

На правах рукописи

НЕФЁДОВА МАРИНА АЛЕКСАНДРОВНА

**ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ
ПРИ РАБОТЕ КОТЛОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

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

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Санкт–Петербургский государственный архитектурно–строительный университет».

Научный руководитель: **Дацюк Тамара Александровна**
доктор технических наук, профессор;

Официальные оппоненты: **Хаванов Павел Александрович**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский Московский
государственный строительный
университет» (НИУ МГСУ) (г. Москва),
профессор кафедры теплогазоснабжения и
вентиляции;

Прохоров Сергей Григорьевич
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный
университет архитектуры и строительства»
(г. Пенза),
доцент кафедры теплогазоснабжения и
вентиляции;

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Саратовский
государственный технический
университет имени Гагарина Ю.А.»**

Защита диссертации состоится «27» декабря 2017 г. в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.223.06 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория 219).

Тел./Факс: (812) 316-58-72; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно–строительный университет» и на сайте <http://dis.spbgasu.ru/users/nefyodova-marina-aleksandrovna>.

Автореферат разослан «8» ноября 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук,
доцент

Виктор Алексеевич Пужкал

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность избранной темы. В настоящее время проводится реформирование теплоэнергетики, внесены поправки в закон «О теплоснабжении» (редакция, действующая с 10 августа 2017 года). Теплоснабжение в РФ продолжает развиваться путём наращивания числа малых отопительных котельных, что экономически эффективно. Например, в течение 2014 года в РФ было введено 6460 новых котельных, из них 80% – котельные малой мощности до 380 кВт для обеспечения объектов отоплением и горячим водоснабжением, что свидетельствует о процессе децентрализации теплоснабжения.

В условиях активного поиска резервов экономии топливно–энергетических ресурсов существенное значение имеют исследования, связанные с котлами малой мощности. Котельные малой мощности, как источник тепловой энергии и горячего водоснабжения (ГВС), находят широкое применение для промышленных предприятий и жилого сектора, а также при реконструкции исторических районов крупных городов. В качестве источника теплоты для систем отопления и ГВС используются котлы малой мощности, работающие на природном газе. Большая часть отечественных котлов мощностью до 30 кВт, используемых для автономного теплоснабжения, оборудованы импортными инжекционными газогорелочными устройствами, долговечность которых ниже, чем у котлоагрегатов.

Эффективность процесса производства теплоты обусловлена также компоновкой котлоагрегатов. При традиционной схеме компоновки котлов в течение большей части отопительного периода мощность отопительных котельных используется не более чем на 50%, а в межотопительный период – на 20–25% (нагрузка ГВС). Для повышения эффективности работы котельной требуется регулирование в широком диапазоне тепловой мощности, как отдельных котлов, так и котельной в целом, что практически невозможно без снижения КПД и увеличения удельного расхода топлива.

Для повышения эффективности производства теплоты в котельных малой мощности успешно используется система каскадного подключения отопительных котлов, которые объединяются в единую систему с программным управлением, что позволяет осуществить плавную регулировку тепловой нагрузки за счет последовательного подключения/отключения котлов с учетом загрузки каждого котла при оптимальном значении КПД.

Для совершенствования технологического процесса производства тепловой энергии и реализации требований импортозамещения для малых котельных, оснащенных отечественными котлами до 30 кВт, необходимо комплексное решение: разработка отечественных взаимозаменяемых газогорелочных устройств и совершенствование тепловых схем котельных. Это позволит повысить эффективность сжигания природного газа (КПД котлов), сократить выбросы вредных веществ в атмосферу, снизить удельный расход газа за счет регулирования тепловой нагрузки при каскадной компоновке котлов.

Обзор существующих отечественных инжекционных газогорелочных устройств (ГГУ), обеспечивающих качественное сжигание газа и необходимую тепловую мощность, показал, что при всем их многообразии, отсутствуют взаимозаменяемые конструкции, которые можно было бы использовать в котлах отечественных производителей.

Эффективность сжигания газа в котлах малой мощности с газогорелочным устройством инжекционного типа, работающем на природном газе низкого давления, зависит от аэродинамического режима приготовления и подачи газозвдушной смеси к огневым отверстиям, физико-химических процессов горения в топках малых размеров при допустимых тепловых режимах.

В связи с отмеченным, разработка отечественных аналогов взаимозаменяемых инжекционных газогорелочных устройств для отопительных котлов малой мощности и более совершенных тепловых схем малых котельных представляется актуальным направлением в современной малой теплоэнергетике.

Степень разработанности темы исследования. Теоретическими и практическими основами работы стали исследования отечественных и зарубежных ученых, которые посвящены проблемам сжигания природного газа низкого давления в газогорелочных устройствах инжекционного типа: Н.Л. Стаскевича, Г.Н. Северинца, Д.Я. Вигдорчика, А.А. Ионина, А.С. Рогозина, Ю.В. Иванова, Б.М. Кривоногова, А.С. Иссерлина, Е.И. Берхмана, Е.Б. Столпнера, Д.К. Коллерова, Д.М. Хзиаляна, Я.А. Кагана, А.Л. Шкаровского, П.А. Хаванова, С.Г. Прохорова, Е.А. Бирюзовой и ряда других.

Цель исследования заключается:

- в разработке конструкции газогорелочного устройства (ГГУ) и обосновании конструктивных особенностей разработанного ГГУ на базе методов численного моделирования;
- в совершенствовании технологического процесса производства теплоты в котлах малой мощности, работающих на газе низкого давления, за счет установки в них разработанной инжекционной газовой горелки.

Задачи исследования:

- проанализировать существующие конструкции отечественных и зарубежных инжекционных газогорелочных устройств, для котлов малой мощности до 30 кВт;
- исследовать работу и выявить недостатки типовой конструкции ГГУ зарубежного образца, устанавливаемой в котлах отечественного производства;
- разработать конструкцию усовершенствованного инжекционного взаимозаменяемого газогорелочного устройства для отечественных котлов малой мощности;
- разработать математическую модель и обосновать на базе метода математического моделирования конструктивные особенности разработанного ГГУ;

- доказать эффективность сжигания газа в топке котла типа «NEVALUX» с разработанным ГГУ методом моделирования процесса горения;
- выполнить сравнительный анализ схем компоновки котельного оборудования и выявить возможные ресурсы энергосбережения;
- исследовать работу котельной малой мощности с каскадной схемой компоновки отечественных котлов с разработанным газогорелочным устройством.

Объект исследования – отопительные газовые котельные малой мощности.

Предмет исследования – инжекционные газовые горелки низкого давления, схемы компоновки котлоагрегатов.

Научная новизна работы в следующем:

- предложена конструкция взаимозаменяемого газогорелочного устройства, отличающегося от импортного аналога меньшим размером, наличием сегментного отвода переменного сечения, схемой расположения огневых отверстий на коллекторе, что позволяет обеспечить равномерный выход газовой смеси и более равномерный факел горения (получен патент на изобретение № 2618137);

- обосновано влияние конструктивных элементов разработанной инжекционной газовой горелки на аэродинамические характеристики и качество сжигания газовой смеси с использованием математического моделирования и экспериментальных исследований;

- экспериментально доказано, что эффективность сжигания газа при установке разработанной инжекционной газовой горелки в отопительные котлы малой мощности при обеспечении условий надежности и безопасности превышает существующий вариант на 3%, получены эмпирические зависимости, характеризующие качество сжигания газа;

- исследована работа котельной с каскадной схемой компоновки котлов отечественного производства с установкой разработанных автором газогорелочных устройств, составлена режимная карта.

Теоретическая значимость работы заключается в обосновании применения разработанной математической модели на базе натурных измерений.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в следующем:

- разработана конструкция взаимозаменяемого инжекционного газогорелочного устройства, работающего на природном газе низкого давления, при установке которого в котлы отечественного производства малой мощности эффективность сжигания газа увеличивается на 3%;

- разработана и исследована тепловая схема котельной малой мощности с каскадной схемой регулирования котлоагрегатов с разработанным газогорелочным устройством;

- результаты диссертационных исследований вошли в курс дисциплин, изучаемых студентами при обучении по направлениям «Теплоэнергетика и

теплотехника», «Строительство» профиль «Теплогазоснабжение и вентиляция» в Санкт–Петербургском государственном архитектурно–строительном университете.

