

На правах рукописи



СОЛНЫШКОВА Юлия Сергеевна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ РАДИАЦИОННОГО  
ОТОПЛЕНИЯ ЗДАНИЙ С ЦЕЛЬЮ СБЕРЕЖЕНИЯ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ**

Специальность 05.14.04. – Промышленная теплоэнергетика

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иваново 2012

Работа выполнена на кафедре «Теоретические основы теплотехники» ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ)

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
Бухмиров Вячеслав Викторович

**Официальные оппоненты:** Созинов Владимир Петрович  
доктор технических наук, профессор  
Ивановский государственный энергетический университет, заведующий кафедрой  
«Промышленная теплоэнергетика»

Колибаба Ольга Борисовна  
кандидат технических наук, доцент  
Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, доцент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция»

**Ведущая организация:** ООО НТЦ «Промышленная энергетика»  
г. Иваново

Защита состоится «30» марта 2012 года в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 в ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, аудитория Б-237.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, ученый совет ИГЭУ.  
Тел. (4932) 38-57-12, факс (4932) 38-57-01. E-mail: uch\_sovet@ispu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Автореферат разослан «\_\_\_» февраля 2012 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук,  
профессор



А.В. Мошкарин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В настоящее время после принятия Государственной думой РФ Федерального закона «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» проблемы экономии энергетических ресурсов стали особенно актуальными. В Российской Федерации на отопление зданий как общественных, так и производственных расходуется значительная часть вырабатываемой тепловой энергии. Одним из способов экономии энергетических ресурсов и повышения энергетической эффективности систем отопления помещений общественных и производственных зданий является использование систем радиационного (или лучистого) отопления. Системы лучистого отопления имеют ряд преимуществ перед традиционными системами отопления (воздушными, водяными (паровыми)): возможность обогрева как всего помещения в целом, так и непосредственно рабочих зон; отсутствие массивных воздухопроводов и трубопроводов и затрат на транспорт теплоносителя; отсутствие циркуляции пыли и загрязняющих веществ в обогреваемом помещении; возможность снижения температуры воздуха в обогреваемом помещении на  $\sim 2-3^{\circ}\text{C}$  в связи с особенностью процессов теплообмена при использовании систем радиационного отопления. По экспертным оценкам при правильной организации отопления помещения при помощи инфракрасных излучателей (ИКИ) экономический эффект от внедрения подобных систем может в несколько раз превышать затраты на их приобретение и монтаж. Однако, для определения потенциала энергосбережения при отоплении помещения ИКИ и поиска наилучшего способа реализации его на практике, необходимо уже на стадии проектирования определить суммарную и единичную мощности излучателей, их тип и расположение в помещении. Поэтому в настоящее время актуальной является проблема совершенствования систем радиационного отопления помещений общественных и производственных зданий с целью экономии топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) и повышения их энергетической эффективности.

**Объект исследования.** Системы радиационного отопления помещений общественных и производственных зданий.

**Предмет исследования.** Процессы сложного теплообмена при отоплении помещений инфракрасными обогревателями.

**Цель работы.** Целью диссертационной работы является совершенствование действующих и проектируемых систем лучистого отопления на основе методов математического моделирования радиационного и сложного теплообмена.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Выполнить анализ существующих методов расчета систем отопления с инфракрасными излучателями.
2. Разработать математическую модель радиационного и сложного теплообмена при обогреве помещения системами инфракрасного отопления, позволяющую рассчитывать температуру в рабочей (обслуживаемой) зоне и тепловые потоки в зависимости от количества, мощности и расположения нагревателей.
3. Разработать методику выбора численного метода решения задач лучистого теплообмена в зависимости от заданных граничных условий.
4. Выполнить экспериментальное исследование процессов теплообмена при отоплении помещений радиационными обогревателями и проверить адекватность математической модели систем лучистого отопления.
5. Сделать вывод об экономической эффективности применения систем с ИКИ при соблюдении требуемых параметров микроклимата воздуха общественных и производ-

ственных помещений и санитарно-гигиенических требований к воздуху рабочей (обслуживаемой) зоны.

6. Разработать рекомендации по совершенствованию систем радиационного отопления.

**Методы исследования.** В диссертации использованы расчетные и экспериментальные методы исследования. Расчетные методы исследования основаны на решении интегральных уравнений переноса лучистой энергии методами математического моделирования. Экспериментальное исследование систем лучистого отопления выполнено в помещениях общественного и производственного зданий.

**Достоверность** результатов и выводов, представленных в диссертационной работе, подтверждается соответствием фундаментальным законам радиационно-конвективного теплообмена и адекватностью математической модели, подтвержденной удовлетворительным совпадением результатов расчета и эксперимента.

**Обоснование соответствия диссертации паспорту научной специальности 05.14.04 – «Промышленная теплоэнергетика».**

*Соответствие диссертации формуле специальности*

В соответствии с формулой специальности 05.14.04 – «Промышленная теплоэнергетика», «объединяющей исследования, по совершенствованию промышленных теплоэнергетических систем... поиску структур и принципов действия теплотехнического оборудования, которое обеспечивает сбережение энергетических ресурсов», в диссертационной работе рассмотрены вопросы снижения потребления ТЭР при обеспечении требуемых параметров микроклимата в рабочих (обслуживаемых) зонах помещений производственного и общественного назначения с системами лучистого отопления.

*Соответствие диссертации области исследования специальности*

Отраженные в диссертационной работе основные научные положения соответствуют пункту 1 «Разработка научных основ сбережения энергетических ресурсов в промышленных теплоэнергетических устройствах и использующих тепло системах и установках» и пункту 3 «Теоретические и экспериментальные исследования процессов тепло- и массопереноса в тепловых системах и установках, использующих тепло. Совершенствование методов расчета...установок с целью улучшения их технико-экономических характеристик, экономии энергетических ресурсов» области исследования специальности 05.14.04 – «Промышленная теплоэнергетика».

В диссертации разработана математическая модель систем лучистого отопления производственных и общественных зданий, позволяющая рассчитывать температуры и тепловые потоки в помещениях при различном расположении излучателей и их геометрии. Выполнены теоретические и экспериментальные исследования систем лучистого отопления с инфракрасными излучателями в помещениях производственных и общественных зданий.

**Научная новизна:**

1. В диссертации разработан принципиально новый подход к расчету систем лучистого отопления, основанный на зональных методах расчета радиационного и сложного теплообмена, которые учитывают переотражения лучистых тепловых потоков в рассматриваемой системе тел.

2. В диссертационной работе на основе зонального метода расчета сложного теплообмена разработана математическая модель систем отопления с газовыми и электрическими инфракрасными излучателями, позволяющая определять значения температур и тепловых потоков в помещениях с учетом ослабляющей газовой среды.

3. Впервые выполнена оценка эффективности модификаций зонального метода расчета радиационного и сложного теплообмена.

4. На основе зональных методов реализован новый подход к расчету сложного теплообмена в системе «излучатель - отражатель» газовых ИКИ, основанный на замене си-

стемы условной излучающей поверхностью. Выполнена оценка погрешности расчета теплообмена при замене системы «излучатель - отражатель» условной поверхностью. Получены новые данные о влиянии толщины теплоизоляционного слоя на внешней поверхности отражателя на его температуру.

5. Экспериментально получены новые данные о параметрах микроклимата в авторемонтном цехе машиностроительного предприятия при отоплении ИКИ и выявлено влияние искусственной шероховатости поверхности электрического излучателя на интенсивность теплообмена.

