сгорания и снижения тепловых потерь рефлектором.

Уравнение теплового баланса усовершенствованной модели ГИИ примет вид:

$$Q_{rur}^{M} = \sum Q_{nyucm} + \sum Q_{\kappa o \, \mu \beta e \kappa}^{M} + Q_{m}$$
(2.8)

где Q_{zuz}^{M} – общее количество теплоты, которое вырабатывает усовершенствованная модель в единицу времени, Вт; $\sum Q_{xyuzem}$ – сумма всех тепловых потоков, переданных излучением в окружающее пространство при работе усовершенствованной модели, Вт; $\sum Q_{конвек}$ – сумма всех тепловых потоков, переданных конвекцией в окружающее пространство при работе усовершенствованной модели, Вт; Q_m – мощность теплового потока теплоносителя, проходящего сквозь «водяную рубашку» рефлектора, Вт.

Мощность теплового потока теплоносителя определяется уравнением:

$$Q_m = \frac{V}{\tau} \cdot c \cdot \Delta T \cdot \rho_m \tag{2.9}$$

где V – объем теплоносителя, м³; τ – время, за которое теплоноситель проходит сквозь модернизированный рефлектор, с; ΔT – разность температур теплоносителя на входе и выходе из модернизированной конструкции рефлектора, К; ρ_m – плотность теплоносителя, кг/м³.

Значение *Q_m* зависит от теплосъема «водяной рубашки», тепловой мощности ГИИ и расхода теплоносителя.

В развернутом виде уравнение (2.8) примет вид:

$$Q_{\pi}^{\mu\mu} + Q_{1\pi}^{nc} + Q_{1\kappa}^{nc} + Q_{\pi}^{enp} + Q_{m} = Q_{\mu\nu}^{M} - Q_{2\pi}^{nc} + Q_{2\kappa}^{nc} + Q_{\pi}^{\mu\mu\kappa} + Q_{\kappa}^{\mu\mu\kappa}$$
(2.10)

Расчет располагаемой теплоты выполнить согласно формулы (2.3). При расчете потерь тепла конструкцией усовершенствованной модели учесть, что в сравнении с типовой моделью измениться температура рефлектора:

$$Q_{n} = I_{2}^{nc} \cdot B_{p} + \varepsilon_{\kappa} \cdot C_{0} \cdot F_{p} \cdot \left[\left(\frac{T_{p}}{100} \right)^{4} - \left(\frac{T_{\kappa}}{100} \right)^{4} \right] + \alpha_{p} \cdot F_{p} \cdot \left(T_{p} - T_{o} \right) + \varepsilon_{\kappa} \cdot C_{0} \cdot F_{\kappa c} \cdot \left[\left(\frac{T_{\kappa c}}{100} \right)^{4} - \left(\frac{T_{\kappa}}{100} \right)^{4} \right] + \alpha_{\kappa c} \cdot F_{\kappa c} \cdot \left(T_{\kappa c} - T_{o} \right)$$

$$(2.11)$$

где F_p , $F_{\kappa c}$ – площадь рефлектора и корпуса излучателя, м²; T_p , $T_{\kappa c}$ – температура рефлектора и корпуса излучателя, К; α_p , $\alpha_{\kappa c}$ – коэффициент теплообмена конвекцией между рефлектором и воздухом, корпусом и воздухом, Вт/(м²·K).

Таким образом, доля полезного тепла усовершенствованной модели определяется из выражения:

$$Q_{1}^{\scriptscriptstyle M} + Q_{\scriptscriptstyle m} = Q_{\scriptscriptstyle H} \cdot B_{\scriptscriptstyle p} - (I_{\scriptscriptstyle 2}^{\scriptscriptstyle nc} \cdot B_{\scriptscriptstyle p} + \varepsilon_{\scriptscriptstyle p} \cdot C_{\scriptscriptstyle 0} \cdot F_{\scriptscriptstyle p} \cdot \left[\left(\frac{T_{\scriptscriptstyle p}}{100} \right)^{4} - \left(\frac{T_{\scriptscriptstyle \kappa}}{100} \right)^{4} \right] + \alpha_{\scriptscriptstyle p} \cdot F_{\scriptscriptstyle p} \cdot (T_{\scriptscriptstyle p} - T_{\scriptscriptstyle o}) + \varepsilon_{\scriptscriptstyle \kappa c} \cdot C_{\scriptscriptstyle 0} \cdot F_{\scriptscriptstyle \kappa c} \cdot \left[\left(\frac{T_{\scriptscriptstyle \kappa c}}{100} \right)^{4} - \left(\frac{T_{\scriptscriptstyle \kappa}}{100} \right)^{4} \right] + \alpha_{\scriptscriptstyle \kappa c} \cdot F_{\scriptscriptstyle \kappa c} \cdot (T_{\scriptscriptstyle \kappa c} - T_{\scriptscriptstyle o}))$$

$$(2.12)$$

Коэффициент полезного действия усовершенствованной модели в процентах составит:

$$\eta = \frac{Q_1^{M} + Q_m}{Q_p} \cdot 100 \tag{2.13}$$

Для определения эффективности типовой, изолированной и усовершенствованной моделей излучателя автором выполнен расчет по предлагаемой методике.

Исходные данные для расчета: коэффициент избытка воздуха – 1,05; температура теплоносителя на входе в рефлектор усовершенствованной модели – 30 °C; температура теплоносителя на выходе из рефлектора усовершенствованной модели – 50 °C; температура окружающего воздуха – 30 °C; температура продуктов сгорания на выходе из излучающего насадка – 900 °C; степень черноты наружной поверхности конструкции излучателя – 0,8; коэффициент излучения абсолютно черного тела – 5,67 Вт/(м²·К⁴). Топливо – природный газ из газопровода «Уренгой-Надым-Пунга-Ухта» в составе, %: CH₄=98,72; C₂H₆=0,12; $C_{3}H_{8}=0.01$; $C_{4}H_{10}=0.01$; $C_{5}H_{12}=0$; $C_{6}H_{14}=0$; CO =0; $CO_{2}=0.14$; $N_{2}=1$; $O_{2}=0$; $H_{2}S=0$; H₂=0; низшая теплота сгорания – 35500 кДж/м³. Дополнительно, исходными данными послужили результаты экспериментальных исследований, представленные в приложении Г; табличные значения удельной энтальпии [125]; продуктов сгорания, представленные В паспортные данные высокотемпературных ГИИ (серия 2100) компании АО «Сибшванк».

Расчет выполнен для высокотемпературных ГИИ всех моделей и тепловых мощностей, а именно 5, 10, 15, 20, 30 и 40 кВт. Результаты расчета сведены в таблицу 2.1.

	Тип конструкции	Наименование расчётного параметра							
Модель- тепловая мощность ГИИ, кВт		Располагаемая теплота (тепловая мощность), Вт	Потери тепла с уходящими газами, Вт	Потери тепла наружной поверхностью конструкции ГИГ, Вт	Объем полезного тепла, Вт	Объем потерь тепла с уходящими газами, %	Объем потерь тепла наружной поверхностью конструкции, %	КПД, %	
ГИИ-5	типовая	4931	1192	896	2842	24	18	58	
ГИИи-5	изолированная	4931	1592	0	3339	32	0	68	
ГИИм-5	усовершенствованная	4931	877	364	3690	18	7	75	
ГИИ-10	типовая	9861	2623	1385	5853	27	14	59	
ГИИи-10	изолированная	9861	3183	0	6678	32	0	68	
ГИИм-10	усовершенствованная	9861	1845	595	7420	19	6	75	
ГИИ-15	типовая	14792	4080	1833	8879	28	12	60	
ГИИи-15	изолированная	14792	4775	0	10016	32	0	68	
ГИИм-15	усовершенствованная	14792	2907	768	11116	20	5	75	
ГИИ-20	типовая	19722	5585	2241	11897	28	11	60	
ГИИи-20	изолированная	19722	6367	0	13355	32	0	68	
ГИИм-20	усовершенствованная	19722	4063	900	14760	21	5	75	
ГИИ-30	типовая	29583	8595	3055	17933	29	10	61	
ГИИи-30	изолированная	29583	9550	0	20033	32	0	68	
ГИИм-30	усовершенствованная	29583	6304	999	22280	21	3	75	
ГИИ-40	типовая	39444	11753	3666	24026	30	9	61	
ГИИи-40	изолированная	39444	12734	0	26711	32	0	68	
ГИИм-40	усовершенствованная	39444	8875	1206	29363	23	3	74	

Таблица 2.1 Эффективность высокотемпературных ГГИИ: типовой, изолированной и усовершенствованной моделей

Расчет эффективности высокотемпературных ГГИИ показал, что объем полезного тепла типовой модели составил 58-61 % от располагаемой теплоты, а это значит, что не более 61 % выработанного тепла передается излучением на обогрев рабочей зоны помещения, туда, где это необходимо. Остальная доля приходиться на потери энергии с уходящими газами (24-30 %) и наружной поверхностью конструкции (9-18 %), поскольку существенное количество тепла формируется в циркуляционной области горелки и передается в верхнюю зону помещения, а именно в зону между излучателем и кровлей, где впоследствии часть энергии аккумулируется ограждающими конструкциями (затем возможен интенсивный теплоотвод в атмосферу), а большая часть удаляется системой вентиляции.

Установлено, что с ростом тепловой мощности излучателя типовой модели увеличивается его КПД. Это обусловлено тем, что площадь теплообмена (площадь конструкции излучателя) повышается не пропорционально увеличению тепловой мощности и, как следствие, сокращаются потери тепла наружной поверхностью конструкции к единице мощности. Потери тепла с уходящими газами, наоборот, возрастают, так как с ростом тепловой мощности увеличивается число керамических плиток, что приводит к увеличению объема продуктов сгорания и менее интенсивному их разбавлению в воздушных массах.

Полученные данные по типовой модели с приемлемой точностью согласуются с данными, представленными в работах [15, 64, 92-95, 97], и работы производителя. Так. экспериментальные исследования данными ГГИИ, В работе А. И. Богомолова, высокотемпературных выполненные Д. Я. Вигдорчика, М. А. Маевского [64], показали, что от нагретой в процессе работы конструкции излучателя теряется 10,2 – 11,7 % тепла и дополнительно с продуктами сгорания от 27,5 до 29,8 %. Незначительное расхождение полученных данных объясняется различием конструктивных решений, тепловой мощности и регулировки работы ГИИ. Согласно информации производителя АО «Сибшванк», представленной в паспортах ГИИ, лучистый КПД излучателей типовой модели (серия 2100) составляет не менее 57 % при номинальной тепловой мощности, что не противоречит полученным результатам расчета, представленным в таблице 2.1.

Теплоизоляция наружной поверхности конструкции излучателя позволила на 7-10 % увеличить интенсивность теплового потока, переданного в рабочую зону помещения И, как следствие, повысить эффективность работы высокотемпературного излучателя и системы ГЛО в целом. Таким образом, при использовании излучателей изолированной модели, тепловая мощность системы ГЛО может быть уменьшена на 7-10 % при обеспечении того же теплового режима в рабочей зоне помещения как при использовании ГГИИ типовой модели, что тем самым позволит снизить капитальные и эксплуатационные затраты на систему отопления в целом.

Необходимо отметить, что при теплоизоляции наружной поверхности конструкции излучателя увеличиваются потери тепла с уходящими газами (таблица 2.1), так как снижается интенсивность теплоотдачи от внутренней поверхности рефлектора к наружной и, как следствие, конвективная теплоотдача от продуктов сгорания к стенке внутренней поверхности рефлектора.

Расчет эффективности излучателя усовершенствованной модели показал, что доля полезного тепла составила 74-75 % от его тепловой мощности, в том числе 58-61 % тепла переданного в рабочую зону помещения и 13-17 % тепла переданного теплоносителю за счет частичной рекуперации продуктов сгорания.

Следовательно, эффективность усовершенствованной модели зависит от теплосъема «водяной рубашки», величина которого определяется путем решения балансового уравнения:

$$Q_{mo} = K \cdot F_{gnp} \cdot \Delta T \tag{2.14}$$

где ΔT – температурный напор, а именно усредненная по всей поверхности нагрева разность температур греющей и обогреваемой сред, К; *К* – полуэмпирическое значение коэффициента теплопередачи от продуктов сгорания к теплоносителю, Вт/(м²·K); *F*_{впр} – площадь внутренней поверхности рефлектора ГИИ, м².

Температурный напор определяется согласно выражению:

$$\Delta T = \frac{\Delta T_{\delta} - \Delta T_{M}}{\ln \frac{\Delta T_{\delta}}{\Delta T_{M}}}$$
(2.15)

где ΔT_{δ} – разность температурных сред на том конце поверхности нагрева, где она больше, К; ΔT_{M} – разность температур на другом конце поверхности, К.

Значение коэффициента теплопередачи определяется по полуэмпирической зависимости (рисунок 2.4), полученной из выражения:

$$K = \frac{Q_{yx}}{F_{enp} \cdot \Delta T}$$
(2.16)

где Q_{yx} – количество тепла, переданного от продуктов сгорания к внутренней поверхности рефлектора, Вт.



Рис. 2.4 Полуэмпирическая зависимость коэффициента теплопередачи от тепловой мощности ГИИ усовершенствованной модели

Теплоотдача продуктов сгорания к внутренней поверхности рефлектора:

$$Q_{yx} = B_p \cdot \left(I_1^{nc} - I_2^{nc} \right) \cdot \varphi$$
(2.17)

где I_1^{nc} – удельная энтальпия продуктов сгорания на 1 м³ газообразного топлива при их температуре в области, ограниченной рефлектором, и коэффициенте избытка воздуха, равном 1,05, Дж/м³; φ – коэффициент сохранения тепла или использования поверхности нагрева, принимаемый в зависимости от полноты омывания продуктами сгорания внутренней поверхности рефлектора [125]. При расчете принят равным 0,6.

Результаты расчета теплосъема «водяной рубашки» усовершенствованного излучателя представлены в таблице 2.2.

Модель- тепловая мощность ГИИ, кВт	Температурный напор ΔТ, К	Коэффициент теплопередачи К, Вт/м ² ·К	Теплоотдача продуктов сгорания Q _{yx} , Вт	Теплосъем Q _{то} , Вт	Баланс Q _{yx} /Q _{то}
ГИИм-5	577	4,38	734	733	1,0008
ГИИм-10	590	5,56	1412	1412	1,0003
ГИИм-15	604	5,81	2035	2034	1,0004
ГИИм-20	616	5,78	2601	2601	1,0002
ГИИм-30	626	5,38	3775	3771	1,0012
ГИИм-40	641	5,52	4752	4744	1,0017

Таблица 2.2 Теплосъем «водяной рубашки»

По полученным данным определена зависимость перепада температур теплоносителя на входе и выходе из «водяной рубашки» от массового расхода и теплосъема (рисунок 2.5) согласно выражению:

(2.18)



Рис. 2.5 Зависимость перепада температур теплоносителя на входе и выходе из модернизированного рефлектора от массового расхода и теплосъема

На рисунке 2.6 схематически изображена одна из возможных схем применения тепловой энергии, полученной в результате рекуперации тепла продуктов сгорания высокотемпературного излучателя усовершенствованной модели.



Рис. 2.6 Принципиальная схема рекуперации в системе ГЛО: 1-ГИИм; 2-кран; 3датчик температуры теплоносителя регистрирующий; 4-сливной кран; 5-датчик температуры показывающий; 6-манометр показывающий; 7-буферная емкость; 8воздухоотводчик; 9-фильтр; 10-обратный клапан; 11-трехходовой клапан; 12предохранительно-сбросной клапан; 13-двухходовой клапан; 14-подпиточный насос; 15-манометр регистрирующий; 16-мембранный расширительный бак; 17циркуляционный насос; 18-рыле перепада давления; 19-балансировочный клапан;

20-клапан подпитки; 21-теплогенератор; 22-частотный преобразователь; 23контроллер; 24-датчик температуры наружного воздуха регистрирующий; 25-бак

Количество ГИИм 1 на схеме представлено условно, на практике их число может быть от нескольких штук до нескольких тысяч. Заполнение системы осуществляется через клапан подпитки 13 и подпиточный насос 14. Циркуляцию теплоносителя в системе обеспечивает насос 17, частота вращений рабочего колеса которого регулируется частотным преобразователем 22 по данным, полученным от рыле перепада давления 18 или датчиков температуры 3. ГИИм Требуемый расход рефлектор 1 обеспечивается через работой балансировочного клапана 19. Группа безопасности системы состоит из мембранных расширительных баков 16, автоматических воздухоотводчиков 8 и предохранительно-сбросных клапанов 12. Регулирование температуры и давления в системе осуществляется посредством контроллера 23, датчиков температуры 3, 5 и датчиков давления 6, 15. В случае превышения температуры в системе двухходовый клапан 13 осуществляет подмес холодного теплоносителя, а горячий теплоноситель удаляется в бак охладитель 25 посредством предохранительносбросного клапана 12. В системе, также, установлены запорная арматура 2; фильтры 9; сливные краны 4; трехходовые клапаны 11.

Система рекуперации тепла работает следующим образом. Исходный теплоноситель по трубопроводу Т2 поступает в «водяную рубашку» рефлектора ГИИм 1, где происходит его нагрев. Далее нагретый в рефлекторе теплоноситель по трубопроводу Т1 поступает в буферную емкость 7, где проходит через один из теплообменников, посредством которого отдает тепло теплоносителю, циркулирующему в буферной емкости 7. Затем насос 17 возвращает остывший теплоноситель в рефлектор ГИИм 1 для его нового нагрева. На случай когда энергии теплоносителя, поступающего от ГИИм 1 в буферную емкость 7, недостаточно, вода в буферной емкости дополнительно подогревается от теплогенератора 21 посредством второго теплообменника. Теплоноситель, нагретый в буферной емкости 7, поступает, например, на нужды горячего водоснабжения (потребитель 1), отопления (потребитель 2) и вентиляции (потребитель 3).

Можно заключить, что предлагаемые технические решения: теплоизоляция наружной поверхности конструкции и модернизация конструкции рефлектора, позволят повысить эффективность работы высокотемпературного излучателя и, как следствие, системы ГЛО в целом. Эффективность работы излучателя при его теплоизоляции повышается на 7-10 % за счет увеличения интенсивности теплового потока, переданного в рабочую зону, что тем самым позволит снизить ГЛО тепловую мощность системы И. как следствие, капитальные И эксплуатационные затраты. Эффективность работы излучателя при модернизации конструкции его рефлектора повышается на 13-17 % за счет рекуперации тепла продуктов сгорания и тем самым нагрева теплоносителя, который в дальнейшем может быть использован для отопления, горячего водоснабжения и вентиляции. В обоих случаях за счет снижения теплоотдачи от рефлектора и вторичного использования тепловой энергии уменьшатся потери тепла конструкцией излучателя и с уходящими газами, что позволит решить проблему перегрева верхней зоны помещения, и, как следствие, обеспечить оптимальный тепловой режим во всем объеме помещения.

ГЛАВА З ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОМАСООБМЕНА И ГОРЕНИЯ ПРИ РАБОТЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗОВЫХ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

3.1 Методология численных исследований

Одной из особенностей модульных производственных зданий, оснащенных системой лучистого газового отопления, является высокая степень пространственной неравномерности тепловых потоков, что, в свою очередь, усложняет анализ их энергоэффективности без детализации температурных полей во всем объеме помещения [126]. Система ГЛО включает в себя большое число параметров (геометрические размеры, форма, материалы всех элементов системы, оптические свойства среды), что делает весьма затратным её изучение путем натурных экспериментальных исследований. Поэтому анализ эффективности систем ГЛО целесообразно производить путем имитационного математического моделирования – изучения поведения объекта исследования в тех или иных условиях путем решения уравнений его математической модели.

Интерактивная параметрическая модель системы газового инфракрасного обогрева в объеме модульного производственного здания в общем случае должна содержать источник излучения и поверхности облучения; учитывать не только лучистый нагрев рабочей зоны, но и конвективно-радиационный нагрев верхней зоны цеха при распределении воздушных потоков в отапливаемом помещении; учитывать эжекцию горелкой воздуха на горение; рассчитывать состав и температуру продуктов сгорания на основе кинетики химических реакций и теплообменных процессов в ГИИ. Такая постановка позволит оценить как работоспособность излучателя на основе анализа протекания реакции горения и температур рабочих поверхностей, так и его эффективность по температурным полям в помещении.

В настоящей главе приводятся результаты разработки и апробации конечноэлементной параметрической модели системы ГЛО.

3.2 Математическая формализация задачи исследования

В технической литературе практически отсутствуют как методики расчета инфракрасного систем газового отопления В условиях сложного тепломассообмена, так и количественные характеристики, связывающие параметры внешней среды С состоянием микроклимата модульных производственных зданий, оборудованных ГИИ, поэтому в качестве инструмента исследования применим универсальную систему конечно-элементного анализа Ansys Multiphysics. включающего в себя модуль Fluent. Достоинства программного модуля Fluent заключаются в использовании неструктурированной сеточной технологии (наиболее универсальный тип элементов – тетраэдр) [127]. Кроме того, он совместим с большим количеством САПР, что расширяет возможное использование разработанной модели для применения на практике.

Спрогнозировать рабочие параметры систем ГЛО представляется возможным только по результатам расчета полной картины газо-воздушных и тепловых потоков в обогреваемом объеме, которая в общем случае описывается уравнениями Навье-Стокса, на настоящий момент, не имеющими аналитического решения:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \overline{u_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho \overline{u_i u_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho \overline{u_i' u_j'} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \right] + f_i$$
(3.1)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j \right) = 0 \tag{3.2}$$

где $\overline{u_1}$, $\overline{u_2}$, $\overline{u_3}$ – осредненные по времени значения скоростей; $\overline{u'_1}$, $\overline{u'_2}$, $\overline{u'_3}$ – пульсационные составляющие скорости [128].

3.2.1 Модель турбулентности

Ввиду своей простоты и производительности, модели естественной конвекции в ламинарной постановке используются при решении инженерных задач проектирования ГЛО намного чаще, чем в турбулентной. Так, например, в [126, 129 – 132] при анализе работы систем инфракрасного отопления

рассматривался исключительно режим ламинарной естественной конвекции воздуха. Отмечено, что возможен и турбулентный режим, но решение задач в турбулентной постановке многократно сложнее. В [30-33] доказано наличие турбулентности в объеме производственного здания, отапливаемого системами ГЛО: турбулентность возникает самопроизвольно как при взаимодействии с перемешиванием попутных потоков воздуха и продуктов сгорания, так и при наличии лобового сопротивления корпуса ГГИИ на пути восходящих потоков воздуха (рисунок 3.1). Возникновение лобового сопротивления, в этом случае, объясняется разностью давлений воздуха под излучателем и над ним (рисунок 3.1), а также трением воздуха о поверхность рефлектора. На практике любое изменение сечения приводит к потере давления и дальнейшему турбулентному движению газов. Турбулентность, в свою очередь, оказывает существенное влияние на протекание химических реакций, процесс горения. Таким образом, можно заключить, что моделирование турбулентности – важная большое И задача, имеющая прикладное применение. достоверная параметрическая модель системы газового инфракрасного обогрева должна эту задачу решать.