Методология и методы исследования. Методологической основой диссертационного исследования являются основные положения теории аэродинамики и математического моделирования газоздушных потоков. Применение ПО «ANSYS Fluent», «STAR–CCM+» (лицензионное соглашение № 60734258). Использование методов математической статистики, теории численного моделирования, отечественных стандартов.

Положения, выносимые на защиту:

- конструкция инжекционного газогорелочного устройства для сжигания газа низкого давления;
- обоснование на базе метода математического моделирования предложенных конструктивных особенностей разработанного ГГУ;
- математическая модель для расчета процесса горения газоздушной смеси при установке разработанного ГГУ в отечественные котлы малой мощности;
- количественные характеристики качества сжигания газа в котле типа «NEVALUX» с использованием разработанного ГГУ по результатам экспериментальных исследований;
- тепловая схема каскадной компоновки отечественного котельного оборудования с установкой разработанного ГГУ, режимная карта котлоагрегата, составленная по результатам натурных испытаний;
- обоснование применения разработанной математической модели на базе натурных измерений.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 05.23.03 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение» по п. 2 «Технологические вопросы теплогазоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха».

Степень достоверности и апробация результатов. Результаты диссертационной работы докладывались: на III Международном конгрессе молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» с участием студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов, СПбГАСУ (2014); на 70–й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета, СПбГАСУ (2014); 68–ой международной научно–практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, СПбГАСУ (2015); на 71–й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета, СПбГАСУ (2015); 69–ой международной научно–практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» СПбГАСУ (2016).

Публикации. По теме диссертационной работы было опубликовано 12 печатных работ, из которых 3 в рецензируемых журналах ВАК. Получен патент на изобретение «Инжекционная горелка низкого давления» № 2618137, Рос.

Федерация; МПК F23D 14/10 (2006.01). Грант СПбГАСУ «Разработка методов работы и повышение энергоэффективности газовых котельных малой мощности». Результаты диссертационной работы внедрены в методические материалы для студентов, обучающихся по направлениям подготовки «Теплоэнергетика и теплотехника», «Строительство» профиль «Теплогазоснабжение и вентиляция».

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, основных выводов, списка литературы и приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 168 страниц, включая 63 рисунка, 8 таблиц, 82 формулы, список литературы из 144 наименований работ отечественных и зарубежных авторов и 6 приложений.

Во введении сформулирована актуальность диссертационной работы, задачи и цели исследований, определена научная новизна и практическая ценность диссертационной работы.

В первой главе приведен обзор существующих газогорелочных устройств инжекционного типа, а также традиционных тепловых схем компоновки котельного оборудования котельных малой мощности. Приведена методика расчёта теплового баланса каскадных котельных установок. Сделаны выводы о достоинствах и недостатках рассмотренных вариантов.

Во второй главе приведена конструкция разработанного газогорелочного устройства инжекционного типа, работающего на природном газе низкого давления, и методика расчета.

В третьей главе приведены результаты математического моделирования аэродинамического режима разработанного газогорелочного устройства для обоснования предложенных конструктивных элементов. Математическая модель и численная реализация процесса горения газозоудшной смеси в топке котла. На основании полученных результатов скорректированы геометрические размеры, профиль огневых отверстий и их расположение на коллекторе разработанного ГГУ. По результатам моделирования процесса горения доказана эффективность сжигания газа при разных мощностях работы котлоагрегата, получены зависимости концентраций вредных веществ в уходящих газах от мощности и от коэффициента избытка воздуха.

В четвертой главе приводится описание тепловой схемы котельной, оборудованной отечественными котлами «NEVALUX» с установкой в котлоагрегаты разработанного ГГУ, сделаны выводы о преимуществах тепловой схемы каскадной компоновки.

В пятой главе приведены методики проведения экспериментальных исследований и результаты натурных измерений энерго–экологических показателей работы котла малой мощности, с установкой разработанного ГГУ, обоснована корректность применения математического моделирования для изучения процесса горения газа в топке котла малой мощности.

В заключении изложены основные итоги проведенного исследования.

В приложениях приведены акты внедрения, режимная карта работы котла «NEVALUX» заводской сборки с ГГУ «Polidoro» (Италия), патент на

изобретение № 2618137, Рос. Федерация; МПК F23D 14/10 (2006.01), графический материал по результатам испытаний работы разработанной ГГУ.

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

Энергосберегающие технологии при сжигании газа в котлах малой мощности – комплексная задача, которая направлена на повышение эффективности сжигания газа, сокращение выбросов вредных веществ в атмосферу, и включает следующие направления решения:

- конструктивное направление: совершенствование узлов и элементов котла, топочных и горелочных устройств;
- технологическое направление: разработка тепловых схем компоновки котлов, автоматизация работы котлов и котельных;
- энерго–экологическое направление: снижение тепловых потерь и выбросов вредных веществ в атмосферу.

1. Конструкция взаимозаменяемого горелочного устройства, которое отличается от импортного аналога меньшим размером, наличием сегментного отвода переменного сечения, схемой расположения огневых отверстий на коллекторе, что позволяет обеспечить равномерный выход газоздушной смеси и более равномерный факел горения (получен патент на изобретение № 2618137).

Разработка относится к инжекционным горелкам для сжигания газообразного топлива в бытовых котлах малой мощности, газовых проточных нагревателях и других аппаратах.

Целью разработки является более равномерное распределение тепловой нагрузки по длине топки, повышение коэффициента полезного действия (КПД) теплогенерирующей установки, улучшение процесса смесеобразования, повышение надежности работы газогорелочного устройства, простота монтажа и универсальность конструкции, возможность разработки широкого набора типоразмеров.

Применение новой конструкции инжекционной горелки (рисунок 1) улучшает доступ вторичного воздуха к основанию факела каждой огневой струи, повышает эффективность сжигания газового топлива, снижает высоту факела, сокращает количество вредных выбросов, что улучшает энерго–экологические показатели и коэффициент полезного действия котла.

Разработанная конструкция огневого коллектора и взаимное расположение огневых отверстий позволяет увеличить площадь теплоотдачи, равномерность распределения потока газоздушной смеси, уменьшить зазор между горелкой и теплообменником. Вследствие этого обеспечивается:

- равномерное распределение температуры по внутренней поверхности котла;
- полнота процесса смесеобразования при значении коэффициент избытка воздуха $\alpha_1 = 0,6$;

- сокращение выбросов продуктов неполного сгорания на 10–12%, что повышает коэффициент полезного действия котла;
- снижение высоты пламени.

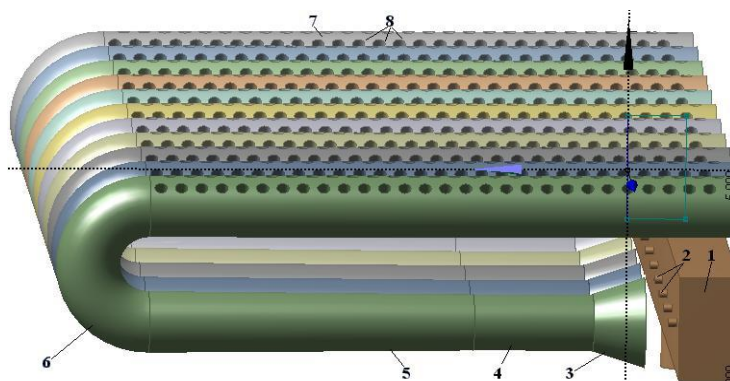


Рисунок 1 – Инжекционная газовая горелка низкого давления:
 1 – газовый коллектор; 2 – сопла цилиндрической формы; 3 – конфузор; 4 – горловина;
 5 – диффузор; 6 – сегментный отвод; 7 – коллектор; 8 – огневые отверстия

2. Обоснование влияния конструктивных элементов разработанной инжекционной газовой горелки на аэродинамические характеристики и качество сжигания газозвушной смеси с использованием математического моделирования и результатов натурных исследований.

Исследования аэродинамических характеристик разработанного газогорелочного устройства низкого давления и импортного аналога проводились методом моделирования с использованием программы «ANSYS Fluent». Математическая модель основана на системе уравнений Навье–Стокса для условия установившегося изотермического движения вязкой несжимаемой жидкости без учёта сил гравитации, которая в векторной форме имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} = F - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \nabla^2 \vec{V}; \\ \text{div } \vec{V} = 0; \end{cases} \quad (1)$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости среды; ρ – плотность; \vec{V} – вектор скорости; $\text{grad } p$ – градиент давления.