**Практическая значимость работы** заключается в следующем:

1. Разработана инженерная методика расчета систем лучистого отопления, учитывающая особенности систем обогрева с инфракрасными излучателями и позволяющая определить суммарную и единичную мощности ИКИ, их количество и расположение с учетом требований, предъявляемых к параметрам микроклимата в общественном и производственном помещении.

2. Разработаны практические рекомендации по выбору модификации зонального метода расчета с целью оптимизации вычислительного алгоритма.

3. На основе математического моделирования:

– даны рекомендации по совершенствованию существующих систем инфракрасного отопления зданий на примере модернизации лучистого отопления цеха здания производственного назначения;

– выявлены возможности повышения энергетической эффективности вновь проектируемых систем лучистого отопления зданий общественного и производственного назначения.

4. Предложены регрессионные зависимости для инженерного расчета температур и тепловых потоков в обслуживаемых зонах общественного здания при отоплении электрическими инфракрасными излучателями.

5. Даны рекомендации по нанесению искусственной шероховатости на поверхность электрического излучателя с целью интенсификации радиационного теплообмена.

6. Создана электронная база инфракрасных излучателей (свидетельство о регистрации в Реестре баз данных №2012620131 от 30 января 2012 года), позволяющая выбирать инфракрасный излучатель в зависимости от вида энергии, температуры его поверхности и заданной мощности.

7. Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе при чтении лекций по курсу «Теоретические основы теплотехники» и выполнении студенческих научных работ.

**Реализация результатов.** Результаты диссертационной работы могут быть использованы при выборе энергосберегающих мероприятий на основе энергоаудита зданий, при проектировании и наладке систем лучистого отопления, а также переданы ООО «РИАТ» (г. Иваново), ООО НТЦ «Промышленная энергетика» (г. Иваново), ООО «Энергосервисная компания» (г. Иваново), НКО Фонд «Энергоэффективность» (г. Ярославль), ООО «Компания «Интегратор» (г. Ярославль), ЗАО ИТФ «Системы и технологии» (г. Владимир) и ООО «Энерго - Мастер» (г. Владимир).

**Личный вклад автора.** Все результаты диссертационной работы получены автором лично под руководством научного руководителя.

### **Автор защищает:**

- математические модели систем лучистого отопления помещений производственного и общественного зданий, разработанные на основе зональных методов расчета радиационного и сложного теплообмена;
- регрессионную математическую модель отопления электрическими инфракрасными излучателями обслуживаемой зоны общественного здания, полученную методом планирования физического эксперимента;
- рекомендации по повышению энергетической эффективности систем лучистого отопления зданий.

**Апробация результатов работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы представлялись:

- на VI Минском международном форуме по тепло- и массообмену (Минск, НАН Беларуси, 19-23 мая 2008);
- на международных научно-практических конференциях: «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, МЭИ, 2009); «Тинчуринские чтения» (Казань, КГЭУ, 2009, 2010); «Состояние и перспективы развития электротехнологии. XV и XVI Бенардосовские чтения» (Иваново, ИГЭУ, 2009 и 2011); V международная школа-семинар молодых ученых и специалистов «Энергосбережение – теория и практика» (Москва, МЭИ, 2010); «Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология. Безопасность технологических процессов» (Москва, МИСиС, 2010);
- на региональной научно-технической конференции «Теплоэнергетика» (Иваново, ИГЭУ, 2010, 2011);
- на конференциях по инновационным проектам молодых ученых и научно-практических семинарах кафедры «Теоретические основы теплотехники» ИГЭУ (Иваново, ИГЭУ, 2009, 2010, 2011).

**Публикации.** Основное содержание работы изложено в 16 печатных работах, в том числе 1 учебном пособии, 6 статьях и докладах и 8 тезисах докладов, из них 3 статьи в журналах по списку ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Работа содержит 169 страниц машинописного текста, рисунки, таблицы, список литературы из 174 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, определены цель работы и направление исследований, перечислены решаемые задачи, отражены научная новизна и практическая значимость, описана структура работы.

**В первой главе** приведены результаты аналитического обзора литературы, посвященной проблемам энергосбережения при отоплении зданий различного назначения. При этом внимание уделено в первую очередь литературным источникам, в которых рассмотрены принципы и подходы к расчету систем отопления с инфракрасными излучателями. На основе анализа литературы можно сформулировать следующие выводы.

1. На обеспечение оптимальных параметров микроклимата в помещениях общественных и производственных зданий по разным оценкам используется не менее 30% всех ТЭР в Российской Федерации, что определяет актуальность поиска новых и модернизации существующих систем отопления.

2. У централизованных и децентрализованных систем отопления есть свои преимущества и недостатки. Однако в современных рыночных условиях доля автономных источников теплоснабжения, включая и системы лучистого отопления, возрастает. По экспертным

оценкам экономия энергии при инфракрасном отоплении может достигать до 10 – 15% по сравнению с традиционными конвективными системами отопления.

3. В настоящее время потребность в установке энергоэффективных систем лучистого отопления в общественных и промышленных зданиях возрастает.

4. Не существует единой классификации инфракрасных излучателей, что затрудняет выбор ИКИ и выполнение экономической оценки эффективности систем лучистого отопления.

5. Для расчета систем лучистого отопления, как правило, применяют интегральные (балансовые) методы. Единой нормативной методики расчета параметров системы отопления для закрытых помещений и открытых площадок с инфракрасными излучателями нет. Расчет систем с ИКИ основан на теории радиационного теплообмена, которая была развита в научных трудах Суринова Ю.А., Невского А.С., Блоха А.Г., Лисиенко В.Г., Журавлева Ю.С., Зигеля Р., Хауэлла Д., Спэрроу Э., Сесс Р., Оцисика М. и других.

6. Инфракрасное излучение в зависимости от спектра излучения (температуры поверхности излучателя) может быть опасным для здоровья человека. Поэтому при проектировании систем отопления оборудованных и электрическими, и газовыми инфракрасными излучателями необходимо в расчетах учитывать ограничение на величину падающего радиационного теплового потока, его изменение по высоте человека и асимметрию облучения.

7. Проблеме определения комфортных условий пребывания человека в рабочих (обслуживаемых) зонах промышленных и общественных зданий посвящены исследования многих отечественных и зарубежных ученых, среди которых в первую очередь следует отметить Батурина В.В., Богословского В.Н., Богуславского Л.Д., Сканави А.Н., Табунщикова Ю.А., Бродач М.М., Мачкаши А., Банхиди Л., Фангера П.

Анализ современного состояния вопроса показал актуальность совершенствования систем отопления с инфракрасными излучателями с целью сбережения энергоресурсов. В заключении первой главы поставлены задачи исследований диссертационной работы.

**Во второй главе** рассмотрены различные модификации зонального метода расчета, показано их применение на примере решения тестовых задач, а также выполнена оценка эффективности классического и резольвентного зональных методов расчета радиационного и сложного теплообмена.

При расчете радиационного теплообмена (РТО) функциональные зависимости между входными и выходными параметрами определяются геометрией системы и радиационными свойствами твердых тел и газовых объемов. Идея зонального метода расчета заключается в разбиении всех твердых поверхностей на дискретные участки (поверхностные зоны), а газовых объемов – на конечные объемы (объемные зоны), в пределах которых температуру, тепловые потоки и радиационные свойства тел можно считать постоянными.

