

На правах рукописи



Ермолаев Антон Николаевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ  
СИСТЕМ ГАЗОВОГО ИНФРАКРАСНОГО ОБОГРЕВА  
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Пенза – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тюменский индустриальный университет».

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

Официальные оппоненты: **Бодров Михаил Валерьевич**,  
доктор технических наук, ФГБОУ ВО  
«Нижегородский государственный архитектурно-  
строительный университет», профессор кафедры  
отопления и вентиляции

**Нагорнова Татьяна Александровна**,  
кандидат технических наук, ФГАОУ ВО  
«Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет», доцент научно-  
образовательного центра И. Н. Бутакова

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Томский государственный  
архитектурно-строительный университет»

Защита состоится «18» мая 2018 года в 13.30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.184.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства» по адресу: 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28, 1 корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства» и на сайте <http://dissovet.pguas.ru>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Учёный секретарь  
диссертационного  
совета

Бикунова Марина Викторовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** 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 нормативно-правовых актов, направленных на повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов и, как результат, на устойчивый рост экономики и улучшение качества жизни населения страны.

В последние десятилетия в России для экономии энергетических ресурсов при обогреве производственных зданий как альтернативу конвективному обогреву применяют системы газового лучистого отопления (ГЛО) на базе газовых горелок инфракрасного излучения (ГГИИ).

Несмотря на высокое качество типовых моделей ГГИИ, их главным недостатком 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 (КПД) 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.

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 эксплуатационным затратам и 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. И. Богомолов, А. К. Родин, О. Н. Брюханов, А. М. Левин, А. Мачкаши, Л. Банхиди, А. Миссенар, А. Н. Сканави, Е. О. Шилькрот, М. Б. Равич и др., посвященные

конструктивным особенностям излучателей и возможности их применения для обогрева крупногабаритных помещений. Дополнительно, 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.

**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.

Для достижения заданной цели определены следующие **задачи исследования:**

- выполнить исследование современного состояния систем ГЛО;
- разработать новые эффективные технические решения, направленные на рекуперацию тепла продуктов сгорания и снижение тепловых потерь конструкцией современного высокотемпературного газового инфракрасного излучателя;
- провести экспериментальные исследования работы ГГИИ на базе производственных зданий;
- разработать многопараметрическую модель производственного помещения, обогреваемого высокотемпературными ГГИИ, с последующим численным исследованием и верификацией;
- 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;
- предложить методику проектирования высокотемпературных ГГИИ.

**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.** Предложены технические решения излучателей: с теплоизоляцией наружной поверхности конструкции и с водяным охлаждением рефлектора, применимые для обогрева крупногабаритных помещений. Установлена 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 аппаратуры; конструировании экспериментального 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 применением предложенной методики проектирования высокотемпературных ГГИИ проведена реконструкция системы ГЛО, 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.

Результаты научно-исследовательской работы внедрены компанией АО «Сибшванк»: методика проектирования высокотемпературных ГГИИ

используется при проектировании систем ГЛО; разработанные 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.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы докладывались на региональных, российских и международных конференциях, форумах и семинарах в городах: Тюмень, Ульяновск, Казань, Томск в период 2013 – 2017 гг.

**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.

**Во введении** обоснована актуальность теоретических и экспериментальных исследований. Сформулированы цель и задачи исследования, основные положения, выносимые на защиту, дана оценка научной и практической значимости работы, приведены сведения об апробации работы.

**В первой главе** выполнен обзор научных исследований, посвященных развитию систем ГЛО, представлены и проанализированы существующие конструктивные схемы ГГИИ типовых моделей и состояние практики их проектирования для обогрева производственных зданий.

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 газовой 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.

По результатам анализа научных исследований и современного состояния систем ГЛО сделан общий вывод: 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.

Во второй главе с помощью записи и решения уравнений теплового баланса определена эффективность работы современной высокотемпературной ГГИИ типовой модели и предлагаемых автором технических решений: с теплоизоляцией наружной поверхности конструкции (изолированная модель) и с водяным охлаждением рефлектора (усовершенствованная модель). Схемы движения тепловых потоков при работе высокотемпературного излучателя в трех конструктивных исполнениях представлены на рисунке 1.