Численное решение проводилось с использованием осредненных по Рейнольдсу (RANS) уравнений Навье–Стокса, двухпараметрической модели турбулентности « k – ε » с модификацией «*Realizable* k – ε ». Модель « k – ε » содержит два уравнения: переноса турбулентной кинетической энергии (k) и скорости её диссипации (ε), которые использовались для вычисления турбулентной вязкости, необходимой для решения уравнения движения.

Использована неструктурированная сетка, имеющая сгущения к твердым границам. Для описания профиля скорости потока в пристенной области использовались специальные пристеночные функции. На твердых границах – условия прилипания.

Моделировались 8 режимов подачи газозвдушной смеси в газогорелочное устройство, соответствующих диапазону тепловой нагрузки 10–30 кВт (изменение давления газа перед горелкой от 1400 до 2000 Па).

Результаты моделирования показали, что в ГГУ импортного образца, при соблюдении критического размера огневых отверстий, имеет место неравномерность выхода газозвдушной смеси, что при определенных условиях, может приводить к явлениям проскока и отрыва пламени.

Для получения одинаковых скоростей истечения газозвдушной смеси из огневых отверстий моделировалась работа нескольких образцов горелки промежуточной конструкции со ступенчатым изменением сечения газового коллектора. Однако результаты исследований показали необходимость в дальнейших изменениях конструкции газового коллектора. Для обеспечения равномерного поля скоростей в газозвдушном тракте горелочного устройства предложена конструкция диффузора с сегментным отводом переменного сечения, который обеспечивает равномерное распределение давления у стенки отвода при подаче газозвдушной смеси к газовому коллектору.

В результате исследований определено эффективное расположение и количество огневых отверстий в газовом коллекторе, получены соотношения максимальной и минимальной скорости выхода газозвдушной смеси для разработанного газогорелочного устройства и импортного аналога.

На рисунке 2 приведена модель разработанной конструкции ГГУ, использованная при расчетах. Рисунок 3 иллюстрирует распределение скорости истечения газозвдушной смеси по длине газового коллектора, полученное при расчетах для разработанной модели ГГУ.

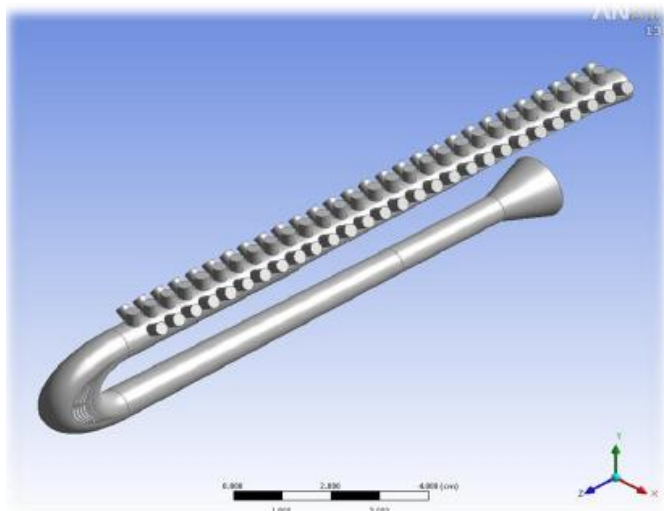


Рисунок 2 – Модель разработанной конструкции инжекционной газовой горелки низкого давления без внешней оболочки

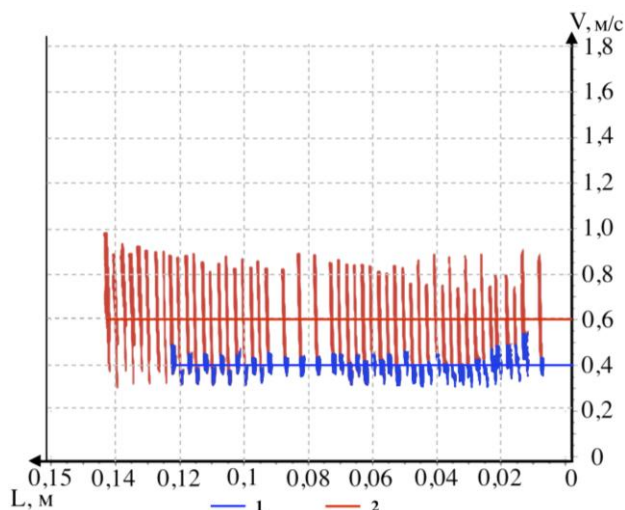


Рисунок 3 – Распределения скорости выхода газозвдушной смеси из огневых отверстий ГГУ, разработанной конструкции:
1 – из центральных отверстий (0,4 м/с);
2 – из боковых отверстий (0,6 м/с)

Для обоснования расположения огневых отверстий на коллекторе разработанного ГГУ определялись особенности выхода и взаимодействия потоков газозвдушной смеси. Истечение струй газозвдушной смеси, выходящих из боковых отверстий, характеризует поле скорости, приведенное на рисунке 4. Линии тока показывают отсутствие пересечения струй.

Анализ распределения скорости выхода газозвдушной смеси из центральных и боковых отверстий (рисунок 5), расположенных под углом 45° от центральной оси коллектора, позволяет ожидать, что фронт пламени в топке котла при горении будет распространяться равномерно.

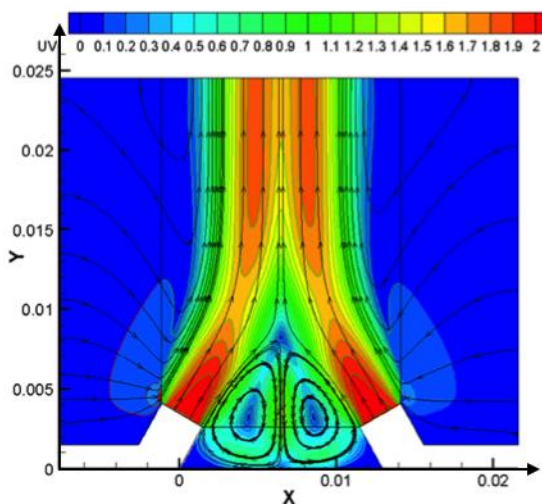


Рисунок 4 – Линии тока газозвдушной смеси при истечении из боковых отверстий разработанной горелки

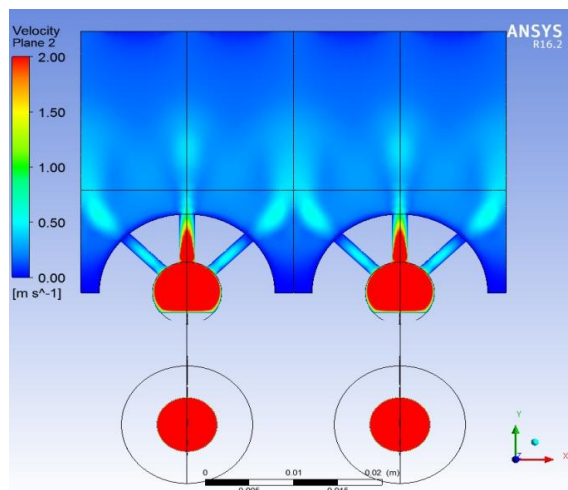


Рисунок 5 – Распределение скорости выхода газозвдушной смеси из огневых отверстий горелки разработанной конструкции

Исследования показали, что для горелки зарубежного образца с огневыми каналами щелевидной формы имеет место скачкообразное изменение скорости истечения смеси по длине коллектора, что ухудшает качество сжигания топлива, приводит к химической неполноте сгорания и увеличивает вредные выбросы в атмосферу.