Для каждой зоны в соответствии с постановкой задачи расчета радиационного теплообмена один из двух параметров – температура зоны ( $T_i$ ) или результирующий тепловой поток ( $Q^{pez}_i$ ) – задан по условию, а другой является искомым. В зависимости от того, какой параметр задан, различают зоны I - го и II - го рода. Для зон I - го рода заданы температуры ( $T_i$ ), а искомыми являются потоки результирующего излучения ( $Q^{pez}_i$ ). Для зон II - го рода заданы потоки результирующего излучения ( $Q^{pez}_i$ ), а требуется найти температуру зон ( $T_i$ ). Поэтому при прямой постановке задачи расчета РТО все зоны – зоны I - го рода, при обратной постановке задачи – все зоны – зоны II - го рода, при смешанной – есть зоны и I - го и II - го рода. При неявнозаданной постановке задачи расчета РТО для всех зон неизвестными являются и температуры, и тепловые потоки при заданной функциональной зависимости между ними. Такие зоны называют зонами III - го рода. Неявнозаданные задачи РТО решают методом последовательных приближений (методом итераций) задавая в первом приближении либо температуры зон, либо тепловые потоки. Поэтому неявнозаданная задача расчета сводится к

решению или прямой задачи с использованием зон I - го рода, или обратной задачи с использованием зон II - го рода. Заметим что задача РТО с зонами только II - го рода не имеет однозначного решения, поэтому в этом случае, как правило, для одной зон задают температуру.

Итак, решение задачи радиационного теплообмена для зон каждого из трех родов сводится к определению:

- потоков результирующего излучения  $Q_i^{pez}$  (для зон I -го рода);
- температур или потоков собственного излучения  $Q_i^{cob}$  (для зон II - го рода);
- потоков результирующего излучения и температур (для зон III - го рода).

При решении задач радиационного теплообмена зональными методами наряду с угловыми коэффициентами излучения используют обобщенные угловые коэффициенты в классическом зональном методе и разрешающие угловые коэффициенты в резольвентном зональном методе.

Обобщенные угловые коэффициенты используют для установления функциональной связи падающего и эффективного радиационных тепловых потоков в классическом зональном методе по формуле

$$Q_i^{пад} = \sum_k Q_k^{эф} \psi_{ki} . \quad (1)$$

Обобщенным угловым коэффициентом излучения (коэффициентом облученности) называют величину, которая определяет долю лучистой энергии, приходящей на данное тело с другого тела с учетом ослабления (поглощения и рассеяния) энергии излучающим и поглощающим газом, расположенным между телами

$$\psi_{ki} = \varphi_{ki} (1 - A_{r(ki)}) = \varphi_{ki} (1 - \varepsilon_{r(ki)}) . \quad (2)$$

Разрешающие угловые коэффициенты используют для установления функциональной связи результирующего и собственного радиационных тепловых потоков в резольвентном зональном методе

$$Q_i^{пад} = \sum_k Q_k^{cob} \Psi_{ki}, \quad i = 1, \dots, l. \quad (3)$$

Разрешающим угловым коэффициентом излучения (коэффициентом облученности) называют величину, которая определяет долю лучистой энергии, приходящей на данное тело с другого тела с учетом всех переотражений от поверхностных зон и поглощений энергии лученепрозрачным газом. Разрешающие угловые коэффициенты излучения находят решением системы алгебраических уравнений:

$$\Psi_{ki} = \psi_{ki} + \sum_{j=1}^m \psi_{kj} R_j \Psi_{ji} . \quad (4)$$

Применяя для расчета теплообмена классический зональный метод, сначала находят эффективные тепловые потоки  $Q_i^{эф}$  для всех поверхностных и объемных зон, а затем рассчитывают потоки результирующего излучения  $Q_i^{pez}$  для поверхностных и объемных зон I - го рода и значения температур  $T_i$  – для поверхностных и объемных зон II - го рода по формуле

$$Q_i^{pez} = Q_i^{погл} - Q_i^{cob} = A_i \sum_k Q_k^{эф} \psi_{ki} - Q_i^{cob} . \quad (5)$$

Поток собственного излучения для поверхностных и объемных зон II - го рода находят по формулам (6) и (7) соответственно:

$$Q_i^{cob} = A_i Q_i^{эф} - R_i Q_i^{pez} ; \quad (6)$$



$$Q_i^{\text{соб}} = Q_i^{\text{эф}}. \quad (7)$$

Зная поток собственного излучения  $i$  - й зоны и считая тело серым, ее температуру рассчитывают по формуле, следующей из законов Стефана-Больцмана и Кирхгофа.

Система зональных уравнений в рамках резольвентного зонального метода имеет вид:

– для поверхностных и объемных зон I - го рода

$$Q_i^{\text{рез}} = \sum_k a_{ki} T_k^4, \quad i = 1, \dots, l_1; \quad (8)$$

– для поверхностных и объемных зон II - го рода

$$\sum_k a_{ki} T_k^4 - Q_i^{\text{рез}} = 0, \quad i = l_1 + 1, \dots, l, \quad (9)$$

где  $a_{ki} = \epsilon_k \sigma_0 F_k (\Psi_{ki} A_i - \delta_{ki})$  – коэффициент радиационного обмена.

Решая систему уравнений (9), находят температуры всех зон II - го рода  $T_i$ , а затем по явным формулам (8) рассчитывают результирующие потоки зон I - го рода.

При математическом описании конвективного теплопереноса, конвективной теплоотдачи, теплопередачи через стенки в зональных уравнениях появляются слагаемые, линейно зависящие от температуры. Система зональных уравнений при наличии зон III - го рода имеет вид

$$\sum_k a_{ki} T_k^4 + \sum_k h_{ki} T_k + h_i^0 = 0, \quad (10)$$

где  $h_{ki}$ ,  $h_i^0$  – коэффициенты конвективного обмена, которые рассчитывают в зависимости от конкретной постановки задачи.

Для понимания алгоритма расчета радиационного теплообмена зональными методами в диссертации рассмотрено решение задачи РТО в двух простейших системах тел, состоящих из двух твердых серых тел, разделенных диатермичным или излучающим и поглощающим газом. При помощи таких систем в инженерных расчетах часто моделируют теплообмен в сложных объектах. Расчетами на модельных задачах выполнено исследование эффективности модификаций зональных методов (глава 2) и исследование влияния радиационных характеристик тел на параметры РТО (глава 5).

В диссертации исследована вычислительная эффективность двух основных модификаций зонального метода. При этом под эффективностью численного метода понимают достижение заданной точности расчета при минимальных вычислительных затратах.

В диссертации выполнена оценка эффективности двух наиболее востребованных в расчетах внешнего теплообмена модификаций зонального метода: классического зонального метода (КЗМ) и резольвентного зонального метода (РЗМ). Заданную точность расчета можно получить при разном числе зон разбиения поверхности и газового объема. При этом тестовыми расчетами на модельных задачах установлено, что при одинаковом числе зон разбиения заданной области точность расчета параметров РТО классическим и резольвентным зональными методами практически совпадает. Поэтому эффективность вычислительного процесса зональными методами, равную обратной величине трудоемкости расчета, находили или по количеству элементарных вычислительных операций, или по времени расчета на одном и том же компьютере. По аналогии с критерием эффективности разностных схем (КЭРС) был получен критерий для оценки эффективности зональных методов – КЭЗМ ( $K_{\text{эзм}}$ )

$$K_{\text{эзм}} = \left[ Z_{\text{пк},i} / Z_{\text{пк,баз}} \right]^{-1}, \quad (11)$$

где  $Z_{\text{пк},i}$  – вычислительные затраты  $i$  - й модификации зонального метода;  $Z_{\text{пк,баз}}$  – вычислительные затраты базовой модификации зонального метода.

Относительная эффективность модификаций зональных методов (критерий эффективности зональных методов) была определена для системы из двух твердых тел, разделенных лучепрозрачной (диатермичной) средой и системы из двух серых тел и излучающего и поглощающего газа между ними.