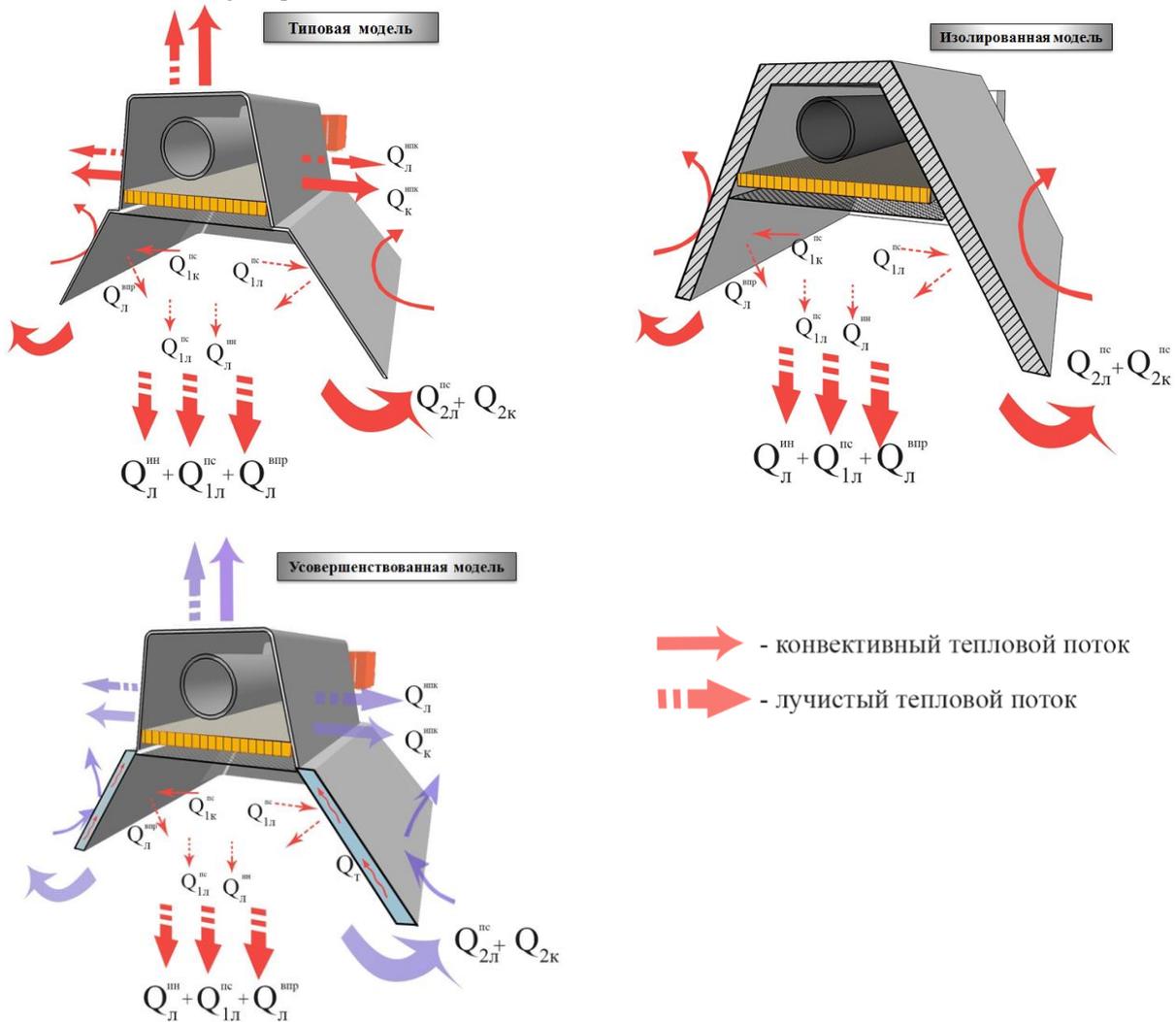


Рисунок 1 – Схемы движения тепловых потоков при работе высокотемпературного излучателя трех конструктивных решений

Уравнение теплового баланса типовой модели:

$$Q_{л}^{ин} + Q_{1л}^{nc} + Q_{1к}^{nc} + Q_{л}^{впр} = Q_{сиг} - Q_{2л}^{nc} + Q_{2к}^{nc} + Q_{л}^{инк} + Q_{к}^{инк} \quad (1)$$

где  $Q_{сиг}$  – общее количество теплоты, которое вырабатывает конструкция современной ГГИИ типовой модели в единицу времени, Вт;  $Q_{л}^{ин}$  – лучистое тепло от излучающего насадка, Вт;  $Q_{1л}^{nc}$  – лучистое тепло от продуктов сгорания

в области, ограниченной рефлектором, Вт;  $Q_{1\kappa}^{nc}$  – конвективное тепло от продуктов сгорания в области, ограниченной рефлектором, Вт;  $Q_{\lambda}^{enp}$  – лучистое тепло от внутренней поверхности рефлектора, Вт;  $Q_{2\lambda}^{nc}$  – 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;  $Q_{\lambda}^{m\kappa}$  – лучистое тепло от наружной поверхности конструкции горелки, Вт;  $Q_{\kappa}^{m\kappa}$  – конвективное тепло от наружной поверхности конструкции горелки, Вт.

Уравнение (1) 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  $Q_n$ ).

Количество располагаемой теплоты определяется исходя из тепловой мощности излучателя:

$$Q_{\text{диз}} = Q_n \cdot B_p \quad (2)$$

где  $Q_n$  – низшая теплота сгорания газа, Дж/м<sup>3</sup>;  $B_p$  – расход газа, м<sup>3</sup>/с.

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

$$Q_n = I_2^{nc} \cdot B_p + \varepsilon_{\kappa} \cdot C_0 \cdot F_{m\kappa} \cdot \left[ \left( \frac{T_{m\kappa}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\kappa}}{100} \right)^4 \right] + \alpha_{m\kappa} \cdot F_{m\kappa} \cdot (T_{m\kappa} - T_o) \quad (3)$$

где  $I_2^{nc}$  – удельная энтальпия продуктов сгорания на 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива при их температуре на выходе из области, ограниченной рефлектором, и коэффициенте избытка воздуха, равным 1,05, Дж/м<sup>3</sup>;  $\varepsilon_{\kappa}$  – степень черноты конструкции излучателя;  $C_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела (5,67), Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $F_{m\kappa}$  – площадь наружной поверхности конструкции излучателя, м<sup>2</sup>;  $T_{m\kappa}$  – температура наружной поверхности конструкции излучателя, К;  $T_{\kappa}$  – средняя температура конструкций, расположенных в непосредственной близости от излучателя, К;  $\alpha_{m\kappa}$  – коэффициент теплообмена конвекцией между наружной поверхностью конструкции излучателя и воздухом, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $T_o$  – температура окружающего воздуха, К.

Коэффициент полезного действия высокотемпературной ГГИИ типовой модели в процентах определен по зависимости:

$$\eta = \frac{Q_1}{Q_p} \cdot 100 \quad (4)$$

Расчет изолированной модели выполняется согласно расчету типовой модели с уточнением данных по толщине тепловой изоляции по заданной температуре наружной поверхности согласно методике, представленной в

приложении «В» СП 61.13330.2012. Толщина тепловой изоляции принята равной 50 мм.

В основу усовершенствованной модели поставлена идея создания низкочастотной системы рекуперации тепла, которая частично задействует тепло уходящих газов. 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 20 миллиметров. В полученную ёмкость поступает теплоноситель, где разогревается до температуры, не превышающей температуру кипения, и в дальнейшем может быть использован для отопления, горячего водоснабжения и вентиляции. Техническое решение защищено патентом на полезную модель RU 167233.

Уравнение теплового баланса усовершенствованной модели:

$$Q_{л}^{ин} + Q_{1л}^{nc} + Q_{1к}^{nc} + Q_{л}^{gnp} + Q_m = Q_{гиз}^M - Q_{2л}^{nc} + Q_{2к}^{nc} + Q_{л}^{hпк} + Q_{к}^{hпк} \quad (5)$$

где  $Q_{гиз}^M$  – общее количество теплоты, которое вырабатывает усовершенствованная конструкция ГГИИ в единицу времени, Вт;  $Q_m$  – мощность теплового потока теплоносителя, проходящего сквозь модернизированный рефлектор, Вт.