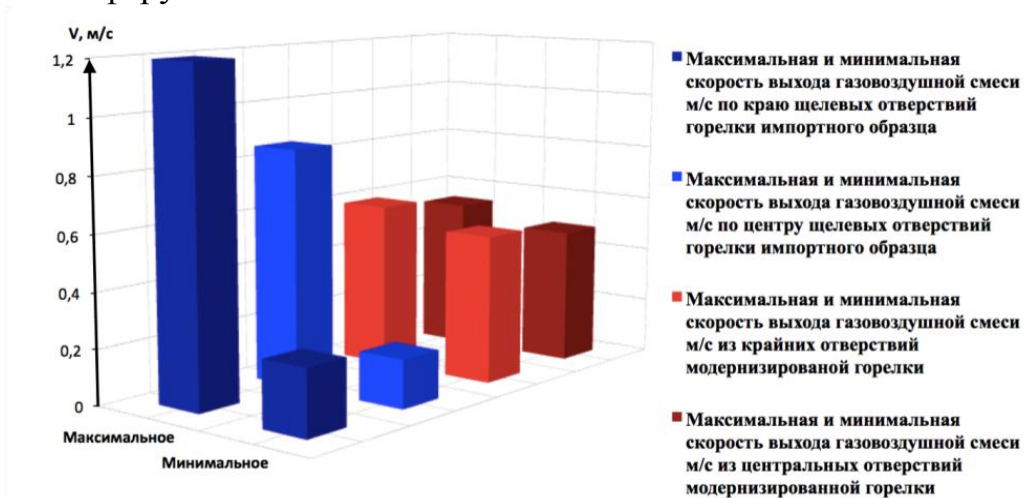


Рисунок 6 – Сравнительная гистограмма распределения скорости выхода газозвдушной смеси из огневых отверстий ГГУ импортного образца и разработанной модели ГГУ

Сравнительная диаграмма (рисунок 6) показывает, что амплитуда колебаний скорости истечения газовой смеси в горелке разработанной конструкции не превышает 11%, в то время как для зарубежного аналога этот показатель достигает 58%.

Для решения задачи моделирования горения в топке котла «NEVALUX–8230» и построения расчётной неструктурированной сетки использовались программные пакеты «STAR–CCM+» и «GRI–Mech 3.0». Модель топки котла и фрагмент модели ГГУ, установленного в топке котла, приведены на рисунках 7 и 8. Расчётная неструктурированная сетка имеет 10 миллионов элементов. Минимальный линейный размер элемента составляет 0,15 мм (газовое сопло), максимальный 12 мм. Сгущение сетки произведено в областях выхода топлива в расчётное пространство и в местах огневых отверстий для более детального моделирования пламени и теплового факела.

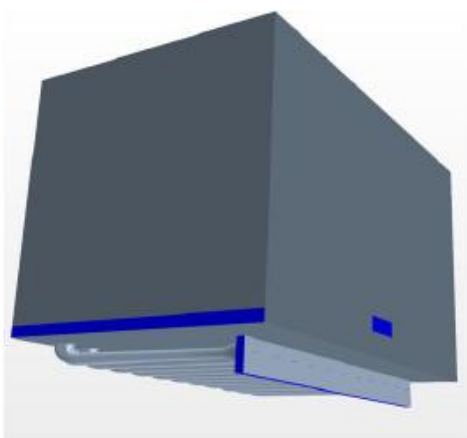


Рисунок 7 – Модель топки котла и разработанной горелки

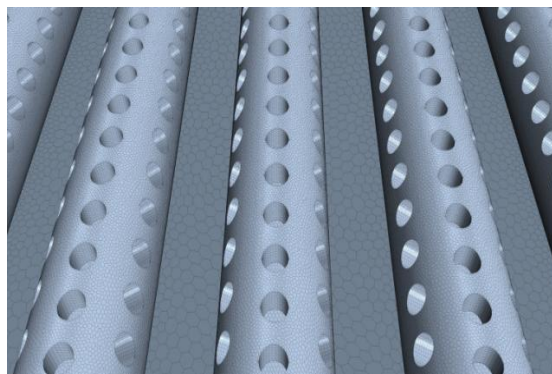


Рисунок 8 – Расчётная сетка в области горелки

Математическая модель процесса горения включает: моделирование турбулентного потока, лучистого теплообмена, расчёт газового состава и динамики горения.

Для моделирования турбулентного потока использованы осредненные по Рейнольдсу (RANS) уравнения Навье–Стокса и модель турбулентности « $k-\omega$ SST».

Моделирование теплового излучения в процессах горения требует решения двух задач: расчёт процесса переноса теплового излучения и расчёт радиационных свойств среды. В основе этого метода лежит численное решение системы дифференциальных уравнений переноса излучения, записанной для каждого элемента объёма расчётной сетки для выбранных направлений. Для ускорения расчёта были использованы следующие допущения:

- не учитывалось рассеяние теплового излучения;
- вместо спектральных интенсивностей рассматривались интегральные величины;
- вместо спектрального коэффициента поглощения вводилось эффективное значение, осреднённое по спектру.

Расчёт газового состава и динамики горения в расчётной области определялся по заранее табулированным зависимостям, определённым из подробной химической кинетики реакции горения с использованием программы «GRI-Mech 3.0». Составленные расчетные таблицы тепловыделений и массовых долей компонентов смеси рассчитывались с применением программы «STAR-CCM+».

На разработанной модели был произведен расчет процесса горения при разных тепловых нагрузках котла с целью обеспечения плавного регулирования.

В результате расчета получены: температурные поля в топке котла, характеризующие равномерность горения, полноту сгорания и концентрации NO_x (рисунок 9).

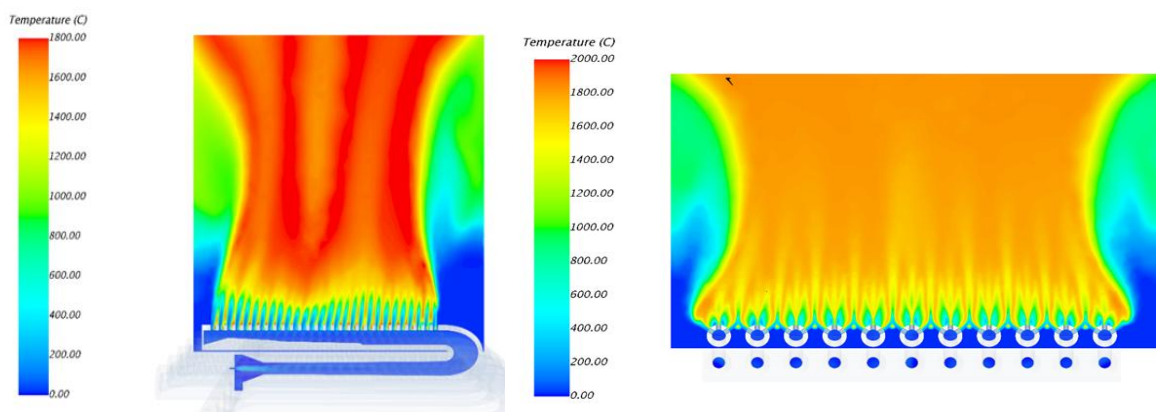


Рисунок 9 – Распределение поля температур при работе котла на 30 кВт

Аксонометрия температурного поля в топке котла (рисунок 10) свидетельствует о равномерности прогрева теплоносителя в теплообменнике.



Рисунок 10 – Аксонометрия температурного поля процесса горения

Для подтверждения качества сжигания газа в котле при использовании ГГУ разработанной конструкции определялось количество окислов азота в топке и в уходящих газах. Рисунок 11 иллюстрирует зависимость концентрации NO_x в топке котла от коэффициента избытка воздуха.

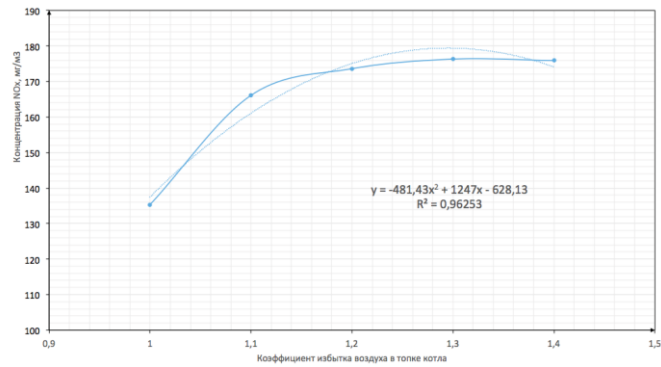
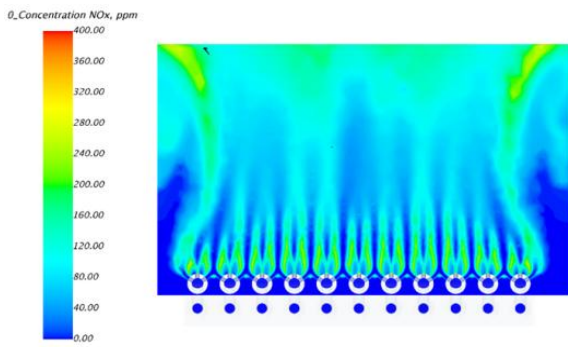


Рисунок 11 – Концентрации NO_x в топке котла от коэффициента избытка воздуха.