При этом в качестве базовой трудоемкости было принято время решения тестовой задачи классическим зональным методом ( $\tau_{\text{баз}} = \tau_{\text{кзм}}^{\text{дс}}$ ) для системы с диатермичной средой. Результаты расчета вычислительной эффективности позволяют сделать однозначный вывод о том, что эффективность классического зонального метода выше эффективности резольвентного зонального метода. Эффективности решения задачи РТО в системах с лучепрозрачной (диатермичной средой) и с ослабляющей средой классическим зональным методом радиационного теплообмена отличаются на 15 – 18%, а резольвентным зональным методом – практически совпадают. Отметим, что результаты анализа эффективности модификаций зонального метода справедливы только для линейной задачи РТО с зонами I - го и II - го рода.

**В третьей главе** приведены результаты экспериментального исследования параметров микроклимата при отоплении газовыми инфракрасными излучателями производственного помещения станции технического обслуживания автомобилей ОАО «РИАТ» г. Иваново и результаты исследования микроклимата помещения общественного здания (учебной лаборатории) при отоплении электрическими инфракрасными излучателями.

Площадь отапливаемой зоны станции технического обслуживания автомобилей составляет 1260 м<sup>2</sup>. Работа по ремонту и диагностике автомобилей ведется ежедневно в течение 12-ти часов.

В помещении цеха установлено девять однотрубных инфракрасных излучателей модели FRLA3 с «тупиковой» трубой и один двухтрубный излучатель модели FRLB4 с U-образной трубой итальянской фирмы Fraccaro. Суммарная номинальная мощность излучателей составляет 310 кВт. Расположение излучателей в помещении цеха показано на рис. 1.

Однотрубные излучатели расположены в один ряд по длине помещения и обогревают зону технического обслуживания автомобилей. Двухтрубный излучатель установлен в помещении цеха, примыкающем к зоне технического обслуживания автомобилей, и обогревает зону ручного ремонта автомобилей и мотоциклов.

Температура воздуха в помещении регулируется при помощи двух электронных приборов, снабженных датчиками типа «шаровой зонд» с точностью до 0,1°С. После задания необходимой температуры происходит включение (выключение) нагревателей и их работа (или простой) до момента

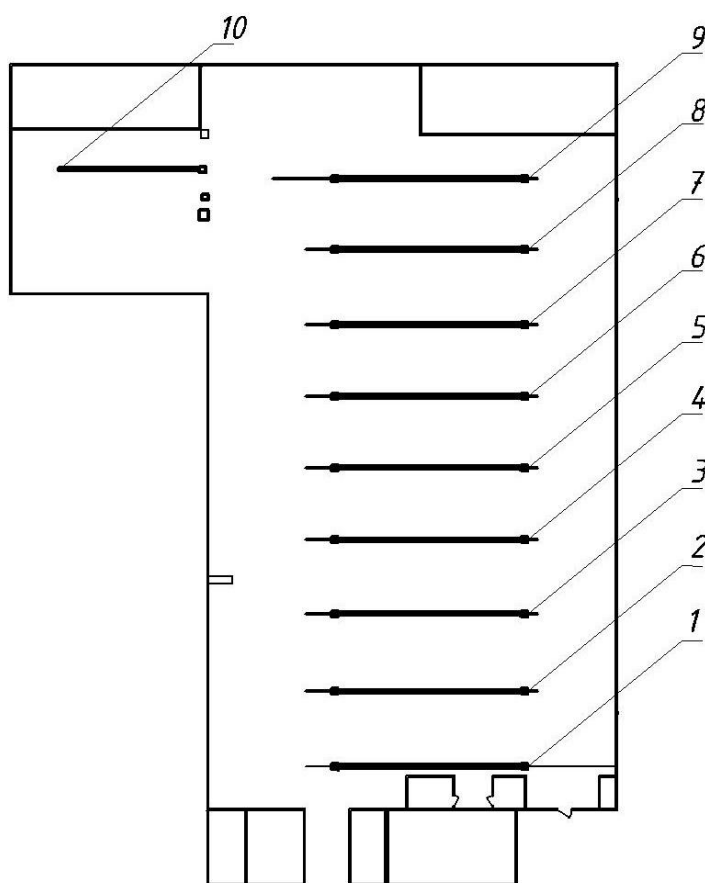


Рис.1. Расположение инфракрасных газовых излучателей в помещении станции: 1-9 – однотрубные газовые инфракрасные излучатели; 10 – двухтрубный газовый инфракрасный излучатель

достижения в помещении заданной комфортной температуры.

Цель экспериментального исследования системы инфракрасного отопления – определение температур и плотностей падающих лучистых тепловых потоков в рабочей зоне помещения, а также влажности и подвижности воздуха.

Экспериментальное исследование параметров микроклимата производственного помещения проведено в марте 2011 года при температуре наружного воздуха от 0°С до +3°С и при температуре в помещении +20°С. Также были определены параметры микроклимата в переходном режиме при выходе на комфортную температуру в помещении +30°С.

В каждой позиции (при температуре комфорта +20 °С) температуры и плотности падающего теплового потока были измерены на полу и на расстоянии 0,1; 1,0; 1,7 и 3,9 м от поверхности пола. Измерения влажности и подвижности воздуха выполнены на расстоянии 0,1; 1,0 и 1,7 м от поверхности пола. Температуру, влажность и подвижность воздуха измеряли прибором МЭС – 200А, а плотность теплового потока и температуру в указанных точках – прибором ИТП – МГ4.03 «ПОТОК». Для анализа работы системы инфракрасного отопления выполнено тепловизионное обследование объекта тепловизором NEC TH 7700. Все измерительные приборы поверены.

Параметры радиационного теплообмена были измерены в 355 точках при комфортной температуре +20 °С и в 47 контрольных точках при температуре +30°С.

Погрешность измерения параметров микроклимата определена по суммарной погрешности измерительного комплекса, включающего датчик и измерительный прибор, и составила 0,21 % при измерении температур и 6,02% при измерении теплового потока.

В результате экспериментального исследования получены данные о параметрах микроклимата производственного помещения – участка станции по ремонту автомобилей ОАО «РИАТ» при отоплении газовыми инфракрасными излучателями. Выявлен запас мощности инфракрасных излучателей.

Экспериментальное исследование параметров микроклимата в помещении общественного здания при отоплении электрическими инфракрасными нагревателями выполнено в одной из учебных лабораторий ИГЭУ. Эксперимент проведен в период с 22 по 27 сентября 2011 года с использованием двух ИКИ фирмы Мистер Хит максимальной единичной мощностью 1,1 кВт.

Инфракрасные обогреватели были закреплены на потолке при помощи элементов крепления обогревателей и отапливали зону в центре лаборатории. Крепление ИКИ позволяло перемещать обогреватели относительно друг друга на расстояние 0,62 м ÷ 2,62 м. Высота подвеса излучателей изменялась в диапазоне 2,2 м ÷ 2,9 м, а их мощность – в диапазоне 550 Вт ÷ 1100 Вт при помощи лабораторного автотрансформатора напряжения.

Измерения температур и тепловых потоков выполнены при помощи приборов МЭС – 200А и ИТП – МГ4.03 «ПОТОК». После предварительной оценки теплового режима помещения измерения температур и тепловых потоков проведены в точках, координаты которых рассчитаны по методу планирования эксперимента. При этом был выбран полный трехфакторный эксперимент с планированием первого порядка. В табл. 1 приведены сведения о факторах планирования и диапазонах их изменения.

При проведении экспериментальных исследований было выполнено 1296 замеров температур и 1620 замеров плотностей тепловых потоков. Тепловые потоки и температуры были измерены на полу и на расстоянии 0,1; 1,1; 1,7 м от поверхности пола, а также на поверхностях стен (наружной и внутренней) на расстоянии 1,5 м от поверхности пола.