Рис. 3.1 Возникновение свободной турбулентности при обтекании ГИИ

восходящим потоком воздуха

Допущение о стационарном режиме работы системы отопления позволяет для замыкания уравнения (3.1) использовать высокопроизводительные RANSтурбулентности, наиболее универсальной ИЗ которых модели является стандартная k-є модель, согласно которой система уравнений движения (3.1) дополняется двумя дифференциальными уравнениями, описывающими перенос соответственно кинетической энергии турбулентности k И скорости диссипации є [128]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \overline{u_j}k) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + P_k - \rho \varepsilon$$
(3.3)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_{j}}(\rho\overline{u_{j}}\varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_{j}}\left(\Gamma_{\varepsilon}\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_{j}}\right) + \frac{\varepsilon}{k}\left(C_{\varepsilon 1}P_{k} - \rho C_{\varepsilon 2}\varepsilon\right)$$
(3.4)

где $P_k = -\rho \overline{u_i u_j} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j}$ – множитель, характеризующий генерацию энергии k.

Множители Γ_k и Γ_ε определяются из уравнений:

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \tag{3.5}$$

$$\Gamma_{\varepsilon} = \mu + \frac{\mu_{t}}{\sigma_{\varepsilon}} \tag{3.6}$$

где µ – вязкость; µ_t – коэффициент турбулентной вязкости.

Уравнения для параметров є и µ_t:

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} \right)^2 \tag{3.7}$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{3.8}$$

Константы модели k-є [128]: $C_{\mu} = 0,09$; $C_{\epsilon 1} = 1,44$; $C_{\epsilon 2} = 1,92$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_{\epsilon} = 1,3$.

Недостатком k-є модели является низкая точность при моделировании турбулентных течений в каналах, трубах и пограничных слоях, т. е. течений около твердых стенок, трение о которые приводит к непрерывному порождению завихренностей с отрывом от ограждающих поверхностей. В этом случае

результаты расчета, получаемые при использовании k-є модели, могут сильно зависеть от расстояния, на которое удалены от стенки ближайшие к ней узлы расчетной сетки. В то же время k-є модель достаточно точно описывает свободные турбулентные течения, в которых непосредственное влияние какихлибо твердых стенок отсутствует.

Для прогнозирования наличия турбулентности служит величина, характеризующая отношение нелинейного и диссипативного членов в уравнении Навье-Стокса – число Рейнольдса:

$$\operatorname{Re} = \frac{\upsilon D_{\Gamma}}{\upsilon}$$
(3.9)

где v – характерная скорость, м/с; D_{Γ} – гидравлический диаметр (определяется как помноженное на 4 отношение площади поперечного сечения потока жидкости к смоченному периметру поперечного сечения потока), м; v – кинематическая вязкость среды, M^2/c .

Подставляя кинематическую вязкость продуктов сгорания (рисунок 3.2) в формулу (3.9) получим следующие значения критерия Рейнольдса: в каналах керамической плитки – 3,8; на выходе из каналов керамической плитки – 123; на выходе из области ограниченной рефлектором – 411.



Рис. 3.2 Зависимость кинематической вязкости (м²/с) продуктов сгорания от

температуры

Экспериментальное исследование течения В диффузоре [133] расширяющемся канале, аналогичном каналу рефлектору, при числах Рейнольдса в выходном сечении в диапазоне от 400 до 3000 показало, что при различных способах подачи потока воздуха на выходе из диффузора формируется свободное турбулентное течение, при этом течение в расширяющемся канале – безотрывное, т. е. порождения завихренностей с отрывом от ограждающих поверхностей не происходит. Процесс формирования турбулентного течения внутри диффузора происходит только при значении числа Рейнольдса больше 800 [133], в остальных случаях в объеме производственного помещения будут преобладать свободные турбулентные течения, что позволяет сделать выбор в пользу стандартной k-є Лля турбулентности. утверждения математической модели модели турбулентности должен быть выполнен анализ её достоверности путем сопоставления результатов численного и экспериментального исследований (приложение Г).

3.2.2 Модель горения

Учитывая низкую скорость движения газовоздушной смеси и диаметр каналов излучающего насадка, число Рейнольдса в каналах керамической плитки можно оценивать величиной не более 123, что, очевидно, соответствует ламинарному режиму течения. Скорость химической реакции горения в условиях неизотермического ламинарного смешения реагирующих компонентов определяется в соответствии с законом Аррениуса при значениях температуры и концентраций реагентов и их взаимных корреляций. Молярная скорость генерации/разрушения вещества с индексом I, в элементарной реакции с индексом k рассчитывается по формуле [134]:

$$R_{k} = \left(F_{k} \prod_{I=A,B,...}^{N_{C}} [I]^{r_{kl}} - B_{k} \prod_{I=A,B,...}^{N_{C}} [I]^{r_{kl}}\right)$$
(3.10)

где [I] – молярная концентрация вещества с индексом *I*; F_k и B_k – константы прямой и обратной реакций соответственно. Газообразная среда при этом представляется как молекулярная смесь веществ N₂, O₂, CO₂, H₂O и CH₄.

г представляет порядок реакции для вещества с индексом *I* в элементарной реакции с индексом *k*. Константы реакций определяются с применением уравнения Аррениуса:

$$F_{k} = A_{k}T^{\beta_{k}} \exp\left(-\frac{E_{k}}{RT}\right)$$
(3.11)

$$B_{k} = A_{k}T^{\beta_{k}} \exp\left(-\frac{E_{k}}{RT}\right)$$
(3.12)

где A_k – предэкспоненциальный множитель, $M^3/(\kappa\Gamma \cdot c)$; β_k – безразмерная экспонента температуры; E_k – энергия активации, Дж/моль; T – температура, K; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·K). Коэффициенты в уравнении Аррениуса принимаются равными $A_k = 0,1\cdot10^{10} \text{ м}^3/(\kappa\Gamma \cdot c)$ и $E_k = 1,53\cdot10^5$ Дж/моль.

Так как перемешивание, транспортировка, конвекция, диффузия и химические реакции, согласно этой модели, рассчитываются путем решения уравнений ДЛЯ каждого химического вещества отдельно, это ведет К значительному увеличению расчетного времени для моделирования многостадийных процессов горения и многокомпонентных реагирующих смесей [135]. Оптимизация расчетного времени в таком случае требует упрощения кинетики реакций и/или состава газовой смеси. Для оценочных, оптимизационных или вариативных исследований такое упрощение реализуется выбором однокомпонентного топлива и, как следствие, упрощенного состава топливовоздушной смеси. Например, расчет горения метана (половина табличных видов газообразного топлива более чем на 90 % состоят из метана, а 25 % – более чем на 98 % [125]), согласно этой модели, основывается на глобальных необратимых реакциях между горючим и окислителем.

3.2.3 Модель излучения

В Ansys Fluent реализованы пять моделей излучения в объёме: модель Россланда, модель сферических гармоник в первом приближении «P1», модель дискретного переноса «DTRM», модель поверхность – поверхность «S2S», модель дискретных ординат «DO». Модель «S2S» описывает исключительно лучистый

перенос с поверхности в замкнутых областях с прозрачной средой и не позволяет учесть излучение в рабочую зону горячими продуктами сгорания. При выборе модели в [136] рекомендовано руководствоваться оптической толщиной в расчетной области: $a \cdot L$, где a - коэффициент поглощения излучения средой, 1/m; $L - характерный размер области, м. Для задач с высокой оптической толщиной рекомендуется использовать наиболее производительные модели Россланда <math>(a \cdot L > 3)$ и P1 $(a \cdot L > 1)$. Модели «DTRM» и «DO» работают во всем диапазоне оптических толщин, но требуют более высоких вычислительных затрат.

Таким образом, при малом характерном размере расчетной области (например, при моделировании стендовых испытаний) из всего набора моделей лучистого теплообмена возможно использование исключительно моделей «DTRM» и «DO». Для уменьшения объема вычислений в оптически «толстой» среде производственного помещения использование экономичных моделей Россланда и «P1» ограничено следующими факторами: модель Россланда использует условие скольжения температуры на стенке и нечувствительна к излучению с поверхностей; в задачах с локальными источниками тепла модель «P1» имеет неприемлемо высокую погрешность расчета тепловых потоков. Модель «DTRM» не учитывает рассеивание излучения, что исключает её применение при проектировании систем ГЛО в запыленных производственных помещениях. Следовательно, наиболее подходящей в этом случае является модель «DO»:

$$\frac{dI(\vec{r},\vec{s})}{dS} + (a + \sigma_s)I(\vec{r},\vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r},\vec{s}) \mathcal{D}(\vec{s},\vec{s}) d\Omega' \qquad (3.13)$$

где r – вектор положения; s – вектор направления; s' – вектор направления рассеяния; S – длина пути; α – коэффициент поглощения; n – показатель преломления; σ_s – коэффициент рассеяния; σ – постоянная Стефана-Больцмана; I – интенсивность излучения, зависящая от положения и направления вектора; T – локальное значение температуры среды; Φ – фазовая функция; Ω' – телесный угол.

Выбранная модель «DO» обладает следующими преимуществами: единственная модель излучения, которая позволяет учесть зеркальное отражение лучей от поверхности рефлектора, а также рассчитать излучение сквозь полупрозрачные среды. Только модель «DO» позволяет рассчитать излучение «не серой» поверхности.

Процесс переноса теплоты является сложным и пространственным [126, 129, 131]: лучистый нагрев прилегающих к рабочим поверхностям слоев воздуха интенсифицирует циркуляцию нагретого газа и теплоперенос конвекцией. По этой причине целесообразна трехмерная именно постановка задачи теплопереноса. Применение выбранного инженерного программного продукта ANSYS Fluent позволяет применить численные методы к решению выше спрогнозировать работу обозначенных уравнений И системы газового инфракрасного отопления с учетом сложного тепломассообмена в трехмерном пространстве производственного здания. Для решения задач теплопереноса в вентилируемых помещениях с радиационными источниками нагрева выбраны модель турбулентного течения газовой среды с гравитацией и модель дискретных ординат для расчета лучистого теплообмена.

3.3 Граничные условия

В качестве граничных условий были приняты: расход природного газа на излучатель тепловой мощностью 5 кВт составляет 0,5 м³/час; топливо – метан (100%); окислитель – кислород воздуха; теоретически необходимый объем воздуха для полного сгорания – 9,52 м³/м³; коэффициент избытка воздуха – 1,05; давление газа перед соплом – 1270 Па.

Для элементов конструкции ГИИ задан материал «Сталь марки 12Х18Н10Т», с толщиной листа 0,002 м, коэффициентом теплопроводности и удельной теплоемкостью, представленными в полиномиальной зависимости от температуры: $\lambda = 0,018 \cdot T + 9$, Bt/(м·K); c = $-2 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 0,45 \cdot T + 324,5$, Дж/(кг·K). Степень черноты поверхности полированных стальных деталей излучателя

принята равной $\varepsilon = 0,002$. На стенках, ограничивающих расчетную область стенда, приняты условия теплообмена 3-го рода:

$$-\lambda \left(\frac{\delta T}{\delta n}\right)_c = \alpha \left(T_e - T_c\right) \tag{3.14}$$

где T_c – температура на границе расчетной области (стенки), К; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); n – нормаль к ограждающей поверхности, м.

Температура воздуха в цеху T_{e} принималась 20 °С. При определении теплофизических свойств (λ , α , C_{p}) материалов ограждений и воздушной среды использовались стандартные библиотеки Ansys Fluent.

Теплофизические свойства области расчета соответствуют свойствам воздуха. Внутри расчетной области размещена расчетная подобласть, включающая камеру сгорания и рефлектор. Расчетные области теплообмена и излучателя построены как сопряженные газодинамические зоны со сдвоенными стенками (wall и shadow wall) в местах контакта. Условия на двойной стенке формулируются как сопряженные, то есть вычисляются на основе решения уравнения теплового равновесия на стенке с учетом толщины стенки и свойств её материала:

$$T_1 - T_2 = q \frac{\delta}{\lambda} \tag{3.15}$$

где δ – толщина стенки, м; q – падающий тепловой поток, Вт/м². Т₁ Т₂ – температуры на внутренней и наружной поверхностях ограждающей конструкции, К.

При моделировании производственного цеха теплообмен с окружающей средой ограничен четырьмя наружными стенами и световыми проемами. На стенках, ограничивающих область расчета цеха, приняты условия теплообмена с окружающей средой 3-го рода: температура внешней среды принималась по температуре самой холодной пятидневки для г. Тюмени –35 °C [137]. Материал стен – сэндвич-панели с утеплителем из пенополиуретана, который среди теплоизолирующих материалов обладает наиболее низким коэффициентом

теплопроводности ($\lambda = 0,019$ Вт/(м·К), с = 1,47 кДж/(кг·К)). Для светового проема задан материал «стекло» с приведенным коэффициентом теплопроводности $\lambda = 1$ Вт/(м·К) и толщиной 0,27 м, что соответствует коэффициенту термического сопротивления окна 0,42 м²·К/Вт [138]. Степень черноты внутренних ограждающих поверхностей принята равной $\varepsilon = 0,8$.

Воздухообмен в цеху обеспечивается работой общеобменной вентиляции, предусматривающей подачу воздуха в нижней части помещения, а забор воздуха – в верхней зоне. Массовый расход воздуха через вентиляционные отверстия, определяется из объема помещения и необходимой кратности воздухообмена.

3.4 Дискретизация расчетной области

Все необходимые элементы геометрической модели расчетной области: стены, световые проемы, вентиляционные отверстия, устройства обогрева смоделированы с применением DesignModeller. При решении поставленных задач толщина ограждающих конструкций и их теплофизические свойства задаются непосредственно в решателе Fluent, что упрощает геометрию расчетной области.

Для решения задачи методом конечных элементов проводится дискретизация геометрической модели расчетной области с помощью подпрограммы Ansys Meshing. Для выбора параметров дискретизации задачи, включающих в себя размер сетки конечных элементов и пространственные характеристики излучения, выполнен адаптационный вариантный расчет модели. Для получения приемлемого по точности и в то же время производительного расчета, дискретизация выполнена неравномерной (рисунок 3.3): сетка точнее в областях наибольших градиентов расчетных характеристик (камера смешения, область ограниченная рефлектором, верхняя зона помещения ГИИ. над пристеночные области). Пробные расчеты с использованием сеток с разной топологией и числом ячеек показали, что принятая в данной работе сетка, $3 \cdot 10^{5}$ контрольных объемов, содержащая около обеспечивает низкую чувствительность результатов к дальнейшему измельчению сетки.



Рис. 3.3 Расчетная сетка моделируемого производственного помещения

Для подбора математической модели турбулентности, верификации и оценки достоверности результатов имитационного моделирования ГГИИ был действующий смоделирован экспериментальный дополнительно стенд. позволяющий в сопряженной постановке проводить испытания излучателей на стадии их физического конструирования и сборки. Все экспериментальные которых представлены сопоставлении исследования, результаты при С результатами математического моделирования, проведены базе на сконструированного экспериментального стенда, расположенного в реальных условиях производственного помещения.

На основании эскизов ГГИИ и экспериментального стенда были построены их полные виртуальные прототипы. Построение расчетной сетки (рисунок 3.4) выполнено также средствами ANSYS Workbench.



Рис. 3.4 Схема экспериментального стенда (слева) и его расчетная сетка (справа)

Число итераций в ходе численного решения выбиралось по сходимости результатов (рисунок 3.5). В качестве критерия сходимости использовались массовый баланс и разность между выходящим тепловым потоком и суммарной генерацией тепла в расчетной области.



Рис. 3.5 Графики безразмерных невязок расчета
3.5 Верификация модели

Адаптационное исследование для утверждения математической модели турбулентности выполнено на примере стендовых испытаний типовой модели 5 кВт излучателя, в ходе которого исследовались три варианта (рисунок 3.6, а): без модели (ламинарное течение), k-є, k-ω модели турбулентности.



Рис. 3.6 Температурные поля (°С) при адаптационном исследовании (а) и

сопоставление результатов (б)

Сопоставление результатов адаптационного и экспериментального исследований (рисунок 3.6, б) показало лучшую сходимость при использовании стандартной k-є модели турбулентности. Согласование результатов, полученных с применением стандартной k-є модели турбулентности (рисунок 3.6, б), и экспериментальных данных подтверждает ранее высказанное предположение о наличии свободной турбулентности над корпусом высокотемпературной ГГИИ.

Наряду с типовой моделью ГИИ мощностью 5 кВт, конструкция которого предполагает рефлектор, выполненный из полированной нержавеющей стали,

рассмотрены ГГИИ изолированной модели мощностью 10 кВт и усовершенствованной модели мощностью 5 кВт (рисунок 3.7, а).



Рис. 3.7 Температурные поля (°С) типовой, изолированной и усовершенствованной моделей ГГИИ (а) и сопоставление с результатами стендовых испытаний (б)

Результаты математического моделирования тепломассообмена в турбулентной реагирующей среде и горения, воспроизводящие реальные условия работы исследуемой высокотемпературной ГГИИ, находятся в приемлемом согласовании с экспериментальными данными, полученными в ходе стендовых испытаний (рисунок 3.7, б и приложение Г).

Исследования математической модели излучателя (рисунок 3.8) позволяют заключить, что реакция горения протекает без недожога, т.е. полностью, а доля СО в уходящих дымовых газах не превышает паспортных 0,02 % для всех вариантов. Согласно модели, температура излучающего насадка для всех исследованных конструкций ГИИ не зависела от исполнения рефлектора и составляла 900 °С (рисунок 3.8). Совместно с фактом численного равенства массовых долей продуктов сгорания в уходящих газах для всех изученных вариантов, это приводит к заключению, что исполнение рефлектора не влияет на горения. Качественная химические процессы картина газодинамики (рисунок 3.8, а) в области ограниченной рефлектором, также, одинакова для всех трех вариантов исполнения рефлектора. Расчетное распределение температуры по толщине и поверхности плитки (рисунок 3.8, б) сопоставлено с результатами экспериментальных работ А. И. Богомолова, Д. Я. Вигдорчика, М. А. Маевского [64].



Рис. 3.8 Температурные поля (°С) в области ГГИИ с протеканием реакции

График (рисунок 3.8, б) демонстрирует, что принятая модель горения на базе упрощенной кинетической схемы брутто-реакций окисления метана имеет качественное согласование с экспериментом авторов [64], например, в части механизмов инициирования горения и расположения кинетической области горения. Кроме того, следует отметить приемлемое количественное согласование температуры излучающей поверхности насадка с экспериментом. Разница в

значениях температур на входе в перфорацию керамического насадка излучателя объясняется конструктивными и режимными характеристиками излучателей, которые изучали авторы [64].

Для контроля достоверности разрабатываемой модели производственного здания при задании граничных условий были использованы данные реальных производственных помещений, на базе которых ранее были проведены натурные экспериментальные исследования (приложение Г). Технические характеристики типовых моделей ГИИ и их эскизы представлены в главе 1. Согласование результатов тепловизионного обследования в части диаметра теплового пятна на поверхности пола, распределения температуры, уровня температурной стратификации (рисунок 3.9) говорит достоверности полученных 0 ПО результатам моделирования параметров теплового режима производственных зданий, отапливаемых высокотемпературными ГГИИ.



Рис. 3.9 Температурные поля (°С) по результатам математического моделирования (слева) и тепловизионного обследования (справа): а – на поверхности внутренних ограждающих конструкций; б – на поверхности наружных ограждающих конструкций

3.6 Вариантное исследование построенной параметрической модели

Возможными способами управления потоками излучения от источников направленного инфракрасного излучения к рабочим поверхностям являются конструктивное исполнение ГГИИ, их взаимное расположение в объеме здания, материалы всех элементов системы, оптические свойства среды. Следовательно, построенная параметрическая модель включает в себя большое число варьирующих величин, что и требует разработки формализованной процедуры для её практического применения. Поэтому для разработки рекомендаций по использованию предложенной параметрической модели на практике проведено численное исследование с варьированием граничных условий.

Произведен анализ возможности дифференцированной оценки параметров микроклимата путем имитационного моделирования среды внутри модульного быстровозводимого производственного (цеха) габаритами здания с 60 м x 24 м x 12 м и оснащенного системой ГЛО. Рассмотрены наиболее типичные и имеющие значение для практики наборы граничных условий. Для выявления наиболее эффективного способа распределения воздушных и тепловых потоков в производственном помещении было рассмотрено 126 наиболее типичных компоновок систем ГЛО, в том числе исследовалась работа высокотемпературных ГГИИ типовой, изолированной и усовершенствованной моделей тепловых мощностей – 5, 10, 15, 20, 30, 40 кВт при размещении на высотах 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 метров от пола. Для всех вариантов суммарная тепловая нагрузка системы отопления составляла 200 – 240 кВт (приложение В).

Для проверки выполнения условий теплового комфорта рассчитывалось распределение интенсивности теплового облучения рабочей зоны (1 метр над исследуемых уровнем пола) В зависимости ОТ параметров. Согласно СП 60.13330.2012 максимальная интенсивность инфракрасного облучения рабочего места не должна превышать 150 Вт/м². Для исследованных параметров этому условию соответствуют следующие оптимальные высоты подвеса ГГИИ: 5 кВт – 4-5 м; 10 кВт – 5-6 м; 15 кВт – 6-7 м; 20 кВт – 7-8 м; 30 кВт – 8-10 м; 40 кВт – 10-11 м. Установлены зависимости, свидетельствующие о том, что чем

выше уровень расположения ГГИИ, тем равномернее распределение локальных тепловых потоков в рабочей зоне и тем ниже их значение в эпицентре теплового пятна. Под тепловым пятном понимается участок обогреваемой поверхности, на который падает не менее 10 Вт/м² от исследуемой ГГИИ. Полученная функциональная аппроксимирующая зависимость диаметра теплового пятна под ГГИИ от мощности в рассмотренном диапазоне характеристик близка к логарифмической (рисунок 3.10).



Рис. 3.10 Радиус (R, м) теплового пятна в рабочей зоне при использовании ГГИИ различной мощности (Q, кВт)

В ходе вариативного исследования установлено, что наиболее равномерная интенсивность облучения рабочей зоны обеспечивается при установке ГГИИ одинаковой мощности на расстоянии, приведенном на рисунке 3.10. Значение тепловых потоков при такой организации ГЛО на 25% выше, чем при размещении одиночных ГГИИ на большем расстоянии (рисунок 3.11 и приложение В). Таким образом, в ходе имитационного моделирования геометрия расположения излучателей в пространстве цеха выбиралась из условий равномерной облученности поверхности пола согласно полученной функциональной зависимости (рисунок 3.10).