По результатам расчета получена эмпирическая зависимость концентрации NO_x в топке котла от тепловой мощности, которая имеет вид ($r = 0,99$):

$$NO_x = 0,89 \cdot Q^2 + 0,70 \cdot Q + 266,50, \quad (2)$$

где NO_x – концентрация в топке котла, mg/m^3 ; Q – тепловая мощность, кВт

Получена зависимость концентрации окислов азота от коэффициента избытка воздуха при сжигании газа:

$$NO_x = -481,43 \cdot \alpha^2 + 1247 \cdot \alpha - 628,13, \quad (3)$$

где α – коэффициент избытка воздуха в топке котла.

Расчёт показал, что в диапазоне значений коэффициента избытка воздуха α от 1,1 до 1,4 отсутствует химический недожог и количество вредных выбросов NO_x не превышает ПДК.

Значения концентраций NO_x в уходящих газах в зависимости от тепловой мощности котла приведены в таблице 1 и использованы для подтверждения корректности результатов моделирования при сравнении с данными натурных обследований.

Таблица 1 – Сравнение расчетных и экспериментальных значений концентрации NO_x в уходящих газах (ПДК $NO_x = 250 mg/m^3$)

| Показатели | Тепловая мощность котлоагрегата, кВт | | | |
|---|--------------------------------------|--------|--------|--------|
| | 15 | 20 | 25 | 30 |
| Расчетные значения NO_x , полученные при моделировании процесса горения, mg/m^3 | 243,49 | 223,20 | 216,33 | 212,41 |
| Экспериментальные, значения NO_x , полученные при натурных измерениях, mg/m^3 | 222,58 | 222,60 | 222,59 | 222,57 |
| Сравнение расчетных и экспериментальных значений, % | 8,6 | 0,3 | 2,9 | 4,8 |

Отличие концентраций NO_x в уходящих газах, полученных при численном расчете, от результатов натурных исследований составляет менее 10 %.

3. Экспериментально доказано, что эффективность сжигания газа при установке разработанной инжекционной газовой горелки в отопительные котлы малой мощности при обеспечении условий надежности и безопасности превышает существующий вариант на 3%, получены эмпирические зависимости, характеризующие качество сжигания.

Исследование энерго–экологических показателей работы разработанной инжекционной горелки низкого давления были проведены на действующем водогрейном котле «NEVALUX–8230».

Проведение экспериментальных исследований для разработки режимной карты котла (таблица 2) осуществлялось на 8 режимах, тепловая мощность изменялась от 10 до 30 кВт. Инструментальные измерения энерго–экологических показателей проводились при достижении стабильных показаний по температуре уходящих газов и температуре теплоносителя.

Результаты исследования работы котла:

- устойчивая работа осуществляется в диапазоне нагрузок от 10 до 30 кВт;
- потери теплоты от химической неполноты сгорания отсутствуют;
- потери теплоты с уходящими газами с ростом тепловой нагрузки изменялись от 3,3 до 5,5%, при этом температура уходящих газов изменялась от 110 до 130 °С;
- КПД котла в пределах исследуемых нагрузок составил 93,5–95%.

В процессе исследований определялось влияние тепловой мощности и коэффициента избытка воздуха на концентрации NO_x , бенз/а/пирена и оксидов углерода в продуктах сгорания природного газа.

Изменением коэффициента первичного избытка воздуха при работе котла «NEVALUX–8230» в диапазоне нагрузки от 10 до 30 кВт можно пренебречь.

Зависимости концентраций вредных веществ, в продуктах сгорания от тепловой мощности котла, приведены на рисунке 12.

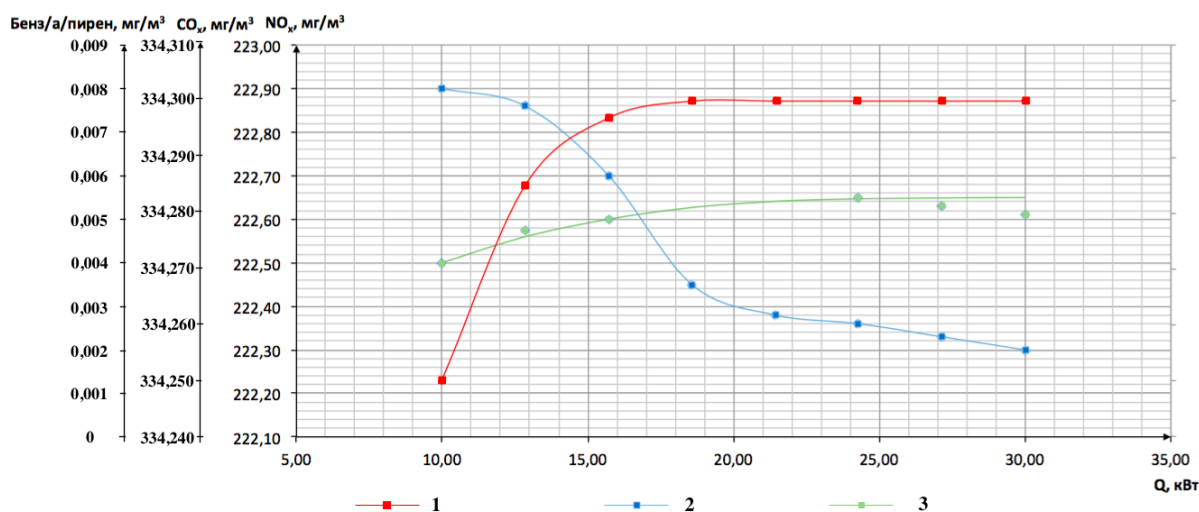


Рисунок 12 – Содержание вредных веществ оксидов углерода, NO_x и бенз/а/пирена в уходящих газах в зависимости от тепловой мощности:

- 1 – изменение концентрации оксидов углерода; 2 – изменение концентрации бенз/а/пирена;
- 3 – изменение концентрации NO_x (ПДК 250 мг/м³)

Максимальные значения концентраций оксидов углерода, оксидов азота и бенз/а/пирена для рассмотренного диапазона тепловой мощности котла не превышают ПДК.

Концентрация кислорода в продуктах сгорания для разработанного ГГУ по сравнению с зарубежным аналогом ниже на 30–50%, характер изменения содержания O_2 при увеличении давления газа – аналогичен (рисунок 13).

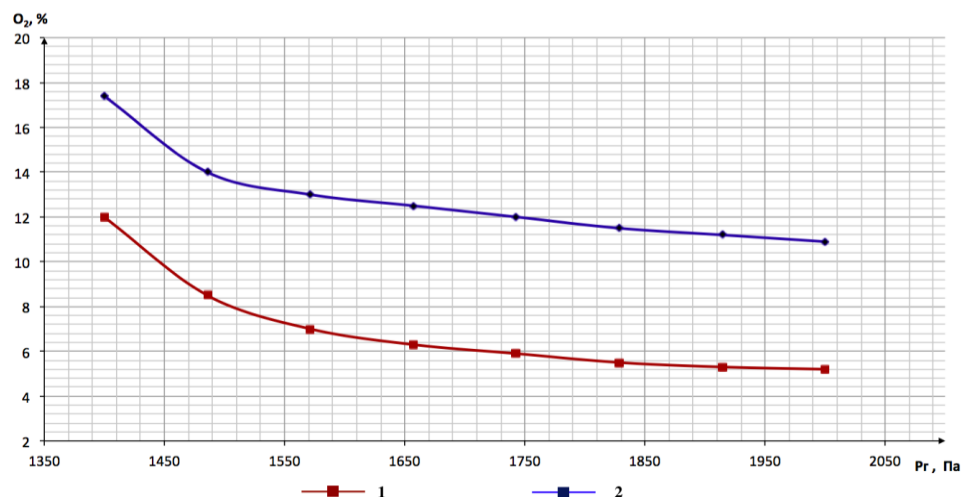


Рисунок 13 – Изменение концентрации кислорода за котлом при работе инжекционных горелок в зависимости от давления газа:

1 – разработанная конструкция ГГУ; 2 – импортный образец ГГУ

4. Исследована работа котельной с каскадной схемой компоновки котлов отечественного производства, с установкой разработанных автором газогорелочных устройств, составлена режимная карта.