Таблица 1. Факторы в эксперименте и их взаимодействия

Уровень фактора	Факторы			Взаимодействие факторов			
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> ·X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> ·X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> ·X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> ·X <sub>2</sub> ·X <sub>3</sub>
	Мощность W, Вт	Расстояние между излучателями L, м	Высота подвеса излучателей Н, м				
Значения факторов							
Максимальный	1100 (1)	2,62 (1)	2,9 (1)	1	1	1	1
Средний	825 (0)	1,62 (0)	2,55 (0)	0	0	0	0
Минимальный	550 (-1)	0,62 (-1)	2,2 (-1)	1	1	1	-1

В эксперименте также были измерены подвижность, относительная влажность и температура воздуха в центре помещения и на расстоянии 0,5м от внутренней поверхности наружных стен в соответствии с требованиями к методам контроля, изложенными в ГОСТ 30494 – 96.

Результаты экспериментального исследования параметров микроклимата помещения общественного здания аппроксимированы уравнениями регрессии по методу планирования эксперимента. Для распространения серии единичных экспериментов на группу подобных явлений факторы планирования были обработаны в относительных координатах

$$\bar{q} = b_0 + b_1 \bar{\Delta N} + b_2 \bar{L} + b_3 \bar{\Delta H} + b_{12} \overline{\Delta N \Delta L} + b_{13} \overline{\Delta N \Delta H} + b_{23} \overline{\Delta L \Delta H} + b_{123} \overline{\Delta N \Delta L \Delta H}, \quad (12)$$

где  $\bar{q} = qL_0H_0/N_0$  – относительная плотность падающего теплового потока. Коэффициенты регрессии для параметров микроклимата во всех контрольных точках измерения приведены в диссертации. Погрешность линейной регрессионной модели в области изменения безразмерных факторов  $\bar{N} = 0,5 \div 1,0$ ,  $\bar{L} = 0,351 \div 0,784$ ,  $\bar{H} = 0,647 \div 0,853$  составила не более 8,7%.

Экспериментальные данные по значению температур в рабочих (обслуживаемых) зонах в зависимости от плотности падающего теплового потока были представлены в виде критериального уравнения:

$$\Theta = a_0 + a_1 \bar{q}, \quad (13)$$

где  $\Theta$  – безразмерная температура;  $a_0$  и  $a_1$  – коэффициенты аппроксимации – приведены в диссертации для производственного и общественного зданий.

Результаты экспериментального исследования параметров микроклимата помещения производственного и общественного зданий были использованы для проверки адекватности математической модели систем отопления с газовыми и электрическими инфракрасными излучателями (глава 4).

**В четвертой главе\*** разработана двухэтапная математическая модель систем отопления с газовыми и электрическими инфракрасными излучателями. На первом этапе составляют тепловой баланс помещения с целью определения необходимого количества тепловой энергии на отопление. Данная задача в диссертации решена с использованием методик, изложенных в известных нормативных документах. На втором этапе находят значения температур и облученности поверхностей помещения с учетом многократных переотраже-

\* При реализации математических моделей радиационного теплообмена оказаны научные консультации доктором технических наук, профессором Крупенниковым С.А.

ний. Математическая модель учитывает особенности теплообмена излучением в объеме отапливаемого помещения и запыленность воздуха в помещении.

При определении тепловой облученности и температур поверхностей следует учитывать геометрические и радиационные характеристики излучателя: температуру излучателя и отражателя, их степени черноты, геометрию системы, наличие тепловой изоляции на внешней поверхности отражателя. В диссертации задача по определению температуры отражателя, влияющей на величину облученности, решена резольвентным зональным методом. В системе тел (рис. 2) в соответствии с зональным методом расчета выделено 3 зоны: излучатель (зона I - го рода), для которой задана температура, отражатель (зона III-го рода) и условная абсолютно черная поверхность, температура которой принимается равной температуре воздуха в помещении. Для отражателя справедлива зависимость между температурой и потоком результирующего излучения:

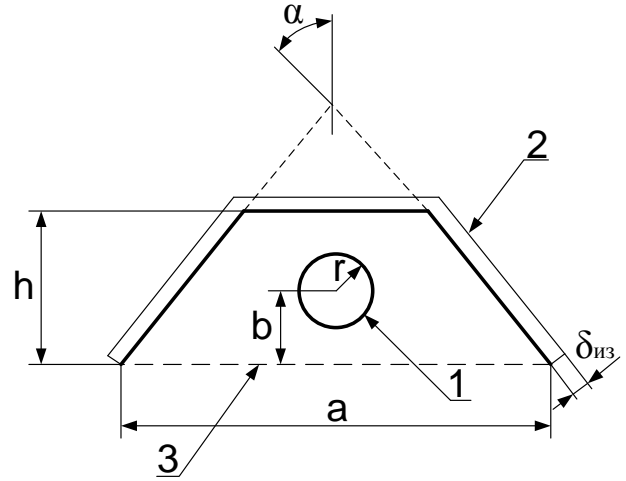


Рис. 2. Конструкция «темного» инфракрасного излучателя: 1 – излучающая труба; 2 – отражатель; 3 – условная поверхность

$$Q_2^p = k(T_2 - T_3)F_2, \tag{14}$$

где  $Q_2^p$  – поток результирующего излучения отражателя, Вт;  $k$  – коэффициент теплопередачи через поверхность отражателя, определяемый с учетом конвективной и лучистой составляющих коэффициента теплоотдачи и термического сопротивления тепловой изоляции отражателя;  $T_2$  – температура отражателя;  $T_3$  – температура условной поверхности;  $F_2$  – площадь поверхности отражателя.

Система уравнений для нахождения неизвестных температур и тепловых потоков в системе тел, изображенных на рис.2, имеет вид:

$$\begin{cases} Q_1^{рез} = \varepsilon_1(Q_1^{cob}\Psi_{11} + Q_2^{cob}\Psi_{21} + Q_3^{cob}\Psi_{31}) - Q_1^{cob} \\ Q_2^{cob} = \varepsilon_2(Q_1^{cob}\Psi_{12} + Q_2^{cob}\Psi_{22} + Q_3^{cob}\Psi_{32}) - kF_2 \left( \sqrt[4]{\frac{Q_2^{cob}}{\varepsilon_2\sigma_0 F_2}} - T_3 \right). \\ Q_3^{рез} = \varepsilon_3(Q_1^{cob}\Psi_{13} + Q_2^{cob}\Psi_{23} + Q_3^{cob}\Psi_{33}) - Q_3^{cob} \end{cases} \tag{15}$$

Разрешающие угловые коэффициенты излучения находим, решая систему уравнений (4).

Задача по определению облученности поверхностей в рабочей (обслуживаемой) зоне решена классическим зональным методом расчета из-за его большей эффективности и при наличии в системе зон только I - го и II - го рода (см. главу 2). Плотность потока падающего излучения в зависимости от угла падения определена по формулам (1)-(2):

$$q_{оп}^{пад} = \sum_k q_{к-оп}^{эф} \varphi_{оп-к}(\gamma)(1 - A_{к-оп}), \tag{16}$$

где  $q_{оп}^{пад}$  – плотность потока падающего излучения;  $q_{к-оп}^{эф}$  – плотность потока эффективного излучения  $k$ -ой зоны;  $\varphi_{оп-к}$  – локальный угловой коэффициент излучения с облучаемой поверхностью на  $k$ -ую зону.