79

Рис. 3.11 Распределение плотности теплового потока в рабочей зоне (q, Bт/м²) при однорядном (пунктирная линия) и многорядном (сплошная линия) размещениях ГИИ мощностью 5 кВт на высоте: — – 4 м, — – 5 м, — – 6 м; I, II – места установки 1-го и 2-го ГИИ; S – шаг расстановки ГИИ, м.

3.7 Газодинамика и тепломассоперенос в вентилируемом помещении, оборудованном ГИИ

Распределение полей скорости и температуры воздуха формируется в взаимодействия результате вентиляционных и конвективных потоков OT источников теплоты. Система вентиляционных потоков в помещении создается источниками (подача воздуха через распределительные устройства И распространяющиеся по инерции) и стоками (отвод воздуха под влиянием разряжения через систему воздухоотводящих устройств). Конвективные потоки от источников теплоты создаются нагретыми поверхностями под действием гравитационных сил.

воздуха Температура рабочей определяется В зоне условиями теплообмена конвективного для стационарного теплового состояния поверхности пола. Полученный вид функциональной зависимости температуры пола в зависимости от высоты подвеса ГГИИ качественно повторяет известный на практике закон Ламберта, т.к. в рассмотренном диапазоне параметров лучистый тепловой поток в рабочую зону обратно пропорционален квадрату расстояния до излучающей поверхности плитки. Взвешенные частицы пыли, влажность, молекулы двухатомных газов приводят к рассеиванию инфракрасного излучения в разных направлениях и ослабеванию лучистого теплового потока с увеличением расстояния до излучающей поверхности ГГИИ (рисунок 3.11). Величина рассеяния в каждом производственном помещении индивидуальна и зависит от состава воздуха и размеров взвешенных частиц. В запыленном цеху увеличение высоты подвеса ГГИИ негативно сказывается на её эффективности.

В результате серии численных расчетов установлено, что для всех рассмотренных вариантов наблюдается естественный процесс температурной стратификации газового объема в цеху (рисунок 3.12 и приложение В) по причине разности плотностей холодного и теплого воздуха. Температурная стратификация («тепловая подушка») - «естественный процесс температурного расслоения воздуха, результатом которого является значительная разность температур воздуха в разных зонах помещения» [139]. При эксплуатации ГГИИ в помещении с высокими потолками дымовые газы и выработанное конвективное тепло дополнительно нагревают воздух между ГГИИ и кровлей помещения, где требуется. Поскольку продукты сгорания этого совершенно не имеют температуру существенно более высокую, чем температура воздуха в естественным образом устремляются помещении, они вверх, создавая завихрения, способствующие перемешиванию дымовых газов с воздушными массами. Во время подъёма происходит полное перемешивание газов с воздухом за счет диффузии. На температуру газового объема оказывают влияние расход и температура приточного воздуха, объем и температура продуктов сгорания, воздухопроницаемость светового проема, доля воздуха, расходуемого на горение. По итогам моделирования разница температур между рабочей зоной и 17 °C потолочным пространством составляла (при ОТ размещении усовершенствованной конструкции ГГИИ на высоте 4 м) до 65,2°С (при размещении типовой модели ГГИИ на высоте 10 м).



в) усовершенствованная конструкция ГГИИ

Рис. 3.12 Температурные поля в объеме и на поверхностях производственного помещения (°С) при размещении на высоте 4 метра 44 штук ГГИИ мощностью 5 кВт для трех конструктивных решений

Таким образом, в условиях работы высокотемпературных ГГИИ область наиболее высоких температур в производственном помещении формируется далеко за пределами рабочей зоны. Температура внутреннего воздуха в верхней зоне помещения будет намного выше, чем температура внутреннего воздуха в рабочей зоне: $t_{e.pa6.30n} > t_{e.pa6.30n}$. Установлено, что применение теплоизоляционных материалов и водяного охлаждения рефлектора понижают среднюю температуру в верхней зоне отапливаемого помещения (рисунок 3.12, б и в). Рефлектор усовершенствованной ГГИИ является наиболее эффективным средством рекуперации тепла из верхней зоны цеха (рисунок 3.12, в), т.к. находится в области максимальных температур, что приводит к высоким значениям

коэффициентов теплоотдачи и температурного напора при теплопередаче через его внутреннюю стенку.

Ha обобщения основании анализа И результатов выполненных экспериментальных исследований теплопереноса в условиях работы ГИИ разработана математическая модель этих процессов, отличающаяся от известных аналогов описанием совместно протекающих химических реакций в камере сгорания излучателя и турбулентности при оценке конвективного теплообмена. При анализе микроклимата производственных объектов подходы, аналогичные Проведенные предложенному, ранее не применялись. результаты адаптационного исследования подтверждают достоверность разработанной модели для исследования процесса горения и протекающего тепломассообмена при решении задач конструирования и оптимизации ГГИИ.

Разработанная параметрическая модель высокотемпературного излучателя позволит на этапе проектирования оценить поведение инженерных решений излучателей в реальных условиях их эксплуатации, провести предэксплуатационную проверку работоспособности и эффективности основных технических решений с меньшими трудозатратами и капиталовложениями.

На основе численных и экспериментальных исследований получены, применимые практике проектирования систем ГЛО, зависимости В распределения плотности теплового потока и температурных полей в объеме производственного помещения от тепловой мощности излучателей и их высоты подвеса. По результатам вариативного исследования можно заключить, что предложенные технические решения излучателей, позволяющие повысить их коэффициент полезного действия, пригодны к практической реализации при Новые крупногабаритных помещений. обогреве технические решения высокотемпературных ГГИИ имеют более высокий КПД за счет частичной рекуперации уходящих газов сокращения тепла И тепловых потерь конструкцией.

ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Достоверность разработанных параметрических моделей подтверждается согласованием результатов численных и экспериментальных исследований. При выполнении экспериментальных исследований была задействована следующая поверенная и сертифицированная приборная база:

1. Многоканальный измерительный комплекс на основе переносного персонального компьютера Dell, преобразователей термоэлектрических ТХК 0006, набора коробок УК – 4 (каждая УК-4 содержит интегральный датчик температуры холодных концов термопары, что позволяет подключать к ней термопарные датчики) и блока ИТ-2. Область применения – измерение температур поверхностей, воздуха и жидкости.

Измерительный комплекс настроен на работу в следующем режиме: блок ИТ-2 измеряет значение напряжения по каждому из каналов, далее снимает показания датчиков температуры холодных концов термопары и передает все значения на компьютер. Компьютер на основе полученных данных определяет значения температуры и выводит результаты измерений на экран. Измерения производятся циклами в непрерывном режиме и с программируемой задержкой от 1 до 3600 сек. По завершению процесса выполняется вывод в таблицу результатов измерений температур с холодных концов термопар.

Принцип работы термопреобразователя основан на преобразовании тепловой энергии в термоэлектродвижущую силу чувствительного элемента термопреобразователя при наличии разности температур между его свободными концами и рабочим спаем. Чувствительный элемент термопреобразователя выполнен из термопарного кабеля типа КТМС с минеральной изоляцией в стальной оболочке. Разнородные термоэлектроды: хромель и копель (ТХК), соединенные на одном конце, который образует рабочий спай. Свободные концы термопреобразователя соединены с компенсационными проводами во фторопластовой изоляции, которые помещены в экранированную оплетку. Диапазон измеряемых температур от -40 до +600 °C. Погрешность ТХК составляет $\pm 2,5$ °C. Погрешность «ИТ-2» $\pm 0,5$ °C.

2. Многофункциональный измерительный прибор Testo 480 в сочетании с зондами и пакетом программного обеспечения EasyClimate, позволяющим фиксировать изменения параметров с течением времени. Зонды: сферический зонд диаметром 150 мм, диапазон измерений от 0 до +120 °C; поверхностный зонд с подпружинной термопарой, диапазон измерений от -60 до +300 °C. Область применения – измерение результирующей температуры и температур поверхностей.

3. Тепловизор Flir T-335 в сочетании с пакетом программного обеспечения FLIR Quick Report, позволяющим выполнить обработку полученных термограмм. Область применения – измерение температур исследуемой поверхности. Погрешность ± 2 °C или $\pm 2\%$ от абсолютной температуры, °C.

4. Газоанализатор Delta 2000. Область применения – измерение температуры продуктов сгорания. Погрешность ±1 %.

5. Манометр Testo 510. Область применения – настройка давления газа перед соплом излучателя. Погрешность ±0,03 гПа (0 до 0,30 гПа) / ±0,05 гПа (0,31 до 1 гПа).

6. Термогигрометр Testo 6110. Область применения – измерение влажности и температуры воздуха. Погрешность при измерении температуры $\pm 0,5$ °C, при измерении влажности ± 3 %.

7. Анемометр Testo 410-1. Область применения – измерение подвижности воздуха. Погрешность ±0,2 м/с.

8. Радиометр «Аргус-03». Область применения – измерение плотности лучистого теплового потока. Погрешность ±6 %.

9. Светодальномер. Область применения – измерение геометрических параметров.

4.1 Стендовые испытания высокотемпературных газовых горелок инфракрасного излучения

В первой серии экспериментальных исследований был проведен ряд испытаний излучателей на специальном стенде, сконструированном в реальных условиях производственного помещения. Схема стенда представлена на рисунке 4.1.

Цель стендовых испытаний заключалась в получении зависимостей, описывающих формируемый в зоне над высокотемпературными ГГИИ тепловой режим от времени, тепловой мощности и конструктивного решения излучателя.



Рис. 4.1 Схема экспериментального стенда

На рисунке 4.1 справа представлен стенд в рабочем положении. С обратной стороны воздуховода, примыкающего к верхней части стенда, установлен дымосос, что позволяет выполнять исследования работы излучателей в условиях естественной и искусственной вентиляции.

Объектом исследования выбраны высокотемпературные ГГИИ типовой модели (серия 2100, производство АО «Сибшванк») всех имеющихся тепловых мощностей: 5, 10, 15, 20, 30, 40 кВт и предлагаемые автором технические

решения: изолированная модель тепловой мощностью 10 кВт и усовершенствованная модель тепловой мощностью 5 кВт. Основные технические характеристики излучателей представлены в таблице 4.1.

Наименование характеристики	ГИИ- 5	ГИИ- 10	ГИИ- 15	ГИИ- 20	ГИИ-30	ГИИ-40	ГИИи- 10	ГИИм- 5
Номинальная тепловая мощность, кВт	5	10	15	20	30	40	10	5
Лучистый КПД, %	58	59	60	60	61	61	68	58
Номинальное давление природного газа, Па	1270	1270	1270	1270	1270	1270	1270	1270
Расход газа при номинальной тепловой мощности (для природного газа), м ³ /час	0,5	1	1,5	2	3	4	1	0,5
Температура излучающей поверхности, °С	800- 1000	800- 1000	800- 1000	800- 1000	800-1000	800- 1000	800- 1000	800- 1000
Материал рефлектора	Феран (Ф)	Φ	Φ	Φ	Полированная нержавеющая сталь (ПНС)	ПНС	ПНС	ПНС

Таблица 4.1 Технические характеристики высокотемпературных ГГИИ

Порядок проведения стендовых испытаний следующий. Попеременно каждой тепловой мощности излучатель И модели устанавливался на экспериментальный стенд с последующей настройкой его работы. По высоте и горизонтали в центре над горелкой были размещены датчики температуры – преобразователи термоэлектрические ТХК 0006. Расстояние между датчиками по высоте оставалось без изменений, а по горизонтали корректировалось из расчета габаритных размеров горелки. Так, при 5 кВт шаг по горизонтали составил 70 мм, 10 кВт – 115 мм, 15 кВт – 160 мм, 20 кВт – 205 мм, 30 кВт – 180 мм, 40 кВт – 225 мм. Испытания каждой тепловой мощности и модели ГИИ проводились по

40 минут со снятием показаний температур каждые 40 секунд. Запуск работы излучателей был произведен параллельно началу считывания показаний температур. Измерения выполнены в условиях естественной вентиляции (дымосос выключен).

Схема стендовых испытания 5 кВт ГИИ типовой модели с указанием мест установки датчиков представлена на рисунке 4.2; 10 кВт ГИИ на рисунке 4.7; 10 кВт ГИИ изолированной модели на рисунке 4.12; 5 кВт усовершенствованной модели на рисунке 4.17. Схемы стендовых испытаний типовой модели ГИИ тепловых мощностей 15, 20, 30, 40 кВт представлены в приложении Г.

Результаты стендовых испытаний 5 кВт ГИИ типовой модели представлены на рисунках 4.3-4.6; 10 кВт на рисунках 4.8-4.11; 10 кВт изолированной модели на рисунках 4.13-4.16; 5 кВт усовершенствованной модели на рисунках 4.18-4.21. Результаты стендовых испытаний типовой модели ГИИ тепловых мощностей 15, 20, 30, 40 кВт представлены в приложении Г.

Фотосъемка стендовых испытаний представлена на рисунке 4.26.



Рис. 4.2 Схема стендовых испытаний 5 кВт излучателя типовой модели



Рис. 4.3 Изменение температур во времени в точках установки датчиков 1-10 при работе 5 кВт ГИИ типовой модели



Рис. 4.4 Распределение температур по высоте над 5 кВт ГИИ типовой модели



Рис. 4.5 Изменение температур во времени в точках установки датчиков I-IX при работе 5 кВт ГИИ типовой модели



Рис. 4.6 Распределение температур по горизонтали над 5 кВт ГИИ типовой

модели



Рис. 4.7 Схема стендовых испытаний 10 кВт излучателя типовой модели



Рис. 4.8 Изменение температур во времени в точках установки датчиков 1-10 при работе 10 кВт ГИИ типовой модели



Рис. 4.9 Распределение температур по высоте над 10 кВт ГИИ типовой модели



Рис. 4.10 Изменение температур во времени в точках установки датчиков I-IX при работе 10 кВт ГИИ типовой модели



Рис. 4.11 Распределение температур по горизонтали над 10 кВт ГИИ типовой модели

Анализ полученных зависимостей показал, что характерной особенностью высокотемпературных ГГИИ типовой модели является значительное тепловое излучение в верхнюю зону помещения нагретой поверхностью конструкции при одновременном протекании процессов конвективного тепломассообмена.

Максимальное значение температуры зафиксировано в центре на расстоянии 50 мм над излучателем в месте установки датчика 1. С увеличением расстояния от конструкции излучателя (датчики 1-10) форма кривой имеет вид гиперболы. Существенные изменения температур по высоте приходятся на первые 600 мм. Причем, различие между температурами первые 600 мм и на расстоянии более 600 мм тем больше, чем меньше мощность излучателя. Так, температура по высоте над 5 кВт ГИИ уменьшается в 3 раза, в то время как у 40 кВт в 1,5 раза.

Распределение температур вдоль ГИИ (датчики I – IX) неравномерное. При увеличении тепловой мощности разброс значений температур сокращается.

Можно заключить, что температурный режим над излучателем зависит от его тепловой мощности: чем выше тепловая мощность, тем выше температура в

каждой точке установки датчика. Данная зависимость объясняется тем, что при увеличении тепловой мощности ГИИ увеличивается доля продуктов сгорания по отношению к объему воздуха в области, ограниченной экспериментальным стендом, что, как следствие, снижает интенсивность разбавления продуктов сгорания и увеличивает температуру в каждой точке.



Рис. 4.12 Схема стендовых испытаний 10 кВт излучателя изолированной модели



Рис. 4.13 Изменение температур во времени в точках установки датчиков 1-10 при работе 10 кВт ГИИ изолированной модели



Рис. 4.14 Распределение температур по высоте над 10 кВт ГИИ изолированной

модели



Рис. 4.15 Изменение температур во времени в точках установки датчиков I-IX при работе 10 кВт ГИИ изолированной модели



Рис. 4.16 Распределение температур по горизонтали над 10 кВт ГИИ изолированной модели



Рис. 4.17 Схема стендовых испытаний 5 кВт излучателя усовершенствованной

модели



Рис. 4.18 Изменение температур во времени в точках установки датчиков 1-10 при работе 5 кВт ГИИ усовершенствованной модели



Рис. 4.19 Распределение температур по высоте над 5 кВт ГИИ усовершенствованной модели



Рис. 4.20 Изменение температур во времени в точках установки датчиков I-IX при работе 5 кВт ГИИ усовершенствованной модели



Рис. 4.21 Распределение температур по горизонтали над 5 кВт ГИИ

усовершенствованной модели

Результаты испытаний ГИИи и ГИИм в обоих случаях указывают на снижение теплоотдачи в зону выше их установки и, как следствие, снижение температуры над излучателями. Это позволяет заключить, что сконструированные решения позволят решить проблему перегрева верхней зоны помещения.

При испытании усовершенствованной модели в качестве теплоносителя принята вода с температурой на входе в конструкцию 30 °С (датчик 13). На выходе из рефлектора температура составила 49 °С (датчик 14).

Испытания высокотемпературных ГГИИ типовой, изолированной и усовершенствованной моделей показали, что температура в зоне выше их установки, как по высоте, так и по горизонтали, пульсирует во времени. Амплитуда возмущений характеризует появление турбулентного потока, вызванного разностью давлений газа на выходе из области ограниченной рефлектором (избыток) и над излучателем (разряжение). Пульсации графика во времени наблюдаются повсеместно при всех тепловых мощностях.

Результаты измерений температур на внутренней (датчик 12) и наружной (датчик 11) поверхностях рефлектора представлены в таблице 4.2.

Модель- тепловая мощность ГИИ, кВт	Температура рефлектора с наружной стороны в точке установки датчика № 11, °С	Температура рефлектора с внутренней стороны в точке установки датчика № 12, °С		
ГИИ-5	148,08	202,81		
ГИИ-10	151,04	206,86		
ГИИ-15	144,93	205,06		
ГИИ-20	140,59	204,85		
ГИИ-30	130,80	125,18		
ГИИ-40	139,15	142,40		
ГИИи-10	140,00	204,64		
ГИИм-5	46,03	58,09		

Таблица 4.2 Температура на внутренней и наружной поверхностях рефлектора

Анализ температур на внутренней и наружной поверхностях типовой модели излучателя указывает на незначительное изменение температур в зависимости от тепловой мощности в пределах 20 кВт. Изменение температуры

более чем на 50 °C с внутренней стороны рефлектора при 30 и 40 кВт излучателях обусловлено применением иного материала рефлектора. Так, конструктивное исполнение 5-20 кВт ГГИИ предполагает применение ферана в качестве материала рефлектора, а 30 и 40 кВт - полированной нержавеющей стали марки AISI-430. Можно сделать вывод, что применение ферана повышает теплоизоляционные свойства рефлектора, тем самым увеличивая интенсивность теплового потока в рабочую зону.

Результаты фиксации температур поверхностей рефлектора ГИИи показали, внутренней и наружной поверхностях рефлектора ЧТО температуры на соразмерны данным для 5-20 кВт ГИИ типовой модели. Такая особенность объясняется в первую очередь применением того же материала рефлектора – ферана, и во вторую очередь более интенсивным теплообменом наружной поверхности конструкции излучателя с продуктами сгорания, вынесенными за пределами области ограниченной рефлектором. Другими словами, если при рассмотрении типовой модели наружная поверхность конструкции излучателя нагревается преимущественно теплопроводности за счет ОТ внутренней поверхности, то при изолированной модели наружная поверхность нагревается за счет омывания продуктами сгорания.

Для оценки влияния механической вытяжной вентиляции на тепловой режим над ГИИ произведены стендовые испытания при включенном дымососе на примере 40 кВт излучателя типовой модели. Фиксация температур выполнена каждые 40 секунд в течение 15 минут. Схема стендовых испытаний типовой модели ГИИ тепловой мощностью 40 кВт представлена в приложении Г; результаты – на рисунках 4.22 – 4.25.



Рис. 4.22 Изменение температур во времени в точках установки датчиков 1-10 при работе 40 кВт ГИИ типовой модели в условиях механической вытяжной

вентиляции



Рис. 4.23 Распределение температур по высоте над 40 кВт ГИИ типовой модели в условиях механической вытяжной вентиляции



Рис. 4.24 Изменение температур во времени в точках установки датчиков I-IX при работе 40 кВт ГИИ типовой модели в условиях механической вытяжной

вентиляции



Рис. 4.25 Распределение температур по горизонтали над 40 кВт ГИИ типовой модели в условиях механической вытяжной вентиляции

Из полученных зависимостей видно, что работа механической вытяжной вентиляции позволит снизить температуру в зоне выше установки излучателя в среднем на 30-40 °C. При этом на расстоянии более 200 мм над излучателем устанавливается зона стабильной температуры, в то время как при естественной вентиляции зона равномерной температуры начинается с 600 мм от горелки.

Температура рефлектора в местах установки датчиков 11 и 12 существенно не изменилась и составила 142,81 и 140,06 °С соответственно.



Рис. 4.26 Фотосъемка стендовых испытаний

Результаты стендовых испытаний показали, что в процессе работы ГГИИ протекает интенсивный высокотемпературных тепломассообмен В турбулентной реагирующей среде, что ведет к перегреву зоны выше их установки. Применение механической вытяжной вентиляции в форме местных отсосов позволит решить проблему перегрева верхней зоны за счет теплоотвода за пределы помещения, но не обеспечит должного энергосберегающего эффекта от внедрения систем ГЛО. Существенный эффект достигается при применении автором технических решений: теплоизоляции предлагаемых наружной поверхности конструкции излучателя и модернизации конструкции рефлектора.

Оба варианта позволят решить проблему перегрева верхней зоны помещения, и, как следствие, обеспечить оптимальный тепловой режим во всем объеме помещения за счет снижения теплоотдачи от рефлектора и вторичного использования тепловой энергии.

4.2 Исследование работы систем газового лучистого отопления на базе производственных помещений

Во второй серии экспериментальных исследований автором выполнено исследование работы систем ГЛО на базе действующих производственных зданий. Цель исследований заключалась в определении эффективности работы систем ГЛО и получении количественных данных, описывающих тепловой режим зданий.

Исследование проведено на базе четырех производственных помещений следующих компаний: фирма «Мостоотряд-36» территориальная АО «Мостострой-11» (производственное помещение № 1), ООО «Оптима» 2), (производственное помещение № АО «Сибшванк» (производственные помещения № 3 и 4). Исследуемые производственные помещения различаются по ряду признаков: вид технологического процесса, микроклимат помещения, геометрические характеристики. Для поддержания теплового режима В рассматриваемых помещениях применяются как высокотемпературные («светлые»), так и низкотемпературные («темные») излучатели.

базе Ha указанных производственных помещений выполнен ряд исследований: сбор и анализ исходных данных, исследование фактического состояния параметров микроклимата, измерение температуры поверхностей конструкций, обследование ограждающих тепловизионное состояния ограждающих конструкций в условиях работы систем ГИО, анализ работы систем автоматизации. Автор в работе приводит результаты и зависимости, наиболее отражающие затронутые проблемы.

В результате сбора исходных данных установлены основные характеристики объектов исследования, представленные в таблице 4.3.

Наименование параметра	Помещение № 1	Помещение № 2	Помещение № 3	Помещение № 4
Длина, м	114	23,82	60	60
Ширина, м	39	12,1	36	36
Высота по стене, м	11,63	4,8	5,4	7,7
Высота в коньке, м	13,15	7,19	5,4	9,86
Площадь, M^2	4446	288,2	2160	2160
Объем, м ³	55085,95	1727,9	11664	18965
Пол	монолитный бетонный	бетонный	монолитный бетонный	монолитный бетонный
Стены	сэндвич-панель	железобетонная панель и керамзитоблок	сэндвич-панель	сэндвич-панель
Система отопления	«светлые» ГИИ типовой модели, 40 шт. по 20 кВт, производства Сибшванк	«светлые» ГИИ типовой модели, 6 шт. по 30 кВт, производства Сибшванк	«светлые» ГИИ типовой модели, 16 шт. по 10 кВт, производства Сибшванк	«темные» ГИИ, 12 шт. по 20 кВт, производства Сибшванк

Таблица 4.3 Характеристики производственных помещений

На базе первого производственного помещения для определения дефектов в виде областей повышенных теплопотерь тепловизионному контролю подверглись наружные и внутренние поверхности ограждающих конструкций. Тепловизионная съемка выполнена согласно ГОСТ [140]:

- оборудование и приборы, использованные при проведении тепловизионного контроля ограждающих конструкций, поверены, сертифицированы и соответствуют требованиям пункта 5 указанного ГОСТа;

- перепад температур между внутренним и наружным воздухом составил 50 °C. Во многих случаях для выполнения условий ГОСТа достаточно перепада температур в 10-15°C;

- обследование поверхностей ограждающих конструкций выполнено с учетом пункта 6.4 ГОСТа: «обследуемые поверхности не должны находиться в зоне прямого и отраженного солнечного облучения в течение 12 часов до проведения измерений». Тепловизионное обследование произведено в шесть часов тридцать минут девятого января 2015 года (06:30 – 09/01/2015);

- измерения проведены при отсутствии атмосферных осадков, тумана, задымленности. Значения параметров наружного воздуха: с 00:00 до 05:59 минут

температура воздуха составляла -30 °C, движение воздуха 1 м/с, влажность 77 %; с 06:00 до 11:59 минут температура воздуха составляла -32 °C, движение воздуха 3 м/с, влажность 81 %.

Произведено несколько тепловизионных съемок с последующим совместным анализом термограмм. Все полученные результаты обработаны в программном обеспечении FLIR QuickReport 1.2 SP2. Термограммы представлены на рисунках 4.27-4.30. На момент проведений обследований в помещении № 1 работало 25 штук ГИИ (из имеющихся 40) тепловой мощностью 20 кВт каждый.



Рис. 4.27 Температурные поля наружных поверхностей ограждающих конструкций (вид 1)



Рис. 4.28 Температурные поля наружных поверхностей ограждающих конструкций (вид 2)

Анализ (рисунки 4.27 4.28) термограмм И показал, что фасад производственного здания имеет множество зон с повышенными тепловыми потерями, преимущественно в местах стыков сэндвич-панелей и примыкания кровли к стенам. Потери тепловой энергии в местах стыков панелей наблюдаются исключительно выше уровня установки ГИИ внутри помещения, что объясняется температурной стратификацией газового объема В цеху. Термограмма, представленная на рисунке 4.28 справа, иллюстрирует потери тепла на вентиляцию.



Рис. 4.29 Температурные поля внутренних поверхностей ограждающих конструкций (вид 1)



Рис. 4.30 Температурные поля внутренних поверхностей ограждающих конструкций (вид 2)

Анализ температурных полей внутренних поверхностей ограждающих конструкций (рисунки 4.29 и 4.30) зоны выше установки излучателей указывает на возникновение температурных деформаций внутренних ограждающих конструкций вследствие перегрева их поверхностей, что приводит к высоким потерям тепловой энергии, а также проникновению в цех влаги в результате таяния снежного покрова. Так, в ходе проведенных исследований в цеху обнаружено, что в зоне над высокотемпературными ГГИИ произошло оплавление теплоизоляции трубопроводов (рисунок 4.31, а) и появление копоти на внутренних поверхностях ограждающих конструкций (рисунок 4.31, б).



Рис. 4.31 Повреждение материалов: a) оплавление теплоизоляции; б) появление копоти на поверхности внутренних ограждающих конструкций

Дальнейшие исследования, выполненные в производственных помещениях, были направлены на измерение температуры поверхностей ограждающих конструкций, исследование фактического состояния параметров микроклимата в рабочей зоне и сопоставление результатов с нормативными данными.

Измерение температуры поверхностей ограждающих конструкций выполнено в следующей последовательности: подготовка места проведения эксперимента (уборка места для установки датчиков и т.п.); проверка высоты установки ГИИ; сбор и установка измерительного комплекса ИТ-2: персональный

компьютер – аналогово-цифровой преобразователь – набор клемных коробок – преобразователи термоэлектрические ТХК 0006; установка на поверхности пола в центре под ГИИ датчиков температуры ТХК 0006 с изоляцией от прямого теплового излучения при помощи термоинтерфейса «Термопаста»; установка датчиков температуры ТХК 0006 на поверхности стены с изоляцией от прямого теплового излучения при помощи термоинтерфейса «Термопаста»; настройка на персональном компьютере программы «Эталон» и её параметров; проверка работоспособности системы; запуск процесса снятия показаний с датчиков термопары в программе «Эталон»; контроль изменений показателей на персональном компьютере в течение одного часа; сохранение полученных данных на персональном компьютере; повтор измерений трижды; обработка и усреднение полученных результатов; определение зависимостей и построение графиков. Для подтверждения полученных результатов и построения температурной карты поверхности, параллельно, выполнена тепловизионная съемка.

Результаты исследований параметров микроклимата, выполненные на базе производственного здания № 1 представлены в приложении Г. Так, при работе в помещении 25 штук ГИИ-20 среднее значение температуры внутреннего воздуха составило 18,2 °C, результирующей температуры 19,6 °C, относительной влажности 16 %, подвижности воздуха 0,1 м/с, перепад температуры внутреннего воздуха по горизонтали не превышал 2 °C. Это позволяет заключить, что даже в условиях низких температур наружного воздуха (минус 32 °C) 25 штук (из имеющихся 40) высокотемпературных ГИИ-20 достаточно для создания в помещении показателей микроклимата, требуемых согласно [141, 142].

На базе производственных помещений № 3 и 4 нарушений норм микроклимата не обнаружено. Результаты исследований, выполненные на базе 3-го и 4-го производственных помещений, представлены в приложении Г.

В результате исследований работы систем ГЛО установлено, что в большинстве производственных зданий суммарная мощность всех ГГИИ превышает требуемую тепловую нагрузку, что говорит о завышении мощности и, как следствие, стоимости систем ГЛО в этих случаях. Некорректное размещение
ГИИ в объеме помещения наблюдается многократно. Типичный пример представлен на рисунке 4.29 справа, где в непосредственной близости друг с другом установлено два ГИИ тепловой мощностью 20 кВт, а ближний к углу помещения излучатель расположен без соблюдения минимальных расстояний до ограждающих конструкций. На базе второго производственного помещения обнаружено, что излучатель тепловой мощностью 30 кВт установлен на высоте 4,74 метра (приложение Г), что, привело к перегреву поверхностей пола и кровли: температура на поверхности пола в центре под ГИИ-30 через 60 минут работы составила в среднем 41 °C, температура кровли около 90 °C. Результаты исследований, выполненные на базе второго производственного помещения, представлены в приложении Г.

Систематичность таких инженерных ошибок свидетельствует о необходимости пересмотра и корректировки существующих методик проектирования систем ГЛО.

Особое внимание требуется уделить системам управления работой ГГИИ в помещениях, так как от этого во многом будет зависеть безопасность и эффективность их работы, тепловой режим в помещении и комфорт человека [143, 144]. Установлено, что на практике встречается несколько вариантов управления тепловым режимом в помещении при работе ГИИ.

На базе первого производственного помещения регулирование теплового режима осуществляют исходя из человеческого фактора, а именно эксплуатирующей организацией посредством ручного включения и выключения излучателей. Погодозависимое регулирование тепловой мощности и возможность перевода системы отопления во внерабочее время, выходные и праздничные дни в режим «дежурного» отсутствуют, что приводит к перерасходу энергоресурсов практически в течение всего отопительного периода.

Регулирование теплового режима в помещении по такому принципу противоречит действующей нормативной и технической документации:

- пункт 4.6 [145]: «Системы отопления здания должны быть оснащены приборами для регулирования теплового потока»;

109

- пункт 6.1 [146]: «Производственные процессы и отдельные операции, сопровождающиеся образованием и выделением конвекционного и лучистого тепла, должны быть автоматизированы»;

- пункт 12.9 [147]: «Необходимо предусматривать автоматическое поддержание заданного значения температуры воздуха в отапливаемом ГИИ помещении»;

- руководства по эксплуатации ГИИ [148-150]: «Запрещается оставлять без надзора работающий излучатель, работа которого не контролируется термостатом, измеряющим температуру воздуха в помещении или нагрев поверхности нагреваемого материала».

На базе второго производственного помещения управление осуществляется путем полного или частичного отключения газолучистой отопительной системы по сигналу датчика температуры внутреннего воздуха на контроллер. Такой вид регулирования снискал популярность при конвективных системах отопления. Сложность применение заключается В TOM, что традиционных систем автоматизации при работе ГГИИ является недостаточно эффективным ввиду иного принципа работы радиационных систем отопления. Автор солидарен с мнением А.К. Родина [29], что при регулировании системы отопления с излучателями температурные датчики должны давать импульс, как по излучению, так и по конвекции. Тепловой поток от ГИИ в совокупности с показателями микроклимата формируют температуру помещения.

Многие исследования в Европе [68, 69] показали, что в случае снижения температуры внутреннего воздуха на 1 °C от заданной величины, экономия энергоресурсов составит 7 %. Например, для установления на объекте, отапливаемом ГИИ, температуры помещения 18 °C, необходимо принять температуру воздуха 10 °C и интенсивность теплового потока q=115 Bt/m².

Следовательно, установка одного датчика, дающего импульс по температуре воздуха, как при конвективной системе отопления, не может в должной мере обеспечить весь энергосберегающий эффект и комфортные условия в отапливаемом помещении при работе ГГИИ. На базе 3-го и 4-го производственных помещений контроль теплового режима осуществляется посредством микропроцессорной системы управления и контроля (термоконтроллер) с использованием датчиков температуры помещения, что позволяет поддерживать заданную температуру в помещении в любое время, запускать систему отопления до начала рабочего дня с целью достижения желаемой температуры помещения в рабочее время и многое другое.

Например, в помещении, отапливаемом ГИИ, необходимо поддерживать температуру в рабочее время 18 °C. Для этого на термоконтроллере настраивается желаемая температура и интервал переключения от 0,2 до 2,0 °C. Чем меньше интервал, тем ближе фактическая температура к желаемой температуре, что обеспечивается большим количеством включений-выключений излучателей [143, 144]. При переходе в рабочий режим импульс подается на излучатель и он включается на 100 % мощности. При достижении заданной температуры помещения импульс с датчика температуры идет на термоконтроллер и излучатель выключается. При понижении температуры на 0,2-2 °C излучатель включается и т.д. Такой процесс управления температурным режимом в отапливаемом ГИИ помещении называется «одноступенчатым» [143, 144].

Из всех рассмотренных способов управления тепловым режимом в производственных зданиях наиболее эффективным является одноступенчатое регулирование. Несмотря на это, в процессе такой работы излучатели также подвержены высокому износу из-за постоянных включений-выключений и «холодного» запуска, что сокращает срок их службы. Характерным примером можно выделить опыт автора [77], которым были исследованы производственные здания с использованием низкоинтенсивных ГИИ. В результате обнаружено, что за отопительный сезон из 30 штук ГИИ выходят из строя 30-40 % излучателей.

Немаловажным является и то, что при достижении определенной температуры регулирующее устройство выключает излучатели и в этом случае человек ощущает только тепло воздуха без излучения. Такой режим работы ГИО менее благоприятен с гигиенической точки зрения, так как периодическое

111

выключение ГИИ частично изменяет лучистую составляющую тепловых потерь человеком [29].

При проектировании радиационных систем отопления производится расчет тепловой нагрузки. В основе такого расчета лежит, наряду с внутренней температурой, минимальная наружная температура. К примеру, для Тюмени минимальной наружной температурой является показатель -35 °C, хотя средняя наружная температура отопительного периода составляет всего лишь -6,9 °C. Для обеспечения заданной температуры в помещении расчет установочной мощности производится для случая с максимально низкой температурой наружного воздуха. Это значит, что в течение большего времени газолучистая система отопления работает с избыточным запасом мощности, что приводит к перерасходу энергоресурсов практически в течение всего отопительного периода [143, 144].

Исходя из вышеизложенного, рассмотренные способы автоматизации являются не достаточно эффективными. Для повышения энергосберегающего эффекта от внедрения систем ГЛО необходимо применение систем, которые позволят обеспечить работу ГИИ в разном диапазоне давлений, то уменьшая, то увеличивая их тепловую мощность, и, как следствие, адаптировать производительность системы к фактическому потреблению тепла.

Необходимо отметить, что в советские годы регулировать тепловую мощность ГИИ путем изменения давления газа перед соплом излучателей запрещалось [29]. По мнению автора, такое условие было вынужденным, так как не было предусмотрено конструкцией ГИИ советских производителей. Хотя уже в 1996 году автор в своей работе [68] рассуждает на тему применения многоступенчатого регулирования тепловой мощности ГГИИ в Германии, что свидетельствует о более прогрессивном развитии систем ГЛО за рубежом на тот период времени.

Известно, что плавномодулируемое регулирование тепловой мощности уже получило широкое распространение в котельных агрегатах. Однако распространить данный опыт на работу высокотемпературных ГИИ является весьма затруднительным, так как диаметр огневого отверстия их керамического насадка не превышает 2 мм. Поэтому выполнение таких работ сопряжено с высоким риском отрыва или проскока пламени. В случае применения «темных» ГИИ таких трудностей не возникает.

Сегодня на рынке отопительного оборудования системы ГЛО справедливо заняли свою «нишу» и некоторые компании-производители предлагают системы управления на базе двухступенчатого и плавномодулирующего режима. Например, крупнейший производитель оборудования газового инфракрасного отопления в мире Schwank и его официальный представитель в России – АО «Сибшванк» под двухступенчатым регулированием понимают такой режим работы ГГИИ, при котором возможно три варианта: 100 %, 50 %, 0 % тепловой мощности. При плавной модуляции тепловая мощность системы отопления адаптируется к фактической тепловой нагрузке здания и ГИИ работает в режиме от 50 до 100 % мощности [151].

Основное техническое отличие от одноступенчатого регулирования заключается в том, что излучатели работают а большем давлении газа и на базе иных конструктивных элементов: блока автоматики горелки (регулятор давления) и сопла. В случае с плавной модуляцией дополнительно потребуется установка на каждый излучатель модуляционной платы («Modulation Box»), которая во взаимодействии с блоком автоматики горелки регулирует давление газа по данным цифрового сигнала от термоконтроллера. Но следует понимать, что применение таких опций значительно увеличит стоимости ГИИ и всей системы отопления в целом. Хотя режим плавной модуляции тепловой мощности, по данным производителя [151], дополнительно экономит до 14 % расходов на энергоресурсы.

Полная тепловая нагрузка требуется лишь несколько дней в году, в остальное время целесообразно использовать оборудование не на полную мощность, экономя при этом ресурсы и сокращая износ оборудования. До настоящего времени процессы двухступенчатого и плавного модулируемого регулирования тепловой мощности газового инфракрасного обогрева в России не получили должного научного и технико-экономического обоснования. Актуальность выполнения таких работ кратно возросла в последние годы ввиду повышения цен на энергоресурсы.

4.3 Математическая обработка результатов экспериментальных исследований

Цель математической обработки заключается в построении на основе результатов стендовых испытаний регрессионных зависимостей, описывающих формируемый в зоне над высокотемпературными ГГИИ тепловой режим в установившихся условиях.

Анализ результатов стендовых испытаний излучателей показал, что установившийся тепловой режим наблюдается в промежутке с 20-й до 40-й минуты. Путем усреднения за указанный период времени значений температур получены эмпирические зависимости, описывающие распределение температур по высоте и горизонтали над ГГИИ от тепловой мощности и модели. Данные зависимости представлены в таблицах 4.4, 4.5 и на рисунках 4.32, 4.33.

Таблица 4.4 Эмпирические зависимости распределения температур по высоте в центре над излучателями

_										
Модель-					Темпера	атура,°С				
тепловая				в местах	установ	ки датчи	ков 1-10			
мощность	1	γ	3	4	5	6	7	8	0	10
ГИИ, кВт	1	2	5	4	5	0	1	0	9	10
ГИИ-5	170,81	91,51	63,69	57,92	56,10	54,29	54,09	53,53	53,56	52,67
ГИИ-10	175,94	100,24	72,40	68,51	67,86	67,54	67,85	67,46	67,28	66,71
ГИИ-15	185,33	106,33	71,16	70,02	70,21	70,36	70,78	70,06	71,64	71,12
ГИИ-20	187,80	114,12	83,02	79,35	79,43	79,83	80,99	80,81	81,18	80,57
ГИИ-30	203,37	145,39	119,24	119,83	119,94	117,01	113,31	114,46	114,97	114,50
ГИИ-40	215,36	155,75	145,23	142,75	141,46	141,92	142,41	143,16	142,93	143,09
ГИИи-10	44,74	43,86	43,36	43,91	43,97	43,77	43,83	43,72	42,49	42,55
ГИИм-5	67,69	55,34	50,91	43,43	38,91	38,46	37,89	37,60	37,66	37,46

Модель- тепловая		Температура,°С в местах установки датчиков I-IX											
мощность ГИИ, кВт	Ι	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX				
ГИИ-5	41,01	45,26	50,82	76,23	100,50	78,68	55,90	43,32	38,11				
ГИИ-10	61,70	64,67	76,70	96,32	109,27	92,00	68,48	67,90	58,87				
ГИИ-15	71,88	73,69	94,92	107,65	114,81	108,13	83,86	76,51	71,68				
ГИИ-20	84,71	92,60	107,89	114,49	126,29	110,83	93,05	88,57	87,23				
ГИИ-30	119,98	126,53	134,42	138,13	145,39	130,42	131,76	122,80	120,57				
ГИИ-40	134,66	136,00	140,07	143,73	155,75	143,54	139,19	140,01	134,33				
ГИИи-10	42,82	42,06	42,72	42,73	43,86	41,78	40,79	40,89	41,77				
ГИИм-5	38,15	38,85	42,44	45,71	55,34	47,08	43,99	38,58	37,17				

Таблица 4.5 Эмпирические зависимости распределения температур по горизонтали над излучателями

Построение регрессионных зависимостей выполнено в следующей последовательности:

1. На основе анализа результатов стендовых испытаний выдвигается гипотеза о виде зависимости между рассматриваемыми показателями либо о ее отсутствии. Записывается общий вид модели, которая сводится к парной (4.1) или множественной (4.2) линейным регрессиям путем замены переменных с предварительным, в случае необходимости, логарифмированием.

$$T = a_0 + a_1 \cdot Z \tag{4.1}$$

$$T = a_0 + a_1 \cdot Z_1 + a_2 \cdot Z_2 + \dots + a_m \cdot Z_m$$
(4.2)

2. Выполняется обработка данных функцией ЛИНЕЙН в программном модуле Microsoft Excel, в результате чего определяются параметры модели $a_0, a_1, ..., a_m$; стандартные ошибки параметров модели $S_{a_0}, S_{a_1}, ..., S_{a_m}$; коэффициент детерминации R^2 ; эмпирическое значение *F*-статистики; степени свободы; остаточная и регрессионная сумма квадратов.

3. По результатам обработки данных записывается регрессионная зависимость.

4. Проводится проверка качества полученной модели:

4.1. Проверяется значимость коэффициентов регрессии на основе *t*-статистики Стьюдента в три этапа:

4.1.1. Рассчитывается эмпирическое значение *t*-статистики для каждого параметра модели a_i $(i = \overline{0, m})$ по формуле:

$$t_{a_i} = \frac{a_i}{S_{a_i}} \tag{4.3}$$

где a_i и S_{a_i} – найденные оценки параметров модели и их стандартные ошибки соответственно.

4.1.2. Определяется критическое значение критерия Стьюдента $t_{\rm kp}$ по заданному уровню значимости α и числу степеней свободы k, рассчитываемому по формуле:

$$k = n - m - 1 \tag{4.4}$$

где *n* – объем выборки; *m* – число независимых переменных в регрессионной модели.

В таблице 4.6 приведены значения критических точек при 5 %-ном уровне значимости для различных степеней свободы.

Таблица 4.6. Критические точки распределения Стьюдента при $\alpha = 5 \%$

Степени свободы, <i>k</i>	4	5	6	7	8	9
Критические точки, <i>t</i> _{кр}	2,78	2,57	2,45	2,36	2,31	2,26

4.1.3. Для каждого параметра сравниваются эмпирическое и критическое значения критерия. Если $|t_{a_i}| > t_{\kappa p}$, то коэффициент a_i признается статистически значимым. Если, наоборот, $|t_{a_i}| \le t_{\kappa p}$, то a_i признается статистически незначимым и *i*-ю переменную можно исключить из модели без потери качества.

4.2. Определяется общее качество построенной модели на основании рассчитанного коэффициента детерминации R^2 , величина которого численно определяет долю вариации результирующего признака (зависимой переменной), описываемую построенной моделью. Коэффициент детерминации принимает

значения от 0 до 1, и чем ближе его значение к единице, тем выше качество построенной модели.

Выполняется проверка значимости коэффициента детерминации на основе *F*-критерия Фишера в три этапа:

4.2.1. Вычисляется эмпирическое значение *F*-статистики (*F*_{эмп}) с применением функции ЛИНЕЙН.

4.2.2. Определяется критическое значение критерия Фишера по заданному уровню значимости α , количеству независимых переменных *m* и числу степеней свободы k = n - m - 1, где n -объем выборки.

В таблице 4.7 приведены значения критических точек распределения Фишера при 5 %-ном уровне значимости для различных степеней свободы и количества переменных в модели.