Расчет располагаемой теплоты выполнен согласно формулы (2). Учитывая, что в сравнении с типовой моделью изменится температура рефлектора, расчет потерь тепла выполнен согласно выражения:

$$Q_n = I_2^{nc} \cdot B_p + \varepsilon_{к} \cdot C_0 \cdot F_p \cdot \left[ \left( \frac{T_p}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{к}}{100} \right)^4 \right] + \alpha_p \cdot F_p \cdot (T_p - T_o) + \varepsilon_{к} \cdot C_0 \cdot F_{кк} \cdot \left[ \left( \frac{T_{кк}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{к}}{100} \right)^4 \right] + \alpha_{кк} \cdot F_{кк} \cdot (T_{кк} - T_o) \quad (6)$$

Коэффициент полезного действия усовершенствованной модели в процентах составит:

$$\eta = \frac{Q_1^M + Q_m}{Q_p} \cdot 100 \quad (7)$$

Расчет эффективности трех конструктивных решений выполнен для тепловых мощностей 5, 10, 15, 20, 30, 40 кВт. Результаты расчета представлены на рисунке 2.

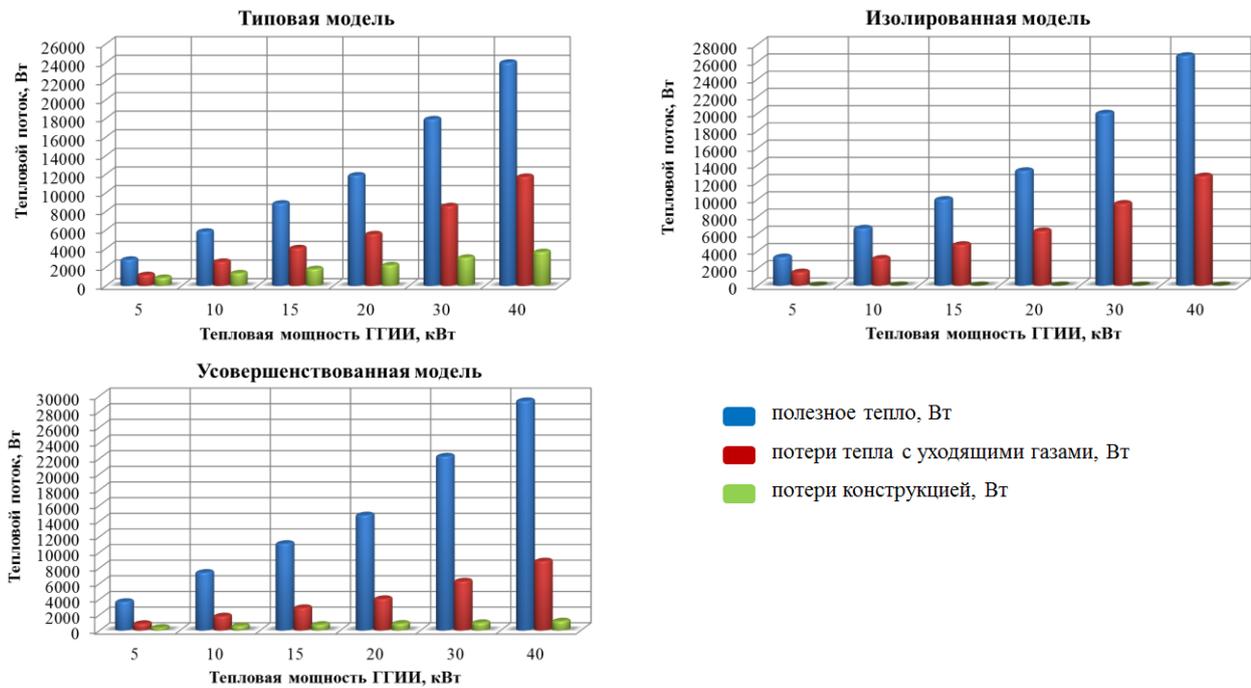


Рисунок 2 – Тепловой поток (Вт) при работе ГГИИ трех конструктивных решений

Установлено, что объем полезного тепла типовой модели ГГИИ составил 58-61 % от тепловой мощности, а это значит, что не более 61 % выработанного тепла передается излучением на обогрев рабочей зоны помещения, туда, где это необходимо. Остальная доля приходится на потери энергии с уходящими газами (24-30 %) и конструкцией (9-18 %). 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. 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 тепла продуктов сгорания.

**В третьей главе** представлены результаты разработки конечно-элементной многопараметрической модели системы газового инфракрасного обогрева, содержащей источник излучения и поверхности облучения. Рассмотрен теплоперенос в вентилируемом помещении с радиационными источниками нагрева путем имитационного моделирования процессов горения в ГГИИ и турбулентного течения газовой среды с применением модели дискретных ординат (Discrete Ordinates «DO») для расчета лучистого теплообмена. В качестве инструмента исследования применена система конечно-элементного анализа Ansys Multiphysics.

Для подбора математической модели турбулентности, верификации и оценки достоверности результатов имитационного моделирования ГГИИ моделировался разработанный автором действующий экспериментальный стенд. Адаптационное исследование на предмет подбора математической модели турбулентности выполнено на примере типовой модели 5 кВт

излучателя, в ходе которого исследовались три варианта (рисунок 3, а): ламинарное течение, турбулентное течение с применением k-ε и k-ω моделей.

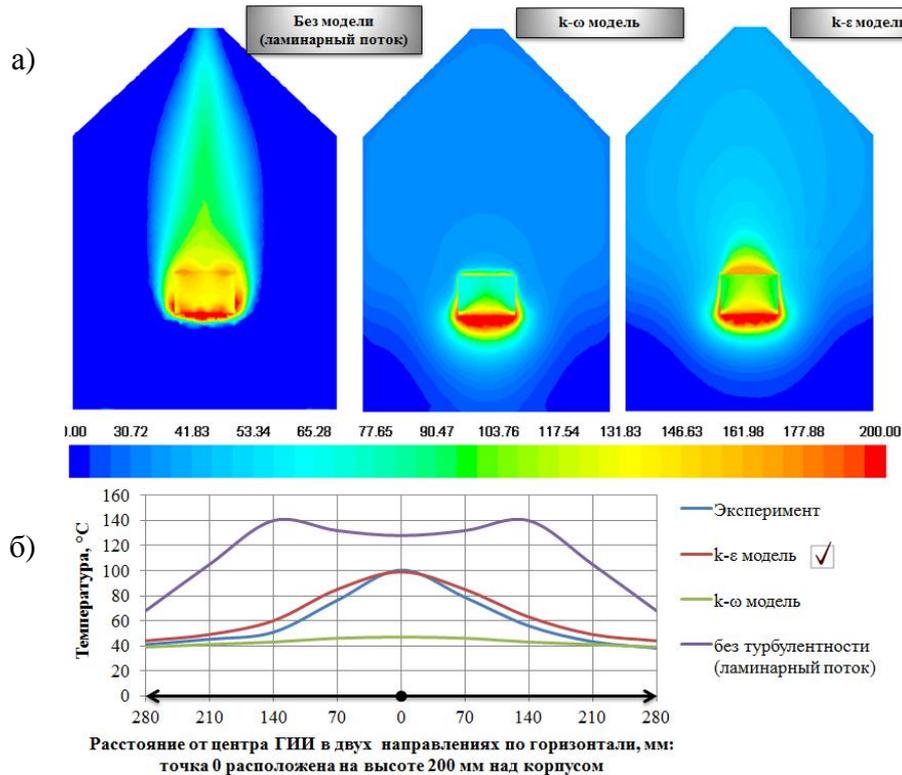


Рисунок 3 – Температурные поля ( $^{\circ}\text{C}$ ) при адапционном исследовании (а) и сопоставление результатов (б)