Угловые коэффициенты излучения определены по известным формулам для параллельных и перпендикулярных плоских поверхностей, а также по выражениям, полученным на основе этих формул с использованием свойств угловых коэффициентов излучения.

Поглощательная способность на пути луча от излучателя или отражателя до облучаемой поверхности определена по закону Бугера:

$$A_{k-оп} = 1 - e^{(-k_{k-оп}S_{k-оп})}, \tag{17}$$

где  $S_{k-оп}$  – толщина газового слоя между излучателем или отражателем и облучаемой поверхностью (лучевоспринимающей площадкой);  $k_{k-оп}$  – интегральный коэффициент ослабления, учитывающий поглощение энергии трехатомными газами и рассеяние частицами пыли. Коэффициент ослабления излучения частицами пыли рассчитан по методике А.Г. Блоха.

В математической модели в качестве ограничений на величину температур и падающих тепловых потоков приняты предельно допустимые и оптимальные плотности тепловых потоков и температуры, указанные в нормативных документах.

Одним из показателей работы инфракрасного излучателя является лучистый КПД, который рассчитывают по формуле

$$\eta_{л} = \frac{Q_{л}^{эф}}{W}, \tag{18}$$

где  $Q_{л}^{эф}$  – лучистый тепловой поток с поверхности излучающей трубы и отражателя;  $W$  – мощность инфракрасного отопительного прибора.

Расчеты РТО с инфракрасными газовыми излучателями можно выполнить и без учета

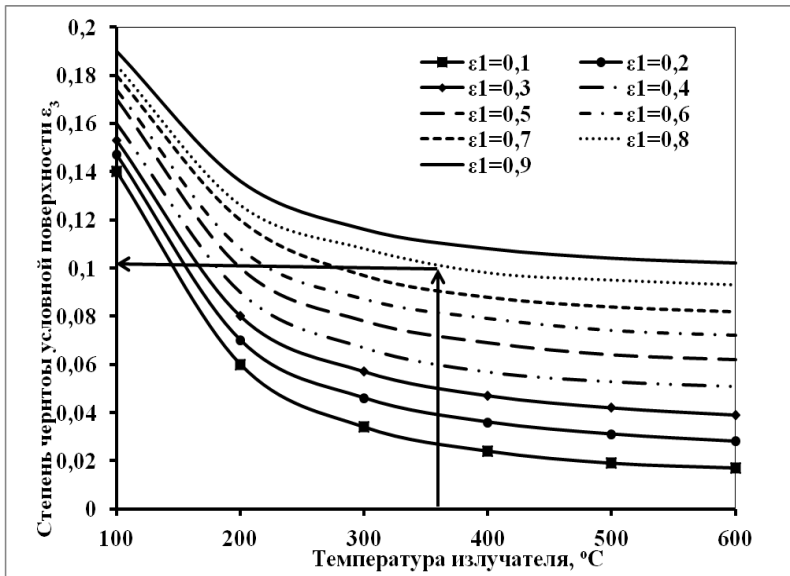


Рис. 3. Зависимость степени черноты условной поверхности от температуры и степени черноты излучателя при степени черноты отражателя 0,05

условной поверхность по алгоритму, предложенному в диссертации, не превышает 12%.

Конвективная составляющая теплового потока около поверхностных зон найдена по закону теплоотдачи и известным в литературе критериальным формулам.

Задача расчета радиационного отопления выполнена по следующему алгоритму:

1. В системе тел «излучатель – отражатель - условная поверхность» с помощью резольвентного зонального метода находим температуру отражателя с учетом геометрических и радиационных характеристик инфракрасного излучателя.

конструктивных особенностей ИКИ, что существенно упрощает расчет. При таком подходе рассматривается теплообмен между условной поверхностью, замыкающей полость отражателя, и облучаемыми поверхностями. При этом температура условной поверхности принимается равной температуре излучателя, а степень черноты выбирается по предложенным в диссертационной работе номограммам (рис. 3). Номограммы разработаны для одно- и двухтрубного излучателей с различными геометрическими и радиационными характеристиками излучателя и отражателя.

2. Определяем потоки эффективного излучения отражателя и излучателя.
3. Уточняем мощность и лучистый КПД излучателя.
4. Находим плотности потоков излучения, падающего на облучаемые поверхности, с использованием классического зонального метода.

5. Находим значения температур в рабочих (обслуживаемых) зонах по эмпирически установленным зависимостям.

6. Проверяем выполнение условий на ограничение значений температур и тепловых потоков и при необходимости проводим расчет вновь, изменяя расположение, количество или мощность излучателей.

Алгоритм расчета лучистого отопления с электрическими инфракрасными излучателями аналогичен алгоритму, описанному выше за исключением этапа расчета отражателя.

Математическая модель систем лучистого отопления с газовыми и электрическими инфракрасными излучателями реализована в виде вычислительной программы в среде Delphi. Отдельным модулем является вычислительный комплекс, позволяющий найти значения количества тепловой энергии на отопление помещения, реализованный в среде Microsoft Excel.

Адекватность математической модели проверена сопоставлением с экспериментальными данными параметров микроклимата в производственном помещении ОАО «РИАТ» и общественном помещении – учебной лаборатории (рис.4).

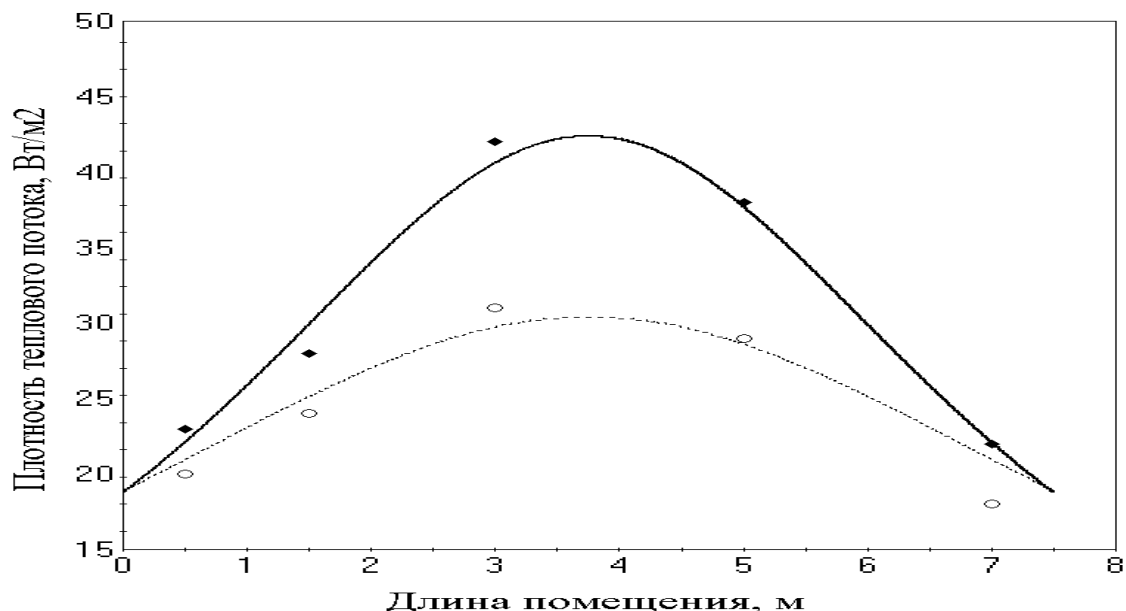


Рис. 4. Изменение значения облученности контрольных плоскостей производственного помещения:

- ◆◆◆◆ - экспериментальные данные (облученность на высоте 1,7 м);
- - расчет (облученность на высоте 1,7 м);
- - экспериментальные данные (облученность на полу);
- - расчет (облученность на полу)

Получено удовлетворительное совпадение результатов эксперимента и расчета. Максимальная относительная погрешность расчета не превышает 10% для плотности падающего теплового потока и 8% для температур.