		Степени свободы, к										
число переменных, т	4	5	6	7	8	9						
1	7,71	6,61	5,99	5,59	5,32	5,12						
2	6,94	5,79	5,14	4,74	4,46	4,26						
3	6,59	5,41	4,76	4,35	4,07	3,86						
4	6,39	5,19	4,53	4,12	3,84	3,63						

Таблица 4.7. Критические точки распределения Фишера при $\alpha = 5 \%$

4.2.3. Сравниваются эмпирическое и критическое значения критерия. Если $F_{_{3M\Pi}} > F_{_{KP}}$, то коэффициент детерминации признается статистически значимым, а качество модели – высоким. Если $F_{_{3M\Pi}} \le F_{_{KP}}$, делается вывод о незначимости R^2 и, как следствие, низком качестве построенной модели.

4.3.1 Определение регрессионных зависимостей, описывающих распределение температур по высоте в центре над излучателями

На основе анализа эмпирических данных распределения температур по высоте в центре над излучателями, можно сделать предположение, что для типовых моделей зависимость между высотой и температурой – гиперболическая.

$$T = a_0 + \frac{a_1}{H} \tag{4.5}$$

где *Н* – высота установки датчиков 1-10 в центре над излучателем.

Сведем нелинейную модель к линейной путем замены переменных: в качестве переменной *Y* выбираем данные по температуре для каждой тепловой мощности; по *X* – данные, обратно пропорциональные высоте, представленные в таблице 4.8.

Высота установки датчиков 1-10, мм	50	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800
Переменная X=1/H (для гиперболической модели)	0,02	0,005	0,0025	0,001667	0,00125	0,001	0,000833	0,000714	0,000625	0,000556
Переменная X=lnH (для логарифмической модели)	3,912	5,2983	5,9915	6,3969	6,6846	6,9078	7,0901	7,2442	7,3778	7,4955

Таблица 4.8. Значения переменной Х

Очевидно, что для изолированной конструкции зависимость между высотой и температурой линейная или температуру можно признать постоянной вне зависимости от высоты. Для уточнения зависимости построим линейную модель и проверим значимость коэффициентов:

$$T = a_0 + a_1 \cdot H \tag{4.6}$$

где температура *T* – зависимая переменная, а высота *H* – независимая переменная.

Для усовершенствованной конструкции можно выдвинуть несколько гипотез о виде связи между температурой и высотой. Наиболее очевидные – это логарифмическая и гиперболическая зависимости. Построение гиперболической модели аналогично построению для типовых моделей (4.5). Уравнение логарифмической регрессии имеет вид:

$$T = a_0 + a_1 \ln H \tag{4.7}$$

Нелинейная регрессия (4.7) сводится к линейной с помощью замены переменной $X = \ln H$. Данные по независимой переменной представлены в таблице 4.8.

Результаты расчета параметров гиперболической зависимости для излучателей типовой и усовершенствованной моделей (для усовершенствованной дополнительно расчет логарифмической зависимости) приведены в таблице 4.9, параметров линейной зависимости для излучателя изолированной модели – в таблице 4.10. Графически зависимости представлены на рисунке 4.32.



Рис. 4.32 Распределение температур по высоте в центре над ГГИИ типовой, изолированной и усовершенствованной моделей: точки – эмпирические данные; пунктирные линии – регрессионные зависимости

Модель- тепловая мощность ГИИ, кВт	<i>a</i> ₀	<i>a</i> ₁	Уравнение регрессии (линейная модель)	<i>S</i> _{<i>a</i>₀}	<i>S</i> _{<i>a</i>1}	t_{a_0}	<i>t</i> _{<i>a</i>₁}	R^2	$F_{\scriptscriptstyle \mathfrak{SMN}}$	Уравнение регрессии (гиперболическая и логарифмическая модели)
ГИИ-5	49,8	6157,0	$T = 49,8 + 6157,0 \cdot X$	1,5	230,6	32,6	26,7	0,989	713,0	$T = 49,8 + \frac{6157,0}{H}$
ГИИ-10	62,6	5733,0	$T = 62, 6 + 5733, 0 \cdot X$	1,4	218,8	43,2	26,2	0,988	686,8	$T = 62, 6 + \frac{5733, 0}{H}$
ГИИ-15	64,9	6082,6	$T = 64,9 + 6082, 6 \cdot X$	2,1	312,7	31,4	19,5	0,979	378,5	$T = 64,9 + \frac{6082,6}{H}$
ГИИ-20	75,3	5692,1	$T = 75, 3 + 5692, 1 \cdot X$	1,9	281,5	40,4	20,2	0,981	408,8	$T = 75,3 + \frac{5692,1}{H}$
ГИИ-30	112,4	4639,2	$T = 112, 4 + 4639, 2 \cdot X$	1,5	229,5	73,9	20,2	0,981	408,6	$T = 112, 4 + \frac{4639, 2}{H}$
ГИИ-40	138,4	3807,8	$T = 138, 4 + 3807, 8 \cdot X$	0,8	114,5	182,5	33,3	0,993	1105,6	$T = 138, 4 + \frac{3807, 8}{H}$
ГИИм-5	39,2	1551,4	$T = 39, 2 + 1551, 4 \cdot X$	1,7	263,0	22,5	5,9	0,813	34,8	$T = 39,2 + \frac{1551,4}{H}$
	102,8	-9,1	$T = 102, 8 - 9, 1 \cdot X$	3,9	0,6	26,3	-15,1	0,966	227,6	$T = 102, 8 - 9, 1 \cdot \ln H$

Таблица 4.9 Параметры гиперболической зависимости для излучателей типовой модели; логарифмической и гиперболической зависимостей для усовершенствованной модели

Таблица 4.10 Параметры линейной зависимости для излучателя изолированной модели

Модель-тепловая мощность ГИИ, кВт	a_0	<i>a</i> ₁	Уравнение регрессии (линейная модель)		<i>S</i> _{<i>a</i>1}	t_{a_0}	t_{a_1}	R^2	F _{эмп}
ГИИи-10	44,39	-0,00085	$T = 44,39 - 0,00085 \cdot H$	0,28	0,00026	159,08	-3,27	0,57	10,67

На основе данных таблицы 4.9 выполним проверку качества гиперболических зависимостей распределения температур по высоте в центре над излучателями типовой и усовершенствованной моделей:

• Проверка значимости коэффициентов гиперболических моделей на основе *t*-статистики Стьюдента.

Определим критическую точку распределения Стьюдента. Для всех тепловых мощностей число независимых переменных m = 1; объем выборки равен числу использованных датчиков температуры, установленных по высоте, то есть n = 10. Тогда число степеней свободы k=10-1-1=8, чему, согласно таблице 4.6, соответствует критическая точка $t_{\rm kp}=2,31$.

Сопоставив эмпирические *t*-значения, представленные в таблице 4.9, с критической точкой, можно заключить, что $|t_{_{3MR}}| > t_{_{KP}}$ для всех коэффициентов во всех построенных моделях. Следовательно, все коэффициенты признаются статистически значимыми на 5 %-ном уровне значимости.

• Проверка значимости коэффициента детерминации гиперболических моделей на основе *F*-критерия Фишера.

Определим критическое значение критерия. Исходя из m=1, n=10, k=8 и данных, приведенных в таблице 4.7, критическое значение равно $F_{\kappa p} = 5,32$.

Следовательно, эмпирические значения критерия превышают критическую точку ($F_{_{\rm ЭМП}} > F_{_{\rm Кр}}$) и коэффициенты детерминации для всех тепловых мощностей типовой усовершенствованной модели, a также модели, признаются значимыми. Учитывая, коэффициент статистически что детерминации гиперболических регрессий близок к единице полученных И признан статистически значимым, можно заключить, что построенные регрессионные модели высокого качества.

На основе данных таблицы 4.9 проверим качество логарифмической зависимости температур от высоты в центре над ГИИм:

• Проверка значимости коэффициентов логарифмической модели на основе *t*-статистики Стьюдента.

Число независимых переменных m = 1; объем выборки n = 10; число степеней свободы k = 10-1-1 = 8; критическая точка $t_{\rm kp}=2,31$. Следовательно, $\left|t_{a_0}\right| > t_{\rm kp}$ и $\left|t_{a_1}\right| > t_{\rm kp}$, и для логарифмической модели параметры признаются статистически значимыми на 5%-ном уровне.

• Проверка значимости коэффициента детерминации логарифмической модели на основе *F*-критерия Фишера.

Критическая точка распределения Фишера определяется при m = 1, n = 10, k = 8, и, как результат, $F_{\kappa p} = 5,32$. Таким образом $F_{\text{набл}} > F_{\kappa p}$, что позволяет заключить, что логарифмическая модель, как и гиперболическая, обладает высоким качеством.

Выбор между двумя моделями высокого качества осуществляется по величине коэффициента детерминации. Очевидно, что для логарифмической модели он выше, чем для гиперболической. Следовательно, теоретическая зависимость для усовершенствованной конструкции описывается логарифмическим уравнением регрессии.

На основе данных таблицы 4.10 выполним проверку качества линейной зависимости распределения температур по высоте в центре над излучателем изолированной конструкции:

• Проверка значимости коэффициента линейной модели на основе *t*-статистики Стьюдента.

Число независимых переменных m = 1, объем выборки n = 10, число степеней свободы k = 10-1-1 = 8, критическая точка $t_{\rm kp}=2,31$. Следовательно, для изолированной конструкции $|t_{a_0}| > t_{\rm kp}$ и $|t_{a_1}| > t_{\rm kp}$, что позволяет с уверенностью не менее 95 % признать параметры линейной модели статистически значимыми.

• Проверка значимости коэффициента детерминации линейной модели на основе *F*-критерия Фишера.

Исходя из m = 1, n = 10, k = 8, $F_{\kappa p} = 5,32$, получаем, что $F_{\text{набл}} > F_{\kappa p}$. Таким образом, найденный коэффициент детерминации для линейной модели

признается статистически значимым, и можно сделать вывод о высоком качестве полученной линейной модели.

4.3.2 Определение регрессионных зависимостей, описывающих распределение температур по горизонтали над излучателями

Проанализируем данные распределения температур по горизонтали над ГГИИ, представленные в таблице 4.5. В связи с тем, что приборы различной мощности отличаются по своей длине, в качестве показателя положения датчика (и точки соответствующего замера температуры) была выбрана относительная величина, показывающая удаленность от середины прибора. Для центрального датчика (датчик V) значение переменной X равно 0, для крайнего правого (датчик IX) X=1, для крайнего левого (датчик I) X=-1. Таким образом, переменная X определяет долю от половины длины прибора, задавая расположение датчика относительно центра.

Значения эмпирических данных наиболее соответствует полиномиальным зависимостям. Склонность к симметрии свидетельствует о том, что старшая степень полинома должна быть четной. Явное наличие точек перегиба (для приборов малой мощности) является признаком того, что степень многочлена больше 2-х.

Таким образом, рассмотрим полином четвертой степени вида:

$$T = a_4 X^4 + a_3 X^3 + a_2 X^2 + a_1 X + a_0$$
(4.8)

Сведем указанную нелинейную зависимость к множественной линейной регрессии с помощью замены $Z_1=X$, $Z_2=X^2$, $Z_3=X^3$, $Z_4=X^4$ (расчетные значения приведены в таблице 4.11) и получим линейную модель:

$$T = a_4 Z_4 + a_3 Z_3 + a_2 Z_2 + a_1 Z_1 + a_0$$
(4.9)

$Z_1 = X$	0	±0,25	±0,5	±0,75	±1
$Z_2 = X^2$	0	0,0625	0,25	0,5625	1
$Z_{3} = X^{3}$	0	±0,01563	±0,125	±0,42188	±1
$Z_4 = X^4$	0	0,003906	0,0625	0,316406	1

Таблица 4.11 Значения переменных Z_i (*i*=1,2,3,4)

Результаты расчета параметров полиномиальной модели для всех тепловых мощностей и моделей ГГИИ приведены в таблице 4.12.

Модель- тепловая мощность ГИИ, кВт	a_4	<i>a</i> ₃	<i>a</i> ₂	a_1	<i>a</i> ₀	S _{a4}	S _{a3}	S _{a2}	S _{a1}	S _{a0}	t _{a4}	t _{a3}	t _{a2}	t _{a1}	t_{a0}	R^2
ГИИ-5	95,22	-6,20	-143,86	4,25	89,55	28,58	14,52	30,37	11,58	5,53	3,33	-0,43	-4,74	0,37	16,19	0,92
ГИИ-10	72,27	4,50	-113,07	-4,81	102,23	24,05	12,22	25,56	9,75	4,66	3,00	0,37	-4,42	-0,49	21,96	0,92
ГИИ-15	66,96	6,30	-108,99	-5,58	114,07	12,60	6,40	13,39	5,11	2,44	5,31	0,98	-8,14	-1,09	46,78	0,98
ГИИ-20	51,72	15,59	-85,69	-13,86	120,47	15,42	7,83	16,39	6,25	2,99	3,35	1,99	-5,23	-2,22	40,35	0,95
ГИИ-30	17,74	7,45	-37,64	-6,95	140,23	13,91	7,06	14,78	5,63	2,69	1,28	1,05	-2,55	-1,23	52,10	0,88
ГИИ-40	21,38	-1,05	-35,27	1,35	148,93	15,82	8,04	16,81	6,41	3,06	1,35	-0,13	-2,10	0,21	48,64	0,74
ГИИи-10	5,50	1,46	-6,21	-1,91	43,06	1,90	0,97	2,02	0,77	0,37	2,89	1,51	-3,08	-2,48	116,99	0,83
ГИИм-5	23,05	-2,39	-36,21	1,74	51,04	9,54	4,85	10,14	3,87	1,85	2,42	-0,49	-3,57	0,45	27,64	0,88

Таблица 4.12 Параметры множественной линейной зависимости для излучателей типовой, изолированной и усовершенствованной моделей: — – значимые; — – незначимые параметры модели

На основе данных таблицы 4.12 проведем проверку качества полиномиальных зависимостей распределения температур по горизонтали над излучателями:

• Проверка значимости коэффициентов полиномиальных моделей на основе *t*-статистики Стьюдента.

Определим критическую точку распределения Стьюдента. Для всех моделей число независимых переменных m = 4, объем выборки n=9. Число степеней свободы k = n - m - 1 = 9 - 4 - 1 = 4. Данным параметрам, согласно таблице 4.6, соответствует критическая точка $t_{\rm kp}=2,78$.

Проанализируем значимость коэффициентов, имея в виду, что переменные *Z* с четными индексами соответствуют четным степеням переменной X в исходной полиномиальной модели (4.8), аналогично – для нечетных индексов.

Свободный член регрессии признан значимым для всех моделей. Для излучателей типовой конструкции мощностью 5-20 кВт и изолированной конструкции значимыми признаны коэффициенты при четных степенях *X*. Для типовой конструкции излучателей мощностью 30 и 40 кВт все коэффициенты признаны незначимыми. Для усовершенствованной конструкции значимым признан только коэффициент *a*₂.

Таким образом, несмотря на высокие коэффициенты детерминации, полученные модели не удовлетворяют условиям, предъявляемым к моделям высокого качества. Следовательно, требуется частично изменить исходный вид модели.

Для типовой конструкции ГИИ мощностью 5-20 кВт и изолированной конструкции уберем слагаемые с нечетной степенью и исходная модель (4.8) примет вид:

$$T = a_4 X^4 + a_2 X^2 + a_0 \tag{4.10}$$

Для типовой конструкции излучателей мощностью 30 и 40 кВт существенно более близкими к критическому порогу были *t*-значения для *a*₂, поэтому при

анализе их данных и данных усовершенствованной конструкции целесообразно строить модель вида:

$$T = a_2 X^2 + a_0 \tag{4.11}$$

Сделав ранее указанные замены переменной, получим соответственно множественную (4.12) и парную (4.13) линейные регрессии:

$$T = a_4 Z_4 + a_2 Z_2 + a_0 \tag{4.12}$$

$$T = a_2 Z_2 + a_0 \tag{4.13}$$

Результаты повторных расчетов приведены в таблице 4.13; графически зависимости представлены на рисунке 4.33.



Рис. 4.33 Распределение температур по горизонтали над ГГИИ типовой, изолированной и усовершенствованной моделей: точки – эмпирические данные; пунктирные линии – регрессионные зависимости

Модель- тепловая мощность ГИИ, кВт	<i>a</i> ₄	<i>a</i> ₂	a_0	S_{a4}	S _{a2}	S _{a0}	t _{a4}	<i>t</i> _{a2}	t_{a0}	Уравнение регрессии	R^2	F _{эмп}
ГИИ-5	95,22	-143,86	89,55	23,88	25,37	4,62	3,99	-5,67	19,38	$T = 95,22X^4 - 143,86X^2 + 89,55$	0,92	32,9
ГИИ-10	72,27	-113,07	102,23	20,35	21,63	3,94	3,55	-5,23	25,95	$T = 72,27X^4 - 113,07X^2 + 102,23$	0,91	30,7
ГИИ-15	66,96	-108,99	114,07	11,73	12,46	2,27	5,71	-8,75	50,26	$T = 66,96X^4 - 108,99X^2 + 114,07$	0,97	95,2
ГИИ-20	51,72	-85,69	120,44	18,82	20,00	3,64	2,75	-4,281	33,06	$T = 51,72X^4 - 85,69X^2 + 120,44$	0,89	23,8
ГИИ-30		-19,43	138,09	Ι	3,85	2,14	_	-5,04	64,67	$T = -19,43X^2 + 138,09$	0,78	25,4
ГИИ-40	_	-13,31	146,36	_	3,97	2,20	_	-3,36	66,54	$T = -13,31X^2 + 146,36$	0,62	11,3
	5,50	-6,21	43,06	2,94	3,12	0,57	1,87	-1,99	75,66	$T = 5,5X^4 - 6,21X^2 + 43,06$	0,40	2,0
Т ИНИ-10	_	-0,57	42,39	-	0,94	0,52	_	-0,61	81,74	$T = -0,57X^2 + 42,39$	0,05	1,03
ГИИм-5	_	-12,55	48,26	_	3,13	1,73	_	-4,01	27,84	$T = -12,55X^2 + 48,26$	0,70	16,1

Таблица 4.13 Параметры множественной (4.12) и парной (4.13) линейных регрессий

На основе данных таблицы 4.13 проведем повторную проверку качества полиномиальных зависимостей распределения температур по горизонтали над излучателями:

• Проверка значимости коэффициентов усеченных полиномиальных моделей на основе *t*-статистики Стьюдента.

Множественная модель (4.12) включает 2 переменные, значит m = 2. Тогда число степеней свободы k = n - m - 1 = 9 - 2 - 1 = 6. Соответствующая критическая точка $t_{\rm kp} = 2,45$. Модель (4.13) включает 1 переменную, значит m = 1, тогда число степеней свободы k = 9 - 1 - 1 = 7, $t_{\rm kp} = 2,36$. Все критические точки определяются на 5%-ном уровне значимости.

Для всех коэффициентов полиномиальных моделей излучателей типовой и усовершенствованной конструкций выполняется неравенство | $t_{a_i} > t_{\kappa p}$. Следовательно, все коэффициенты признаны значимыми с уверенностью 95%.

Для изолированной конструкции все коэффициенты (кроме *a*₀) незначимы, следовательно, полученная модель не может считаться моделью высокого качества.

• Проверка значимости коэффициента детерминации полиномиальных зависимостей на основе *F*-критерия Фишера.

Согласно таблице 4.7 для модели (4.12) – $F_{\kappa p}$ =5,14; для модели (4.13) – $F_{\kappa p}$ =5,59. Следовательно, для типовой и усовершенствованной конструкций излучателей $F_{3Mn} > F_{\kappa p}$, что позволяет заключить о статистической значимости R^2 и, как результат, высоком качестве построенных регрессий.

Поскольку в полиномиальной модели 4-й степени изолированной конструкции наименьшее по модулю *t*-значение – это t_4 , то исключим из модели переменную Z_4 и построим модель вида (4.11). Результаты расчета сведены в таблицу 4.13. Исходя из $t_{\kappa p}$ =2,36, установлено, что $|t_{\alpha 2}| < t_{\kappa p}$ и, как результат, коэффициент a_2 признается незначимым.

Анализируя эмпирические данные и результаты проведенных исследований полиномиальной модели изолированной конструкции можно выдвинуть гипотезу

об отсутствии и линейной связи между температурой и расстоянием до центра ГИИи.

Построим линейную регрессионную модель вида:

$$T = a_1 X + a_0 \tag{4.14}$$

По результатам расчетов получаем, что $a_1 = -0.84$, $S_{a_1} = 0.44$. Тогда $|t_{\alpha 1}| = 1.89 < 2.36 = t_{\kappa p}$, $R^2 = 0.34$, $F_{3MN} = 3.36$. Следовательно, $F_{3MN} < F_{\kappa p}$ и, как результат, незначимыми признаются коэффициент при переменной и коэффициент детерминации. Это свидетельствуют о том, что температура над изолированной конструкцией ГГИИ не зависит от расстояния до центра горелки. Другими словами, температура равномерно распределена над поверхностью изолированной конструкции излучателя.

ГЛАВА 5 ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1 Методика проектирования высокотемпературных газовых горелок инфракрасного излучения

Для оптимизации времени выполнения проектных работ и повышения точности конструкторских и проектных расчетов автором разработана методика проектирования высокотемпературных ГГИИ для обогрева производственных и крупногабаритных помещений.

5.1.1. Сбор исходных данных.

5.1.1.1. Геометрические параметры помещения: длина, ширина, высота по стене, высота в коньке, м;

5.1.1.2. Общая площадь остекления, м²;

5.1.1.3. Тип остекления: одинарное, двойное, тройное, стеклоблоки;

5.1.1.4. Материал и толщина ограждающих конструкций: стен, кровли, пола;

5.1.1.5. Тип наружный ворот и дверей: утепленные, неутепленные;

5.1.1.6. Площадь наружных ворот и дверей, M^2 ;

5.1.1.7. Площадь фонарного остекления кровли, м²;

5.1.1.8. Наличие крана/крана-балки и высота установки, м;

5.1.1.9. Характер производства;

5.1.1.10. Категория взрывопожароопасности;

5.1.1.11. График работы: одно-, двух-, трехсменный;

5.1.1.12. Внутренняя температура: дневная и ночная, °С;

5.1.1.13. Приточная и вытяжная вентиляция: канальная, бесканальная; с подогревом, без подогрева; естественная, механическая, местные отсосы;

5.1.1.14. Кратность воздухообмена, крат.;

5.1.1.15. Адрес: страна, область, город.

5.1.1.16. Климатические параметры.

5.1.2. Определение тепловой мощности системы отопления с ГИИ. В первом приближении согласно расчета тепловых потерь здания, например по [152].

5.1.3. Создание трехмерной геометрической модели в САПР для генерации конечно-элементной сетки и задания граничных условий (глава 3). Начиная с девятой версии, программный продукт ANSYS реализует «концепцию расчета многодисциплинарных задач в единой рабочей платформе с поддержкой ассоциативной связи с САD-системой. В качестве такой платформы используется среда ANSYS Workbench, которая имеет следующие модули для ассоциативной работы с CAD-пакетами: Geometry Interface for Pro/ENGINEER, Geometry Interface for Unigraphics, Geometry Interface for Inventor/MDT, Geometry Interface for Solid Edge, Geometry Interface for SolidWorks» [127]. Таким образом, становятся возможными параметрический анализ и оптимизация геометрических моделей созданных с использованием наиболее распространенных современных САПР.

5.1.4. Уточнение теплофизических характеристик материалов для имитационной модели производственного помещения. Задание граничных условий (глава 3).

5.1.5. Определение мест размещения и высоты подвеса ГИИ из условий расположения рабочих мест, конструктивных особенностей помещения, наличия в помещении крана/кран-балки и других технологических сооружений: одно-, многорядное размещение по центру помещения под углом 0° (с направлением излучения вертикально вниз) или в пристенной области под углом не более 60° (с отклонением направления излучения от вертикали, при этом продольная ось излучателя должна быть горизонтальна). Излучатель может быть установлен на колоннах, стенах, подвешен к фермам, балкам, конструкциям перекрытий или размещен на специальных стойках. При установке исключить нагрев от излучателя строительных конструкций, оборудования, материалов и инженерных коммуникаций, в результате которого их рабочая температура превышает допустимые значения.

5.1.6. Подбор типа конструкции и тепловой мощности высокотемпературных ГГИИ по прогнозируемой высоте подвеса: 4-5 м – 5 кВт; 5-6 м – 10 кВт; 6-7 м – 15 кВт; 7-8 м – 20 кВт; 8-10 м – 30 кВт; 10-11 м – 40 кВт. Высота повеса может быть уменьшена или увеличена (± 1 м) при увеличении угла наклона излучателя, но должна составлять не менее 4 м во всех случаях.

5.1.7. Уточнение параметров имитационной модели высокотемпературной ГГИИ. Задание граничных условий (глава 3).

5.1.8. Определение расстояния между излучателями исходя из создания равномерной облученности рабочей зоны. В случаях, когда необходимо создать равномерное распределение теплового потока ПО всей площади пола, целесообразнее использовать многорядное размещение ГИИ (глава 3). А у теплотеряющих ограждающих конструкций интенсивность теплового потока должна быть увеличена на 20-30 % в сравнении с остальной площадью пола. Шаг между излучателями определять по установленной автором функциональной аппроксимирующей зависимости диаметра теплового пятна под ГГИИ от мощности (рисунок 3.10), когда необходимо a В случае, учитывать конструктивные особенности помещения установку выполнить исходя из существующей возможности размещения с проверкой на удовлетворение заданной и допустимой облученности.

5.1.9. Определение расстояния от ГГИИ до ограждающих конструкций. Установить согласно руководству по эксплуатации [148, 149] производителя (рисунки 5.1 и 5.2). Излучатель должен крепиться на несгораемых конструкциях и все подводящие элементы к нему использовать из жаростойких материалов.





Рис. 5.1 Минимальные расстояния (мм) от высокотемпературного излучателя мощностью 5-20 кВт до конструкций

Рис. 5.2 Минимальные расстояния (мм) от высокотемпературного излучателя мощностью 30-40 кВт до конструкций

5.1.10. Математическое моделирование теплового режима и распределения плотности теплового потока в объеме помещения (глава 3).

5.1.11. Проверка данных, полученных по результатам математического моделирования на удовлетворение санитарно-гигиеническим требованиям в отношении плотности теплового потока, температуры внутреннего воздуха и окружающих материалов (согласно требованиям [70, 141]).

Если полученные значения не превышают санитарно-гигиенических требований, то расчет завершен (переход к пункту 5.1.13). В случае превышения:

5.1.12. Численное исследование с корректировкой расчётной области и граничных условий (согласно пунктов 5.1.2-5.1.11);

5.1.13. Создание проектной документации системы ГЛО.

Апробация предложенной методики проектирования высокотемпературных ГГИИ проведена при реконструкции системы ГЛО производственного помещения территориальной фирмы «Мостоотряд-36» АО «Мостострой-11». Характеристики производственного помещения: длина – 114 м; ширина – 39 м; высота по стене – 11,63 м; высота в коньке – 13,15 м; площадь – 4446 м²; объем – 55085,95 м³;

134

исходная тепловая мощность системы ГЛО – 800 кВт, в том числе 40 шт. высокотемпературных ГИИ тепловой мощностью по 20 кВт каждый.

На базе указанного производственного помещения ранее был проведен ряд экспериментальных исследований (глава 4 и приложение Г), в результате чего установлено завышение суммарной тепловой мощности ГГИИ, некорректное размещение излучателей в объеме помещения и, как следствие, нарушение температурного режима и облученности в рабочей зоне, завышение стоимости системы ГЛО и эксплуатационных расходов.

энергозатрат обеспечение Для снижения теплового на режима производственного цеха было произведено повторное проектирование высокотемпературных ГГИИ согласно разработанной методике. В результате в цеху установлена оптимальная тепловая мощность системы ГЛО – 600 кВт, в том числе 30 штук высокотемпературных ГГИИ тепловой мощностью 20 кВт каждый; определены рациональные решения по размещению излучателей в объеме помещения: излучатели установлены в пристенной области под углом 45°, высота подвеса 7 метров, средний шаг между ГИИ составил 7 метров (акт внедрения представлен в приложение А).

Для оценки экономической эффективности выполним сравнительный расчет капитальных и эксплуатационных затрат на систему ГЛО с высокотемпературными ГИИ мощностью 20 кВт в количестве 40 и 30 штук.

Капитальные осуществляются разработку затраты на проектной документации системы ГЛО, поставку излучателей, строительно-монтажные работы (в том числе и пуско-наладочные), а эксплуатационные затраты – на приобретение природного газа, электроэнергии и техническое обслуживание излучателей. Обслуживание излучателей и проверка их работы проводится один раз в год перед отопительным сезоном, что включает в себя следующие работы: очистка керамической плитки излучателя продувкой сжатым воздухом под давлением 0,4 -0,5 МПа; очистка наружных поверхностей излучателя; проверка герметичности соединений излучателей С газопроводом; контроль всех электрических соединений; проверка работы блока автоматики; проверка работы

блока клапанов и регулировка давления газа перед излучателем; при необходимости ремонт излучателей и замена неисправных комплектующих в рамках гарантийных обязательств.

Исходные данные для расчета: стоимость 1 шт. ГИИ мощностью 20 кВт марки 2100, по данным завода-изготовителя АО «Сибшванк» (на 01.04.2017), составляет 74500 руб. (с НДС); стоимость строительно-монтажных работ из расчета на один излучатель, по данным завода-изготовителя АО «Сибшванк» (на 01.04.2017), составляет 45000 руб.; стоимость разового технического излучателя, обслуживания завода-изготовителя одного ПО данным АО «Сибшванк» (на 01.04.2017), составляет 4500 руб.; стоимость 1000 м³ природного газа, по данным ООО «Газпром межрегионгаз Север» (на 01.04.2017), составляет 4961,51 руб. (с НДС); стоимость 1 кВт электроэнергии, по данным АО «Тюменская энергосбытовая компания» (на 01.04.2017), составляет 4,94 руб. (с НДС); температура воздуха наиболее холодной пятидневки (с обеспеченностью 0,92) - минус 35 °C; средняя температура воздуха за отопительный период минус 6,9 °С; продолжительность отопительного периода со средней суточной температурой воздуха 8 °С и ниже – 223; график работы – трехсменный, пять рабочих дней, два выходных; температура незамерзания поддерживаемая в нерабочее время - 5 °C; температура внутреннего воздуха в рабочее время -18 °C; продолжительность работы системы отопления в сутки – 24 часа; низшая теплота сгорания природного газа – 7900 ккал/м³; коэффициент преобразования энергии топлива в тепловую энергию высокотемпературного ГИИ – 0,95.

Порядок расчета потребности в тепле, топливе и электроэнергии:

- Максимально-часовой расход тепла на отопление, Гкал/час:

$$Q_o = \frac{N \cdot 10^3}{1,163 \cdot 10^6} \tag{5.1}$$

где N – мощность системы отопления, кВт.

- Среднечасовой расход тепла на отопление, Гкал/час:

136

$$Q_{o.cp.} = Q_o \cdot \frac{T_{e} - T_{cp.o.}}{T_{e} - T_{po}}$$
(5.2)

где T_{ср.о} – средняя температура наружного воздуха за отопительный период, К; Т_{ро} – температура воздуха наиболее холодной пятидневки, К.

Среднечасовой расход на отопление определяется для рабочей (5 дней в неделю по 24 часа) и нерабочей смен (2 дня в неделю по 24 часа).

- Среднегодовой расход тепла на отопление, Гкал/год:

$$Q_{o.c.} = 24 \cdot Q_{o.cp.} \cdot \Pi_o \tag{5.3}$$

где П_о – продолжительность отопительного периода со средней суточной температурой воздуха 8 °C и ниже.

- Годовой расход натурального топлива (природного газа), м³/год:

$$B_{\Gamma} = \frac{Q_{o.c.} \cdot 10^6}{Q_{\mu} \cdot \eta} \tag{5.4}$$

где Q_н – низшая теплота сгорания газа, ккал/м³; η – коэффициент преобразования энергии топлива в тепловую энергию высокотемпературного ГИИ.

- Максимальный часовой расход природного газа, м³/час:

$$q = \frac{N \cdot 10^3}{1,163 \cdot Q_{\scriptscriptstyle H} \cdot \eta} \tag{5.5}$$

- Годовой расход электроэнергии на систему отопления с высокотемпературными ГГИИ, кВт:

$$B_{_{\mathcal{Y}}} = \frac{B_{_{\Gamma}}}{B_{_{\mathcal{Y}^2}}} \cdot B_{_{\mathcal{Y}^3}} \tag{5.6}$$

где В_{чг} – часовой расход газа высокотемпературным ГИИ, м³/час; В_{чэ} – часовой расход электроэнергии высокотемпературным ГИИ (принят 0,03), кВт/час.

Результаты расчета капитальных и эксплуатационных затрат на систему отопления с высокотемпературными ГИИ мощностью 20 кВт в количестве 40 и 30 штук приведены в таблице 5.1.

Наименование расчетного параметра	Результа	т расчета
Количество ГИИ, шт.	40	30
Тепловая мощность ГИИ, кВт	20	20
Капитальные затрат	Ы	
Стоимость 1 шт. ГИИ-20, руб.	74 500	74 500
Стоимость комплекта излучателей, руб.	2 980 000	2 235 000
Стоимость строительно-монтажных работ, руб.	1 800 000	1 350 000
Эксплуатационные затр	раты	
Максимально-часовой расход тепла на отопление,	0.60	0.52
Гкал/час	0,09	0,52
Среднечасовой расход тепла на отопление, Гкал/час	0,29	0,22
Среднегодовой расход тепла на отопление, Гкал/год	1 548,37	1 161,28
Годовой расход натурального топлива (природного	206 211 67	154 722 75
газа), м ³ /год	200 311,07	154 755,75
Максимальный часовой расход природного газа, м ³ /час	91,66	68,74
Годовой расход электроэнергии на систему отопления с	3 004 68	2 321 01
высокотемпературными ГГИИ, кВт	5 094,08	2 321,01
Стоимость 1000 м ³ природного газа, руб.	4 961,51	4 961,51
Годовые затраты на приобретение природного газа, руб.	1 023 617	767 713
Стоимость 1 кВт электроэнергии, руб.	4,94	4,94
Годовые затраты на приобретение электроэнергии, руб.	15 287,69	11 465,77
Годовые затраты на техническое обслуживание, руб.	180 000,00	135 000,00
Итого затрат, руб.	5 998 905	4 499 179
Экономический эффект, руб.	1 499	9 726

	n v 1	1	V T	TTTT
	AIROTION ITITOORIUIT OC	$M \Delta W T = O D T D O U U U U U U U U U U U U U U U U U U$	ΗΙ Ο ΥΛΙΔΗΗ ΗΙΔΗΗΔΝΙ ΙΟΟΠΗΠΔΟΤΡΟ Ι	1/1/1
		нискі связанны	и с уменьшением количества і	
таолица эт				

Сравнительная экономическая оценка показала, что научно-обоснованный метод проектирования систем ГЛО позволяет снизить капитальные и эксплуатационные затраты почти на 1,5 млн. руб. при поддержании теплового режима в производственном помещении и, как следствие, увеличить энергосберегающий эффект от применения высокотемпературных ГГИИ.

5.2 Оценка экономической эффективности высокотемпературного газового инфракрасного излучателя изолированной модели

Эффективность газового инфракрасного обогрева производственного помещения повышается за счет применения высокотемпературных ГГИИ изолированной модели, результаты исследований (глава 2 и приложение В) которых показали, что за счет увеличения полезной доли излучателя до 10 % температура в рабочей зоне помещения на 1,5-2 °C выше, чем при работе излучателей типовой модели той же суммарная тепловой мощности.

Следовательно, за счет применением излучателей изолированной модели тепловая мощность системы ГЛО может быть уменьшена до 10 %, что позволит снизить капитальные и эксплуатационные затраты на поддержание теплового режима в производственном помещении.

Апробация предложенного в работе технического решения проведена на базе производственного помещения компании АО «Сибшванк», а именно произведена теплоизоляция корпуса установленных высокотемпературных ГГИИ, а их суммарная тепловая мощность уменьшена до 140 кВт (ранее – 160 кВт), в том числе 14 шт. (ранее – 16 шт.) высокотемпературных излучателей изолированной модели тепловой мощностью по 10 кВт каждый (акт внедрения представлен в приложении А).

Для эффективности оценки экономической изолированной модели высокотемпературного ГИИ было проведено сравнение капитальных И эксплуатационных затрат для двух вариантов системы ГЛО: с применением шестнадцати излучателей типовой модели мощностью 10 кВт каждый и с применением четырнадцати излучателей изолированной модели мощностью 10 кВт каждый.

Исходные данные для расчета приняты согласно раздела 5.1 с уточнением: стоимость 1 шт. ГИИ тепловой мощностью 10 кВт марки 2100, по данным заводаизготовителя АО «Сибшванк» (на 01.04.2017), составляет 47000 руб. (с НДС); стоимость теплоизоляции наружной поверхности конструкции ГИИ тепловой мощностью 10 кВт марки 2100 составила 8500 руб. (с НДС); график работы – односменный, пять рабочих дней, два выходных.

Порядок расчета потребности в тепле, топливе и электроэнергии выполнен согласно формул (5.1)-(5.6). Результаты расчета капитальных и эксплуатационных затрат на систему ГЛО с высокотемпературными ГИИ мощностью 10 кВт типовой (в количестве 16 шт.) и изолированной (в количестве 14 шт.) моделей приведены в таблице 5.2.

	Результат расчета	
Наименование расчетного параметра	типовая	изолированная
	модель	модель
Количество ГИИ, шт.	16	14
Тепловая мощность ГИИ, кВт	10	10
Капитальные затраты		
Стоимость 1 шт. ГИИ-10, руб.	47 000	55 500
Стоимость комплекта излучателей, руб.	752 000	777 000
Стоимость строительно-монтажных работ, руб.	720 000	630 000
Эксплуатационные затраты		
Максимально-часовой расход тепла на отопление,	0,14	0,12
Гкал/час		
Среднечасовой расход тепла на отопление, Гкал/час	0,05	0,04
Среднегодовой расход тепла на отопление, Гкал/год	264,16	231,14
Годовой расход натурального топлива (природного	35 107 78	30 798 06
газа), м3/год	55 177,70	50 7 70,00
Максимальный часовой расход природного газа, м3/час	18,33	16,04
Годовой расход электроэнергии на систему отопления с высокотемпературными ГГИИ, кВт	1 055,93	923,94
Стоимость 1000 м3 природного газа, руб.	4 961,51	4 961,51
Годовые затраты на приобретение природного газа, руб.	174 634	152 805
Стоимость 1 кВт электроэнергии, руб.	4,94	4,94
Годовые затраты на приобретение электроэнергии, руб.	5 216,31	4 564,27
Годовые затраты на техническое обслуживание, руб.	72 000,00	63 000,00
Итого затрат, руб.	1 723 850	1 627 369
Экономический эффект, руб.	96 481	

Таблица 5.2 Экономический эффект от применения изолированной модели

Оценка экономической эффективности показала, что система ГЛО с применением высокотемпературных ГГИИ изолированной модели имеет наименьшие капитальные и эксплуатационные затраты в сравнении с типовой моделью. Экономический эффект составил 96,481 тыс.руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа современного состояния систем ГЛО обоснована актуальность совершенствования высокотемпературных ГГИИ и разработки методики проектирования таких отопительных устройств.

2. Предложены технические решения высокотемпературных ГГИИ: с теплоизоляцией наружной поверхности конструкции и с водяным охлаждением рефлектора, которые позволили решить проблему перегрева верхней зоны помещения и обеспечить оптимальный тепловой режим во всем объеме помещения за счет снижения теплоотдачи от корпуса излучателя и вторичного использования энергии и, как следствие, повысить эффективность работы системы ГЛО в целом.

3. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что эффективность работы излучателя при его теплоизоляции повышается на 7-10 % за счет увеличения интенсивности теплового потока, переданного в рабочую зону. Эффективность работы излучателя при усовершенствовании конструкции его рефлектора повышается на 13-17 % за счет рекуперации тепла продуктов сгорания и, тем самым, нагрева теплоносителя, который в дальнейшем может быть использован для отопления, горячего водоснабжения и вентиляции.

4. Разработаны и апробированы параметрические модели высокотемпературных ГГИИ, описывающие закономерности их работы и позволяющие оценить работоспособность и эффективность технических решений на стадии конструирования.

5. Разработана и апробирована многопараметрическая модель производственного помещения, описывающая закономерности формирования воздушно-теплового режима при работе современных решений высокотемпературных ГГИИ и позволяющая определять эффективность системы ГЛО при различных параметрах.

141

6. На основе натурного и математического имитационного моделирования процессов горения и тепломассообмена при работе высокотемпературных ГГИИ получены:

• зависимость, описывающая распределение температуры по высоте перфорированного керамического насадка современной высокотемпературной ГГИИ;

• зависимость диаметра теплового пятна под ГГИИ от её мощности, позволяющая определять оптимальное расстояние между излучателями и, как следствие, создать равномерную облученность в помещении;

• зависимости, описывающие распределение плотности теплового потока и температурных полей в объеме производственного помещения при различной тепловой мощности высокотемпературных ГГИИ (5, 10, 15, 20, 30, 40 кВт) и их высоты подвеса (4-10 метра);

оптимальные высоты подвеса высокотемпературных ГГИИ в объеме помещения: 5 кВт – 4-5 м; 10 кВт – 5-6 м; 15 кВт – 6-7 м; 20 кВт – 7-8 м; 30 кВт – 8-10 м; 40 кВт – 10-11 м;

 зависимости, описывающие формируемый в зоне над высокотемпературными ГГИИ тепловой режим от времени, тепловой мощности и конструктивного решения излучателя.

7. Предложена и апробирована методика проектирования высокотемпературных ГГИИ, позволяющая повысить эффективность работы системы ГЛО за счет определения её эффективной тепловой мощности и подбора рациональных решений по размещению излучателей в помещении.

8. Результаты научно-исследовательской работы использованы при проектировании и реконструкции систем ГЛО для АО «Сибшванк» и территориальной фирмы «Мостоотряд-36» АО «Мостострой-11». Суммарный расчетный экономический эффект от внедрения составил 1 596,207 тыс. руб. в ценах 2017 года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

2. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27.12.2010 № 2446-р «Об утверждении государственной программы «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года».

3. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 13.11.2009 № 1715-р «Об Энергетической стратегии России на период до 2030 года».

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

Распоряжение Правительства Тюменской области от 06.02.2017 № 85-рп
 «Об утверждении региональной программы Тюменской области
 «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности» до 2020 года».

6. Распоряжение Правительства Тюменской области от 27.02.2010 № 141-рп «О плане мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности в Тюменской области, направленных на реализацию Федерального закона «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

7. Распоряжение Администрации г. Тюмени от 21.10.2009 № 1630 «О мерах по энергосбережению и повышению энергетической эффективности в городе Тюмени».

8. Страхова, Н. А., Горлова, Н. Ю. Концепция энергоресурсосберегающей деятельности в промышленности / Н. А. Страхова, Н. Ю. Горлова // Инженерный вестник Дона. - 2011. - № 1. - Режим доступа: http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2011/359.

9. Ермолаев, А. Н. Совершенствование систем радиационного обогрева рабочих мест / А. Н. Ермолаев // Сборник материалов XIII научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и соискателей ТюмГАСУ. - 2014. - С. 136-139.

10. Куриленко, Н. И., Михайлова, Л. Ю., Давлятчин, Р. Р., Ермолаев, А. Н. Оптимизация работы инфракрасного обогрева рабочих мест общественных и производственных зданий / Н. И. Куриленко, Л. Ю. Михайлова, Р. Р. Давлятчин, А. Н. Ермолаев // Сборник материалов международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы строительства, архитектуры, экологии и энергосбережения в условиях Западной Сибири». - 2014. - С. 115-119.

11. Михайлова, Л. Ю., Созонова, О. А., Ермолаев, А. Н., Куриленко, Е. Ю. Поиск путей энергосбережения при производстве газовых инфракрасных излучателей / Л. Ю. Михайлова, О. А. Созонова, А. Н. Ермолаев, Е. Ю. Куриленко // Научно – технический журнал «Строительный вестник». - 2014. - № 1. - С. 58-60.

12. Слесарев, Д. Ю. Совершенствование сжигания газового топлива в горелках инфракрасного излучения светлого типа: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / Слесарев Денис Юрьевич. - Тольятти, 2009. - 161 с.

13. Руководство по энергоэффективному оборудованию «Газовые инфракрасные обогреватели для промышленности»: отчет. – Москва: Международная финансовая корпорация IFC, 2007. - 67 с.

Куриленко, Н. И., Чекардовский, М. Н., Михайлова, Л. Ю., Ермолаев, А. Н.
 Рекуперация тепла в системе газового инфракрасного обогрева / Н. И. Куриленко,
 М. Н. Чекардовский, Л. Ю. Михайлова, А. Н. Ермолаев // Сборник материалов XV
 конференции молодых ученых, аспирантов, соискателей и магистров ТюмГАСУ. 2015. - С. 54-60.

15. Мачкаши, А. Лучистое отопление / А. Мачкаши, Л. Банхиди; пер. с венгерского В. М. Беляева, под ред. В. Н. Богословского и Л. М. Махова. - М.: Стройиздат, 1985.-464 с.
16. Чандрасекар, С. Перенос лучистой энергии / С. Чандрасекар; пер. с английского под ред. Е. С. Кузнецова. – Москва: Издательство иностранной литературы, 1953.-432 с.

17. Суринов, Ю. А. Интегральные уравнения теплового излучения и методы расчета лучистого теплообмена в системе серых тел, разделенных диатермической средой / Ю. А. Суринов // Известия АН СССР. Серия ОТН. - 1948. - № 7. - С. 981-1002.

18. Суринов, Ю. А. Обобщенный зональный метод исследования и расчета лучистого теплообмена в поглощающей и рассеивающей среде / Ю. А. Суринов // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. - 1975. - № 4. - С. 112-137.

Суринов, Ю. А. О нестационарных задачах теории лучистого теплообмена
 / Ю. А. Суринов // Известия вузов. Черная металлургия. 1997. - С. 58-66.

20. Кутателадзе, С. С. Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе. - М.: Атомиздат, 1979.-415 с.

21. Блох, А. Г. Основы теплообмена излучением / А. Г. Блох. - М.: Госэнергоиздат, 1967.-331 с.

22. Сперроу, Э. М., Сесс, Р. Д. Теплообмен излучением / Э. М. Сперроу, Р. Д. Сесс. - Л.: Энергия, 1971.-294 с.

23. Левин, А. М. Газовые излучающие горелки / А. М. Левин, А. К. Родин. - Сборник «Распределение и сжигание газа». Выпуск 2. - Саратов: СПИ, 1976.-13 с.

24. Родин, А. К. Определение плотности излучения от газовых инфракрасных излучателей / А. К. Родин // Использование газа в народном хозяйстве. Выпуск 4. – 1965. – С. 240-246.

25. Родин, А. К. Определение доли излучения фронта горения в газовых излучающих горелках / А. К. Родин, Л. Б. Иванова // Распределение и сжигание газа в газовых излучающих горелках – 1978. – С. 143-146.

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

27. 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.

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

29. Родин, А. К. Газовое лучистое отопление / А. К. Родин. - Л.: Недра, 1987.-191 с.

 Богословский, В. Н. Тепловой режим здания / В. Н. Богословский. -М.: Стройиздат., 1979.-248 с.

 Богословский, В. Н. Отопление / В. Н. Богословский, А. Н. Сканави. -М.: Стройиздат., 1991.-735 с.

32. Богословский, В. Н. Строительная теплофизика / В. Н. Богословский. - М.: Высшая школа, 1982.-415 с.

33. Богословский, В. Н. Теплообмен в помещении при лучистом отоплении. Панельное отопление зданий / В. Н. Богословский. - М.: Стройиздат., 1967.-254 с.

34. Сканави, А. Н. Отопление / А. Н. Сканави. - М.: Стройиздат., 1988.-416 с.

35. Банхиди, Л. Тепловой микроклимат помещений / Л. Банхиди. - М.: Стройиздат., 1981.-247 с.

36. Franger, P. Thermal comfort / P. Fanger. - New York: Mc Grow Hill Book Co., 1970.-271 p.

 Миссенар, А. Лучистое отопление и охлаждение / А. Миссенар. - пер. с франц. – М.: Госстройиздат., 1961.-299 с.

38. Kollmar, F., Lise, W. Die Strahlungsheizung / F. Kollmar, W. Lise. - Munchen Springer, 1957.-142 p.

39. Борхерт, Р. Техника инфракрасного нагрева / Р. Борхерт, В. Юбиц. - пер. с нем., под ред. И. Б. Левитина. - М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963.-278 с.

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

41. Брюханов, О. Н. Радиационно – конвективный теплообмен при сжигании газа в перфорированных системах / О. Н. Брюханов. - Л.: Издательство ЛГУ, 1977.-240 с.

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

43. Брюханов, О. Н. Микрофакельное сжигание газов / О. Н. Брюханов. - Л.: Недра, 1983.-190 с.

44. Брюханов, О. Н., Винникова, Р. Н., Алексеева, Т. И. Унифицированная металлосетчатая инфракрасная горелка / О. Н. Брюханов, Р. Н. Винникова, Т. И. Алексеева // Газовая промышленность. – 1985. - № 3. - С. 40-41.

45. Брюханов, О. Н. Радиационный газовый нагрев / О. Н. Брюханов, Э. В. Крайний, Б. С. Мастрюков. - Л.: Недра, 1989.-160 с.

46. Брюханов, О. Н., Румянцев, А. В., Шевченко, С. Н. Передвижная газовая инфракрасная установка для сушки и нагрева / О. Н. Брюханов, А. В. Румянцев, С. Н. Шевченко // Газовая промышленность. – 1985. - № 11. - С. 38-39.

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

48. Оцеп, С. А. Лучистое отопление / С. А. Оцеп. - М.: Гос. изд. литературы по строительству, 1948.-150 с.

49. Тилин, Л. А. Лучистое отопление нагретым воздухом / Л. А. Тилин. - М.: Гос. изд - во литературы по строительству и архитектуре, 1955.-153 с.

50. Ициксон, Б. С. Инфракрасные газовые излучатели / Б. С. Ициксон, Ю. А. Денисов. - М.: Недра, 1969.-280 с.

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

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

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

54. Левин, А. М., Родин, А. К., Кулагин, Л. А. 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.

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

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

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

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

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

60. Голик, В. Г., Родин, А. К. Эффективность применения газовых горелок инфракрасного излучения для отопления животноводческих помещений / В. Г. Голик, А. К. Родин // Животноводство. - 1967. - № 3. - С. 81-84.

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

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

63. Yaglou, C. P. A method for improving the effective temperature index. – ASHRAE. – 1974. - 53.307 p.

64. Богомолов, А. И. Газовые горелки инфракрасного излучения и их применение / А. И. Богомолов, Д. Я. Вигдорчик, М. А. Маевский. - М: Стройиздат, 1967.-255 с.

65. Малышева, А. Е. Гигиеническая оценка радиационного охлаждения зданий
/ А. Е. Малышева // Исследования по строительной теплофизике. - 1959. - С. 259-263.

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

67. Горомосов, М. С., Ципер, Н. А. К вопросу о гигиенической оценке систем лучистого отопления / М. С. Горомосов, Н. А. Ципер // Гигиена и санитария. – 1967. - № 22у6 – С. 20-28.

68. Andreas Kampf. Energetische und physiologische Untersuchungen bei der Verwendung von Gasinfrarotstrahlern im Vergleich zu konkurrierenden Heizsystemen fur die Beheizung grober Raume: dissertation zur Erlangung des Grades Doktor-Ingenieur der Fakultat fur Maschinenbau der Ruhr-Universitat Bochum. – Bochum, 1994. - 195 c.

69. Andreas Kampf. Behaglichkeit wird neu definiert [Электронный ресурс] // Know-How. – 2004. – Режим доступа: http://www.ikz.de/1996-2005/2004/08/0408083.php.

70. СП 60.13330.2012 Свод правил. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003. - М.: Минрегион России, 2012. - 81 с.

71. 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.

72. Гвозденко, Л. А. Обоснование допустимых нормативов облученности инфракрасным излучением в зависимости от его спектрального состава /

Л. А. Гвозденко // Медицина труда и промышленная экология. – 1999. - № 12. -С. 13-18.

73. 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.

74. Chrenko, F. A. Heated ceiling and comfort / F. A. Chrenko // Journal IHVE. – 1973. - v. 20. - P. 68-75.

75. Turkiewiez, K. Ocena warunkow cieplnych hali przemys towejprzy ogrzewaniu powietrznym / K. Turkiewiez // Politechnka Slaska. - 1981. – № 22. - P. 133-151.

76. Табунщиков, Ю. А. Расчеты температурного режима помещения и требуемой мощности для его отопления или охлаждения / Ю. А. Табунщиков. - М.: Стройиздат, 1981.-80 с.

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

78. Ермолаев, А. Н. Исследование теплового режима в зоне над высокотемпературными газовыми инфракрасными горелками / А. Н. Ермолаев // Научно-технический журнал «Энергосбережение и водоподготовка». - 2017. - № 1 (105). - С. 17-22.

79. Крейнин, Е. В., Шуляк, В. Ф., Горбачев, Ю. К. Радиационные тупиковые трубы с рециркуляцией продуктов горения / Е. В. Крейнин, В. Ф. Шуляк, Ю. К. Горбачев // Сталь. - 1977. - № 12. - С. 1142-1144.

80. Крейнин, Е. В. Освоение тупиковых радиационных труб в металлургических печах / Е. В. Крейнин // Сталь. - 1983. - № 7. - С. 82-85.

81. Крейнин, Е. В. Современные газовые радиационные трубы металлургических печей / Е. В. Крейнин. - М.: ВНИИЭгазпром, 1979.-52 с.

82. Зиганшин, Б. М. Снижение энергетических затрат в системах отопления производственных объектов радиационными трубами: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04 / Зиганшин Булат Маликович. - Казань, 2006. - 163 с.

83. Кривоногов, Б. М. Разработка, исследование и результаты внедрения газовых инфракрасных излучателей с пористой керамической насадкой / Б. М. Кривоногов // Использование газа в народном хозяйстве. - 1966. - С. 299-314.

84. Дребенцов, В. Ф. Эффективность работы газовых радиационных горелок при сжигании природного газ / В. Ф. Дребенцов // Газовая промышленность. - 1964. - № 11. - С. 21-25.

85. Дребенцов, В. Ф. Высокотемпературные газовые излучатели беспламенного типа / В. Ф. Дребенцов // Газовая промышленность. - 1972. - № 3. - С. 24-27.

86. Лунин, В. В., Левин, А. М. Новая металлосетчатая инфракрасная горелка с удлинённой огневой насадкой / В. В. Лунин, А. М. Левин // Газовая промышленность. – 1989. - № 12. - С. 42-43.

87. Давлятчин, Р. Р. Влияние лучистой системы отопления на теплоизолирующие свойства покрытий производственных зданий и сооружений: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / Давлятчин Рустам Русланович. - Тюмень, 2009. - 120 с.

88. Куриленко, Н. И., Чекардовский, М. Н., Михайлова, Л. Ю., Ермолаев, А. Н. Повышение коэффициента полезного действия лучистой системы отопления с применением в качестве отопительных приборов «светлых» газовых инфракрасных излучателей / Н. И. Куриленко, М. Н. Чекардовский, Л. Ю. Михайлова, А. Н. Ермолаев // Инженерный вестник Дона. - 2015. - № 4. – Режим доступа: http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3339.

89. Куриленко, Н. И., Михайлова, Л. Ю., Ермолаев, А. Н. Создание низкозатратной системы рекуперации тепла на примере «светлого» газового инфракрасного излучателя / Н. И. Куриленко, Л. Ю. Михайлова, А. Н. Ермолаев // Научно-технический журнал «Энергосбережение и водоподготовка». - 2015. - № 6 (98). - С. 52-57.

90. Ермолаев, А. Н. Численное исследование горения и тепломассообмена при работе высокотемпературных газовых горелок инфракрасного излучения /

А. Н. Ермолаев // Фундаментальные исследования. - 2017. - № 1. – С. 56-62. - Режим доступа: https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41315.

91. СП 42-101-2003 Свод правил по проектированию и строительству. Общие положения по проектированию и строительству газораспределительных систем из металлических и полиэтиленовых труб. - М.: ЗАО «Полимергаз», ГУП ЦПП, 2003. - 199 с.

92. Болотских, Н. Н. Совершенствование ленточных двухтрубных газовых инфракрасных нагревателей / Н. Н. Болотских // Журнал «Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит». - 2014. - № 3 (121). - С. 33-40.

93. Болотских, Н. Н. Энергоэффективный инфракрасный трубчато-панельный газовый обогреватель / Н. Н. Болотских // Журнал «Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит». - 2013. - № 12 (118). - С. 35-40.

94. Болотских, Н. Н. Совершенствование инфракрасных газовых нагревателей, применяемых для зонального отопления / Н. Н. Болотских // Журнал «Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит». - 2014. - № 6 (124). - С. 57-64.

95. Болотских, Н. Н., Болотских, Н. С., Сорокотяга, А. С. Повышение эффективности работы газовых инфракрасных трубчатых нагревателей / Н. Н. Болотских, Н. С. Болотских, А. С. Сорокотяга // Журнал «Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит». - 2013. - № 4 (110). - С. 32-37.

96. Осетянская, Д. Е. Повышение эффективности газовых трубчатых нагревателей для лучистого отопления / Д. Е. Осетянская // Журнал «Технологический аудит и резервы производства». - 2012. - № 6/1 (8). - С. 31-32.

97. Редько, А. Ф., Болотских, Н. Н. 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.

98. ГОСТ Р 54446–2011 Нагреватели светового излучения газовые, не предназначенные для бытового применения. Часть 1. Требования безопасности. -М.: Стандартинформ, 2012. - 50 с. 99. ГОСТ Р 54447–2011 Нагреватели газовые для лучистого верхнего отопления, не применяемые в быту. Часть 2. Рациональное использование энергии. - М.: Стандартинформ, 2012. - 38 с.

100. ГОСТ Р 54448–2011 Нагреватели трубчатые радиационные газовые с одной горелкой, не предназначенные для бытового применения. Часть 1. Требования безопасности. - М.: Стандартинформ, 2012. - 82 с.

101. ГОСТ Р 54449–2011 Нагреватели трубчатые радиационные газовые с одной горелкой, не предназначенные для бытового применения. Часть 2. Рациональное использование энергии. - М.: Стандартинформ, 2012. - 40 с.

102. Куриленко, Н. И., Давлятчин, Р. Р. Лучисто-конвективный теплообмен газовых инфракрасных излучателей с многослойной конструкцией кровли / Н. И. Куриленко, Р. Р. Давлятчин // Приволжский научный журнал. - 2009. - № 3. - С. 74-78.

103. Куриленко, Н. И., Давлятчин, Р. Р. Теплообмен газовых инфракрасных излучателей с многослойной конструкцией кровли / Н. И. Куриленко, Р. Р. Давлятчин // Вестник Томского государственного архитектурностроительного университета. - 2009. - № 4. - С. 132-141.

104. Зиганшин, Б. М. Исследование процесса обогрева помещения при помощи газоиспользующих излучающих труб / Б. М. Зиганшин // Сборник научных трудов докторантов и аспирантов. - 2004. - С. 244-248.

Б. 105. Зиганшин, M. Численные И экспериментальные исследования теплоотдачи радиационных труб объеме параметров В замкнутом / Б. М. Зиганшин // Проблемы энергетики. - 2006. - С. 99-102.

106. Зиганшин, Б. М. Эффективность обогрева теплоэнергетических объектов радиационными трубами / Б. М. Зиганшин // Материалы докладов. - 2006. - С. 307-311.

107. Каменев, П. Н. Отопление и вентиляция. Часть II. Вентиляция / П. Н. Каменев. - М.: Стройиздат., 1966.-480 с.

108. Патент 2084762 Российская Федерация, (51) МПК F23D 14/12 (1995.01). Горелка инфракрасного излучения / Жебрак Ю. А., Сорокин В. И.,

Стопневич А. В., Вязков В. А.; заявители и патентообладатели Жебрак Ю. А., Сорокин В. И., Стопневич А. В., Вязков В. А. - № 94 94024408, 29.06.1994.

109. Патент 2172453 Российская Федерация, (51) МПК F26B 3/30 (2000/01), F24J 2/18 (2000/01). Излучатель тепловой энергии / Зяблов В. А., Атаров М. Н., Капралов О. В.; заявитель и патентообладатель ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королева». - № 99125050/06, 29.11.1999; опубл. 20.08.2001, Бюл. № 23.

110. Листов, А. М. Метод расчёта теплового режима вентилируемых помещений при лучистом отоплении / А. М. Листов // Индустриальные конструкции для электрификации железных дорог. – 1952. - С. 26-31.

111. 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.

112. Ковалев, А. Е. Расчет мощности инфракрасных облучательных установок /
А. Е. Ковалев // Водоснабжение и санитарная техника. - 1983. - № 2. - С. 27-28.

113. СТО НП «АВОК» 4.1.5 — 2006 Системы отопления и обогрева с газовыми инфракрасными излучателями. - М.: НП «АВОК», 2006. - 10 с.

114. Pollman, F. Heizen mit Infrared / F. Pollman // Maschinenmarkt. -1969. - № 55.
- P. 1261-1262.

115. Шилькрот, Е. О. Методика расчета газового инфракрасного отопления промышленных зданий и открытых площадок / Е. О. Шилькрот. – М.: Научноисследовательский институт санитарной техники, 1968.-15 с.

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

117. 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.

118. СТО Газпром 2-1.9-440-2010 Методика расчета систем лучистого отопления. - М.: ОАО «Газпром», 2010. - 58 с.

119. Казарян, Ю. А., Довтян, С. М., Амксанян, К. А., Багдасарян, Л. А. Об оптимизации газовыми горелками инфракрасного излучения при нагреве плоских поверхностей / Ю. А. Казарян, С. М. Довтян, К. А. Амксанян, Л. А. Багдасарян // Газовая промышленность. - 1970. - № 3. - С. 49-50.

120. Ландау, Л. Д. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. - М.: Гостехтеоретиздат, 1953.-788 с.

121. Stuart, J. T. // J. Fluid Mech. - 1966. - vol. 24. - P. 673-687.

122. Phillips, O. M. The irrotational motion outside a free turbulent boundary /O. M. Phillips // Proc. Cambridge Philos. Soc. - 1955. - vol. 51. - P. 220-229.

123. СП 61.13330.2012. Свод правил. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Актуализированная редакция СНиП 41-03-2003. - М.: Минрегион России, 2011. - 56 с.

124. Сайт компании ISOTEC. — Режим доступа: http://calculator.isotecti.ru.

125. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). – СПб: Изд. НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.

126. Куриленко, Н. И., Максимов, В. И., Мамонтов, Г. Я., Нагорнова, Т. А. Математическое моделирование сопряженного теплопереноса в системе с радиационным источником нагрева / Н. И. Куриленко, В. И. Максимов, Г. Я. Мамонтов, Т. А. Нагорнова // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2012. - № 2–2 (147). - С. 48-53.

127. Сайт компании ANSYS. — Режим доступа: http://www.ansys.com.

128. Launder B.E., Spalding D.B. The Numerical Computation of Turbulent Flows // Comp. Meth. Appl. Mech. Eng. – 1974. – Vol. 3. – P. 269-289.

129. Кузнецов, Г. В., Куриленко, Н. И., Максимов, В. И., Мамонтов, Г. Я., Нагорнова, Т. А. Свободно-конвективный теплоперенос в отапливаемых с использованием газовых инфракрасных излучателей производственных помещениях / Г. В. Кузнецов, Н. И. Куриленко, В. И. Максимов, Г. Я. Мамонтов, Т. А. Нагорнова // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. - 2013. –№ 1–2. - С. 18-25.

130. Кузнецов, Г. В., Куриленко, Н. И., Максимов, В. И., Мамонтов, Г. Я., Нагорнова, Т. А. Сопряженный теплоперенос при работе газовых инфракрасных излучателей, смещенных относительно верхней границы обогреваемой области / Г. В. Кузнецов, Н. И. Куриленко, В. И. Максимов, Г. Я. Мамонтов, Т. А. Нагорнова // Энергосбережение и водоподготовка. - 2015. - № 2 (94). - С. 46-51.

131. Кузнецов, Г. В., Куриленко, Н. И., Максимов, В. И., Мамонтов, Г. Я., Нагорнова, Т. А. Анализ свободноконвективных режимов теплопереноса в замкнутой области при работе инфракрасных излучателей / Г. В. Кузнецов, Н. И. Куриленко, В. И. Максимов, Г. Я. Мамонтов, Т. А. Нагорнова // Известия Российской академии наук. Энергетика. - 2014. - № 5 (94). - С. 37-44.

132. Максимов, В. И., Нагорнова, Т. А., Куриленко, Н. И., Мамонтов, Г. Я. Численное исследование сопряженной естественной конвекции в замкнутой области в условиях радиационного нагрева одной из границ / В. И. Максимов, Т. А. Нагорнова, Н. И. Куриленко, Г. Я. Мамонтов // Известия Томского политехнического университета. - 2013. - Т. 323. - № 4. - С. 66-71.

133. Решмин, А. И., Сударикова, А. Д., Тепловодский, С. Х., Трифонов, В. В. Развитие турбулентности в конических диффузорах / А. И. Решмин, А. Д. Сударикова, С. Х. Тепловодский, В. В. Трифонов // Ломоносовские чтения 2016. Тезисы докладов. - 2016.

134. Westbrook, C. K., Dryer F. L. Simplified reaction mechanisms for the oxidation of hydrocarbon fuels in flames / C. K. Westbrook, F. L. Dryer // Combust. Sci. Technol.
- 1981. - vol. 27. - № 1-2. - P. 31-43.

135. Шумихин, А. А., Карпов, А. И. Численное моделирование турбулентного диффузионного пламени на основе метода крупных вихрей / А. А. Шумихин, А. И. Карпов // Вычислительная механика сплошных сред. - 2012. - Т. 5 - № 2. - С. 199-207.

136. FLUENT 6.2 User's Guide. - Fluent Inc,. Centerra Resource Park, 10 Cavendish Court, Lebanon, NH 03766, 2005. – 250 p.

137. СП 131.13330.2012 Свод правил. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99. - М.: Минрегион России, 2015. – 124 с.

138. СП 50.13330.2012 Свод правил. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. - М.: Минрегион России, 2012. -99 с.

139. Копин, С. В. Особенности организации воздухообмена в теплонапряженных производственных помещениях / С. В. Копин // Молодой ученый. - 2014. - № 6. — С. 173-175.

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

141. СанПиН 2.2.4.548-96. 2.2.4 Физические факторы производственной среды. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Санитарные правила и нормы. – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997. – 19 с.

142. ГОСТ 12.1.005-88 Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 80 с.

143. Куриленко, Н. И., Давлятчин, Р. Р., Ермолаев, А. Н. Автоматизация систем газового инфракрасного обогрева / Н. И. Куриленко, Р. Р. Давлятчин, А. Н. Ермолаев // Сборник материалов международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы строительства, архитектуры, экологии и энергосбережения в условиях Западной Сибири». - 2015. - С. 161-167.

144. Куриленко, Н. И., Давлятчин, Р. Р., Ермолаев, А. Н. Особенности регулирования систем газового инфракрасного обогрева / Н. И. Куриленко, Р. Р. Давлятчин, А. Н. Ермолаев // Инженерный вестник Дона. - 2015. - № 2. – Режим доступа: http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3042.

145. СП 56.13330.2011 Свод правил. Производственные здания. Актуализированная редакция СНиП 31-03-2001. - М.: Минрегион России, 2011. -13 с.

РΦ 146. Постановление Главного государственного санитарного врача от 26.05.2003 N 100 «О введении в действие Санитарно-эпидемиологических правил СП 2.2.2.1327-03» (вместе с «СП 2.2.2.1327-03. 2.2.2. Гигиена труда. Технологические процессы, материалы и оборудование, рабочий инструмент. Гигиенические требования к организации технологических процессов, оборудованию рабочему производственному И инструменту. Санитарноэпидемиологические правила», утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 23.05.2003). - М.: Российская газета, 2003. - № 119/1. - 26 с.

147. СТО Газпром РД 1.2-137-2005 Рекомендации по проектированию систем газового лучистого отопления и газового воздушного отопления производственных и общественных зданий. - М.: ОАО «Газпром», 2005. - 26 с.

148. Руководство по эксплуатации 2100 РЭ / АО Сибшванк. - 2014. - 24 с.

149. Руководство по эксплуатации ГИИ-30.000 РЭ / АО Сибшванк. - 2014. – 23 с.

150. Руководство по эксплуатации ГИИ-ТМ 15.000 РЭ / АО Сибшванк. - 2014. - 23 с.

151. Сайт компании АО «Сибшванк». - Режим доступа: http://www.schwank.ru/ru/glavnaja.html.

152. Малявина, Е. Г. Теплопотери здания: справочное пособие / Е. Г. Малявина.
− М.: ABOK-ПРЕСС, 2007. – 144 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

МАТЕРИАЛЫ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ



«Мостоо	риальная фирма тряд-36»	9		
Открыто «Мостос	го акционерног грой-11»	о общест	ва	
625014, Ялуторов ИНН 861 тел.: 8(3 факс: 8(e-mail: <u>m</u> www.ms	тюменская обла вский тракт 11 г 7001665 КПП 72 452)540-888, 54 3452)540899 1036@ms11.ru 11.ru	асть, г. Т км 20202001 Ю-889	юмень	
(3.03.2015	N	01	

АКТ

О внедрении результатов научно-исследовательской работы аспиранта кафедры «ТГВ» ФГБОУ ВПО «ТюмГАСУ»

<u>Тема:</u> Оптимизация работы инфракрасного обогрева производственного цеха по изготовлению металлоконструкций «Механический» Территориальной фирмы «Мостоотряд-36».

<u>Цель работы</u>: Снижение энергозатрат на обеспечение теплового режима производственного цеха по изготовлению металлоконструкций «Механический» ТФ «Мостоотряд-36».

<u>Настоящий акт составил</u>: Ботнарь Игорь Аркадьевич, главный энергетик ТФ «Мостоотряд-36». <u>Настоящий акт исполнил</u>: Ермолаев Антон Николаевич, аспирант кафедры «ТГВ» ФГБОУ ВПО «ТюмГАСУ».

Эффективность внедрения научно-исследовательской работы:

 Снижение ежемесячных издержек на создание и поддержание оптимального теплового режима в указанном производственном цеху на 20-30%;

2. Уменьшение частоты включений отопительного оборудования – «светлых» газовых инфракрасных излучателей в отопительный период примерно на 40%. Отсюда, на 40% меньше потерь на простой и запуск, на 40% меньше на разогревание и охлаждение, на 40% меньше изнашиваемость материала дает 40% увеличения предполагаемого срока службы оборудования;

3. Повышение теплового комфорта, что благоприятно сказывается на самочувствии работников;

4. Создание равномерного теплового ощущения благодаря предотвращению температурных пиков;

5. Снижение эксплуатационных затрат путем уменьшения количества отопительного оборудования – «светлых» газовых инфракрасных излучателей «ГИИ-20» с 40 до 30 шт. Количество ГИИ-20 определено по результатам выполненного расчета.

6. Снижение потребности в обслуживающем персонале.

Стоит отметить, что высвободившиеся ресурсы направлены на инвестиции в новое производство, капитальное строительство.

Директор

В.И. Назарько

Schwank Group AO «СИБШВАНК»



ИНН 7202067917, КПП 720301001. Почтовый адрес: 625031, г. Тюмень, ул. Ветеранов Труда, 60, стр.3. тел./факс (3452) 38-88-65,38-88-66, 38-88-67, e-mail: sibschwank@sibschwank.ru, www.schwank.ru

от «03» февраля 2017 г.

АКТ

О внедрении результатов диссертационной работы Ермолаева Антона Николаевича «Повышение эффективности работы систем газового инфракрасного обогрева производственных зданий»

Настоящий акт составлен о том, что результаты научно-исследовательской работы Ермолаева Антона Николаевича «Повышение эффективности работы систем газового инфракрасного обогрева производственных зданий», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, используются в настоящее время в АО «Сибшванк» при конструировании модельного ряда высокотемпературных газовых горелок инфракрасного излучения (ГГИИ) и проектировании систем газового лучистого отопления (ГЛО).

Использование результатов позволило:

1. С применением предложенной методики проектирования высокотемпературных ГГИИ разработать проекты систем ГЛО производственного здания ООО «Сибпласт», г. Новосибирск; здания производственного цеха ООО «БИРС Арматуры», г. Чебоксары; производственного помещения территориальной фирмы «Мостоотряд-36», г. Тюмень.

В каждом индивидуальном случае данная методика позволила подобрать оптимальную модель примененного оборудования; определить рациональные решения по размещению излучателей в помещении; определить оптимальную тепловую мощность системы ГЛО и оценить её эффективность; выполнить ряд проверочных расчетов на удовлетворение полученной суммарной тепловой нагрузки санитарно – гигиеническим требованиям в отношении плотности теплового потока и удовлетворения требований в отношении температуры воздуха и окружающих предметов.

Экономическая оценка показала, что метод проектирования систем ГЛО позволяет снизить капитальные и эксплуатационные затраты на поддержание теплового режима B производственном помещении как следствие. И. увеличить энергосберегающий эффект OT применения высокотемпературных ГГИИ. Экономический эффект, на примере территориальной фирмы «Мостоотряд-36», составил 1 499,726 тыс. руб.

2. Оптимизировать процесс конструирования излучателей. Произвести инженерные расчеты и оценить эффективность конструкторских решений,

Schwank Group: Австрия • Бенилюкс • Франция • Великобритания • Канада • Польша • Румыния • Россия • Чехия • США •Китай Дистрибьюторы более чем в 40 странах мира

Schwank Group AO «СИБШВАНК»



ИНН 7202067917, КПП 720301001. Почтовый адрес: 625031, г. Тюмень, ул. Ветеранов Труда, 60, стр.3. тел./факс (3452) 38-88-65,38-88-66, 38-88-67, e-mail: sibschwank@sibschwank.ru, www.schwank.ru

применяемых при производстве газовых инфракрасных излучателей всех выпускаемых АО «Сибшванк» тепловых мощностей: 5, 10, 15, 20, 30, 40 кВт.

В настоящее время компания ежегодно инвестирует средства в размере около 350 тыс. рублей в выполнение научно-исследовательских работ, направленных на оптимизацию газовых инфракрасных излучателей. Применение разработанных имитационных моделей (виртуальных прототипов) излучателей, экспериментального стенда и производственного помещения позволит компании уйти от создания физических прототипов, необходимых для проверки эффективности и работоспособности тех или иных технических решений на стадии конструирования и, как следствие, максимально сократить затраты компании на выполнение научноисследовательских работ по данному направлению.

3. Предложенная в работе изолированная модель высокотемпературного газового инфракрасного излучателя внедрена в экспериментальное производство. Произведена теплоизоляция корпуса 14 из 16-ти излучателей (2 демонтированы), установленных для отопления собственного производственного помещения, что позволило на 96,481 тыс.руб. сократить ежегодные затраты на систему ГЛО. Усовершенствованная модель излучателя представлена на базе компании в качестве опытного образца. При появлении спроса на данные модели излучателя будет запущено их серийное производство.

Таким образом, использование результатов, представленных в научноисследовательской работе Антона Николаевича Ермолаева, позволило АО «Сибшванк» оптимизировать время выполнения проектных работ; повысить точность конструкторских и проектных расчетов; сократить эксплуатационные затраты и затраты на НИОКР.

Генеральный директор

О.В. Хмелёв

ПРИЛОЖЕНИЕ Б ПАТЕНТ НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ



Автор(ы): Куриленко Николай Ильич (RU), Михайлова Лариса Юрьевна (RU), Ермолаев Антон Николаевич (RU), Калашников Владимир Александрович (RU)

ПРИЛОЖЕНИЕ В

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ





Рис. В1 Распределение плотности теплового потока в рабочей зоне (q, Вт/м²) при однорядном (пунктирная линия) и многорядном (сплошная линия) размещениях



установки 1-го и 2-го ГИИ; S – шаг расстановки ГИИ, м.





ГИИ мощностью 10 кВт на высоте: - 6 м, - 7 м, - 8 м.



165

Рис. ВЗ Распределение плотности теплового потока в рабочей зоне (q, Bт/м²) при однорядном (пунктирная линия) и многорядном (сплошная линия) размещениях

ГИИ мощностью 15 кВт на высоте: **—** – 7 м, **—** – 8 м, **—** – 9 м.



Рис. В4 Распределение плотности теплового потока в рабочей зоне (q, Bт/м²) при однорядном (пунктирная линия) и многорядном (сплошная линия) размещениях ГИИ мощностью 20 кВт на высоте: — – 8 м, — – 9 м, — – 10 м.



166

Рис. В5 Распределение плотности теплового потока в рабочей зоне (q, Bт/м²) при однорядном (пунктирная линия) и многорядном (сплошная линия) размещениях

ГИИ мощностью 30 кВт на высоте: **—** –8 м, **—** – 9 м, **—** – 10 м.



Рис. В6 Распределение плотности теплового потока в рабочей зоне (q, Bт/м²) при однорядном (пунктирная линия) и многорядном (сплошная линия) размещениях

ГИИ мощностью 40 кВт на высоте: — – 8 м, — – 9 м, — – 10 м.

2. Количественные и качественные данные о распределении температуры газового объема в производственном помещении.



гис. Б/ температурные поля в оовеме и на поверхностях производственного помещения
 (°С) при размещении 44 штук типовой модели ГГИИ мощностью 5 кВт на высоте 4 м.

Рис. В8 Температурные поля в объеме и на поверхностях производственного помещения (°С) при размещении 44 штук изолированной модели ГГИИ мощностью 5 кВт на высоте 4 м.

Рис. В9 Температурные поля в объеме и на поверхностях производственного помещения (°С) при размещении 44 штук усовершенствованной модели ГГИИ мощностью 5 кВт на высоте 4 м.

Характеристики по результатам расчета						
Типовая модель		Изолированная модель		Усовершенствованная модель		
Средняя температура поверхности пола, °С	22,5	Средняя температура поверхности пола, °С	24,7	Средняя температура поверхности пола, °С	22,4	
Средняя температура в рабочей зоне, °С	18,1	Средняя температура в рабочей зоне, °С	19,6	Средняя температура в рабочей зоне, °С	17,9	
Средняя температура в верхней зоне, °С	54,2	Средняя температура в верхней зоне, °С	42,2	Средняя температура в верхней зоне, °С	34,9	
Тепловые потери, %	43	Тепловые потери, %	33	Тепловые потери, %	24	





Рис. В10 Температурные поля в объеме и на поверхностях производственного помещения (°С) при размещении 24 штук типовой модели ГГИИ мощностью 10 кВт на высоте 6 м.

Рис. В11 Температурные поля в объеме и на поверхностях производственного помещения (°С) при размещении 24 штук изолированной модели ГГИИ мощностью 10 кВт на высоте 6 м.

Рис. В12 Температурные поля в объеме и на поверхностях производственного помещения (°С) при размещении 24 штук усовершенствованной модели ГГИИ мощностью 10 кВт на высоте 6 м.

168

Характеристики по результатам расчета						
Типовая модель		Изолированная модель		Усовершенствованная модель		
Средняя температура поверхности пола, °С	23,3	Средняя температура поверхности пола, °С	25,6	Средняя температура поверхности пола, °С	23,5	
Средняя температура в рабочей зоне, °С	19,1	Средняя температура в рабочей зоне, °С	20,8	Средняя температура в рабочей зоне, °С	18,9	
Средняя температура в верхней зоне, °С	59,6	Средняя температура в верхней зоне, °С	47,3	Средняя температура в верхней зоне, °С	40,0	
Тепловые потери, %	43	Тепловые потери, %	33	Тепловые потери, %	24	





Рис. В13 Температурные поля в объеме и на поверхностях производственного помещения (°С) при размещении 14 штук типовой модели ГГИИ мощностью 15 кВт на высоте 7 м.

Рис. В14 Температурные поля в объеме и на поверхностях производственного помещения (°С) при размещении 14 штук изолированной модели ГГИИ мощностью 15 кВт на высоте 7 м.

Рис. В15 Температурные поля в объеме и на поверхностях производственного помещения (°С) при размещении 14 штук усовершенствованной модели ГГИИ мощностью 15 кВт на высоте 7 м.

Характеристики по результатам расчета					
Типовая модель		Изолированная модель		Усовершенствованная модель	
Средняя температура поверхности пола, °С	21,8	Средняя температура поверхности пола, °С	23,7	Средняя температура поверхности пола, °С	21,6
Средняя температура в рабочей зоне, °С	17,9	Средняя температура в рабочей зоне, °С	19,4	Средняя температура в рабочей зоне, °С	17,6
Средняя температура в верхней зоне, °С	63,2	Средняя температура в верхней зоне, °С	54,7	Средняя температура в верхней зоне, °С	46,8
Тепловые потери, %	42	Тепловые потери, %	33	Тепловые потери, %	25



Рис. В16 Температурные поля в объеме и на поверхностях производственного помещения (°С) при размещении 12 штук типовой модели ГГИИ мощностью 20 кВт на высоте 8 м.

- Рис. В17 Температурные поля в объеме и на поверхностях производственного помещения (°С) при размещении 12 штук изолированной модели ГГИИ мощностью 20 кВт на высоте 8 м.
- Рис. В18 Температурные поля в объеме и на поверхностях производственного помещения (°С) при размещении 12 штук усовершенствованной модели ГГИИ мощностью 20 кВт на высоте 8 м.

Характеристики по результатам расчета						
Типовая модель		Изолированная модель		Усовершенствованная модель		
Средняя температура поверхности пола, °С	23,7	Средняя температура поверхности пола, °С	25,1	Средняя температура поверхности пола, °С	22,9	
Средняя температура в рабочей зоне, °С	18,5	Средняя температура в рабочей зоне, °С	19,8	Средняя температура в рабочей зоне, °С	18,2	
Средняя температура в верхней зоне, °С	67,8	Средняя температура в верхней зоне, °С	57,2	Средняя температура в верхней зоне, °С	51,0	
Тепловые потери, %	42	Тепловые потери, %	33	Тепловые потери, %	25	



171

- Рис. В20 Температурные поля в объеме и на поверхностях производственного помещения (°С) при размещении 8 штук изолированной модели ГГИИ мощностью 30 кВт на высоте 9 м.
- Рис. В19 Температурные поля в объеме и на поверхностях производственного помещения (°С) при размещении 8 штук типовой модели ГГИИ мощностью 30 кВт на высоте 9 м.
- Характеристики по результатам расчета Типовая модель Изолированная модель Усовершенствованная модель Средняя температура Средняя температура Средняя температура 23,1 24,7 23,5 поверхности пола, °С поверхности пола, °С поверхности пола, °С Средняя температура Средняя температура Средняя температура 18,3 19,7 18,4 в рабочей зоне, °С в рабочей зоне, °С в рабочей зоне, °С Средняя температура Средняя температура Средняя температура 74,3 61,3 54,7 в верхней зоне, °С в верхней зоне, °С в верхней зоне, °С Тепловые потери, % 41 Тепловые потери, % 33 Тепловые потери, % 26

Рис. В21 Температурные поля в объеме и на

поверхностях производственного

помещения (°С) при размещении 8 штук

усовершенствованной модели ГГИИ

мощностью 30 кВт на высоте 9 м.



172

Рис. В23 Температурные поля в объеме и Рис. В24 Температурные поля в объеме и на на поверхностях производственного помещения (°С) при размещении 5 штук изолированной модели ГГИИ мощностью 40 кВт на высоте 10 м.

Рис. В22 Температурные поля в объеме и на поверхностях производственного помещения (°С) при размещении 5 штук типовой модели ГГИИ мощностью 40 кВт на высоте 10 м.

Характеристики по результатам расчета					
Типовая модель		Изолированная модель		Усовершенствованная модель	
Средняя температура поверхности пола, °С	20,5	Средняя температура поверхности пола, °С	21,8	Средняя температура поверхности пола, °С	20,1
Средняя температура в рабочей зоне, °С	16,2	Средняя температура в рабочей зоне, °С	17,4	Средняя температура в рабочей зоне, °С	16,0
Средняя температура в верхней зоне, °С	81,4	Средняя температура в верхней зоне, °С	68,1	Средняя температура в верхней зоне, °С	59,1
Тепловые потери, %	40	Тепловые потери, %	33	Тепловые потери, %	26

поверхностях производственного

помещения (°С) при размещении 5 штук

усовершенствованной модели ГГИИ

мощностью 40 кВт на высоте 10 м.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Стендовые испытания типовой модели ГИИ тепловой мощностью 15 кВт.



Рис. Г1 Схема стендовых испытаний 15 кВт излучателя типовой модели



Рис. Г2 Изменение температур во времени в точках установки датчиков 1-10 при работе 15 кВт ГИИ типовой модели



Рис. ГЗ Распределение температур по высоте над 15 кВт ГИИ типовой модели



Рис. Г4 Изменение температур во времени в точках установки датчиков I-IX при работе 15 кВт ГИИ типовой модели



Рис. Г5 Распределение температур по горизонтали над 15 кВт ГИИ типовой

модели

2. Стендовые испытания типовой модели ГИИ тепловой мощностью 20 кВт.



Рис. Г6 Схема стендовых испытаний 20 кВт излучателя типовой модели



Рис. Г7 Изменение температур во времени в точках установки датчиков 1-10 при работе 20 кВт ГИИ типовой модели



Рис. Г8 Распределение температур по высоте над 20 кВт ГИИ типовой модели



177

Рис. Г9 Изменение температур во времени в точках установки датчиков I-IX при работе 20 кВт ГИИ типовой модели



Рис. Г10 Распределение температур по горизонтали над 20 кВт ГИИ типовой

модели



3. Стендовые испытания типовой модели ГИИ тепловой мощностью 30 кВт.

Рис. Г11 Схема стендовых испытаний 30 кВт излучателя типовой модели



Рис. Г12 Изменение температур во времени в точках установки датчиков 1-10 при работе 30 кВт ГИИ типовой модели



Рис. Г13 Распределение температур по высоте над 30 кВт ГИИ типовой модели



Рис. Г14 Изменение температур во времени в точках установки датчиков I-IX при работе 30 кВт ГИИ типовой модели



Рис. Г15 Распределение температур по горизонтали над 30 кВт ГИИ типовой

модели

Газовый инфракрасный излучатель 10 40 кВт q 1675 a, MM 200 MM 1514 а1, мм 8 200 b, мм 562 7 h, мм 377 200 MM Лучистый КПД, % 57 6 Полированная 200 MM Материал рефлектора 5 нержавеющая сталн 200 MM 4 200 MM 3 200 MM 2 III 200 MM 150 MM 50 MM 225 1 11 1 12

4. Стендовые испытания типовой модели ГИИ тепловой мощностью 40 кВт.

Рис. Г16 Схема стендовых испытаний 40 кВт излучателя типовой модели


Рис. Г17 Изменение температур во времени в точках установки датчиков 1-10 при работе 40 кВт ГИИ типовой модели



Рис. Г18 Распределение температур по высоте над 40 кВт ГИИ типовой модели



Рис. Г19 Изменение температур во времени в точках установки датчиков I-IX при работе 40 кВт ГИИ типовой модели



Рис. Г20 Распределение температур по горизонтали над 40 кВт ГИИ типовой

модели

5. Результаты исследования параметров микроклимата в производственном цеху ТФ «Мостоотряд-36».

N₂	Параметры микроклимата	Количество измерений							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	Температура внутреннего воздуха, °С	18	17,7	17,9	18,1	18,6	18,6	19,1	17,9
2	Результирующая температура, °С	20,3	20,1	19,1	18,5	19,1	19,6	19,5	19,6
3	Температура на внутренних поверхностях ограждающей конструкции, °С	11,8	14,6	17,7	11,1	9,4	15,5	4,9	14,7
4	Относительная влажность, %	13,8	13,8	13,5	19,5	13,4	15,2	20,5	17,8
5	Подвижность воздуха в помещении, м/с	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Таблица Г1. Результаты исследования параметров микроклимата в производственном цеху № 1 при работе 25 шт. ГИИ-20



6. Результаты исследований в производственном помещении ООО «Оптима».

Рис. Г22 Схема исследований на базе производственного помещения ООО «Оптима»



Рис. Г23 Распределение температур поверхности пола в стационарном режиме при поперечном расположении датчиков



Рис. Г24 Распределение температур поверхности пола в стационарном режиме при продольном расположении датчиков



Рис. Г25 Распределение температур поверхности стены в стационарном режиме при вертикальном расположении датчиков



Рис. Г26 Фотосъемка поверхности пола в центре под ГИИ-30



Рис. Г27 Температурное поле поверхности пола в центре под ГИИ-30



Рис. Г28 Фотосъемка поверхности потолка в центре над ГИИ-30



Рис. Г29 Температурное поле поверхности потолка в центре над ГИИ-30

7. Результаты исследований в производственных помещениях



Рис. Г30 Производственные помещения АО «Сибшванк»



Рис. Г31 Схема исследований температуры поверхности пола при работе одного ГИИ-ТМ-20U Рис. Г32 Схема исследований температуры поверхности пола при работе двух ГИИ-ТМ-20U



Рис. ГЗЗ Распределение температур поверхности пола в стационарном режиме при работе одного ГИИ-ТМ-20U



Рис. Г34 Распределение температур поверхности пола в стационарном режиме при работе двух ГИИ-ТМ-20U



Рис. Г35 Схема исследования параметров микроклимата в центре под ГИИ-ТМ-20U

Таблица Г2.	. Результаты	измерений	параметров	микроклимата	1 под I	ГИИ-Т	ГМ-20)U
	2	1	1 1	1				

№	Параметры микроклимата	Значение в точке измерения					
		1	2	3	4	5	6
1	Температура воздуха, °С		24,1	24,0	25	26	26
2	Интенсивность теплового потока, Вт/м ²	73	84	92	116	124	133
3	Результирующая температура, °С	26,8	27	27,6	28,4	29,8	30,5
4	Подвижность воздуха в помещении, м/с	0	0	0	0	0	0



Рис. ГЗ6 Схема исследования параметров микроклимата вблизи ГИИ-10

Таблица Г3. Результаты изм	мерений параметров	микроклимата под ГИИ-10
----------------------------	--------------------	-------------------------

N⁰	Параметры микроклимата	Значение в точке измерения				
		1	2	3		
1	Температура воздуха, °С	23,3	23,4	23,5		
2	Интенсивность теплового потока, Bт/м ²	123	95	61		
3	Результирующая температура, °С	28,9	27,6	26,9		
4	Подвижность воздуха в помещении, м/с	0	0	0		