k-ε и k-ω – это высокопроизводительные математические модели турбулентности. k-ε-модель достаточно точно описывает свободные турбулентные течения, в которых непосредственное влияние ограждающих поверхностей отсутствует. k-ω-модель хорошо описывает пристеночные течения, однако чрезвычайно чувствительна к граничным условиям во входном сечении, что усложняет её настройку при расчете свободных турбулентных течений.

Согласование результатов, полученных с применением стандартной k-ε математической модели турбулентности (рисунок 3, б), и экспериментальных данных свидетельствует о наличии свободной турбулентности над корпусом ГИИ.

Граничные условия решения задачи определены условиями нагрева и вентиляции помещения: топливо – метан (100%); окислитель – кислород воздуха; расход топлива для ГИИ мощностью 5 кВт –  $0,5 \text{ м}^3/\text{час}$ ; теоретический объем воздуха для полного сгорания –  $9,52 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ; коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  – 1,05; давление газа перед соплом – 1270 Па. Для элементов конструкции ГИИ задан материал «Сталь марки 12X18H10T», с толщиной листа 0,002 м, коэффициентом теплопроводности и удельной теплоемкостью, представленными в полиномиальной зависимости от температуры:  $\lambda = 0,018 \cdot T + 9, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;  $c = -2 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 0,45 \cdot T + 324,5 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ . Степень черноты поверхности полированных стальных деталей излучателя принята равной  $\varepsilon = 0,002$ . Степень черноты внутренних ограждающих поверхностей

принята равной  $\varepsilon = 0,8$ . Теплофизические свойства области расчета соответствуют свойствам воздуха. При определении теплофизических свойств материалов ограждений и воздушной среды использовались стандартные библиотеки Ansys Fluent.

Наряду с типовой моделью ГГИИ мощностью 5 кВт рассмотрены изолированная модель мощностью 10 кВт и усовершенствованная модель мощностью 5 кВт (рисунок 4, а).

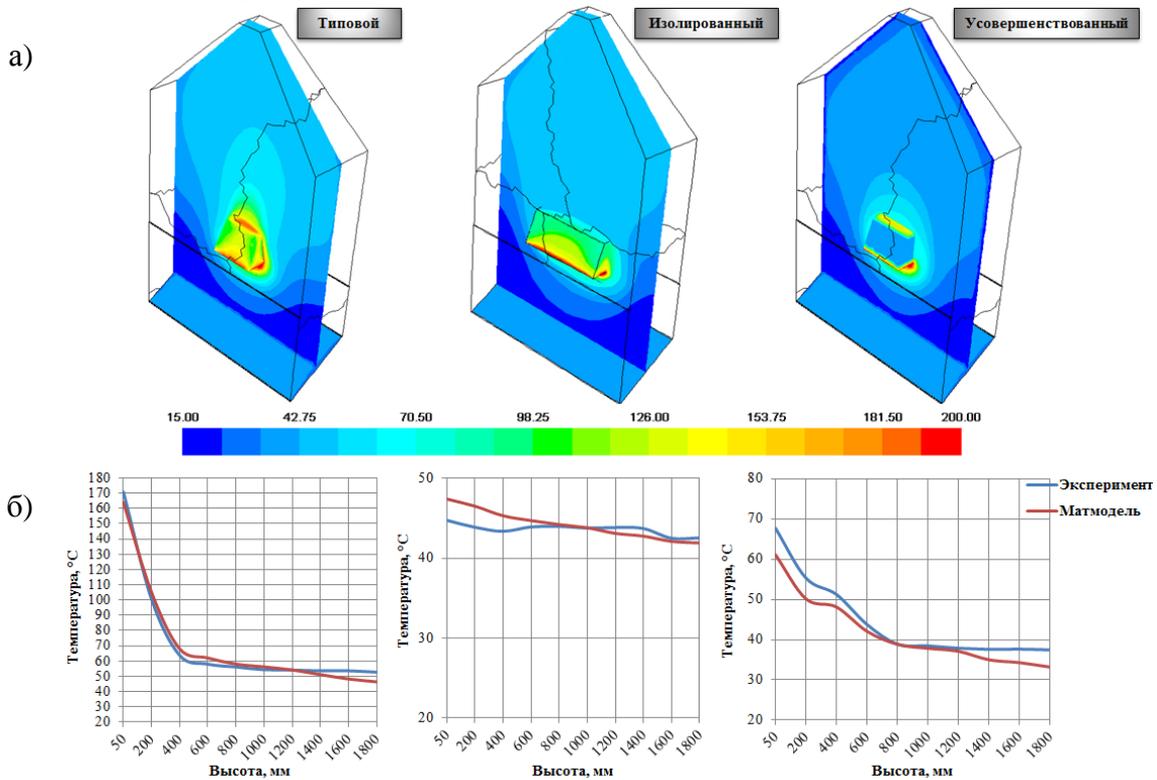


Рисунок 4 – Температурные поля (°C) типовой, изолированной и усовершенствованной моделей ГГИИ (а) и сопоставление с результатами стендовых испытаний (б)

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 4, б).

Построенная параметрическая модель включает в себя большое число варьирующих величин: конструктивное исполнение ГГИИ, их взаимное расположение в объеме здания, материалы всех элементов системы, оптические свойства среды. Поэтому для разработки рекомендаций по использованию предложенной параметрической модели на практике произведено имитационное моделирование среды внутри быстровозводимого производственного здания (помещения) с габаритами 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. Теплообмен цеха с окружающей средой ограничен четырьмя наружными стенами и световыми проемами, на которых заданы условия теплообмена 3-го рода. Температура внешней среды принималась по температуре самой холодной пятидневки для г. Тюмени – минус 35 °С. Материал стен – сэндвич-панели с утеплителем из пенополиуретана ( $\lambda = 0,019$  Вт/(м·К),  $c = 1,47$  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  $0,42$  м<sup>2</sup>·К/Вт. Воздухообмен в цеху обеспечивается работой общеобменной вентиляции, предусматривающей подачу воздуха в нижней части помещения, а забор воздуха – в верхней зоне.