Разработанная математическая модель систем лучистого отопления позволяет получить распределение температур и тепловых потоков в выбранных точках облучаемых поверхностей в зависимости от типа, расположения и количества инфракрасных излучателей.

**В пятой главе** на основе математической модели отопления с газовыми и электрическими инфракрасными излучателями исследовано влияние радиационных и конструктив-

ных параметров излучателя на характеристики радиационного теплообмена в помещениях производственных и общественных зданий.

Для «темных» излучателей с тупиковой и U-образной трубой получены зависимости температуры отражателя от толщины тепловой изоляции и степени черноты материала отражателя. Сделан вывод о влиянии степени черноты отражателя, температуры излучателя и толщины слоя тепловой изоляции на температуру отражателя и величину лучистого КПД.

В результате лабораторного эксперимента установлен характер изменения плотности падающего теплового потока от высоты подвеса излучателя и от шероховатости его поверхности (степени черноты). Увеличение шероховатости поверхности излучателя при помощи металлических сеток с разными размерами ячеек увеличивает падающий тепловой поток на ~ 40% по сравнению с поверхностью излучателя, у которой отражательная способность стремится к единице. Даны рекомендации по увеличению лучистого КПД инфракрасных излучателей при неизменной единичной мощности.

Разработана электронная база инфракрасных излучателей, содержащая сведения более чем о трехстах моделях наиболее известных инфракрасных излучателей. Инфракрасные излучатели в базе ранжированы по типу используемой энергии, мощности и диапазону длин волн излучения (температуре поверхности излучателя). Электронная база передана для использования в практике проектных работ ряду заинтересованных организаций.

По результатам исследований на математической модели предложены рекомендации по совершенствованию системы лучистого отопления участка станции технического обслуживания автомобилей ОАО «РИАТ». Рекомендовано при температуре наружного воздуха выше  $-6^{\circ}\text{C}$  в производственном помещении отключить три однетрубных нагревателя из девяти. Также показано, что снижение нагрузки на 40% на лучистые отопительные приборы в ночное время позволит сэкономить не менее 100 тысяч рублей в течение отопительного периода. Рекомендации переданы в ОАО «РИАТ» для применения.

При помощи математической модели разработана система локального инфракрасного отопления рабочих зон помещения производственного назначения и система отопления помещения для условий одного из предприятий по производству сыпучих строительных материалов. В диссертации показано, что наличие запыленности и влажности ведет к существенному снижению падающего теплового потока. Даны рекомендации по выбору ИКИ для помещений с ослабляющей излучение газовой средой.

В заключении главы приведен расчет повышения энергетической эффективности использования ТЭР при замене системы централизованного отопления на систему лучистого отопления производственного здания.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ**

1. На основе экспериментальных и теоретических исследований в диссертационной работе предложены инженерные методики расчета радиационного и сложного теплообмена при лучистом отоплении, позволяющие анализировать существующие системы отопления зданий общественного и производственного назначения и быть полезными при проектировании систем автономного отопления.

2. Исследована вычислительная эффективность двух основных модификаций зонального метода расчета радиационного теплообмена. Для сравнительной оценки эффективности применен критерий эффективности зональных методов. Показано, что для расчета радиационного теплообмена в системах тел, состоящих из зон I –го и II – го рода эффективнее использовать классический зональный метод.



3. Получены экспериментальные данные о параметрах микроклимата производственного помещения – участка станции по ремонту автомобилей ОАО «РИАТ» г. Иваново – при отоплении газовыми инфракрасными излучателями. Выявлен запас мощности инфракрасных излучателей. Экспериментальное исследование параметров микроклимата в ОАО «РИАТ» показало, что основные параметры микроклимата: температура, подвижность воздуха и плотность лучистого теплового потока, падающего на пол и площадки, установленные на различных высотах в объеме рабочей зоны, соответствуют санитарным нормам. Экспериментально установлено, что относительная влажность воздуха имеет недопустимо низкие значения.

4. Проведено экспериментальное исследование параметров микроклимата помещения общественного здания. По методу планирования эксперимента получены регрессионные зависимости для основных параметров микроклимата. Аппроксимация экспериментальных данных уравнением регрессии выполнена для безразмерных параметров, что позволит использовать данную информацию для расчета и проектирования аналогичных систем отопления.

5. Даны рекомендации по увеличению лучистого КПД электрических инфракрасных излучателей за счет изменения шероховатости поверхности излучателя при помощи металлических сеток с размерами ячеек 100 – 200 мкм. Экспериментально установлено влияние искусственной шероховатости на величину облученности контрольной поверхности.

6. Разработана математическая модель систем инфракрасного отопления помещений с электрическими и газовыми нагревателями, учитывающая переотражения лучистых тепловых потоков в рассматриваемой системе тел. На основе зонального метода расчета сложного теплообмена разработана математическая модель систем отопления с газовыми и электрическими инфракрасными излучателями, позволяющая определять значения температур и тепловых потоков в помещении с учетом ослабляющей газовой среды. На основе зональных методов реализован новый подход к расчету сложного теплообмена в системе «излучатель – отражатель» газовых ИКИ, основанный на замене системы условной излучающей поверхностью. Выполнена оценка погрешности расчета теплообмена при замене системы «излучатель – отражатель» условной поверхностью.

7. На основе математической модели лучистого отопления исследовано влияние радиационных и конструктивных параметров излучателя на интенсивность лучистого отопления помещений производственных и общественных зданий.

8. При помощи математической модели исследовано влияние степени черноты отражателя и толщины тепловой изоляции на внешней поверхности отражателя на лучистый КПД высокотемпературного отопительного прибора.

9. Разработана электронная база инфракрасных излучателей, в которой инфракрасные излучатели классифицированы по виду используемой энергии, мощности, температуре поверхности и диапазону длин волн. Электронная база передана для использования при проектировании ряду заинтересованных организаций.

10. По результатам проведения многовариантных расчетов предложены рекомендации по совершенствованию системы лучистого отопления с газовыми инфракрасными излучателями производственного помещения ОАО «РИАТ» г. Иваново, внедрение которых позволит сократить потребление ТЭР. Рекомендации переданы в ОАО «РИАТ» для применения.

11. На основе математического моделирования разработана система локального лучистого отопления рабочих зон с диатермичной и ослабляющей средой. Приведены рекомендации по расчету мощности отопительных приборов для лучистого отопления локальных рабочих мест.

12. Результаты диссертационной работы переданы ряду заинтересованных организаций для оценки величины снижения затрат энергии при использовании инфракрасных из-

лучателей и используются в учебном процессе Ивановского государственного энергетического университета.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

1. **Бухмиров В.В.** Модификации зонального метода для решения задач радиационного теплообмена: основные положения [Текст] / В.В. Бухмиров, С.А. Крупенников, **Ю.С. Солнышкова** // Вестник ИГЭУ. – 2009. – Вып.2. – С. 61-63.
2. **Бухмиров В.В.** Алгоритм расчета систем лучистого отопления помещений [Текст] / В.В. Бухмиров, С.А. Крупенников, **Ю.С. Солнышкова** // Вестник ИГЭУ. – 2010. – Вып.4. – С. 23-25.
3. **Бухмиров В.В.** Экспериментальное исследование системы отопления с инфракрасными излучателями [Текст] / В.В. Бухмиров, **Ю.С. Солнышкова**, М.В. Пророкова // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Вып.3. – С. 12-16.