Экспериментальная котельная расположена в Ленинградской области (Кировский район, Никольское шоссе, участок № 55). В помещении котельной установлен комплекс из четырех настенных котлов «NEVALUX–8230», тепловая мощность каждого котла составляет 30 кВт. Котлы работают на природном газе с параметрами $Q = 33496$ кДж/м³ и $\rho = 0,683$ кг/м³. Общая максимальная теплопроизводительность теплогенерирующей установки составляет 120 кВт.

Работа отопительного оборудования предусматривается в зимний, переходный и летний периоды. Расчетные режимы работы котельной приняты в соответствии с нормативными требованиями.

Применяемые настенные водогрейные котлы «NEVALUX–8230» являются двухконтурными котлами с принудительной циркуляцией теплоносителя. Учитывая возможные колебания расхода теплоносителя в системе теплоснабжения (термостатические клапаны на приборах отопления, периодичность работы вентиляции, действия потребителя и т.д.) и требования завода–изготовителя котлов, принята зависимая тепловая схема подключения теплоснабжающих систем с гидравлическим разделителем «Meibes MH 50/MA».

Таблица 2 – Результаты испытаний разработанной инжекционной горелки, работающей на газе низкого давления

| Наименование параметров | Единица измерения | Режимы работы котла NEVALUX 8230 | | | | | | | |
|---|--------------------------|----------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Тепловая мощность | % | 30,0 | 40,0 | 50,0 | 60,0 | 70,0 | 80,0 | 90,0 | 100,0 |
| | кВт | 10,0 | 12,86 | 15,71 | 18,57 | 21,43 | 24,29 | 27,14 | 30,0 |
| Давление газа перед горелкой | Па | 1400 | 1486 | 1571 | 1657 | 1743 | 1828 | 1914 | 2000 |
| Расход газа (при н.у.) | м ³ /ч | 3,394 | 3,399 | 3,404 | 3,409 | 3,415 | 3,420 | 3,425 | 3,430 |
| | м ³ /год | 29731,12 | 29775,89 | 29820,81 | 29865,86 | 29911,04 | 29956,36 | 30001,82 | 30047,41 |
| | тыс. м ³ /год | 29,73 | 29,78 | 29,82 | 29,87 | 29,91 | 29,96 | 30,00 | 30,05 |
| Коэффициент избытка воздуха α_f | – | 0,6 | | | | | | | |
| Содержание CO ₂ за котлом | % | 6,50 | 6,71 | 6,78 | 6,80 | 6,80 | 6,80 | 6,80 | 6,80 |
| Содержание O ₂ за котлом | % | 12 | 8,5 | 7 | 6,3 | 5,9 | 5,5 | 5,3 | 5,2 |
| Содержание NO _x за котлом (250 мг/м ³) | ppm | 178,000 | 178,060 | 178,080 | 178,072 | 178,056 | 178,120 | 178,104 | 178,088 |
| | мг/м ³ | 222,500 | 222,575 | 222,600 | 222,590 | 222,570 | 222,650 | 222,630 | 222,610 |
| Содержание CO _x за котлом | ppm | 267,400 | 267,428 | 267,438 | 267,440 | 267,440 | 267,440 | 267,440 | 267,440 |
| | мг/м ³ | 334,250 | 334,285 | 334,297 | 334,300 | 334,300 | 334,300 | 334,300 | 334,300 |
| Бенз/а/пирен (3, 4–Бензпирен) | ppm | 0,006 | 0,006 | 0,005 | 0,003 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 |
| | мг/м ³ | 0,008 | 0,008 | 0,006 | 0,004 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,002 |
| Тепловое напряжение поверхностей нагрева (теплосъем) | кВт/м ² | 11,13 | 14,31 | 17,50 | 20,67 | 23,85 | 27,04 | 30,22 | 33,39 |
| Температура уходящих газов $t_{ух}$ | °С | 110 | 116 | 121 | 127 | 129 | 129 | 129 | 130 |
| КПД котла | % | 94,87 | 94,91 | 94,93 | 94,94 | 94,97 | 95,01 | 95,03 | 95,05 |
| q_5 (по измеренным температурам наружной поверхности котла) | % | 1,33 | 1,24 | 1,17 | 1,14 | 1,08 | 1,00 | 0,97 | 0,85 |
| q_2 | % | 3,80 | 3,85 | 3,90 | 3,92 | 3,95 | 3,99 | 4,00 | 4,10 |
| Нагрев воды в котле (перепад на входе и выходе) | °С | 20 | | | | | | | |
| Уровень звукового давления | дБ | 46 | | | | | | | |

Применение гидравлического разделителя позволяет значительно сгладить влияние контуров отопления и вентиляции (потребителей) на котловой контур.

Тепловая схема котельной делится на две составляющие:

- схему обвязки генераторов теплоты – котловой контур;
- схему обвязки теплопотребляющих контуров.

Каждый котел оборудован встроенным циркуляционным насосом, обеспечивающим постоянный расход теплоносителя через котел. Работа котлов, настроена на выработку теплоносителя, с постоянной температурой 85 °С. Производится плавное регулирование мощности горелок котлов, количеством работающих котлов и трехходовыми клапанами в контуре отопления и вентиляционных установках.

Схема обвязки котлов оснащена необходимой запорной и предохранительной арматурой, а также средствами контрольно–измерительных приборов и автоматики, обеспечивающими безопасную, экономичную и комфортную работу котлового контура. Схема отопительных контуров – закрытая.

По результатам натурных испытаний работы котла (рисунок 14) была получена эмпирическая зависимость часового расхода газа от тепловой мощности котла:

$$B = 3,376 + 0,002 \cdot Q, \text{ м}^3/\text{ч} \quad (4)$$

где B – расхода газа, $\text{м}^3/\text{ч}$; Q – тепловая мощность, кВт.

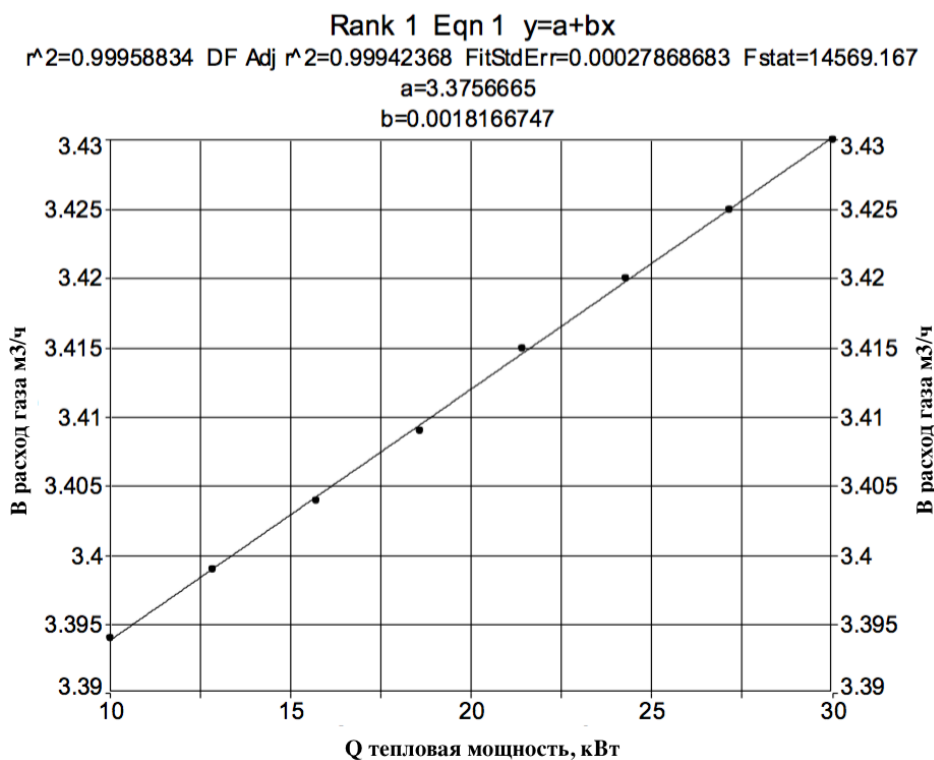


Рисунок 14 – Зависимость расхода газа от тепловой мощности котла

На рисунке 15 приведена схема компоновки котлов «NEVALUX–8230».

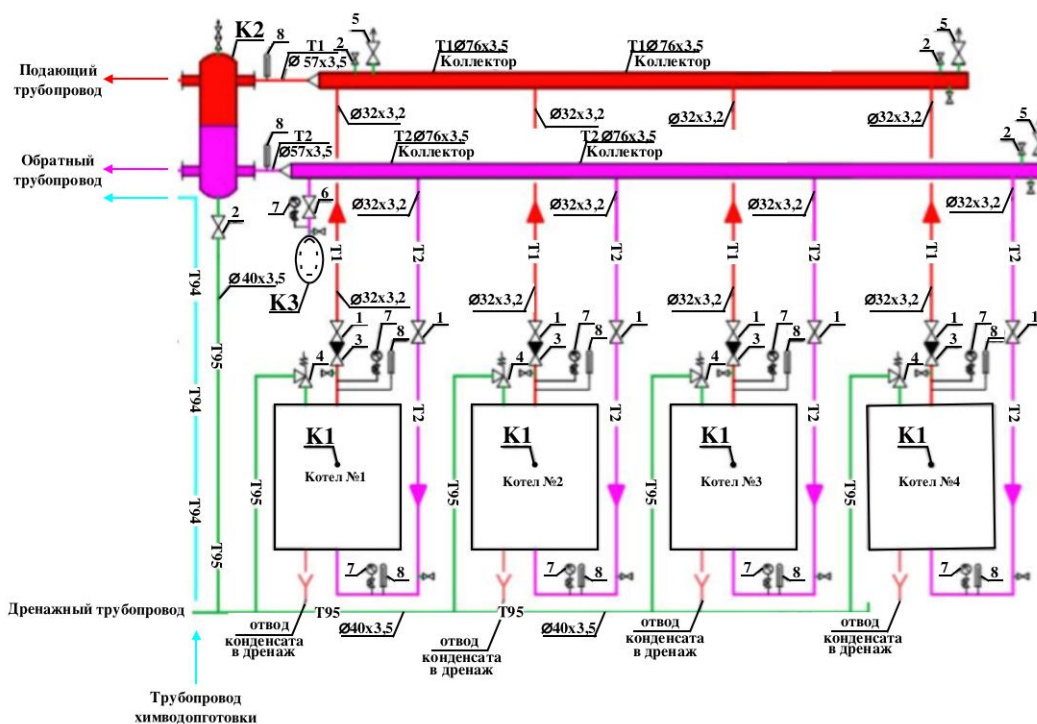


Рисунок 15 – Схема компоновки котлов «NEVALUX–8230»:

- K1 – настенный газовый котел №1, №2, №3, №4; K2 – гидравлический разделитель;
- K3 – разборный мембранный расширительный бак; T1 – подающий трубопровод;
- T2 – обратный трубопровод; T94 – трубопровод химводоподготовки;
- T95 – дренажный трубопровод; 1 – вентиль муфтовый; 2, 6 – кран муфтовый;
- 3 – клапан обратный; 4 – клапан предохранительный угловой пружинный;
- 5 – автовоздушник; 7 – манометр показывающий; 8 – термометр показывающий

Результаты, полученные при натурных обследованиях работы котла, приведены на рисунках 16–18.

Из графика, приведенного на рисунке 16, следует, что максимальное значение КПД котла (таблица 2) соответствует максимальной величине тепловой нагрузки.

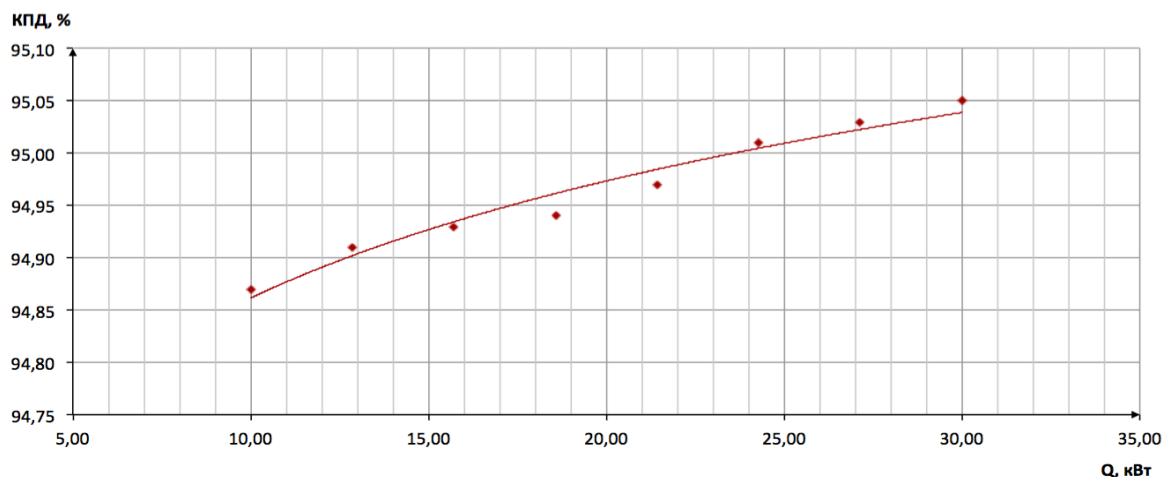


Рисунок 16 – Зависимость КПД от тепловой мощности котла

На рисунке 17 приведена зависимость потерь теплоты от нагретой поверхности котла в окружающую среду при изменении тепловой мощности.

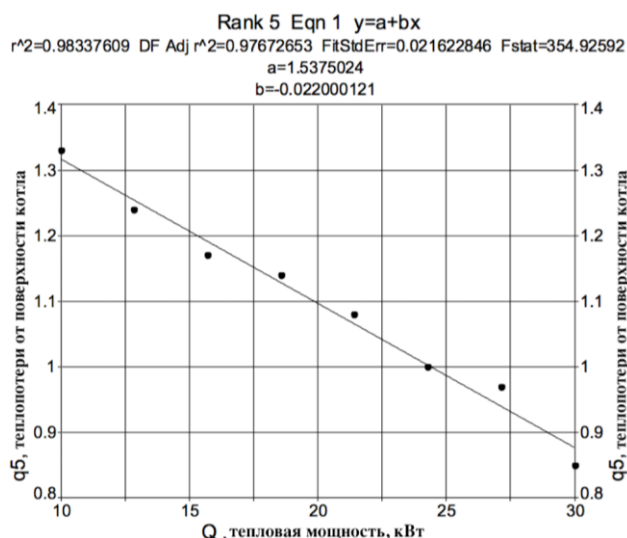


Рисунок 17 – Зависимость потерь теплоты от нагретой поверхности котла в окружающую среду от тепловой мощности котла

При обработке экспериментальных данных (рисунок 17) получена эмпирическая зависимость потерь теплоты с поверхности котла «NEVALUX–8230» в окружающую среду q_5 , в процентах:

$$q_5 = 1,54 - 0,022 \cdot Q, \quad (5)$$

где Q – тепловая мощность, кВт.

Сравнение потерь теплоты в окружающую среду q_5 от нагретых поверхностей котла для рассмотренного диапазона мощностей с данными известными в литературе и результатами расчетов, выполненных по известным методикам, приведено на рисунке 18.

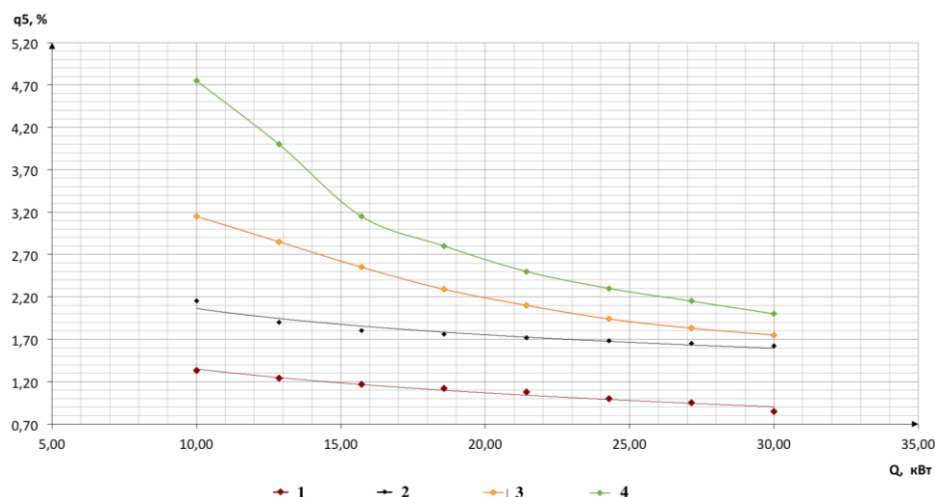


Рисунок 18 – Зависимость потерь теплоты в окружающую среду с поверхности водогрейных котлов от тепловой мощности:

1 – по результатам экспериментальных исследований; 2 – по результатам, рассчитанным по формулам, приведенным в справочнике «Тепловая изоляция» под ред. Кузнецова Г.Ф.; 3 – по данным диссертационных исследований Бирюзовой Е.А.; 4 – по данным справочника под ред. Роддатиса К.Ф.

Величина q_5 для котлов «NEVALUX–8230» с ГГУ, разработанным автором, в 1,6 раза ниже, чем при установке импортного образца за счет повышения качества сжигания газа.

III. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Выполнен анализ существующих конструкций отечественных и зарубежных инжекционных газогорелочных устройств, для котлов малой мощности до 30 кВт.

2. Исследована работа и выявлены недостатки импортной конструкции газогорелочного устройства, устанавливаемого в котлах отечественного производства.

3. Разработана конструкция усовершенствованного инжекционного взаимозаменяемого газогорелочного устройства для отечественных котлов малой мощности.

4. Обосновано на базе метода математического моделирования конструктивные особенности разработанного ГГУ:

– сегментный отвод переменного сечения, который обеспечивает выравнивание поля скорости газозвушной смеси, поступающей в коллектор;

– коллектор со сложным профилем внутренней поверхности и форма огневых отверстий, обеспечивающие одинаковые скорости выхода газозвушной смеси из огневых отверстий по всей длине коллектора (неравномерность скорости выхода не превышает 11%);

– конструктивное исполнение огневого коллектора и взаимное расположение огневых отверстий увеличивает площадь теплоотдачи, приводит к снижению высоты факела и сокращению зазора между горелкой и теплообменником.

5. Разработана математическая модель и доказана эффективность сжигания газа в топке котла типа «NEVALUX» с газогорелочным устройством, предложенным автором.

6. Выполнен сравнительный анализ схем компоновки котельного оборудования и выявлены возможные ресурсы энергосбережения.

7. Доказано на основании натуральных исследований, что эффективность сжигания газа в котле типа «NEVALUX» с разработанным ГГУ на 3% выше, чем при компоновке котлоагрегата импортным ГГУ.

8. Исследована работа котельной малой мощности с каскадной компоновкой котлов «NEVALUX» с установкой в котлоагрегатах разработанных газогорелочных устройств, получены энерго–экологические характеристики работы котлов.

9. По результатам натуральных исследований работы котла типа «NEVALUX» доказана достоверность использования математического моделирования для изучения процессов сжигания газа.

IV. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Научные статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Нефёдова, М.А. Патент на изобретение «Инжекционная горелка низкого давления» № 2618137, Рос. Федерация; МПК F23D 14/10 (2006.01) / М.А. Нефедова, Е.А. Бирюзова, Мостафа Фазлави; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт–Петербургский государственный архитектурно–строительный университет» (ФГБОУ ВПО «СПбГАСУ»). – № 2016115412; заявл. 20.04.2016; опубл. 02.05.2017, Бюл. № 13. Режим доступа: <http://www1.fips.ru>.

2. Нефёдова, М.А. Оптимизация работы котельного оборудования за счет применения новой схемы компоновки / М.А. Нефёдова // В мире научных открытий. Естественные и технические науки. – 2015. – № 8 (68). – С.134–145. Режим доступа: <http://elibrary.ru/item.asp?id=23837783>.

3. Нефёдова, М.А. Анализ технических характеристик современных газогорелочных устройств / М.А. Нефёдова // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2015. – №5. – С.411–423. Режим доступа: http://ogbus.ru/issues/5_2015/ogbus_5_2015_p411-423_NefedovaMA_ru.pdf.

4. Нефёдова, М.А. Анализ требований, предъявляемый к подбору котлоагрегата для каскадных котельных / М.А. Нефёдова // Электронный научный журнал «Естественные и технические науки». – 2015. – №11. Режим доступа: <http://elibrary.ru/item.asp?id=25304986>.

Публикации в других изданиях:

5. Нефёдова, М.А. Энерго–экономическое преимущество перевода котлов на газообразное топливо / М.А. Нефедова // III Международный конгресс молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» с участием студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов, а также молодых специалистов строительных и проектных организаций. – СПб.: СПбГАСУ. 2014. Режим доступа: www.spbgasu.ru.

6. Нефёдова, М.А. Энерго–экологическое преимущество использования газообразного топлива в промышленной теплоэнергетике / М.А. Нефедова // Доклады 70-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета. Часть II. – СПб. : СПбГАСУ. 2014. – С. 222–225. Режим доступа: www.spbgasu.ru.

7. Нефёдова, М.А. Проведение пуско–наладочных работ на теплоэнергетическом оборудовании / М.А. Нефедова // материалы 68-й Междунар. науч.–практ. конф. студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов «Актуальные проблемы строительства». – СПб. : СПбГАСУ. 2015. – С. 247 – 251. Режим доступа: www.spbgasu.ru.

8. Нефёдова, М.А. Разработка методов работы и повышение энергоэффективности газовых котельных малой мощности / ГРАНТ СПбГАСУ

// Научный руководитель к.т.н., доцент Бирюзова Е.А. – СПб. : СПбГАСУ. 2015. – 100 с.

9. Нефёдова, М.А. Программа инструментальных измерений при пуско–наладочных работах на оборудовании газового хозяйства котельной // Сборник докладов 69-ой международной научно–практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: Актуальные проблемы современного строительства. – СПб. : СПбГАСУ. 2016. Режим доступа: www.spbgasu.ru.

10. Нефёдова, М.А. Нормирование расхода газа на объектах теплоэнергетики / М.А. Нефёдова, С.Д. Пестич // Сборник докладов 69-ой международной научно–практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: Актуальные проблемы современного строительства. – СПб. : СПбГАСУ. 2016. Режим доступа: www.spbgasu.ru.

11. Нефёдова, М. А. Современные системы дымоудаления каскадных котельных / М.А. Нефёдова, Н.А. Щеглова // Сборник докладов 69-ой международной научно–практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: Актуальные проблемы современного строительства. – СПб. : СПбГАСУ. 2016. Режим доступа: www.spbgasu.ru.

12. Нефёдова, М.А. Каскадные котельные – источник автономного теплоснабжения / Н.А. Щеглова, Е.А. Бирюзова, М.А. Нефёдова. //Берг-коллегия: Промышленная безопасность. Том №9 (144). – СПб.: ООО «Девиз», издательский дом «ГРАНД». 2016. – С. 22–23. Режим доступа: www.bergkollegia.ru.

13. Нефёдова, М.А. Использование конденсационных котлов в каскадных котельных / Н.А. Щеглова, Е.А. Бирюзова, М.А. Нефёдова. // Научно-технический прогресс: актуальные и перспективные направления будущего / Сборник материалов V Международной научно-практической конференции (7 апреля 2017 года). Том II. – Кемерово : ЗапСибНЦ, 2017. – С. 204–206. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29230660>.

14. Нефёдова, М. А. Усовершенствованная горелка для теплогенератора, работающая в аэродинамическом режиме / М. А. Нефёдова, Т. А. Дацюк // Промышленные и отопительные котельные и мини-ТЭЦ. – 2017. – №3(34)'. – С. 30–32.