По итогам моделирования (рисунок 5) разница температур между рабочей зоной и потолочным пространством составляла от 17 °С (при размещении усовершенствованной конструкции ГГИИ на высоте 4 м) до 65,2°С (при размещении типовой модели ГГИИ на высоте 10 м).

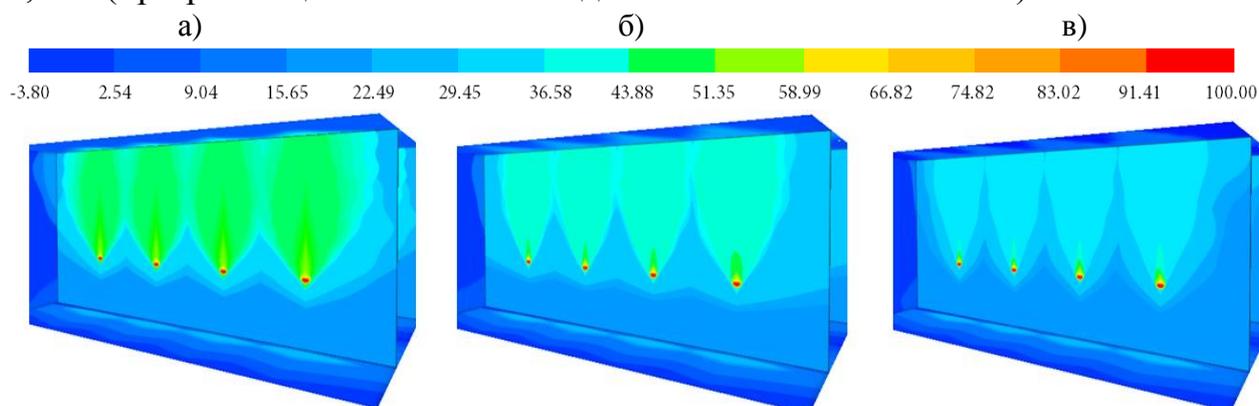


Рисунок 5 – Температурные поля в объеме и на поверхностях производственного помещения (°С) при размещении на высоте 4 метра 44 штук ГГИИ мощностью 5 кВт: а – типовая модель; б – изолированная модель; в – усовершенствованная модель

Серия численных расчетов установила, что для всех рассмотренных вариантов наблюдается естественный процесс температурной стратификации газового объема в цеху (рисунок 5) по причине разности плотностей холодного и теплого воздуха. При эксплуатации ГГИИ в помещении с высокими потолками дымовые газы и выработанное конвективное тепло дополнительно нагревают воздух между ГГИИ и кровлей помещения, где этого совершенно не требуется. Применение теплоизоляционных материалов и водяного охлаждения рефлектора понижают среднюю температуру в верхней зоне отапливаемого помещения (рисунок 5, б и в). Рефлектор усовершенствованной ГГИИ является наиболее эффективным средством рекуперации тепла из верхней зоны цеха (рисунок 5, в), т.к. находится в области максимальных температур, что приводит к высоким значениям коэффициентов теплоотдачи и температурного напора при теплопередаче через его внутреннюю стенку.

Для проверки выполнения условий теплового комфорта рассчитывалось распределение интенсивности теплового облучения рабочей зоны (1 метр над уровнем пола) в зависимости от исследуемых параметров (рисунок 6).

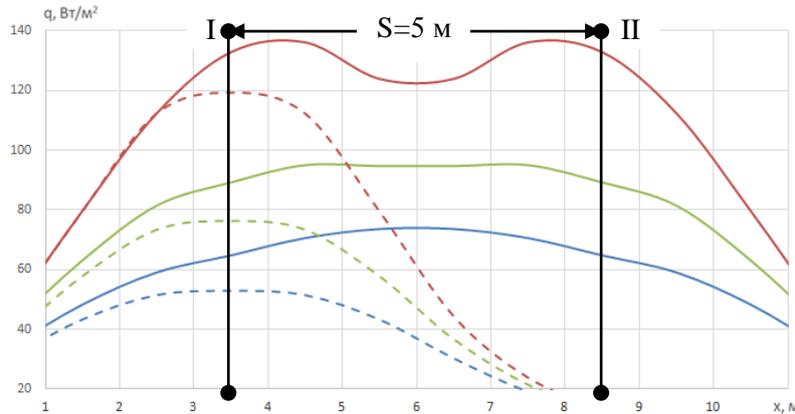


Рисунок 6 – Распределение плотности теплового потока в рабочей зоне (Вт/м<sup>2</sup>) при однорядном (пунктирная линия) и многорядном (сплошная линия) размещении ГГИИ мощностью 5 кВт на высоте: ■ – 4 м, ■ – 5 м, ■ – 6 м; I, II – места установки 1-го и 2-го излучателей; S – шаг расстановки излучателей, м.

Согласно СП 60.13330.2012 максимальная интенсивность инфракрасного облучения рабочего места не должна превышать 150 Вт/м<sup>2</sup>. Для исследованных параметров этому условию соответствуют следующие 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.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований. В первой серии экспериментальных исследований был проведен ряд испытаний излучателей на специальном стенде, сконструированном в реальных условиях производственного помещения. Цель стендовых испытаний заключалась в получении зависимостей, описывающих формируемый в зоне над высокотемпературными ГГИИ тепловой режим от времени, тепловой мощности и конструктивного решения излучателя.

Объектом исследования выбраны высокотемпературные ГГИИ типовой модели (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.

Порядок проведения стендовых испытаний следующий. Поочередно излучатель каждой тепловой мощности 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 ГГИИ проводились по 40 минут со снятием показаний температур каждые 40 секунд.

Схема стандовых испытаний на примере типовой модели ГГИИ мощностью 5 кВт с указанием мест установки датчиков представлена на рисунке 7.

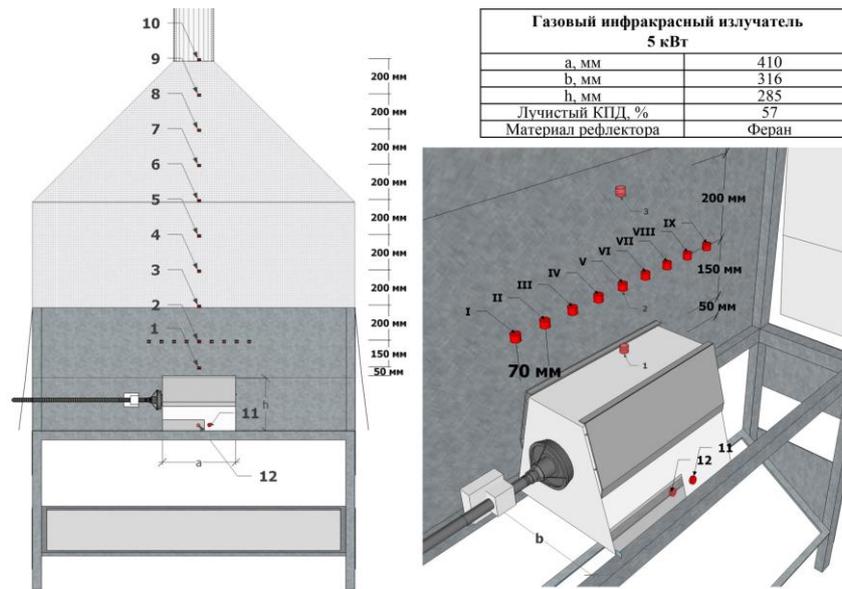


Рисунок 7 – Схема стандовых испытаний 5 кВт ГГИИ типовой модели

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. Установившийся тепловой режим наблюдается в промежутке с 20-й до 40-й минуты. Путем усреднения за указанный период времени значений температур и математической обработки результатов были получены зависимости, описывающие распределение температур по высоте (рисунок 8) и горизонтали (рисунок 9) над ГГИИ от тепловой мощности и модели.

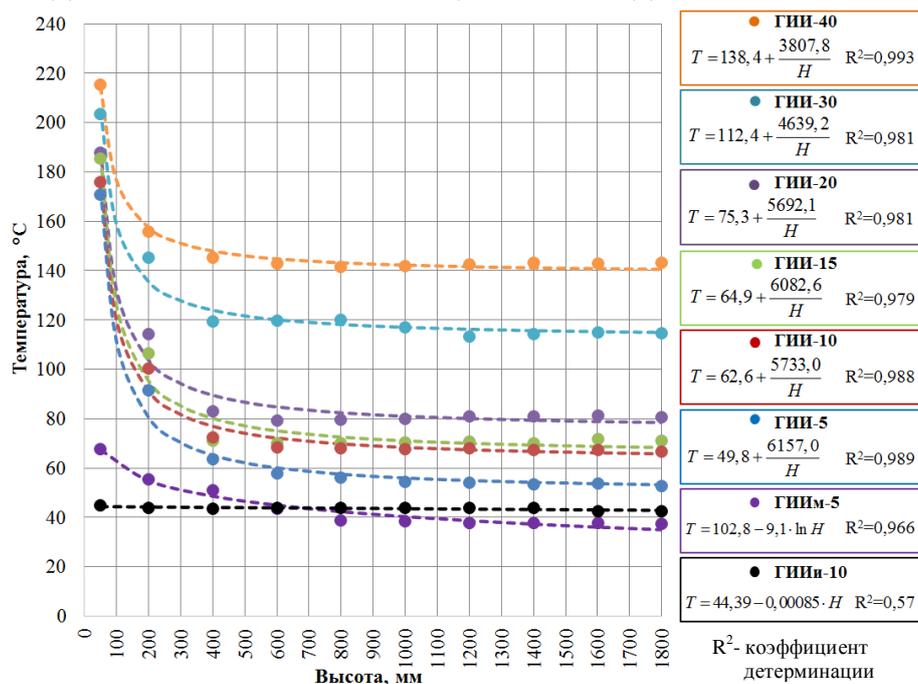


Рисунок 8 – Распределение температур по высоте в центре над излучателями типовой (ГГИИ), изолированной (ГГИИи) и усовершенствованной (ГГИИм) моделей: точки – эмпирические данные; пунктирные линии – регрессионные зависимости

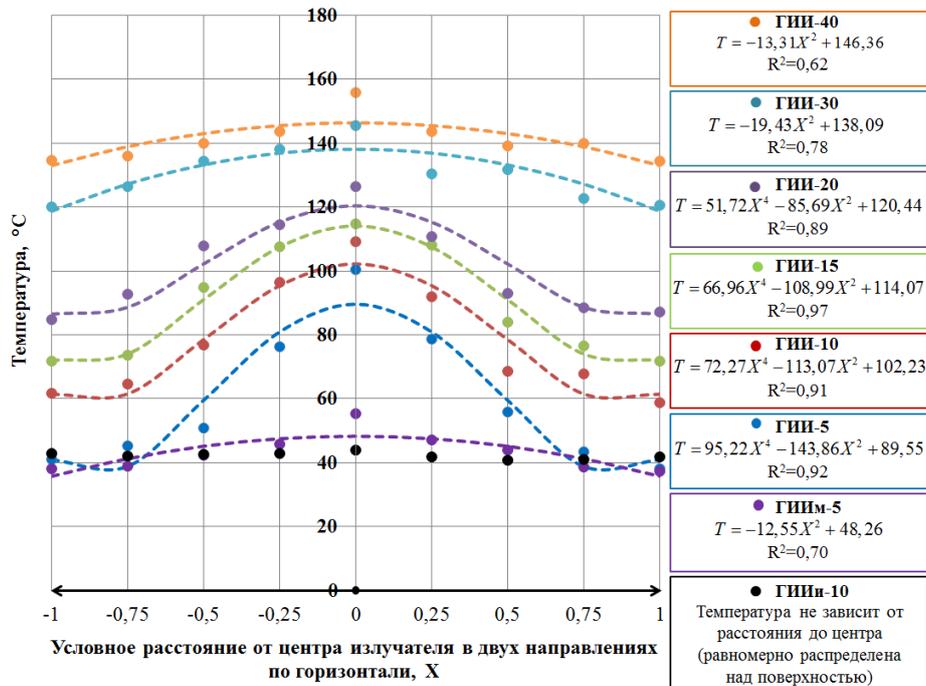


Рисунок 9 – Распределение температур по горизонтали над излучателями типовой (ГИИ), изолированной (ГИИи) и усовершенствованной (ГИИм) моделей: точки – эмпирические данные; пунктирные линии – регрессионные зависимости

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 (рисунок 9). 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.

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод о том, что характерной особенностью излучателей типовой модели является значительное тепловое излучение в верхнюю зону при одновременном протекании процессов конвективного теплообмена в турбулентной среде, что ведет к перегреву зоны выше их установки. Результаты испытаний ГИИи и ГИИм в обоих случаях указывают на снижение теплоотдачи в зону выше их установки, а это позволяет заключить, что сконструированные решения позволяют решить проблему перегрева верхней зоны помещения и, как следствие, обеспечить оптимальный тепловой режим во всем объеме помещения за счет снижения потерь конструкцией излучателя и вторичного использования энергии.

Во второй серии экспериментальных исследований автором выполнено исследование работы систем ГЛО на базе 4-х действующих производственных помещений. Цель исследований заключалась в определении эффективности работы систем ГЛО и получении количественных данных, описывающих тепловой режим зданий.

На базе производственных помещений выполнен ряд исследований: сбор и анализ исходных данных, исследование фактического состояния параметров микроклимата, измерение температуры поверхностей ограждающих

конструкций, тепловизионное обследование состояния ограждающих конструкций в условиях работы систем ГЛЮ, анализ работы систем автоматизации.

Результаты тепловизионного обследования на примере одного из производственных помещений представлены на рисунке 10.

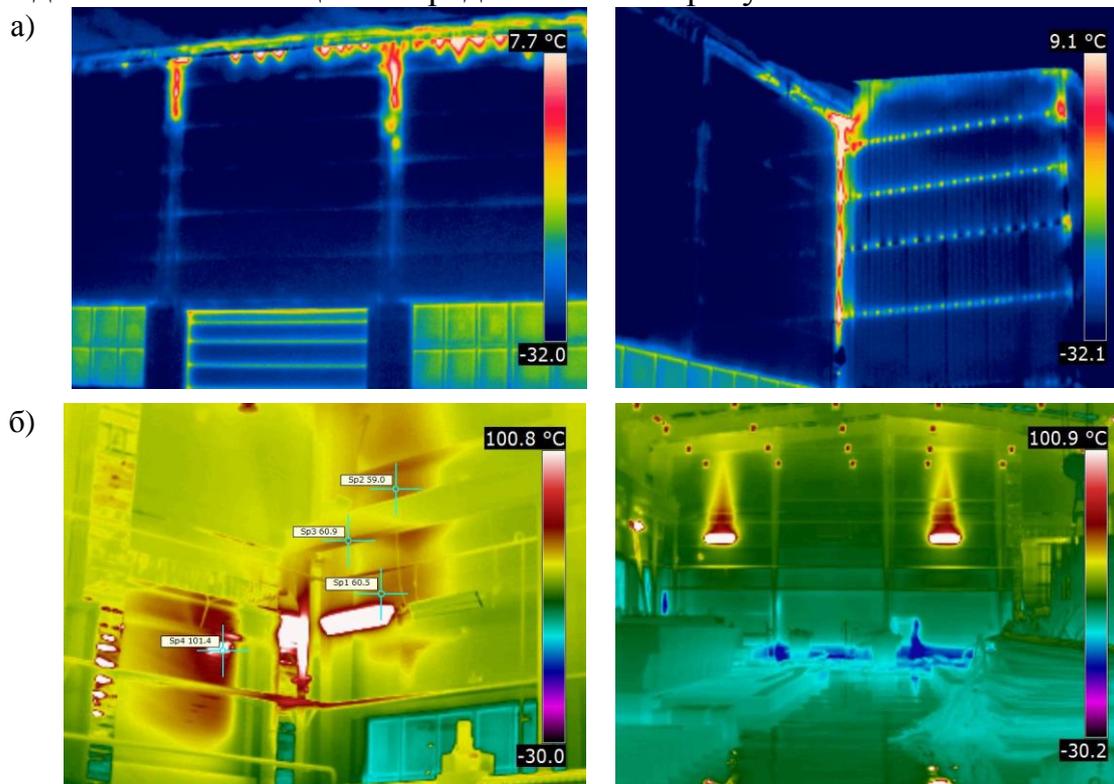


Рисунок 10 – Температурные поля (°C): а – наружных поверхностей ограждающих конструкций; б – внутренних поверхностей ограждающих конструкций

Анализ термограмм (рисунок 10, а) 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.

Анализ температурных полей внутренних поверхностей ограждающих конструкций (рисунок 10, б) 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.

Установлено, что в большинстве производственных зданий суммарная мощность всех ГГИИ превышает требуемую тепловую нагрузку, что говорит о завышении мощности и, как следствие, стоимости систем ГЛЮ в этих случаях. Некорректное размещение ГИИ в объеме помещения наблюдается многократно. Систематичность таких инженерных ошибок свидетельствует о необходимости пересмотра и корректировки существующих методик проектирования систем ГЛЮ.

В пятой главе представлена методика проектирования высокотемпературных ГГИИ (рисунок 11) и её апробация с расчетом экономической эффективности. Доказана экономическая эффективность излучателя изолированной модели в сравнении с типовой моделью.

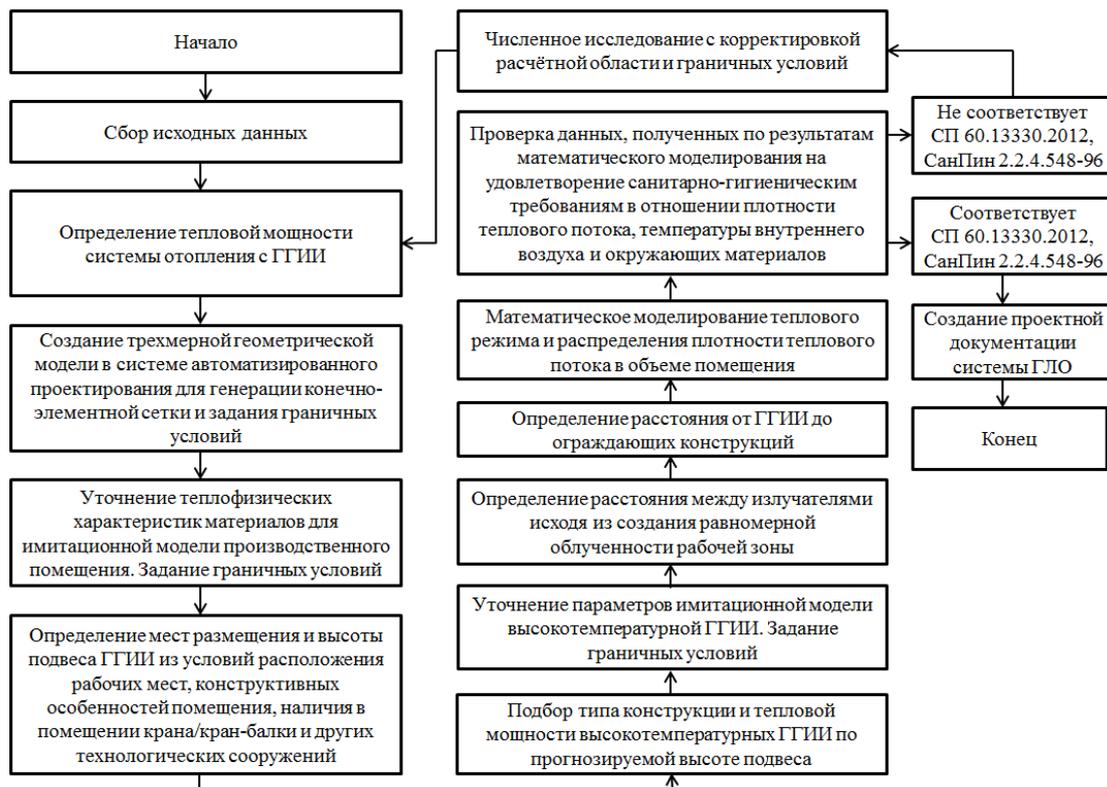


Рисунок 11 – Методика проектирования высокотемпературных ГГИИ

Апробация предложенной методики проектирования высокотемпературных ГГИИ проведена при реконструкции системы ГЛЮ производственного помещения территориальной фирмы «Мостоотряд-36» АО «Мостострой-11». На базе указанного производственного помещения ранее был проведен ряд экспериментальных исследований, 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 ГЛЮ и эксплуатационных расходов.

Для снижения энергозатрат на обеспечение теплового режима производственного цеха было произведено повторное проектирование высокотемпературных ГГИИ согласно разработанной методике. В результате в цеху установлена оптимальная тепловая мощность системы ГЛЮ – 600 кВт (ранее – 800 кВт), в том числе 30 штук (ранее – 40 шт.) 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 горелками составил 7 метров.

Проведено экономическое сравнение капитальных и эксплуатационных затрат на систему ГЛЮ с высокотемпературными ГГИИ мощностью 20 кВт в количестве 40 и 30 штук. Результаты расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1 Экономический эффект, связанный с уменьшением количества ГИИ

Наименование расчетного параметра	Результат расчета	
Количество ГИИ, шт.	40	30
Тепловая мощность ГИИ, кВт	20	20
Капитальные затраты		
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 затраты		
Максимально-часовой расход тепла на отопление, Гкал/час	0,69	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 газа), м <sup>3</sup> /год	206 311,67	154 733,75
Максимальный часовой расход природного газа, м <sup>3</sup> /час	91,66	68,74
Годовой расход электроэнергии на систему отопления с высокотемпературными ГГИИ, кВт	3 094,68	2 321,01
Стоимость 1000 м <sup>3</sup> 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.	1 499 726	

Сравнительная экономическая оценка показала, что научно-обоснованный метод проектирования систем ГЛЮ 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.

Эффективность газового инфракрасного обогрева производственного помещения повышается за счет применения излучателей изолированной модели, результаты исследований которых показали, что за счет увеличения полезной доли до 10 % температура в рабочей зоне помещения на 1,5-2 °С выше, чем при работе излучателей типовой модели той же суммарной тепловой мощности. Следовательно, за счет применения излучателей изолированной модели тепловая мощность системы ГЛЮ может быть уменьшена до 10 %, что позволит дополнительно снизить капитальные и эксплуатационные затраты.

Техническое решение внедрено компанией АО «Сибшванк», а именно произведена теплоизоляция установленных в производственном помещении высокотемпературных ГГИИ, а их суммарная тепловая мощность уменьшена до 140 кВт (ранее – 160 кВт), в том числе 14 шт. (ранее – 16 шт.) высокотемпературных излучателей тепловой мощностью по 10 кВт каждый. Оценка экономической эффективности показала, что система ГЛЮ с

применением излучателей изолированной модели имеет наименьшие капитальные и эксплуатационные затраты в сравнении с типовой моделью. Экономический эффект составил 96,481 тыс.руб.

**В приложениях** приведены результаты численных и экспериментальных исследований, акты об использовании результатов исследований, патент на полезную модель.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. На основе анализа современного состояния систем ГЛЮ 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 ГЛЮ 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 ГЛЮ при различных параметрах.

6. На основе натурального 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.

### ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

*Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК*

1. **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>.

2. **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>.

3. **Ермолаев, А. Н.** Создание низкочатратной 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.

4. **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.

5. **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>.

*Работы, проиндексированные в Scopus*

6. **Ermolaev, A. N.** Finite element analysis of radiant heating systems based on gas-fired infrared heat emitters / A. N. Ermolaev, S. A. Khaustov // MATEC Web of Conferences. – 2017. – vol. 110. – URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711001024>.

7. **Ermolaev, A. N.** Research of thermal conditions over high-temperature gas-fired infrared emitters / A. N. Ermolaev, S. A. Khaustov // MATEC Web of Conferences. – 2017. – vol. 110. – URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711001038>.

*Публикации в сборниках трудов конференций и прочих научных журналах*

8. **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.

9. **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.

10. **Ермолаев, А. Н.** 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.

11. **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.

12. **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.

*Патенты*

1. Пат. 167233 Россия. МПК F23D 14/12 (2006.01). Газовый инфракрасный излучатель с модернизированным рефлектором / Н. И. Куриленко, Л. Ю. Михайлова, **А. Н. Ермолаев**, В. А. Калашников; заяв. 05.11.2015; опубл. 27.12.2016. – 7 с.: ил.

Ермолаев Антон Николаевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ  
СИСТЕМ ГАЗОВОГО ИНФРАКРАСНОГО ОБОГРЕВА  
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать \_\_.\_\_.2018. Формат 60x90 1/16. Усл. печ. л. 1,5.  
Тираж 100 экз. Заказ № \_\_\_\_.

Библиотечно-издательский комплекс  
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Тюменский индустриальный университет»  
625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

Типография библиотечно-издательского комплекса.  
625039, г. Тюмень, ул. Киевская, 52.