### Публикации в других изданиях

4. **Бухмиров В.В.** Повышение эффективности зональных методов расчета радиационного и сложного теплообмена [Текст] / В.В. Бухмиров, С.А. Крупенников, Д.В. Ракутина, **Ю.С. Солнышкова** // Тез. докл. VI Минского международного форума по тепло- и массообмену, 19 – 23 мая 2008г. – Минск, НАН Беларуси, 2008. – С. 193 – 194.
5. **Бухмиров В.В.** Об эффективности зональных методов расчета задач внешнего теплообмена [Текст] / В.В. Бухмиров, **Ю.С. Солнышкова** // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез. докл. XV-й междунар. научно-технической конференции студентов и аспирантов. – М.: МЭИ (ТУ), 2009. – С. 378 – 379.
6. **Бухмиров В.В.** Применение зональных методов для расчета радиационного и сложного теплообмена [Текст] / В.В. Бухмиров, **Ю.С. Солнышкова** // Тез. докл. IV международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» / Под общ. ред. д-ра физ-мат. наук, проф. Ю.Я. Петрушенко. – Казань, ГОУ ВПО КГЭУ, 2009. Т. 2. – С. 51 – 52.
7. **Бухмиров В.В.** Математическая модель вращающейся печи с учетом запыленности газового потока [Текст] / В.В. Бухмиров, **Ю.С. Солнышкова**, А.А. Власюк // Состояние и перспективы развития энерготехнологии: Тез. докл. международной научно-технической конференции «XV Бенардосовские чтения». – Иваново: ГОУ ВПО «ИГЭУ имени В.И. Ленина», 2009. – С. 3.
8. **Бухмиров В.В.** Некоторые аспекты инфракрасного отопления промышленных и гражданских зданий [Текст] / В.В. Бухмиров, **Ю.С. Солнышкова**, В.Н. Шарыпов // Состояние и перспективы развития энерготехнологии: Тез. докл. международной научно-технической конференции «XV Бенардосовские чтения». – Иваново: ГОУ ВПО «ИГЭУ имени В.И. Ленина», 2009. – С. 13.
9. **Бухмиров В.В.** Определение эффективности основных модификаций зонального метода расчета радиационного теплообмена [Текст] / В.В. Бухмиров, **Ю.С. Солнышкова**, М.В. Пророкова // Теплоэнергетика: Тез. докл. региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Энергия – 2010». – Иваново: ГОУ ВПО «ИГЭУ имени В.И. Ленина», 2010. – С. 99 – 100.
10. **Бухмиров В.В.** Исследование эффективности зональных методов расчета [Текст] / В.В. Бухмиров, **Ю.С. Солнышкова**, М.В. Пророкова // Тез. докл. V международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» / Под общ. ред. д-ра физ-мат. наук, проф. Ю.Я. Петрушенко. – Казань, ГОУ ВПО КГЭУ, 2010. Т. 2. – С. 26 –27.

11. **Бухмиров В.В.** Оценка эффективности применения систем лучистого отопления производственных зданий [Текст] / В.В. Бухмиров, **Ю.С. Солнышкова**, А.К. Гаськов // Энергосбережение – теория и практика: Труды V международной школы-семинара молодых ученых и специалистов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – С. 36 – 39.
12. **Бухмиров В.В.** Системы инфракрасного отопления промышленных зданий: методы расчета [Текст] / В.В. Бухмиров, С.А. Крупенников, **Ю.С. Солнышкова** // Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология. Безопасность технологических процессов: Материалы докладов V международной науч.-практич. конференции. – М.: НИТУ «МИСиС», 2010. – с.195 – 196.
13. **Бухмиров В.В.** Определение количества тепловой энергии на отопление помещения с помощью автоматизированного вычислительного комплекса [Текст] / В.В. Бухмиров, **Ю.С. Солнышкова** // Состояние и перспективы развития энерготехнологии: Тез. докл. международной научно-технической конференции «XVI Бенардосовские чтения». – Иваново: ГОУ ВПО «ИГЭУ имени В.И. Ленина», 2011. – С. 167 - 169.
14. **Бухмиров В.В.** Теплообмен в системе «излучатель – отражатель – окружающая среда» [Текст] / В.В. Бухмиров, **Ю.С. Солнышкова**, А.Е. Курочкин // Повышение эффективности энергетического оборудования: Материалы VI Междунар. науч.-практ. конф.: 6 – 8 декабря 2011 г. / Под ред. А.В. Мошкаркина. – Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский государ. Энергетический университет им. В.И. Ленина», 2011. – С. 253 – 258.
15. **Бухмиров В.В.** Электронная база инфракрасных излучателей. / В.В. Бухмиров, **Ю.С. Солнышкова**, Е.В. Павлычева. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2012620131 от 30 января 2012 года.
16. **Бухмиров В.В.** Зональные методы расчёта радиационного и сложного теплообмена: Учебное пособие [Текст] / В.В. Бухмиров, **Ю.С. Солнышкова** // ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина». – Иваново, 2012. – 96 с.

## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

$Q_i$  – тепловой поток  $i$  - й поверхностной или объемной зоны;  $Q_{\text{л}}^{\text{эф}}$  – лучистый тепловой поток с поверхности излучающей трубы и отражателя;  $W$  – мощность инфракрасного отопительного прибора.  $T_i$  – температура  $i$  - й поверхностной или объемной зоны;  $\varphi_{ki}$  – угловой коэффициент с  $k$  - й зоны на  $i$  - ю зону;  $\psi_{ki}$  – обобщенный угловой коэффициент с  $k$  - й зоны на  $i$  - ю зону;  $\Psi_{ki}$  – разрешающий угловой коэффициент с  $k$  - й зоны на  $i$  - ю зону;  $\varepsilon_i$  – степень черноты  $i$  - й зоны;  $A_i$  – поглощательная способность  $i$  - й зоны;  $R_i$  – отражательная способность  $i$  - й зоны;  $\tau$  – время расчета;  $h_{ki}$ ,  $h_i^{\circ}$  – коэффициенты конвективного обмена;  $\bar{q} = qL_0N_0/N_0$  – относительная плотность падающего теплового потока;  $\Theta = (T_w - T_{\text{рз}})/(T_w - T_{\text{рз}}^0)$  – безразмерная температура в рабочей (обслуживаемой) зоне;  $T_{\text{рз}}^0$  – нормативное значение температуры в рабочей (обслуживаемой) зоне;  $T_w$  – температура пола;  $\bar{N}$ ,  $\bar{L}$ ,  $\bar{H}$  – безразмерные значения мощности, расстояния между нагревателями и высоты подвеса электрических нагревателей;  $\overline{\Delta N}$ ,  $\overline{\Delta L}$ ,  $\overline{\Delta H}$  – относительное изменение безразмерных параметров;  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$  – коэффициенты регрессии.

РТО – радиационный теплообмен; КЗМ – классический зональный метод; РЗМ – резольвентный зональный метод; ИКИ – инфракрасный излучатель;

эфф – эффективный; пад – падающий; рез – результирующий; отр – отраженный; соб – собственный; г – газ; дс – диатермичная среда; ос – ослабляющая среда; баз – базовый; оп – облучаемая поверхность.

---

Солнышкова Юлия Сергеевна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ  
РАДИАЦИОННОГО ОТОПЛЕНИЯ  
ЗДАНИЙ С ЦЕЛЬЮ СБЕРЕЖЕНИЯ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ**

**АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Подписано в печать \_\_\_\_ .02.2012. Формат 50X84 1/16

Печать плоская. Усл. печ. л. 1,10.

Тираж 100 экз. Заказ №\_\_.

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный  
энергетический университет имени В.И. Ленина»

153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ.