

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

НЕФЁДОВА МАРИНА АЛЕКСАНДРОВНА

**ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ
ПРИ РАБОТЕ КОТЛОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ**

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

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Дацюк Тамара Александровна

Санкт-Петербург

2017 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ СЖИГАНИИ ГАЗА В КОТЕЛЬНЫХ МАЛОЙ МОЩНОСТ.....	11
1.1 Общие требования, предъявляемые к инжекционным газогорелочным устройствам.....	11
1.2 Анализ существующих инжекционных газогорелочных устройств, работающих на газе низкого давления	17
1.3 Компоновка отопительной водогрейной котельной котлами малой мощности до 30 кВт	29
1.4 Методика расчета теплового баланса каскадных котельных установок	36
1.5 Методика исследования величины потерь теплоты каскадной котельной установкой в окружающую среду	39
1.6 Выводы по главе 1.....	40
ГЛАВА 2 РАСЧЁТ И РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ИНЖЕКЦИОННОЙ ГАЗОВОЙ ГОРЕЛКИ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ	41
2.1 Методика расчета газогорелочного устройства.....	41
2.2 Описание конструкции разработанной инжекционной газовой горелки низкого давления.....	49
2.3 Выводы по главе 2.....	54
ГЛАВА 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ РАЗРАБОТАННОЙ ГОРЕЛКИ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ	55
3.1 Математическая модель для обоснования конструктивных элементов разработанного ГГУ	55
3.1.1 Методы получения дискретного аналога	60
3.2 Обоснование выбора конструктивных элементов разработанного ГГУ	62
3.3 Исследование процесса горения в топке котла методом моделирования.....	74
3.3.1 Моделирование теплового излучения	77
3.3.2 Моделирование горения.....	78

3.4 Выводы по главе 3.....	87
ГЛАВА 4 КАСКАДНАЯ КОМПОНОВКА КОТЛОАГРЕГАТОВ С РАЗРАБОТАННЫМ ГАЗОГОРЕЛОЧНЫМ УСТРОЙСТВОМ.....	89
4.1 Каскадная схема компоновки котлов с разработанным ГГУ	89
4.2 Методика проведения наладочных испытаний.....	96
4.3 Выводы по главе 4	102
ГЛАВА 5 МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	103
5.1 Экспериментальные исследования работы разработанного ГГУ	103
5.2 Методика исследований энерго–экологических показателей работы каскадной котельной при отсутствии химического недожога	103
5.3 Определение теплового баланса каскадной котельной	109
5.4 Энерго–экологические показатели работы горелки новой конструкции.....	113
5.5 Результаты исследований потери теплоты в окружающую среду	119
5.6 Экономическое обоснование стоимости нового газогорелочного устройства.....	121
5.7 Выводы по главе 5.....	122
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ	124
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	126
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	141

ВВЕДЕНИЕ

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, 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 типа, 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 более совершенных взаимозаменяемых газогорелочных устройств и оптимизация тепловых схем компоновки 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 газозоудушной смеси к огненным 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 автоматизированных 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, Е.А., Шкаровского А. Л., Хаванова П.А., Бирюзовой, С.Г. Прохорова 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.

Для достижения цели поставлены следующие **задачи**:

- 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 газозвушной 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 газозвушной 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;

– 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%;

– разработке и исследовании тепловой схемы котельной малой мощности с каскадной компоновкой 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 натуральных 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. 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, вентиляция, водоснабжение и водоотведение зданий, сооружений, населенных пунктов».

Структура и объем диссертационной работы

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

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ СЖИГАНИИ ГАЗА В КОТЕЛЬНЫХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Энергосберегающие технологии при сжигании газа в котлах малой мощности – комплексная задача, которая включает повышение экономичности сжигания газа, снижение выбросов вредных веществ в атмосферу и капитальные затраты на их осуществление. Можно выделить 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;
- режимные мероприятия: снижение тепловых потерь и выбросов вредных веществ в атмосферу.

1.1 Общие требования, предъявляемые к инжекционным газогорелочным устройствам

Развитие системы современного газоснабжения направлено на использование энергосберегающего котельного оборудования. Для производства теплоты в котельных малой мощности в большинстве случаев используют природный газ. Природный газ является экологически чистым видом топлива, так как в составе продуктов сгорания природного газа содержание оксидов и диоксидов азота мало по сравнению с другими видами топлива [23, 66].

К энергоустановкам, основным элементом которых является ГГУ, предъявляется ряд требований, основными из которых являются:

- высокий коэффициент полезного действия (КПД);
- гарантия бесперебойности и безопасности горения топлива;
- энергоэффективность и экологичность.

Газогорелочное устройство (газовая горелка) является основной частью энергетической установки, в котором реализуется процесс горения природного газа с преобразованием химической энергии в тепловую [26].

Для эффективной работы газогорелочного устройства необходимо обеспечить:

- полное сжигание природного газа в пределах топочного объема камеры сгорания котлоагрегата;
- стабильный факел и устойчивость воспламенения;
- возможность регулирования факела при изменении тепловых нагрузок;
- отсутствие проскока и отрыва пламени;
- низкое гидравлическое сопротивление.

Кроме того, газогорелочное устройство должно иметь небольшие габаритные размеры и вес. Быть взаимозаменяемым, надежным и безопасным в эксплуатации, уровень звукового давления при работе горелки не должен превышать 85 дБ [8, 26, 90, 11,1, 126].

Процесс горения газа в газогорелочных устройствах делится на три стадии:

- формирование состава газозвушной смеси;
- подогрев газообразного топлива до температуры воспламенения;
- химическая реакция горения газа.

Все вышеперечисленные процессы происходят в камере сгорания и непосредственно в горелке [126].

Последовательность работы газовой горелки:

- подача воздуха и газа в топочное устройство для смешения;
- смесеобразование;
- стабилизация фронта воспламенения при заданных нагрузках;
- обеспечение интенсивности процесса горения природного газа [26, 111, 126].

В зависимости от того по какому принципу происходит процесс сжигания газа горелочные устройства, условно подразделяются на два вида: диффузионные и инжекционные [27].

Инжекционная или «атмосферная» горелка низкого давления состоит из сопла, смесителя, горелочной насадки, на выходе которой установлено стабилизирующее устройство [111].

Сопло горелки необходимо для подачи нужного количества газа в смеситель горелки с определенной скоростью. Расположение сопел горелки должно быть организовано таким образом, чтобы не возникало проскока пламени, и не происходило снижение коэффициента инъекции [27].

Смеситель горелки представляет собой входной патрубок (конфузор), камеру смешения и диффузор. Конфузор (инжектор) является важным элементом горелки. Правильный выбор геометрических размеров позволяет обеспечить необходимый коэффициент инъекции и обеспечить более равномерное перемешивание газа и инжектируемого воздуха [11]. Чаще всего его принимают конической формы [111].

Камера смешения газовой горелки необходима для выравнивания профиля скорости и обеспечения однородности газозвушной смеси перед диффузором и имеет цилиндрическую или коническую форму [27, 29].

Диффузор необходим для увеличения разрежения в камере смешения, что способствует лучшей инъекции воздуха и преобразования скоростного напора смеси в давление, которое необходимо для преодоления сопротивления огневой насадки. Кроме того, диффузор служит для выравнивания полей концентраций при образовании газозвушной смеси. Диффузор должен иметь угол раскрытия не более 90° , при условии, что течение потока газозвушной смеси будет происходить без отрыва от его стен [41].

Горелочная насадка имеет форму конфузора и служит для выравнивания скорости газозвушной смеси по сечению после диффузора, что в свою очередь, позволяет предотвратить проскок пламени [111].

Стабилизаторы используются для устойчивого процесса горения, предотвращения проскока и отрыва пламени. По своей конструкции стабилизаторы бывают различных видов. Использование того ли иного вида

зависит от характера распространения газовой смеси, а также стабилизатор предотвращает проскок или отрыв пламени [111].

Отрыв пламени возможен при переходе ламинарного режима движения смеси в турбулентный. В этом случае ширина разгорающегося пояса пламени будет уменьшаться, что приведет к нарушению устойчивости фронта пламени – будет происходить его отрыв от горелки [74].

Проскок пламени приведет к тому, что пламя будет втягиваться внутрь смесителя газогорелочного устройства. Это явление, обычно, сопровождается хлопком и приводит либо к затуханию факела пламени и выходу несгоревшей газообразной смеси в топку котлоагрегата, либо к горению газовой смеси внутри горелки [74].

К техническим характеристикам газогорелочных устройств относятся следующие физические величины [8, 26, 41, 90, 111,126,130]:

Q – тепловая мощность, кВт – количество теплоты, которое выделяется при полном сгорании часового расхода природного газа, в газогорелочном устройстве. Различают максимальную, минимальную и номинальную тепловую мощность газогорелочного устройства;

α_1 – коэффициент избытка первичного воздуха, показывающий какую часть воздуха от теоретически необходимого значения для сгорания газа следует подать предварительно в газогорелочное устройство. В зависимости от способа смешения первичного воздуха и газа, коэффициент избытка воздуха имеет разные значения:

а) если $\alpha_1 = 0$, то газ будет подаваться в камеру сгорания без первичного воздуха, а смешение будет происходить в факеле пламени за счет диффузии с вторичным воздухом;

б) если $\alpha_1 < 1$, то газ будет смешиваться с частью первичного (инжектируемого) воздуха и подаваться в камеру сгорания, а оставшаяся часть необходимого для сжигания газа количества воздуха поступает в топку котла;

в) если $\alpha_1 = 1$, то газ и воздух в количестве необходимом для сжигания будут подаваться в газогорелочное устройство, а процесс смешения будет завершен еще до выхода смеси из амбразуры в топку;

г) если $\alpha_1 > 1$, то газ и воздух в количестве необходимом для сжигания, не успев перемешаться, подаются на горение, а процесс смешения продолжается в факеле пламени;

α_2 – коэффициент избытка вторичного воздуха, показывающий какую часть воздуха от теоретически необходимого для сгорания газа необходимо подвести к пламени. Вторичный воздух – воздух, который подается для горения из топочного пространства газогорелочного устройства;

n – кратность инъекции – отношение объема первичного воздуха, инжектируемого газовой горелкой, к объемному расходу газа;

$k_{p,p}$ – коэффициент рабочего регулирования, показывающий отношение номинальной тепловой мощности к минимальной;

$k_{п,p}$ – коэффициент предельного регулирования, показывающий отношение максимальной тепловой мощности к минимальной, который характеризует диапазон устойчивой работы горелки;

p – давление воздуха и газа перед горелкой, которое соответствует тепловой мощности газогорелочного устройства. Соответственно различают максимальное, минимальное и номинальное, Па;

$p_{кc}$ – давление в камере сгорания в месте выходного сечения газогорелочного устройства при номинальной тепловой мощности, Па;

l – номинальная относительная длина факела пламени – расстояние по оси факела пламени от выходного отверстия газогорелочного устройства, м;

m – удельная металлоёмкость – отношение массы газогорелочного устройства к его номинальной мощности, кг/кВт;

L – уровень звукового давления в октавных полосах частот, который создается при работе газогорелочного устройства, дБ.

К конструктивным характеристикам газогорелочных устройств относят:

– диаметр газового сопла;

- выходное отверстие горелки;
- геометрические размеры горелки;
- способ стабилизации горения;
- угол раскрытия факела;
- интенсивность крутки.

Газогорелочные устройства инжекционного типа подразделяются по *теплоте сгорания газа*. В зависимости от того на какой теплоте сгорания работает инжекционное газогорелочное устройство различают устройства низкой (до 10 МДж/м³), средней (от 10 –20 МДж/м³) и высокой (свыше 20 МДж/м³) теплоты сгорания [1].

В зависимости от *давления газа*, на котором работают газогорелочные устройства инжекционного типа, они подразделяются на устройства, работающие на газе низкого давления до 5 кПа, среднего давления от 5 кПа до 0,3 МПа и высокого давления свыше 0,3 МПа [26].

В зависимости от *давления воздуха* газогорелочные устройства подразделяются: низкого давления (245–981 Па), среднего давления (981–1962 Па), высокого давления первой категории (1962– 49050 Па) и второй категории (49–294 кПа) [111, 126].

По организации смешения газа и воздуха инжекционные газовые горелки в зависимости от коэффициента избытка воздуха α_1 подразделяются на горелки с частичным предварительным смешением ($\alpha_1 = 0,3–0,7$) и полным предварительным смешением газа и воздуха ($\alpha_1 \geq 1$) [26].

Различают газогорелочные устройства однофакельные и многофакельные. Конструкция многофакельных газогорелочных устройств имеет распределительный коллектор [31].

Газогорелочных устройств инжекционного типа подразделяются по количеству сопел на односопловые и многосопловые, а также по их расположению – центральное или периферийное.

Различают газогорелочные устройства полностью автоматизированные, полуавтоматические и с ручным управлением [41].

1.2 Анализ существующих инжекционных газогорелочных устройств, работающих на газе низкого давления

В инжекционных (атмосферных) горелках низкого давления коэффициент избытка первичного воздуха, как правило, варьируется в пределах $0,3 \div 0,7$. Принцип действия таких горелок основан на подсосе первичного воздуха в горелку за счет инжектируемого действия газовой струи [111].

Атмосферные горелки используются в тех энергетических установках, где сжигается газ с высокой теплотой сгорания выше 16748 кДж/м^3 [126]. Благодаря хорошим теплотехническим показателям и удобной конструкции эти горелки широко используются для установок в газовых водонагревателях, сушильных аппаратах, бытовых плитах и отопительных котлах малой мощности [26].

Устойчивость работы горелок ограничена проскоком пламени внутрь горелок и отрывом пламени от кратера и определяется скоростью истечения газообразной смеси около их стенок [132]. При условии, что в других зонах газогорелочного устройства скорость истечения газообразной смеси будет выше. В результате этого образуется застойная зона, в которую газ поступает из струи, а воздух из окружающей среды [42].

Благодаря этому условно формируется кольцевой источник зажигания, который предотвращает отрыв фронта пламени от кратера горелки.

Явление проскока пламени в атмосферных горелках будет встречаться в том случае, если коэффициент избытка первичного воздуха будет более $0,6$ [74]. Дальнейшее увеличение коэффициента избытка первичного воздуха приведет к снижению устойчивости процесса горения. При значениях коэффициента избытка первичного воздуха менее $0,4$ будет иметь место неполное сгорание газа [74].

Явление отрыва пламени возможно, если для горения будет использован медленно горящий газ. К таким газам можно отнести природный газ с высоким содержанием метана (98%), а также генераторный газ с высоким содержанием балласта [1]. В случае сжигания быстро горящих смесей вероятно явление

проскока пламени внутрь смесителя, которое связано с невысоким форсированием смеси.[1]

Максимальная тепловая мощность инжекционных горелок низкого давления определяется скоростью выхода газозвушной смеси, которая меньше или равна скорости распространения пламени [42]. Для того чтобы диапазон регулирования тепловой мощности был достаточно большим, следует принимать его таким, при котором первичная смесь газа и воздуха была бы не горючей [43]. В этом случае можно избежать явления проскока пламени при уменьшении расхода природного газа [76].

Достоинства атмосферных горелок заключаются в компактном конструктивном исполнении, благодаря чему они получили широкое распространение для применения в теплоэнергетических установках различных мощностей.

Инжекционная газовая горелка «КГИ-56» является многофакельной газовой горелкой инжекционного типа, работающая на газе низкого давления (рисунок 1.1). На каждой трубке-распределителе с огневыми отверстиями или огневыми щелями устанавливается отдельный шибер для регулирования первичного воздуха и для каждой трубки в коллекторе имеется сопло. Эта горелка имеет относительно малый коэффициент инжекции равен $0,4 \div 0,5$ [24].

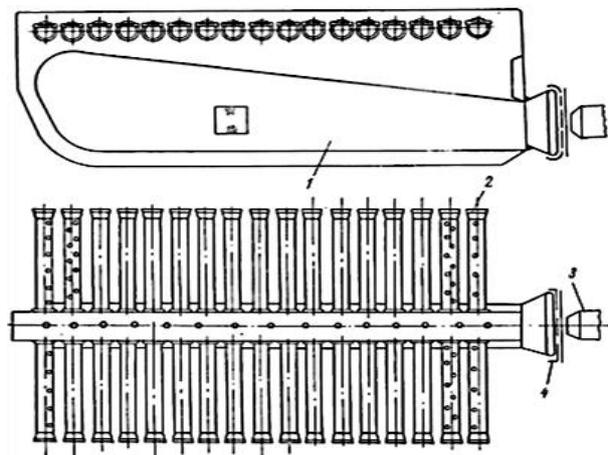


Рисунок 1.1 – Инжекционная горелка КГИ-56 [24]:

1 – общий смеситель; 2 – распределительные трубки; 3 – сопло; 4 – конфузор с шибером

Достоинством горелок данного типа является создание равномерного теплового напряжения в топке по длине горелки за счет многофакельного горения и двухстороннего расположения огневых отверстий [24].

Недостатком инжекционной газовой горелки является сложность конструкции, за счет наличия шибера и двухстороннего расположения трубок. В связи с малым коэффициентом инжекции такая горелка не может использоваться для сжигания сжиженного газа. Кроме того, при увеличении количества первичного воздуха устойчивость работы горелки будет снижаться, что может привести к возникновению явления отрыва пламени.

Инжекционная многофакельная горелка низкого давления, устанавливаемая в водонагревателях типа «Л-1», «Л-3», «ВПП-18» и их модификациях, а также в котлах малой мощности (рисунок 1.2).

Данная горелка используется для сжигания природного и сжиженного углеводородного газа, при этом коэффициент избытка первичного воздуха должен составлять 0,6. Одним из преимуществ данной горелки является малая скорость выхода газозвушной смеси, которая достигается за счет ширины щелей 1,2 мм (докритический размер). Наличие малой скорости выхода газозвушной смеси гарантирует устойчивое горение без отрыва пламени [111].

Еще одно преимущество заключается в наличии двух смесителей, которые присоединены к одному распределительному коллектору. В каждый смеситель подается газ через три сопла. Такая подача обеспечивает образование однородной смеси газа и воздуха при коротком пути смешения. Распределитель состоит из 13 трубок. Вдоль оси каждой трубки расположены щелевые отверстия в два ряда [111].

Недостатками инжекционной газовой горелки для водонагревателей являются применение нетермостойких материалов, сложность изготовления, высокая неравномерность выхода газозвушной смеси из щелевых отверстий. Неравномерность выхода газозвушной смеси из отверстий может привести к возникновению явлений отрыва и проскока пламени, а также к образованию застойной зоны.

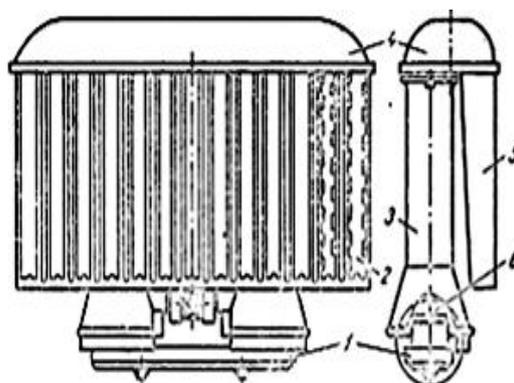


Рисунок 1.2 – Инжекционная горелка, устанавливаемая в водонагревателях типа «Л-1», «Л-3», «ВПГ-18» [111]:

- 1 – тройник с соплами; 2 – стальные пластины с огневыми отверстиями; 3 – смеситель;
4 – крышка смесителей; 5 – распределительные трубки; 6 – трехканальное сопло

Многофакельная инжекционная горелка конструкции Киселёва В. Н. для сжигания газообразного топлива в бытовых котлах и других аппаратах (рисунок 1.3). Горелка содержит трубчатый насадок (1), подключенный через газораспределитель (2), терморегулятор (3) и газовый клапан (4) к газовой магистрали [35]. Насадок снабжен щелевыми отверстиями (5), ширина которых меньше критического размера (1,6 мм для природного газа), и расположен поперек оси трубчатого насадка в шахматном порядке под углом друг к другу [35].

Инжекционная горелка работает следующим образом: при нажатии на пусковую кнопку (11) газового клапана (4) газ по трубопроводу (7) поступает на запальную горелку (8) и, воспламеняясь, нагревает датчик (9), расположенный над огневыми отверстиями запальной горелки (8) связанный с рычагом 10 [35].

Термодатчик (9) выполнен в виде пластины V – образной формы из жаропрочного материала с высоким коэффициентом линейного расширения, ленты шириной 20 и толщиной 0,5 мм. V – образный термодатчик (9), нагревается от пламени запальника (8), перемещает рычаг (10) на кнопку газового клапана (11) и удерживает ее в нажатом положении, обеспечивая проход газа через кран (12), терморегулятор (3), подвижной кран (13) газораспределитель (2) к трубчатым насадкам (1) основной горелки [35].

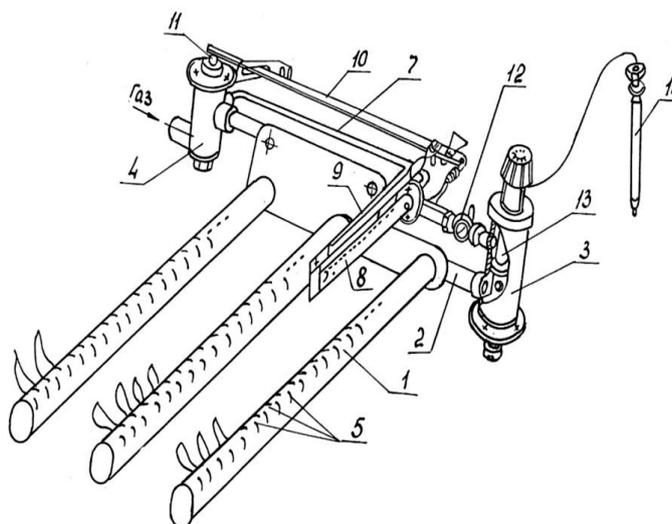


Рисунок 1.3 – Многофакельная инжекционная горелка конструкции Киселёва В. Н. [35]:
 1 – трубчатый насадок; 2 – газораспределитель; 3 – терморегулятор; 4 – газовый клапан;
 5 – щелевые отверстия; 6 – лепестковая пружина отсекателя газа; 7 – трубопровод;
 8 – запальная горелка; 9 – термодатчик; 10 – рычаг; 11 – кнопка газового клапана;
 12 – кран; 13 – подвижной клапан; 14 – термодатчик контроля температур теплоносителя

Преимущество данного вида газогорелочного устройства заключается в том, что выполнение огневых отверстий поперек оси трубчатого насадка в два ряда в шахматном порядке под углом друг к другу повышает КПД теплового агрегата [35]. Кроме того, оснащение терморегулятора отсекателем газа, исключает пульсацию инжекционной горелки при работе на минимальных расходах газа и увеличивает коэффициент рабочего регулирования [35]. Исключение датчика тяги упрощает конструкцию газогорелочного устройства [35].

Недостатками многофакельной инжекционной газовой горелки являются, значительная неравномерность выхода газозвушной смеси из щелевых отверстий, сложность изготовления, высокая стоимость контрольно-измерительных приборов.

Известна *атмосферная газовая горелка с рассеивателями многофакельного типа конструкции Себастьяни Э.*, обеспечивающая оптимальное сгорание, используя газы низкого давления из углеводородного семейства газов (рисунок 1.4). Горелка имеет насадки для истечения газа,

всасывающие смесительные каналы, соосные с насадками, и рассеиватели, связанные с каналами для подачи смеси газа и первичного воздуха в камеру сгорания. Установка также состоит из конструкции коробчатого типа, присоединенной к камере сгорания и покрывающей всасывающие и смесительные каналы. У этой конструкции есть стенка, расположенная поперек между насадками и каналами, и для каждого насадка впускной проход, через который всасывается первичный воздух в канал, и впускные проходы для вторичного воздуха рядом с впускным проходом для первичного воздуха [82].

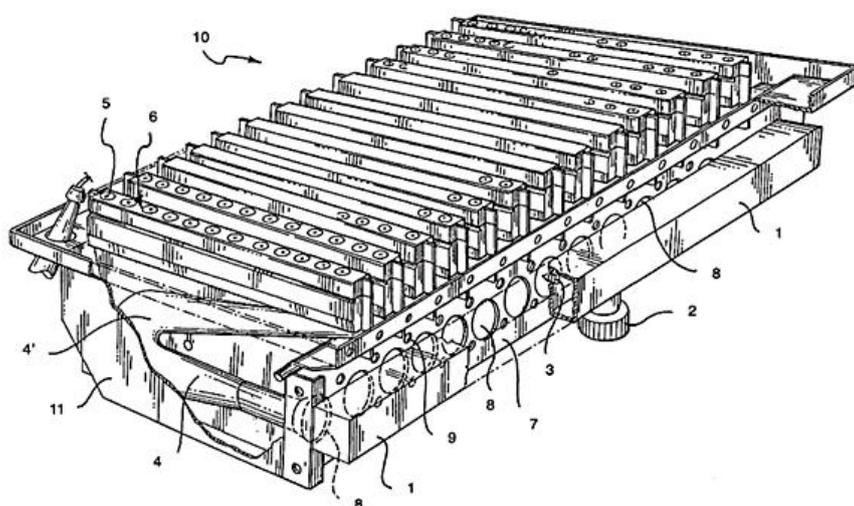


Рисунок 1.4 – Атмосферная горелка низкого давления с рассеивателями конструкции Себастьяни Э. [82]:

- 1 – канал; 2 – фитинг; 3 – насадок; 4 – канал; 4' – соединительный канал;
 5 – распылители; 6 –рассеиватель; 7 – стенка; 8 – проход трубки;
 9 – дополнительные проходы; 10 – атмосферная горелка;
 11 – конструкция коробчатого типа

Достоинством атмосферной горелки данного типа является возможность применения различных углеводородных газов низкого давления, упрощение подачи первичного и вторичного воздуха, для улучшения процесса смесеобразования [82].

Недостатком многофакельной атмосферной газовой горелки с рассеивателями является сложность конструкции, большие габаритные размеры,

вследствие чего, ограничена возможность широкого применения в топках различных котлоагрегатов, отсутствие возможности сто процентного регулирования.

Инжекционная горелка с огневыми отверстиями сегментной формы.

Существует инжекционная газовая горелка низкого давления, многофакельного типа, предназначенная для оборудования духовых шкафов, бытовых газовых плит, проточных водонагревателей и других теплотехнических агрегатов (рисунок 1.5).

Горелка содержит огневой насадок, соединенный со смесительной камерой, огневые отверстия, имеющие форму сегмента и расположенные напротив друг друга в торцах канавок, которые размещены на насадке. Размер огневого отверстия согласован с условием стабильного горения [83].

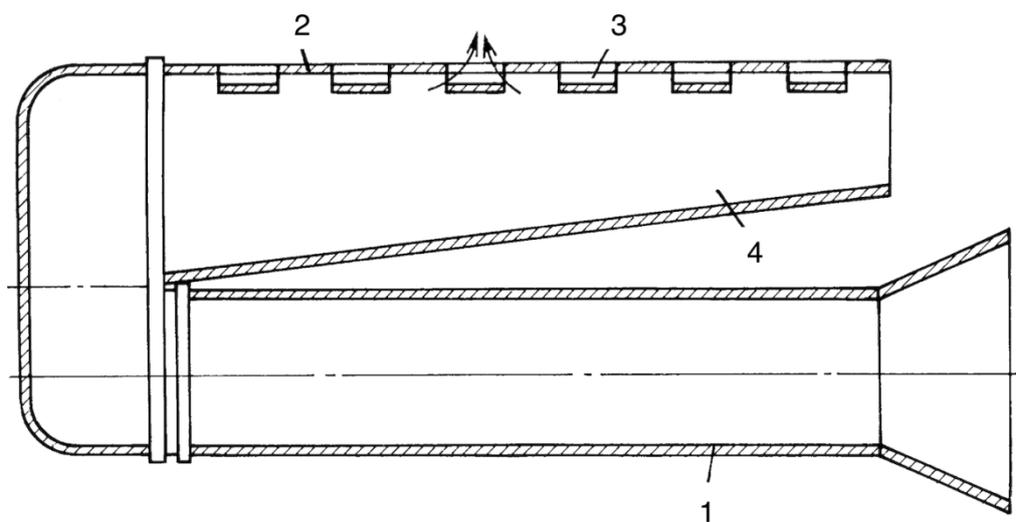


Рисунок 1.5 – Инжекционная горелка с огневыми отверстиями сегментной формы [83]:

- 1 – смесительная камера; 2 – поверхность пластины; 3 – огневое отверстие;
4 – распределительная трубка

Достоинством горелок данного типа является устойчивость процесса горения, возможность применение в теплотехнических агрегатах широкого спектра назначения [83].

Недостатком многофакельной инжекционной газовой горелки низкого давления является сложность конструкции огневых отверстий (наличие сегмента),

повышенная турбулентность горения, сравнительно высокая неравномерность распределения газовой смеси по длине огневой части насадка.

Многопоточная инжекционная горелка относится к изобретениям атмосферных горелок и может быть использована в технологических водонагревателях преимущественно взрыво- и пожароопасных объектов нефтехимических производств, а также для повышения безопасности газового оборудования (рисунок 1.6).

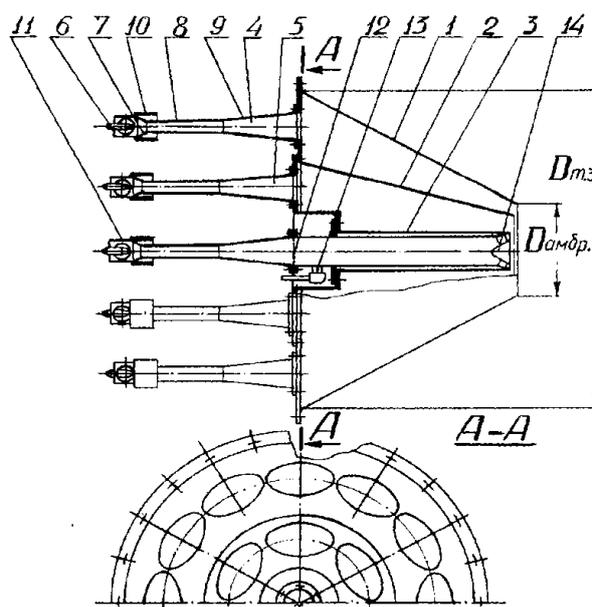


Рисунок 1.6 – Многопоточная инжекционная горелка [21]:

- 1 – промежуточная труба; 2 – внутренняя труба; 3 – выпускная труба; 4 – инжектор;
 5 – инжектор; 6 – газовое сопло; 7 – входной конфузор; 8 – смесительная труба;
 9 – выходной диффузор; 10 – регулятор подсосываемого воздуха; 11 – инжектор;
 12 – пламяпреградитель; 13 – запальная свеча; 14 – стабилизатор пламени;
 $D_{амбр.}$ – размер амбразуры горелки; $D_{т.з.}$ – диаметр топочной зоны; А-А – продольный разрез

Многопоточная инжекционная горелка содержит коаксиально установленные по оси горелки внешнюю, промежуточную и внутреннюю выпускные трубы [21]. Внешняя и промежуточная трубы выполнены в виде усеченных конусов, со стороны вершины обращены в сторону топочной зоны теплового агрегата, а со стороны основания каждая из них подключена к четному количеству инжекторов, равнорасположенных по concentрическим окружностям,

причем внутренняя труба со стороны входа подключена к соосному с ней инжектору, за которым последовательно по потоку газозвушной смеси установлены пламяпреградитель и запальная свеча, а со стороны выхода в топочную зону – стабилизатор пламени, при этом наибольший диаметр внешней трубы, обращенной в топочную зону, должен быть не менее внутреннего диаметра топочной зоны, которая ограничена боковыми экранами [21].

Достоинством горелок данного типа является устойчивость процесса горения, защита от проскока и отрыва пламени, что достигается за счет применения стабилизатора горения [21].

Недостатком многопоточной инжекционной газовой горелки низкого давления является сложность конструкции, необходимость наличия вторичной розжиговой горелки, высокий коэффициент избытка первичного воздуха = 1,6, низкая температура факела, сложность автоматизации горелки.

Газогорелочное устройство инжекционного типа конструкции «Мосгазниипроект» применяются в автоматизированных газовых водонагревателях типа АГВ–80 (рисунок 1.7) и АГВ–120 (рисунок 1.8), емкостью 80 и 120 литров по воде соответственно. Горелка данного производства изготавливается посредством литья из чугуна. Работает как на природном газе низкого давления, так и на сжиженном углеводородном топливе.

Достоинством данных горелок является возможность их компоновки, в случае необходимости, для увеличения тепловой мощности в группы по несколько горелок. Насадка с плоской прямоугольной рамкой позволяет равномерно распределить теплоту по топочному объему. Характеризуется простотой и надежностью в эксплуатации, легко монтируется и устойчиво работает в требуемом диапазоне давлений. Могут быть использованы не только для водонагревателей, но и для любых других теплогенерирующих установок, в случае соответствия тепловой мощности, габаритным размерам и форме. Имеет малую длину факела (до 0,1 м) [111].

Недостатком инжекционной газовой горелки низкого давления конструкции «Мосгазниипроект» является большой вес, большие габаритные размеры, сложность геометрической формы.

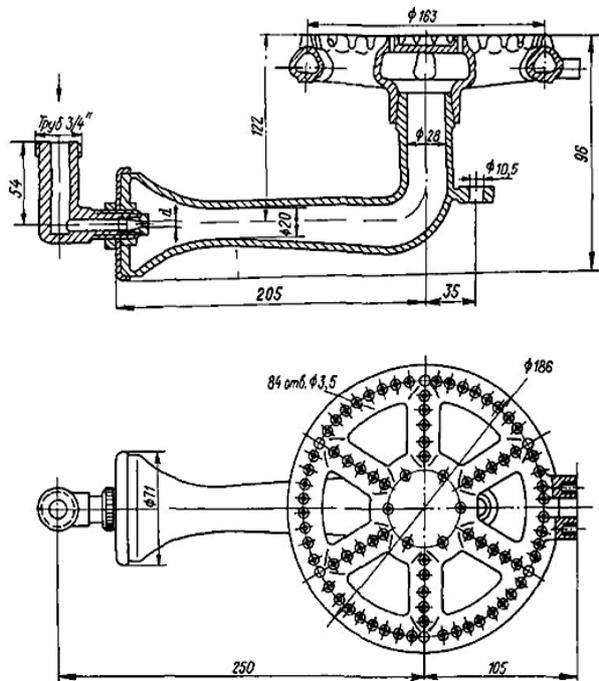


Рисунок 1.7 – Инжекционная газовая горелка для емкостного водонагревателя АГВ – 80 конструкции «Мосгазниипроект» [111]

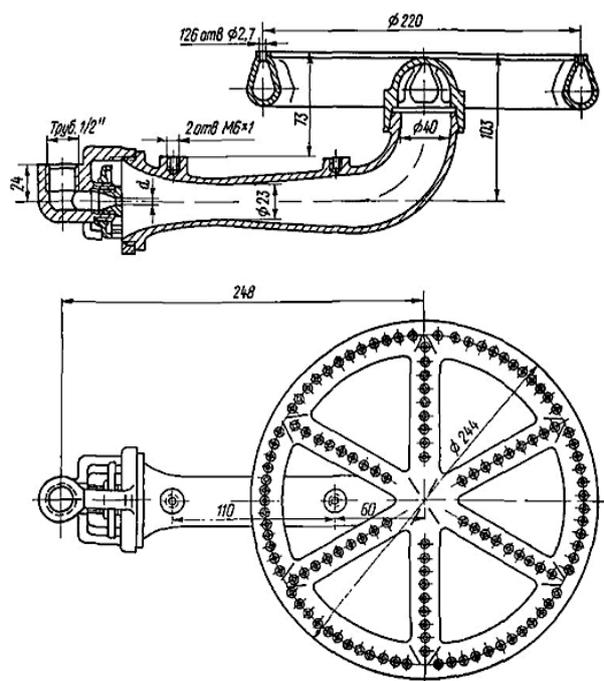


Рисунок 1.8 – Инжекционная газовая горелка для емкостного водонагревателя АГВ – 120 конструкции «Мосгазниипроект» [111]

Инжекционная многофакельная горелка с продольной формой коллектора конструкции «Киевгазпроект» выполняется в литом исполнении из чугуна (рисунок 1.9) [26, 111]. Такое газогорелочное устройство предназначено для использования в секционных котлах малой теплопроизводительностью, а также других теплофикационных установках, где топки имеют продольную форму.

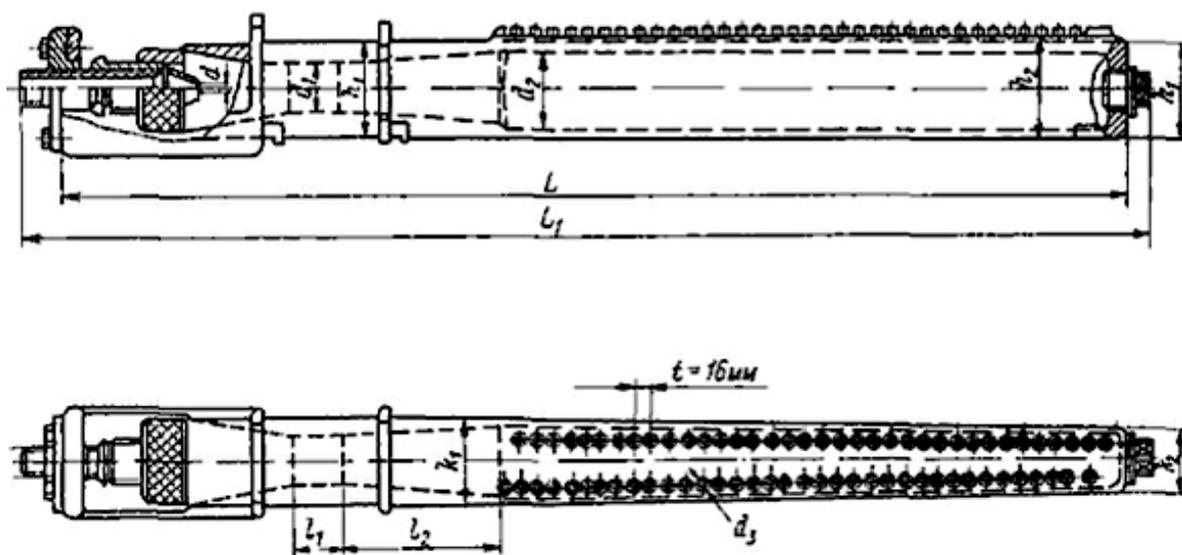


Рисунок 1.9 – Инжекционная многофакельная горелка с коллектором удлиненной формы конструкции «Киевгазпроект» [26, 111]

Достоинством многофакельной инжекционной горелки данного типа является возможность ее работы на природном газе, а также на сжиженном углеводородном топливе, при условии сохранения определенных требований [26]. Газовые факелы имеют высоту до 0,2 м и равномерно распределены по площади насадки. В состав конструкции газогорелочного устройства входят специальные устройства для его крепления в топке котла [111].

Недостатком инжекционной многофакельной газовой горелки с продольной формой коллектора конструкции «Киевгазпроект» являются большие габаритные размеры, возможность использования только в топках продольной формы, не высокая тепловая мощность, низкие пределы регулирования, сложность автоматизации.

Инжекционная горелка итальянского производства «Polidoro». Данное газогорелочное устройство предназначено для установки в атмосферных и трубно–настенных котлоагрегатов, а также в водонагревателях, работающих на газообразном топливе (рисунок 1.10). Выполнена горелка фирмы Polidoro из нержавеющей стали. Огневой насадок такой горелки обеспечивает устойчивое горение пламени за счет оптимального размера щелей. Горелка охлаждается водой.

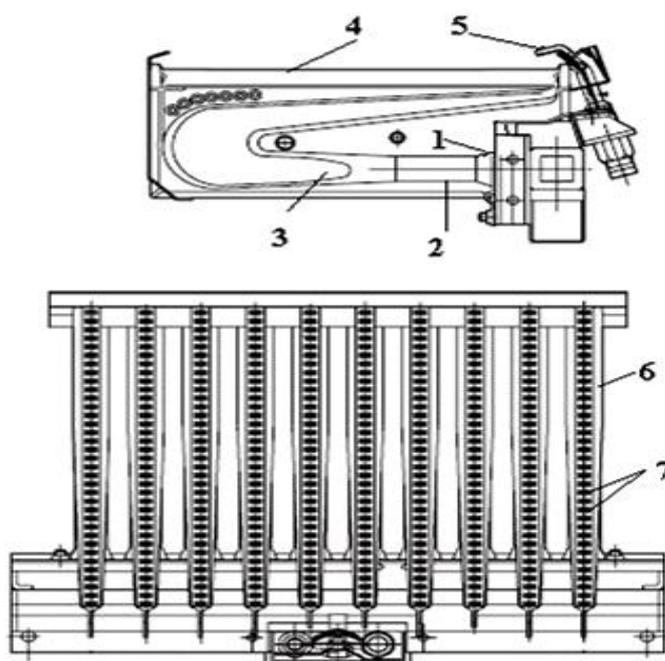


Рисунок 1.10 – Инжекционная горелка итальянского производства «Polidoro»:

1 – конфузор; 2 – горловина; 3 – диффузор; 4 – металлическая пластина; 5 – запальник;
6 – огневой насадок; 7 – щелевые отверстия

Достоинством горелок данного вида является, соответствие параметров их работы современным стандартам по шуму. Высокий КПД (чуть выше 90%), благодаря современным технологиям изготовления [136].

Недостатком инжекционной газовой горелки итальянского производства Polidoro являются сложность изготовления, необходимость в соединении с водным контуром теплообменника, установка горелки осуществляется в

специальных лабораториях. Долговечность ГГУ ниже, чем у котлоагрегата (рисунок 1.11).



Рисунок 1.11 – Прогоревшая горелка итальянского производства «Polidoro»

1.3 Компоновка отопительной водогрейной котельной котлами малой мощности до 30 кВт

Выбор компоновки котельного оборудования осуществляется таким образом, чтобы было обеспечено надёжное и бесперебойное теплоснабжение потребителей [13]. В зависимости от вида вырабатываемого теплоносителя котельные малой мощности можно подразделить на паровые и водогрейные [107].

По назначению котельные делятся на следующие группы [68, 69]:

- отопительные, которые предназначены для теплоснабжения систем горячего водоснабжения, отопления и вентиляции жилых и общественных зданий;
- производственные, которые обеспечивают горячей водой и паром технологические процессы предприятий;
- производственно–отопительные, которые обеспечивают горячей водой и паром различных потребителей.

Согласно нормативным требованиям расчетная производительность котельной определяется как сумма расчетных часовых расходов теплоты на нужды отопления, вентиляции и кондиционирования для трех характерных режимов: максимально-зимнего, наиболее холодного месяца и летнего с учетом расчетных расходов тепла на ГВС, потерь теплоты и расхода на собственные нужды котельной [92, 99, 102]. В случае выхода из строя одного из установленных котлов оставшиеся должны обеспечивать не менее 87% расчетной нагрузки на отопление и вентиляцию для потребителей 2-й категории и 100% расчетной нагрузки на отопление и вентиляцию для потребителей 1-й категории [102].

Принципиальная тепловая схема котельной с водогрейными котлами малой мощности включает весь перечень оборудования и трубопроводы. Расположение котлоагрегатов и дополнительного оборудования: насосов, аккумуляторных и конденсационных баков, устройства подачи топлива, деаэраторы и теплообменники, тепловые щиты, пульта управления и вентиляторы.

После разработки принципиальной тепловой схемы котельной выбирается необходимое оборудование котельной. В водогрейной котельной принципиальная тепловая сеть может быть как открытой, так и закрытой и зависит от вида вырабатываемого теплоносителя [108, 85]. Расчет тепловой схемы котельной базируется на решении уравнений теплового и материального баланса, составляемых для каждого элемента, схемы.

Пример принципиальной тепловой схемы котельной с четырьмя напольными котлами малой мощности приведен на рисунке 1.12. В качестве теплоносителя принят: теплоноситель – вода с параметрами 95/70 °С. Система автоматики фирмы «Danfoss» (страна производитель Германия), поставляемая совместно с отопительным оборудованием для регулирования температуры теплоносителя в зависимости от температуры наружного воздуха. Каждый котел работает по температурному графику 95/70 °С. Температура на выходе из котла поддерживается постоянной при помощи системы автоматики котла. Температура

сетевой воды для системы отопления в зависимости от температуры наружного воздуха регулируется по отопительному графику с помощью трехходового регулирующего клапана.

Принципиальные схемы компоновки котельных перестают отвечать современным стандартам в области энергоэффективности и имеют ряд недостатков: невозможность плавного регулирования температуры теплоносителя, низкая степень автоматизации, необходимость обслуживания и контроля работы эксплуатационным персоналом [131].

Каскадная схема компоновки котельной с водогрейными котлами малой мощности. Современным требованиям отвечает каскадная схема компоновки водогрейных котлов. Каскадная котельная – это система взаимосвязанных между собой нескольких котлов, мощность которых в сумме обеспечивает требуемое теплотребление объекта. Принцип работы каскадной котельной основан на последовательном (каскадном) соединении котлов между собой [60]. При этом один из котлов каскадной схемы является главным, который в зависимости от потребности в увеличении мощности работы котельной, последовательно подключает остальные котлы каскада. Мощность каждого котла, входящего в состав каскада, может быть любая. Общая мощность каскадной котельной варьируется от требуемого теплотребления объекта до минимальной–номинальной мощности одного котла каскада [55].

Котельная каскадной схемы компоновки имеет ряд преимуществ по сравнению с котельной принципиальной схемы компоновки. При работе котельной принципиальной схемы компоновки используются все котлы, установленные в котельной, несмотря на требуемую отпускаемую нагрузку [52], исключая резервный котел. В котельной каскадной схемы компоновки возможно включение того количества котлоагрегатов, которое необходимо для обеспечения требуемой тепловой нагрузки. Причем подключение последующих котлов, в случае повышения нагрузки, будет происходить автоматически и при плавном регулировании системы каскада, то есть будет идти распределение нагрузки по всем котлам [55, 60].

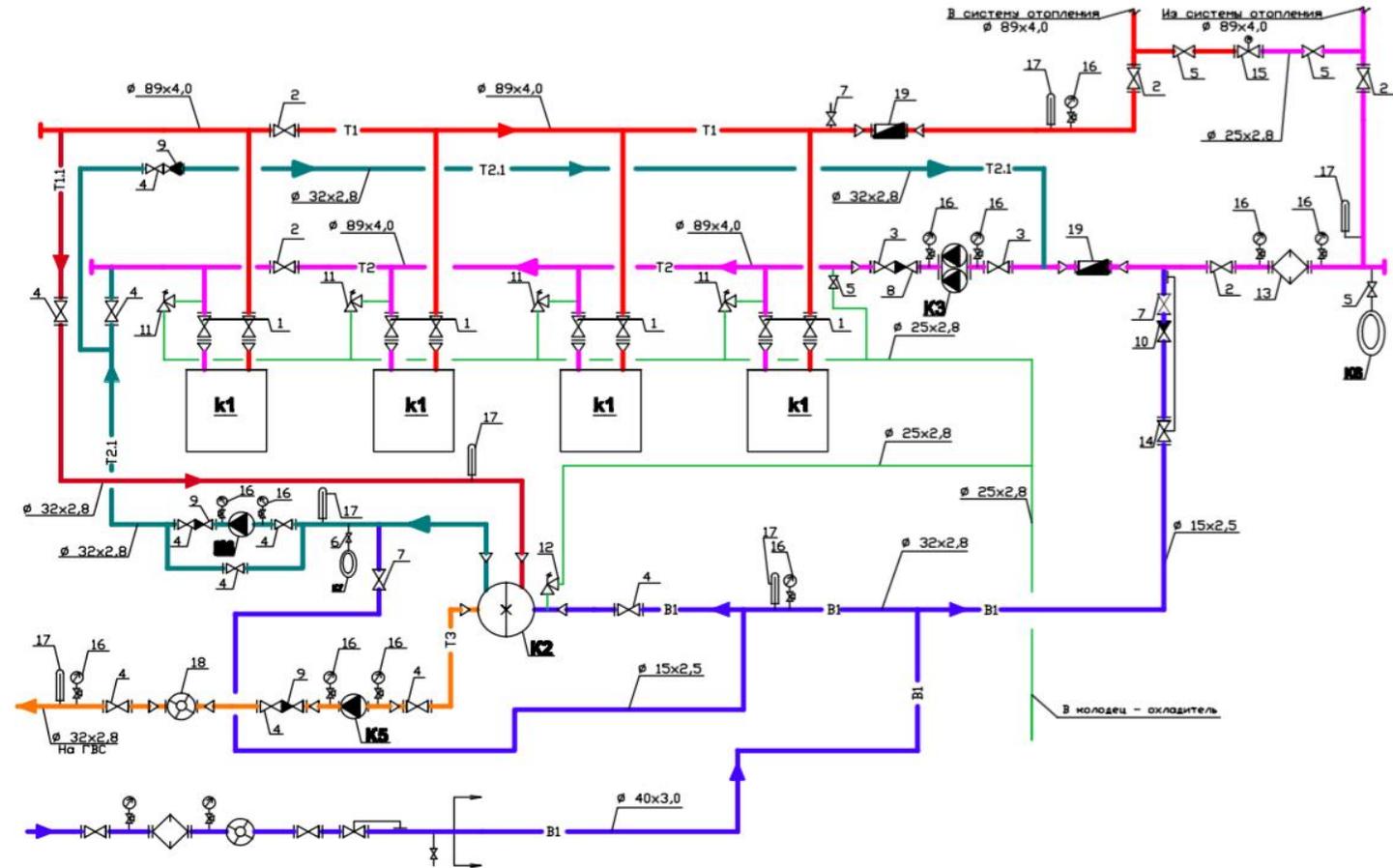


Рисунок 1.12 – Принципиальная тепловая схема с четырьмя напольными котлами малой мощности:

K1 – напольный газовый котел; K2 – вертикальный бойлер; K3 – сетевой насос; K4 – циркуляционный насос; K5 – повысительный насос;
 K6 – мембранный расширительный бак; 1, 2, 3, 4 – кран фланцевый; 5, 6, 7 – кран муфтовый; 8 – клапан обратный фланцевый;
 9, 10 – клапан обратный муфтовый; 11, 12 – клапан предохранительный угловой пружинчатый; 13 – грязевик; 14 – клапан регулирующий;
 15 – кран фланцевый с электроприводом; 16 – манометр показывающий; 17 – термометр показывающий; 18 – водомер;
 19 – счетчик воды

Плавное регулирование увеличивает срок службы котельного оборудования. При выходе из строя одного котлоагрегата, котельная каскадной схемы компоновки будет продолжать работать, при этом обеспечивая до 50% требуемой мощности, что повышает надежность всей отопительной системы. Каскадная схема компоновки позволяет сокращать объемы теплогенерирующего оборудования, что в свою очередь, облегчает их обслуживание и может выполняться в процессе эксплуатации [60]. Важным преимуществом каскадной схемы является снижение вредных выбросов в атмосферу за счет плавного регулирования работы котлов и уменьшение расхода топлива [52, 53]. Пример каскадной схемы компоновки котельной с четырьмя настенными котлами малой мощности приведен на рисунке 1.13.

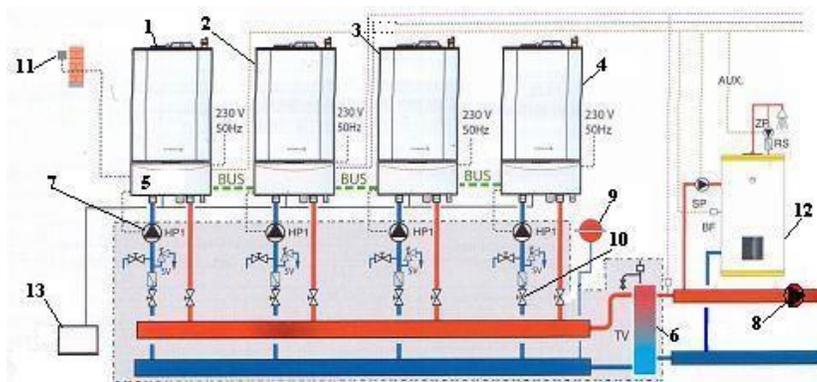


Рисунок 1.13 – Схема каскадной компоновки котлов:

- 1 – главный котел каскада К1; 2 – второй котел каскада К2;
- 3 – третий котел каскада К3; 4 – четвертый котел каскада К4; 5 – автоматика котла;
- 6 – гидравлический разделитель; 7 – повысительный насос;
- 8 – циркуляционный насос; 9 – расширительный бак;
- 10 – регулирующий клапан; 11 – датчик температуры наружного воздуха;
- 12 – водонагреватель; 13 – система химической водоподготовки

Каскадная схема компоновки котельной представляет собой каскад из четырех котлов одинаковой мощности. Данная схема полностью автоматизирована. Автоматика котла (5) включает систему каскада котлов в работу. После включения

каскада, запускается в работу насос (7), который устанавливается за гидравлическим разделителем (6), и циркуляционный насос (8) отопительной системы. В системе начинает циркулировать холодная вода.

Запуск работы котлов производится автоматически, таким образом, что первым включается в работу главный котел каскада К1 (1), далее автоматика котла К1 (1) управляет последующим включением котлов К2 (2), К3 (3) и К4 (4) в каскаде, по мере необходимости. Включение каждого последующего котлоагрегата связано с показаниями датчика температуры наружного воздуха (11). Распределение нагрузки между котлами осуществляется за счет плавного регулирования автоматики системы.

Все котлы, кроме первого К1 (1), могут работать на нагрев воды для системы ГВС. Для поддержания необходимого количества горячей воды и её подогрева в системе устанавливается водонагреватель (12), присоединенный к котлу через регулирующий клапан (10). Объем бойлера, как правило, 0,2 м³ и более.

Гидравлическое соединение котлов в новой схеме компоновки осуществляется с помощью спаренного коллектора. Коллектор бывает двух видов:

- для подключения котлов в один ряд (рисунок 1.13);
- для подключения котлов в два ряда. Установка котлов осуществляется задней стенкой друг к другу.

В составную часть коллектора входит гидравлический разделитель (6). Именно благодаря гидравлическому разделителю (6) возможна эксплуатация новой схемы компоновки котельного оборудования [124].

Регулирование работы каскада осуществляется следующим образом. После розжига котлоагрегат запускается на 50% своей номинальной мощности, затем мощность уменьшается до минимального значения, которое обеспечивает требуемую температуру в системе отопления.

Установка датчика температуры наружного воздуха (11) позволяет поддерживать постоянство температуры воды в системе отопления при изменении

температуры наружного воздуха за счет увеличения мощности работы котельного оборудования. Нагретая вода через гидравлический разделитель (6) поступает в систему отопления. Для повышения долговечности работы всего теплогенерирующего оборудования в котельной обязательно должна быть установлена система химической водоподготовки (13) [2].

При повышении нагрузки на систему отопления срабатывает контроллер в первом котле К1 (1), и подключает второй котел К2 (2), который запускается в работу также как и первый К1 (1), сначала на 50% номинальной мощности, а затем снижает свою нагрузку до необходимого минимума. Если температура воды в системе отопления по-прежнему остается ниже требуемой, то срабатывает автоматика первого котла К1 (1) и подключается третий котел К3 (3), а при сильном понижении температуры и последний четвертый котлоагрегат К4 (4).

При работе четырех котлов котельная будет работать на максимально возможную мощность, при этом в гидравлическом разделителе (6) произойдет уравнивание потоков между отопительным и котловым контурами. При этом горячая вода, как и ранее, будет охлаждаться отработанной водой отопительной системы [131].

Плюсами каскадной схемы компоновки является возможность установки различных систем автоматики [52]. Для повышения эффективности работы системы отопления и экономии технико-экономических ресурсов устанавливается специальный контроллер, снижающий температуру воды в системе отопления в ночные часы [61]. Также возможно установить контроллер включения работы котельной не только от датчика температуры наружного воздуха, но и от сообщения с мобильного телефона. Установка подобного контроллера нужна в том случае, если источником теплоснабжения является объект сезонного пользования (например, загородный дом, эксплуатируемый в летний период).

В каскадной схеме компоновки существует система приоритетов горячего водоснабжения [61, 131]:

- приоритетное. Во время использования системы ГВС полностью отключается система отопления;
- смешанное. Мощность котлоагрегатов разделяется на систему отопления и систему ГВС;
- неприоритетное. Система отопления и система ГВС работают одновременно, но на первом месте стоит система отопления

1.4 Методика расчета теплового баланса каскадных котельных установок

Цель расчета теплового баланса каскадной котельной установки – обоснование равенства между располагаемой теплотой Q_p^p , полезно использованной теплотой Q_1 и тепловыми потерями Q_2, Q_3, Q_5 [8, 25, 75, 89, 115].

Уравнение теплового баланса для газообразной смеси имеет следующий вид [159]:

$$Q_p^p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_5, \quad (1.1)$$

По данным теплового баланса вычисляется КПД, а также необходимый расход топлива [14, 25, 75, 115]. Составляется тепловой баланс уже для установившегося теплового состояния каскадной котельной установки на 1 м³ газообразного топлива при нормальных условиях, то есть атмосферному давлению $p = 101325$ Па и абсолютной температуре $T = 0$ °С [75, 111, 115].

Располагаемая теплота Q_p^p определяется на 1 м³ газообразного топлива по следующей формуле [8, 15, 25, 75, 89]:

$$Q_p^p = Q_n^c + i_{\text{ТЛ}}, \quad (1.2)$$

где Q_n^c – низшая теплота сгорания сухой массы газообразного топлива, кДж/м³;

$i_{\text{ТЛ}}$ – физическое тепло топлива, кДж/м³.

Физическое тепло топлива определяется по формуле [8, 15, 25, 75, 115]:

$$i_{\text{ТЛ}} = c_{\text{ТЛ}} \cdot t_{\text{ТЛ}}, \quad (1.3)$$

где $c_{\text{ТЛ}}$ – теплоемкость рабочего топлива, кДж/м³·°С;

$t_{\text{ТЛ}}$ – температура топлива, °С.

Формула для определения теплоемкости газообразного топлива отнесенного на 1 м³ сухого газа имеет вид [75, 115]:

$$c_{\text{ТЛ}} = 0,01 c_{\text{H}_2} H_2 + c_{\text{CO}} CO + c_{\text{CH}_4} CH_4 + c_{\text{C}_m\text{H}_n} C_m H_n + c_{\text{CO}_2} CO_2 + \dots + \\ + 0,00124 \cdot c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot d_{\text{Г.ТЛ}}, \quad (1.4)$$

где H_2 , CO , CH_4 , $C_m H_n$, CO_2 – объемные доли компонентов, входящие в химический состав газообразной смеси, в процентах;

c_{H_2} , c_{CO} , c_{CH_4} , $c_{\text{C}_m\text{H}_n}$, c_{CO_2} , $c_{\text{H}_2\text{O}}$ – теплоемкости компонентов, входящих в химический состав газообразного топлива, кДж/м³·°С;

$d_{\text{Г.ТЛ}}$ – влагосодержание газообразного топлива.

Определение потерь теплоты с уходящими газами q_2 , в процентах [8, 15, 75, 115]:

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_p} \cdot 100 = \frac{(I_{\text{УХ}} - \alpha_{\text{УХ}} \cdot I_{\text{ХВ}}^{\circ})}{Q_p}, \quad (1.5)$$

где $I_{\text{УХ}}$ – энтальпия уходящих газов, кДж/м³;

$\alpha_{\text{УХ}}$ – коэффициент избытка воздуха;

$I_{\text{ХВ}}^{\circ}$ – энтальпия холодного воздуха, кДж/м³.

Определение потерь теплоты от химической неполноты сгорания q_3 , в процентах [8, 15, 25, 75, 115]:

$$q_3 = \frac{Q_3}{Q_p}, \quad (1.6)$$

Потери теплоты от нагретых поверхностей в окружающую среду q_5 для каждого котельного агрегата, установленного в каскадной установке, принимается по справочным значениям [75]. В том случае если нагрузки отличаются от номинальной больше чем на 25%, то q_5 пересчитывается по формуле, в процентах [8, 25, 75, 115]:

$$q_5 = q_{5\text{ном}} \cdot \frac{D_H}{D}, \quad (1.7)$$

где $q_{5\text{ном}}$ – потери теплоты от наружного охлаждения при работе котла, в процентах;

D_H – номинальная теплопроизводительность котла, т/час;

D – теплопроизводительность производительность котла, т/час.

Определение суммарных потерь теплоты в котельном агрегате, рассчитывается по формуле, в процентах [8, 25, 75, 115]:

$$q = q_2 + q_3 + q_5, \quad (1.8)$$

Формула для определения коэффициента полезного действия котлоагрегата $\eta_{к.а}$, в процентах, имеет вид [8, 14, 15, 75, 89, 115]:

$$\eta_{к.а} = 100 - q, \quad (1.9)$$

Определение полного расчета теплоты, которое было полезно отдано в котельном агрегате $Q_{к.а}$, кДж/ч [75]:

$$Q_{к.а} = D_{\text{пр}} \cdot i_{\text{кип}} - i_{\text{п.в}} + Q_{\text{от}}, \quad (1.10)$$

где $D_{\text{пр}}$ – расход воды для продувки котла, кг/ч;

$i_{\text{кип}}$ – энтальпия, кДж/кг;

$i_{\text{п.в}}$ – энтальпия питательной воды на входе в котлоагрегат, кДж/м³;

$Q_{\text{от}}$ – тепловосприятие воды, которая подогревается в котле и отдается на сторону, кДж/ч.

Определение расхода топлива, подаваемого в топку B , осуществляется по следующей формуле, кг/ч [8, 15, 25, 75, 115]:

$$B = \frac{Q_{к.а}}{Q_p^p \cdot \eta_{к.а}} \cdot 100, \quad (1.11)$$

1.5 Методика исследования величины потерь теплоты каскадной котельной установкой в окружающую среду

Потери теплоты в окружающую среду q_5 можно определить, учитывая интенсивность теплоотдачи естественной конвекцией на внешних поверхностях котлов, входящих в состав каскадной установки, по формуле [75]:

$$q_5 = \frac{Q_5}{Q_H^p} \cdot V_{\Gamma}^{\text{сух}} \cdot 100, \quad (1.12)$$

где Q_5 – количество теплоты, переданное конвекцией через наружные поверхности ограждения, Вт;

Q_H^p – низшая теплота сгорания сжигаемого топлива, кДж/м³;

$V_{\Gamma}^{\text{сух}}$ – объемный расход сухой части влажного газа, м³/с.

Определение количества теплоты, переданного на конвекцию через наружные поверхности ограждения Q_5 , Вт [75]:

$$Q_5 = F \cdot \alpha \cdot (t_n - t_B), \quad (1.13)$$

где F – площадь рассчитываемой поверхности котлоагрегата, м²;

α – коэффициент теплоотдачи исследуемой поверхности, Вт/м²·°С;

t_n – температура поверхности котла, °С;

t_B – температура воздуха, °С.

Температура поверхности каждого котла t_n каскадной установки определяется путем экспериментального измерения поверхности котла.

1.6 Выводы по главе 1

На основании анализа существующих газогорелочных устройств для котлов малой мощности и схем компоновки котельного оборудования, используемых в практике, сделаны следующие выводы:

1. В современных водогрейных котельных установках малой мощности до 30 кВт в основном используются ГГУ зарубежного производства, так как отсутствуют отечественные аналоги.

2. Эффективность работы котельных малой мощности зависит от схемы компоновки котельного оборудования.

3. Для решения вопросов импортозамещения требуется разработка конструкции ГГУ для отечественных котлов малой мощности.

4. Для повышения эффективности получения теплоты в котлах малой мощности необходимо разработать каскадную схему компоновки отечественных водогрейных котлов мощностью 30 кВт с инжекционными горелками разработанной конструкции (патент на изобретение № 2618137).

ГЛАВА 2 РАСЧЁТ И РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ИНЖЕКЦИОННОЙ ГАЗОВОЙ ГОРЕЛКИ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

2.1 Методика расчета газогорелочного устройства

Газогорелочное устройство при работе должно обеспечить: необходимую тепловую мощность, широкий диапазон регулирования расхода газа, устойчивость пламени и минимальную концентрацию вредных веществ в продуктах сгорания [8, 11, 26, 31, 41, 51, 54, 73, 76, 77, 83, 86, 111, 126, 130].

Теоретический расчет газогорелочных устройств достаточно сложен, так как при расчете необходимо учитывать и процессы смешения, и процессы горения, и процессы теплоотдачи, обеспечивая минимально возможную концентрацию вредных веществ в продуктах сгорания [8, 11, 26, 27, 29, 62, 76, 77, 86, 111, 130]. Поэтому, как правило, для расчета ГГУ используются полуэмпирические методики [26, 27, 29, 111]. При расчете ГГУ определяют габаритные размеры и форму следующих элементов: конфузора, диффузора, огневых каналов, горловины смесителя и сопла (рисунок 2.1).

Для расчета газогорелочного устройства необходимо знать следующие параметры: химический состав используемого газа, тепловую мощность газогорелочного устройства, давление газа перед соплом, температуру газа и воздуха, характеристики оборудования, для которого рассчитывается газогорелочное устройство [8, 27, 29, 77, 111].

При расчете инжекционных горелок объем и плотность газа определяют при нормальных физических условиях, так как давление газа практически не отличается от атмосферного давления, а расчетная температура газа в зимний период изменяется в пределах 5–10 °С [27, 29, 111, 130]. Так же при расчете таких горелок можно не учитывать содержание водяных паров в газе и воздухе, так как оно практически не влияет на теплоту сгорания газа, его объем и плотность [111].

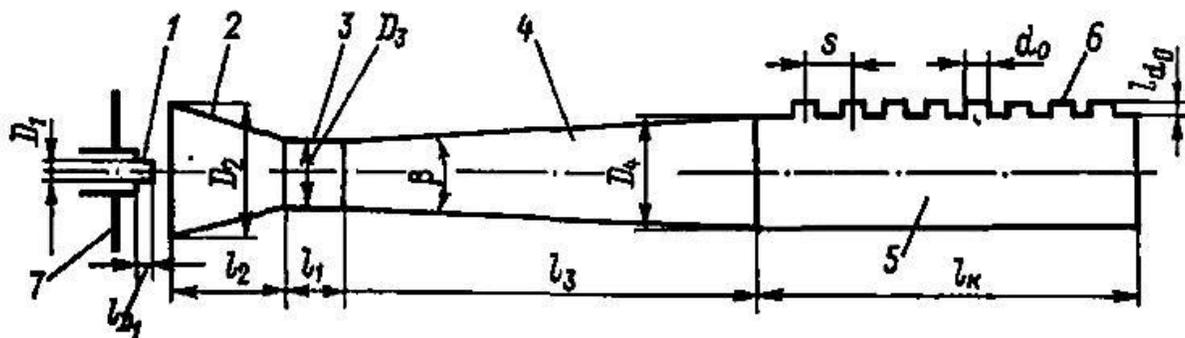


Рисунок 2.1 – Расчетная схема инжекционной горелки низкого давления [111]:

1 – сопло; 2 – конфузор; 3 – горловина; 4 – диффузор; 5 – распределительный коллектор;
6 – огневые каналы; 7 – регулировочная шайба поступления первичного воздуха;

D_1 – диаметр поперечного сечения газового сопла; D_2 – диаметр конфузора; D_3 – диаметр горла смесителя; D_4 – диаметр диффузора; l_{D_1} – длина цилиндрической части сопла; l_1 – длина горловины смесителя; l_2 – длина конфузора; l_3 – длина диффузора смесителя; l_k – длина коллектора; l_{d_0} – глубина огневого канала; β – угол конусности; s – шаг между осями огневых каналов; d_0 – диаметр огневых каналов на коллекторе горелки

Расхода газа V_{Γ} определяется по формуле [111], м³/ч:

$$V_{\Gamma} = \frac{q}{Q_{\text{H}} \cdot N \cdot \eta}, \quad (2.1)$$

где q – номинальная теплопроизводительность котлоагрегата, кДж/ч;

Q_{H} – низшая теплота сгорания газа, кДж/м³;

N – число однотипных горелок с одинаковым расходом газа, применяемых к установке в котлоагрегате;

η – коэффициент полезного действия котлоагрегата.

Давление газа перед соплом горелки определяется на основании гидравлического расчета газопровода [100, 111]. Для того чтобы горелка имела широкий диапазон регулирования расхода газа давление газоздушнoй смеси p_{Γ} в ГГУ должно быть не менее расчетного давления, которое определяется по формуле [111], Па:

$$p_{\Gamma} = \frac{0,27 \cdot Q_{\text{H}}}{100} + 40, \quad (2.2)$$

Формула для определения теоретической скорости истечения газа из сопла w_{Γ} , при давлении до 5 кПа, имеет вид [27, 111], м/с:

$$w_{\Gamma} = \sqrt{\frac{2 \cdot p_{\Gamma}}{\rho_{\Gamma}}}, \quad (2.3)$$

где p_{Γ} – давление газа перед соплом, Па;

ρ_{Γ} – плотность газа, кг/м³.

Площадь поперечного сечения газового сопла f_{D_1} определяют по формуле [26, 27, 111], м²:

$$f_{D_1} = \frac{V_{\Gamma}}{3600 \cdot \mu \cdot w_{\Gamma}}, \quad (2.4)$$

где μ – коэффициент расхода, который учитывает неравномерность распределения скоростей потока газа по сечению сопла, сопротивления трения в нем, а также сжатие струи, и зависит от формы сопла.

Согласно справочным данным [26, 27, 29, 111] для цилиндрической формы сопла с острыми краями в тонкой стенке (рисунок 2.2) μ зависит от качества обработки стенки и находится в пределах от 0,6 до 0,65. Для цилиндрической формы сопла с закругленными изнутри краями (рисунок 2.3) μ находится в пределах от 0,7 до 0,75. Для сопла конической формы (рисунок 2.4) μ зависит от угла конусности β , если $\beta = 15^{\circ}$, то $\mu = 0,9$, если $\beta = 30^{\circ}$, то $\mu = 0,85$, если $\beta = 45^{\circ}$ (рисунок 2.5), то $\mu = 0,82$. Для цилиндрической формы сопла с углом конусности $\beta = 90^{\circ}$ значение μ зависит от отношения длины цилиндрической части сопла l_{D_1} к диаметру сопла D_1 . Если $l_{D_1} : D_1 = 0,18$, то $\mu = 0,75$, если $l_{D_1} : D_1 = 0,45$, то $\mu = 0,85$, если $l_{D_1} : D_1 = 1,0$, то $\mu = 0,85$, если $l_{D_1} : D_1 = 2$, то $\mu = 0,84$.

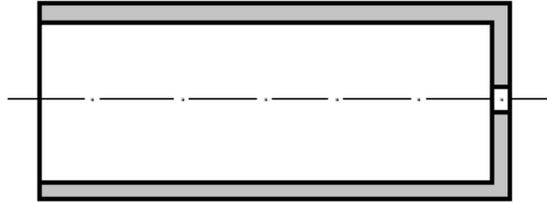


Рисунок 2.2 – Схема сопла цилиндрической формы с острыми краями в тонкой стенке

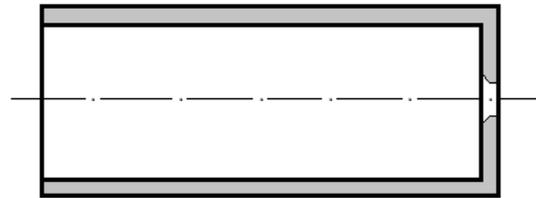


Рисунок 2.3 – Схема сопла цилиндрической формы с закругленными изнутри краями

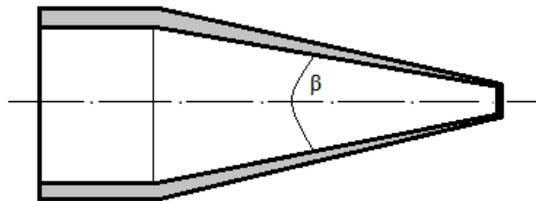


Рисунок 2.4 – Схема сопла цилиндрической формы с углом конусности β

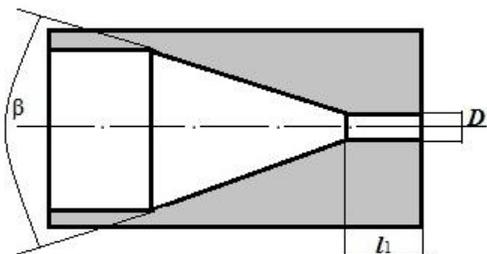


Рисунок 2.5 – Схема сопла цилиндрической формы с углом конусности $\beta = 45^\circ$

Диаметр поперечного сечения газового сопла D_1 определяют по формуле [29, 111], м:

$$D_1 = \frac{\overline{4 \cdot f_{D_1}}}{3,14}, \quad (2.5)$$

Диаметр горла смесителя D_3 рассчитывается как [27, 29, 111], м:

$$D_3 = D_1 \sqrt{(1 + \alpha_1 \cdot V_T)(1 + \alpha_1 \cdot V_T \cdot \frac{\rho_B}{\rho_T})}, \quad (2.6)$$

где α_1 – коэффициент избытка инжектируемого воздуха;

V_T – теоретическая потребность в воздухе для сгорания 1 м³ газа, м³/м³;

ρ_B – плотность воздуха, кг/м³.

Из формулы (2.6) видно, что α_1 непосредственно зависит от соотношения диаметра горловины к диаметру сопла, и абсолютно не зависит от давления инжектируемого газа. Это означает, что инжекционные горелки обеспечивают заданное соотношения газа и воздуха не зависимо от изменения расхода газа. Поэтому α_1 должен быть принят таким, чтобы не происходило проскока пламени при минимально необходимом расходе газа [26, 27, 29, 111].

Для определения численного значения коэффициента избытка инжектируемого воздуха α_1 используют формулу [111]:

$$\alpha_1 < \frac{100}{L_B} - 1 \cdot \left(\frac{1}{V_T}\right), \quad (2.7)$$

где L_B – верхний предел воспламеняемости газа.

Значение коэффициента избытка инжектируемого воздуха должно быть больше значения, при котором могут образовываться желтые языки пламени, которое рассчитывается по следующей формуле [111]:

$$\alpha_1 > 0,75 \left(m + \frac{n}{4}\right)^{0.5} \cdot d_0^{0.25}, \quad (2.8)$$

где m – число углеродных атомов в молекуле или среднее их число в сложном газе;

n – число водородных атомов в молекуле или среднее их число в сложном газе;

d_0 – диаметр огневых канав на коллекторе горелки, м.

Диаметр конфузора D_2 и диффузора D_4 принимают примерно одинаковых размеров, которые рассчитывают по следующей формуле [29, 111], м:

$$D_2 \approx D_4 = (2,0 - 2,2)D_3, \quad (2.9)$$

Длину горловины смесителя l_1 и конфузора l_2 , принимают в диапазоне значений D_3 [111], м:

$$l_1 = (2,5 - 3,5)D_3, \quad (2.10)$$

$$l_2 = (1,3 - 1,5)D_3, \quad (2.11)$$

Для определения длины диффузора l_4 смесителя используют формулу [111], м:

$$l_4 = \frac{(D_4 - D_3)}{2 \cdot \tan \frac{\theta}{2}}, \quad (2.12)$$

где θ – угол расширения диффузора, значение которого принимаются для обеспечения безотрывности потока газовой смеси в пределах от 6° до 8° .

Формула для определения суммарной площади огневых каналов коллектора f_{d_0} имеет вид [27, 29, 111], м²:

$$f_{d_0} = \frac{V_{\text{см}}}{w_{\text{см}}} = \frac{V_{\text{г}} \cdot (1 + \alpha_1 \cdot V_{\text{Т}})}{(1 + \alpha_1 \cdot V_{\text{Т}})}, \quad (2.13)$$

где $V_{\text{см}}$ – расход газовой смеси, м³/с;

$w_{\text{см}}$ – скорость вытекания из огневых каналов газовой смеси, м/с.

Скорость вытекания газовой смеси из огневых каналов $w_{\text{см}}$ должна обеспечивать отсутствие отрыва пламени [26, 27, 29, 76]. Для природного газа эта скорость должна быть не менее скорости, которая определяется по формуле [111], м/с:

$$w_{\text{см}} = \frac{3,6 \cdot 10^{-3} \cdot d_0 \cdot T^2 \cdot (1 + V_{\text{Т}})}{(1 + \alpha_1 \cdot V_{\text{Т}})}, \quad (2.14)$$

где T – абсолютная температура газовой смеси, °К.

Определение количества огневых каналов на коллекторе N' [111]:

$$N' = \frac{f d_o}{f d_o}, \quad (2.15)$$

где $f d_o$ – площадь одного огневого канала, м².

Обычно огневые каналы на коллекторе размещаются в один или два ряда [11, 26, 27, 29, 41, 42, 76, 77, 83, 86, 111, 130, 132, 136]. Если используется двухрядное расположение, то оно, как правило, имеет шахматный порядок, и минимальная длина коллектора l_k в этом случае равна [111], м:

$$l_k = N - 1 \cdot \frac{s}{2} + 2 \cdot s, \quad (2.16)$$

где s – шаг между осями огневых каналов на коллекторе горелки, м.

Существуют специальные пределы, которые были определены экспериментально, для шага между каналами [11, 27, 29, 111]. Это требуется для быстрого распространения пламени по всем каналам, а также для предотвращения их слияния [26, 76, 83, 111, 130]. Поэтому для $\alpha_1 = 0,6$ и $d_o = 2 \div 6$ мм шаг между осями огневых каналов на коллекторе горелки s принимают как [111], мм:

$$s = (2,4 \div 2,8) \cdot d_o, \quad (2.17)$$

Расстояние между осями рядов огневых каналов на коллекторе горелки должно быть в 2,0–2,05 раза больше, чем расстояние между самими каналами [111].

К выбору глубины огневых каналов стоит подходить с особой тщательностью, так как увеличение глубины приводит к устойчивому горению, исключая возможность проскока пламени [11, 26, 74, 111, 130]. Это связано с тем, что стенки каналов охлаждаются, и скорость распространения пламени в газовой смеси снижается [26, 74, 76, 111, 130]. Также при большей глубине увеличивается сопротивление трения, что в свою очередь, уменьшает коэффициент избытка

первичного воздуха. При значительной глубине каналов существенно усложняется их производство [130].

Опираясь на экспериментальные данные, глубина каналов l_{d_0} может быть рассчитана по следующей формуле [111], мм:

$$l_{d_0} = (1,5 \div 2,0) \cdot d_0, \quad (2.18)$$

Следует отметить, что большая глубина каналов должна быть использована для быстрогорящих газов и при коэффициенте избытка первичного воздуха близком к пределу воспламеняемости или больше него [1, 8, 26, 27, 31, 74].

Расположение газогорелочных устройств в топке напрямую зависит от конусного фронта пламени – он не должен омывать поверхности теплообмена, в противном случае это приведет к появлению продуктов неполного сгорания [111].

Высота конусного фронта пламени h определяется по формуле [111], мм:

$$h = 0,75 \cdot k \cdot d_0^2 \cdot y, \quad (2.19)$$

где k – коэффициента, который зависит от вида используемого газа и коэффициента избытка первичного воздуха, является табличным значением (таблица 2.1) [111];

y – отношение расчетной удельной тепловой нагрузки к номинальной, которая равна 17 кДж/мм²·ч.

Таблица 2.1 – Значение коэффициента k

Коэффициент избытка первичного воздуха α_1	Природный газ	Сжиженный углеводородный газ	Коксовый газ
0,2	–	–	0,85
0,3	0,85	–	0,6
0,4	0,7	1,1	0,5
0,5	0,6	0,9	0,38
0,6	0,5	0,8	0,3
0,7	0,4	0,65	0,24
0,8	0,42	0,5	0,2

2.2 Описание конструкции разработанной инжекционной газовой горелки низкого давления

Конструкция ГГУ относится к инжекционным горелкам для сжигания газообразного топлива в бытовых котлах малой мощности, газовых проточных нагревателях и других аппаратах [83].

Целью разработки является увеличение равномерности тепловой нагрузки по длине топки, повышение эффективности и качества сжигания природного газа низкого давления, увеличение коэффициента полезного действия (далее по тексту КПД) теплогенерирующей установки, улучшение процесса смесеобразования, повышение надежности работы газогорелочного устройства, простота монтажа горелок, универсальность конструкции, возможность разработки широкой линейки типоразмеров [83].

Инжекционная горелка низкого давления содержит насадок с огневыми отверстиями в виде скрепленных между собой распределительных трубок, состоящих из конфузора, горловины, диффузора, последовательно соединенных между собой со стороны входа газозвоздушной смеси, и коллектора с рядом огневых отверстий, выполненного в виде усеченного конуса. ГГУ содержит сегментный отвод, соединяющий диффузор с коллектором, внутренняя поверхность которого имеет сужение. Коллектор содержит от 3 ряда огневых отверстий, расположенных с одинаковым шагом, диаметром от 2 до 3 мм. Огневые отверстия коллектора расположены в шахматном порядке параллельно его оси [83].

Новая конструкция инжекционной горелки улучшает доступ вторичного воздуха к основанию факела огневой струи, повышает эффективность сжигания газового топлива, снижает длину факела, уменьшает количество вредных выбросов, и повышает КПД котельного агрегата [83].

Использование огневых отверстий разного диаметра от 2 мм до 3 мм, расположенных в шахматном порядке с одинаковым шагом, позволяет повысить

равномерность поля скорости на выходе газовой смеси из отверстий (процент неравномерности выхода газовой смеси из отверстий не более 10%), что в свою очередь, улучшает процесс смесеобразования, снижает высоту факела, обеспечивая полное сжигание газовой смеси [83].

Диффузор в виде усеченного конуса соединенный со стороны большего диаметра с сегментным отводом переменного сечения приводит к выравниванию поля скорости газовой смеси по всей длине огневого насадка за счет закручивания потока смеси при прохождении через отвод, что увеличивает интенсивность смешения первичного воздуха и газа при образовании газовой смеси [83]. Вследствие чего повышается эффективность сгорания газа в рабочем диапазоне нагрузки, исключая прокок и отрыв пламени, что обеспечивается размером и формой огневых отверстий [83].

Применение коллектора со сложным профилем внутренней поверхности обеспечивает равномерное поле скорости выхода газовой смеси из огневых отверстий по всей длине коллектора при изменяющемся расходе смеси внутри коллектора (т.к. при движении по длине коллектора часть газовой смеси выходит из огневых отверстий и расход уменьшается), что в свою очередь позволяет улучшить смесеобразование и повысить качество сжигания газа, увеличить КПД котлоагрегата [83].

Размер и количество огневых отверстий были подобраны экспериментально [83].

Предложенное конструктивное исполнение огневого насадка и взаимное расположение огневых отверстий позволяет увеличить площадь теплоотдачи, что совместно с достигнутой равномерностью распределения потока газовой смеси приводит к снижению высоты факела и сокращению зазора между горелкой и теплообменником [83].

Инжекционная газовая горелка низкого давления (рисунок 2.6) содержит газовый коллектор (1), подключенный к источнику природного газа и снабженный

цилиндрическими соплами (2) круглого сечения постоянного диаметра, конфузор (3), который соединен со стороны меньшего диаметра с горловиной (4), диффузор (5), выполненный в виде усеченного конуса, сегмент переменного сечения (6), который соединяет диффузор (5) и коллектор (7), выполненный в виде усеченного конуса [83]. Коллектор (7) содержит от 3 ряда огневых отверстий (8) диаметром от 2 до 3 мм [83]. Внутренняя поверхность коллектора (7) имеет участок сужения, расположенный со стороны выхода коллектора (7) на расстоянии одной трети его длины, а ширина участка сужения в 2–2,5 раза меньше ширины выхода коллектора (7) [83]. В месте соединения сегментного поворота переменного сечения (6) с коллектором (7) толщина их стенок одинакова [83].

Разработанная инжекционная газовая горелка низкого давления работает следующим образом [83].

Природный газ низкого давления подается в газовый коллектор (1), который выходит через сопло (2), и инжектирует первичный воздух для процесса смесеобразования. Затем первичный воздух и газ поступают в конфузор (3), после чего – в горловину (4) горелки. При прохождении через конфузор (3) и горловину (4) первичный воздух и газ частично смешиваются. После горловины (4) образовавшаяся газоздушная смесь поступает в диффузор (5), в котором происходит выравнивание поля скорости газоздушной смеси, а при последующем прохождении смеси через сегментный поворот (6) поток газоздушной смеси дополнительно закручивается, благодаря чему увеличивается интенсивность процесса смесеобразования, а затем поступает в коллектор (7). Выравнивание скорости потока газоздушной смеси достигается при прохождении диффузора (5), выполненного в виде усеченного конуса, и сегментного поворота (6) за счет перераспределения давления и изменения направления движения потока газоздушной смеси.

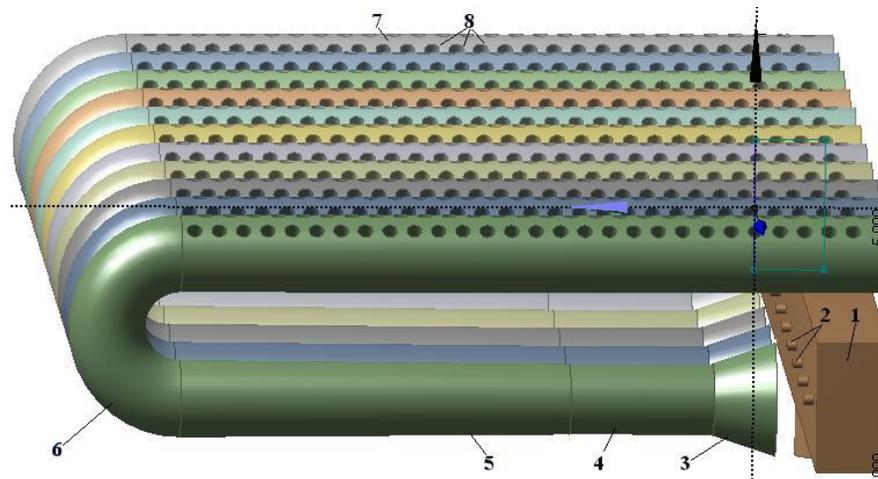


Рисунок 2.6 – Инжекционная газовая горелка низкого давления:

- 1 – газовый коллектор; 2 – сопла цилиндрической формы; 3 – конфузор; 4 – горловина;
5 – диффузор; 6 – сегментный поворот; 7 – коллектор; 8 – огневые отверстия

В коллекторе (7) происходит дополнительное выравнивание поля скорости за счет сечения и сложного профиля внутренней поверхности. При движении потока газозвушной смеси по длине коллектора (7) давление и скорость потока достигают максимальных значений. Участок сужения внутренней поверхности коллектора (7), расположенный со стороны его выхода на расстоянии одной трети его длины (ширина в 2–2,5 раза меньше ширины выхода коллектора) обеспечивает постоянство скорости и давления по длине коллектора [83].

После прохождения участка сужения внутри коллектора (7) часть газозвушной смеси, которая не вышла через огневые отверстия (8), изменяет направление своего движения. Это происходит за счет сужения коллектора (7). Переменное сечение коллектора (7) (ширина участка сужения в 2–2,5 раза меньше ширины выхода коллектора) обеспечивает равномерность скорости выхода потока газозвушной смеси через огневые отверстия (8). При выходе через огневые отверстия (8) газозвушная смесь перемешивается с вторичным воздухом, поступающим из окружающей среды. После завершения процесса полного смесеобразования начинается процесс горения. Горелка зажигается запальником.

Пламя мгновенно «пробегают» вдоль всего коллектора (7) и устойчиво горит над всеми отверстиями (8). Огневой насадок, выполненный из жаропрочной стали, раскаляется и обеспечивает надежную стабилизацию факела на всех режимах работы горелки. По всей длине огневого насадка образуется общий факел, который передает внутренним поверхностям нагрева секций теплообменника котлоагрегата часть теплоты за счет излучения [83].

Инжекционная газовая горелка обеспечивает равномерность распределения температуры по поверхности нагрева теплообменника котлоагрегата, полноту процесса смесеобразования, повышение эффективности и качества сжигания газа (коэффициент избытка воздуха $\alpha_1 = 0,6$, сокращение выбросов продуктов неполного сгорания на 10–12%, что ведет к повышению коэффициента полезного действия котлоагрегата), снижению высоты фронта пламени [83].

Таблица 2.2 – Габаритные размеры инжекционной газовой горелки низкого давления

Габаритные размеры	Условное обозначение	Единицы измерения	Численное значение
Диаметр поперечного сечения газового сопла	D_1	мм	1,00
Диаметр конфузора	D_2	мм	16,8
Длина конфузора	l_2	мм	12,6
Диаметр горла смесителя	D_3	мм	8,4
Длина горловины смесителя	l_1	мм	29,4
Диаметр диффузора	D_4	мм	16,8
Длина диффузора смесителя	l_3	мм	80,0
Длина коллектора	l_k	мм	145
Глубина огневого канала	l_{d_0}	мм	3 – 4,5
Шаг между осями огневых каналов	s	мм	5
Диаметр огневых каналов на коллекторе горелки	d_0	мм	2 – 3
Количество огневых каналов	N	шт.	638

Инжекционная горелка низкого давления предлагаемой конструкции имеет меньшие габаритные размеры по сравнению с известными аналогами (таблица 2.2), а также невысокую металлоемкость. Кроме этого, разработанная инжекционная горелка проста в изготовлении, монтаже и эксплуатации, обладает высокой взаимозаменяемостью с известными аналогами, в том числе и с зарубежными образцами [83].

2.3 Выводы по главе 2

1. Газогорелочное устройство разработано с учетом требований импортозамещения для отечественных котлов малой мощности.

2. Разработанное взаимозаменяемое ГГУ имеет меньшие габаритные размеры, чем импортный аналог, что дает возможность его применения в котлоагрегатах малой мощности, различных производителей.

3. Аэродинамические и энерго–экологические характеристики разработанного ГГУ превосходят импортный аналог.

4. Получен патент на изобретение «Инжекционная горелка низкого давления» № 2618137, Рос. Федерация; МПК F23D 14/10 (2006.01).

ГЛАВА 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ РАЗРАБОТАННОЙ ГОРЕЛКИ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

3.1 Математическая модель для обоснования конструктивных элементов разработанного ГГУ

Для моделирования работы ГГУ использовались программные пакеты «ANSYS Fluent» и «STAR-CCM+» (лицензионное соглашение № 60734258).

Использовался метод конечных объёмов. Для условия установившегося изотермического движения вязкой несжимаемой жидкости без учёта сил гравитации используется система дифференциальных уравнений Навье–Стокса в виде [114]:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= F_x - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\
 \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= F_y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\
 \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= F_z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right), \\
 \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

или в векторной форме [146]:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V &= F - \frac{1}{\rho} \text{grad} p + \nu \nabla^2 V, \\
 \text{div} V &= 0
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости среды;

ρ – плотность;

u, v, w – компоненты вектора скорости по осям координат x, y и z соответственно;

$\text{grad} p$ – градиент давления.

Уравнения Навье–Стокса, как и любая математическая модель, описывают реальную физическую систему в рамках принятых приближений и допущений.

Для замыкания уравнений, как правило, используется модель турбулентности « $k-\varepsilon$ ». Достоинством модели « $k-\varepsilon$ » является хорошее предсказание свойств турбулентных течений в широких диапазонах турбулентности в сочетании с невысокими затратами расчётных ресурсов ЭВМ. Недостатками данной модели является недостаточная точность при моделировании течений с большой кривизной линий тока, а также плохо предсказываются течения с вращением и завихренностью. Для решения этих проблем были разработаны две модификации модели: « $RNGk-\varepsilon$ » и « $Realizablek-\varepsilon$ ».

В отличие от стандартной « $k-\varepsilon$ » модели в « $RNGk-\varepsilon$ » присутствуют дополнительные условия в уравнении скорости турбулентной диссипации, что повышает точность решения высоконапряженных потоков, а также дополнительный параметр, учитывающий циркуляцию турбулентности и повышающий точность вычислений истечений с закруткой потока. Модель « $RNGk-\varepsilon$ » представляет собой аналитическую формулу турбулентных чисел Прандтля (в стандартной « $k-\varepsilon$ » модели данный параметр является константой) и предоставляет, полученную аналитическим путём, дифференциальную формулу эффективной вязкости, которая работает при качественном сеточном разрешении в области пограничного слоя, что является более приемлемым при расчёте низкорейнольдсовых течений.

Эти особенности делают « $RNGk-\varepsilon$ » модель более точной и надёжной для широкого диапазона турбулентных течений, чем в случае со стандартной « $k-\varepsilon$ » моделью.

Модель « $Realizablek-\varepsilon$ », которая используется наряду с моделью « $RNGk-\varepsilon$ », в отличие от стандартной « $k-\varepsilon$ » модели, предсказывает более точно распределение диссипации плоских и круглых струй, а также вращающихся потоков, пограничных слоев, которые подвержены сильным градиентам давления, отрывных течений, развитых вторичных течений.

Для решения задачи течения газовой смеси при выполнении моделирования в аэродинамической системе разработанного газогорелочного устройства использовалась двухпараметрическая модель турбулентности « k - ϵ » с модификацией «*Realizable* k - ϵ ». Модель « k - ϵ » включает два уравнения: уравнения переноса турбулентной кинетической энергии (k), и скорости её диссипации (ϵ). По этим параметрам были вычислены значения турбулентной вязкости, которые использовались для решения уравнения движения.

Турбулентная кинетическая энергия (k) и скорость её диссипации в теплоту (ϵ) для «*Realizable* k - ϵ » модели представлены следующими уравнениями переноса [114]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho k + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho k u_i = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k, \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho \epsilon u_i = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} + \rho C_1 S \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \nu \epsilon} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon, \quad (3.4)$$

где k – турбулентная кинетическая энергия;

u_i – проекция вектора скорости на ось x ;

μ – коэффициент турбулентной вязкости;

σ_k и σ_ϵ – турбулентные числа Прандтля для турбулентной кинетической энергии (k) и скорости её диссипации (ϵ);

μ , ν – коэффициент динамической и кинематической вязкости среды соответственно;

G_k – генерация турбулентной кинетической энергии, вызванное градиентами осредненного потока;

G_b – генерация турбулентной кинетической энергии, вызванная силами плавучести;

Y_M – параметр, характеризующий пульсации, вызванные расширением в сжимаемых турбулентных потоках;

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}, C_1, C_2$ – эмпирические константы модели;

S_k, S_ε – источники, определяемые пользователем;

S – величина завихрённости потока.

Коэффициент динамической (турбулентной) вязкости [114]:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (3.5)$$

где C_μ – расчётный коэффициент [146]:

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}}, \quad (3.6)$$

где A_0 и A_s – константы модели;

$$U^* = \overline{S_{ij}S_{ij} + \Omega_{ij}\Omega_{ij}}, \quad (3.7)$$

где S_{ij} – средняя скорость деформации потока;

Ω_{ij} – тензор средней скорости вращения.

Средняя скорость деформации потока S_{ij} [114]:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right), \quad (3.8)$$

Тензор средней скорости вращения Ω_{ij} [114]:

$$\Omega_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k, \quad (3.9)$$

$$\Omega_{ij} = \Omega_{ij} - \varepsilon_{ijk}\omega_k, \quad (3.10)$$

где Ω_{ij} – тензор средней скорости вращения перемещающейся в системе координат с угловой скоростью ω_k .

Константы модели A_0 и A_s [114]:

$$A_0 = 4,04$$

$$A_s = \bar{b} \cdot \cos \varphi, \quad (3.11)$$

где φ [146]:

$$\varphi = \frac{1}{3} \cos^{-1} \bar{b} \cdot \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{S_{ij} S_{ij}^3}, \quad (3.12)$$

Генерация турбулентной кинетической энергии, вызванная градиентами осредненного потока согласно гипотезе Буссинеска [40]:

$$G_k = R_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}, \quad (3.13)$$

где R_{ij} – тензор Рейнольдсовых напряжений [40]:

$$R_{ij} = -\rho u'_i u'_j = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \right), \quad (3.14)$$

Генерация турбулентной кинетической энергии, вызванная силами плавучести G_b [114]:

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \cdot \frac{\partial T}{\partial x_i}, \quad (3.15)$$

где Pr_t – турбулентное число Прандтля. Для стандартной и «*Realizable k-ε*» модели турбулентное число Прандтля принимается постоянной величиной и равной 0,85;

g_i – проекция вектора ускорения свободного падения;

β – коэффициент температурного расширения среды.

Коэффициент температурного расширения среды β [114]:

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T}_p, \quad (3.16)$$

Параметр, характеризующий пульсации, вызванные расширением в сжимаемых турбулентных потоках Y_M [114]:

$$Y_M = 2\rho\varepsilon \frac{k}{\gamma RT}, \quad (3.17)$$

где γ – удельная звукопроницаемость среды.

Величина завихрённости потока S [114]:

$$S = \overline{2S_{ij}S_{ij}}, \quad (3.18)$$

3.1.1 Методы получения дискретного аналога

Метод дискретизации сводится к получению системы алгебраических уравнений, которые являются дискретными аналогами исходных дифференциальных уравнений. При этом предполагается, что при мелкой сетке, решение дискретных уравнений является хорошим приближением к точному решению исходных дифференциальных уравнений. Дискретизация дифференциальных уравнений может выполняться разными методами, при этом используемая схема должна быть устойчивой и сходящейся.

В общем случае процедура решения задачи заключается в следующем. Для каждого локального элемента (ячейки) записывается система законов сохранения массы, импульса и энергии в интегральной форме, которая затем преобразуется в систему алгебраических уравнений относительно искомых величин – плотности, скорости, температуры и др.

Система уравнений, описывающих движение жидкой среды, решается приближённо с помощью метода конечных объёмов, в котором уравнения движения интегрируются по каждой расчётной ячейке (*cell*), построенной сетки, имеющей объём V_{cell} и n граней с площадями F_f [40]:

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} \cdot V_{cell} + \sum_f \rho_f W_f \varphi_f \cdot F_f = \sum_f \Gamma_\varphi \nabla \varphi_f \cdot F_f + S_\varphi \cdot V_{cell}, \quad (3.19)$$

где ρ – плотность среды;

V_{cell} – объём расчётной ячейки сетки;

ρ_f – плотность, усреднённая по поверхности площадью F_f ;

W_f – скорость, усреднённая по поверхности площадью F_f ;

φ – значения искомой величины.

Значения искомых величин φ приписаны к центру расчётных ячеек сетки, однако в уравнение также входят значения искомой величины Γ_φ и её градиента $\nabla\varphi_f$ на гранях ячеек.

Преимущество метода конечных объёмов заключается в том, что в его основе лежат законы сохранения. Поэтому, в отличие от метода конечных разностей, метод конечного объёма обеспечивает строгость численной схемы, что позволяет даже на сравнительно грубых сетках получать приемлемые по точности результаты.

При дискретизации уравнений Навье–Стокса, осредненных по Рейнольдсу, расчетная область разбивается на большое количество непересекающихся элементарных объёмов, таким образом, чтобы каждый объём содержал только одну расчетную (узловую) точку. Совокупность элементарных объёмов составляет расчетную сетку конечных объёмов, предназначенную для CFD-анализа.

Решение системы уравнений представляется в виде набора значений искомых параметров в центрах этих объёмов. Интегрирование дифференциальных уравнений производится по каждому элементарному объёму. Интегралы вычисляются с использованием интерполяционных формул, при помощи которых определяют значения искомых переменных между расчетными точками. В результате получается дискретный аналог исходных уравнений в узловых точках, который отражает закон сохранения изучаемых переменных в каждом конечном объёме.

Для выполнения аэродинамического расчёта, были определены цели исследования, построена математическая модель и был выбран метод приближённого решения. После создания математической 3D модели, с учетом её

геометрических особенностей и основных рекомендаций, было выполнено построение сетки конечных объёмов.

При создании 3D модели и расчётной сетки учитывались следующие рекомендации:

- упрощена геометрия расчётной области математической модели, которая не влияет на изменение моделируемых течений. Эти упрощения направлены на создание более простой и удобной для построения конформной сетки конечных объёмов, позволяющей более точно просчитать в расчётной области турбулентные вихревые течения с минимальными затратами расчётных ресурсов ЭВМ;

- организовано сгущение сетки к твердым границам модели, где имеют место условия прилипания приграничного вязкого слоя;

- сгущения производились с учетом коэффициента увеличения призматических слоёв пристеночных ячеек с множителем не более 1,2.

Для описания профиля скорости течения в узкой пристенной области в теории пограничного слоя использовались специальные безразмерные переменные [44]:

$$u_{\tau} = \frac{\overline{\tau_{wall}}}{\rho}, \quad y^{+} = \frac{y \cdot u_{\tau}}{\nu}, \quad (3.20)$$

Значение y^{+} для граничащей со стенкой ячейкой, при использовании « k - ϵ » модели турбулентности, находятся с использованием пристеночных функций, рекомендованных для использования пакетом «ANSYS Fluent».

3.2 Обоснование выбора конструктивных элементов разработанного ГГУ

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

С целью определения наиболее оптимальной конструкции газогорелочного разработана модель ГГУ, представленная на рисунке 3.1.

При численном моделировании исследовались равномерность распределения поля скорости и давления газовой смеси на выходе из огневых отверстий, рисунки 3.2 и рисунке 3.3 соответственно.

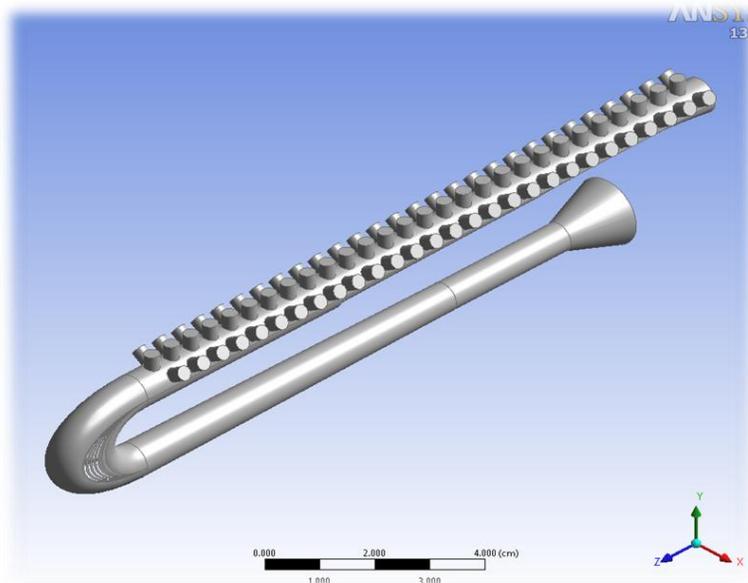


Рисунок 3.1 – Разработанная конструкция инжекционной газовой горелки
низкого давления без внешней оболочки

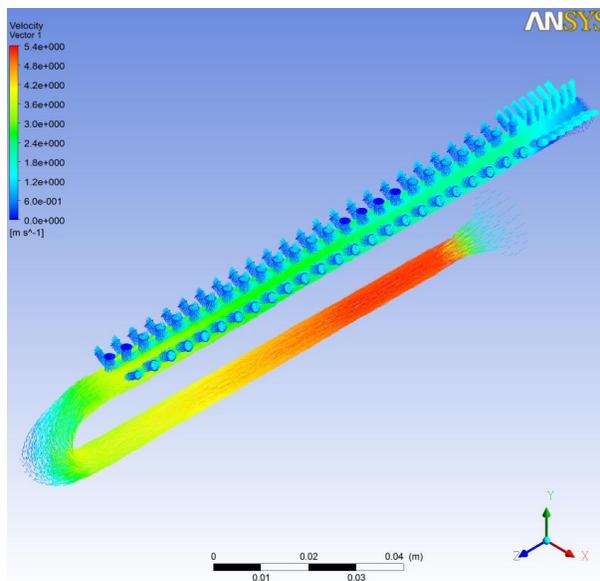


Рисунок 3.2 – Равномерность распределения поля скоростей газовой смеси в ГГУ
разработанной конструкции

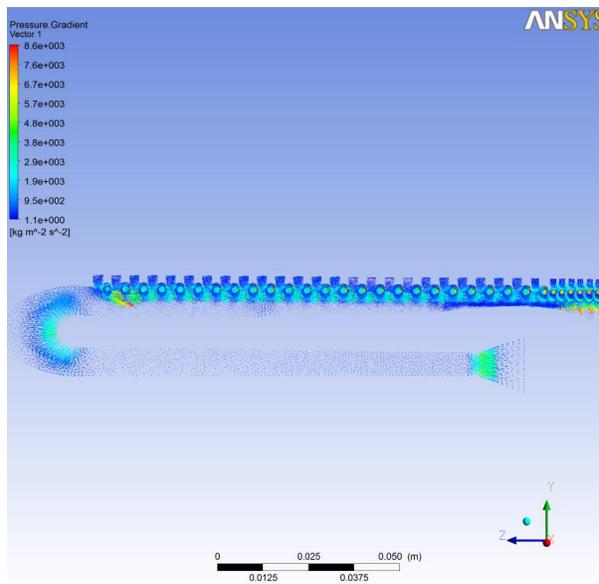


Рисунок 3.3 – Равномерность распределения поля давлений газовой смеси в ГГУ разработанной конструкции

Результатом исследований стало определение эффективного расположения и количества огневых отверстий в газовом коллекторе (рисунок 3.1). Выходное отверстие разработанного диффузора через сегментный отвод, по которому осуществляется поворот газовой смеси, соединяется с газовым коллектором, что обеспечивает равномерное распределение давления у стенки отвода.

Были рассмотрены и смоделированы разные способы подачи газовой смеси в топку котла (приложение А). Наиболее интересными являются следующие модели.

Модель 1 – горелка зарубежного образца с огневыми каналами щелевидной формы (рисунок 3.4).

Модель 2 – горелка с огневыми каналами цилиндрического сечения круглой формы одинакового диаметра с тремя рядами отверстий (рисунок 3.5).

Модель 3 – горелка с тремя рядами огневых каналов цилиндрического сечения одинакового диаметра (рисунок 3.6).

Разработанная модель ГГУ – горелка с тремя рядами огневых каналов цилиндрического сечения разного диаметра, которые расположены в шахматном порядке (рисунок 3.7).

Для каждой модели были проведены исследования равномерности распределения поля скорости и давления на входе в газогорелочное устройство, по длине газового смесителя, по длине и на повороте диффузора, по длине огневого коллектора, а также на выходе из огневых отверстий. По результатам исследований поля скоростей на выходе из огневых отверстий были построены графики (рисунки 3.4–3.7).

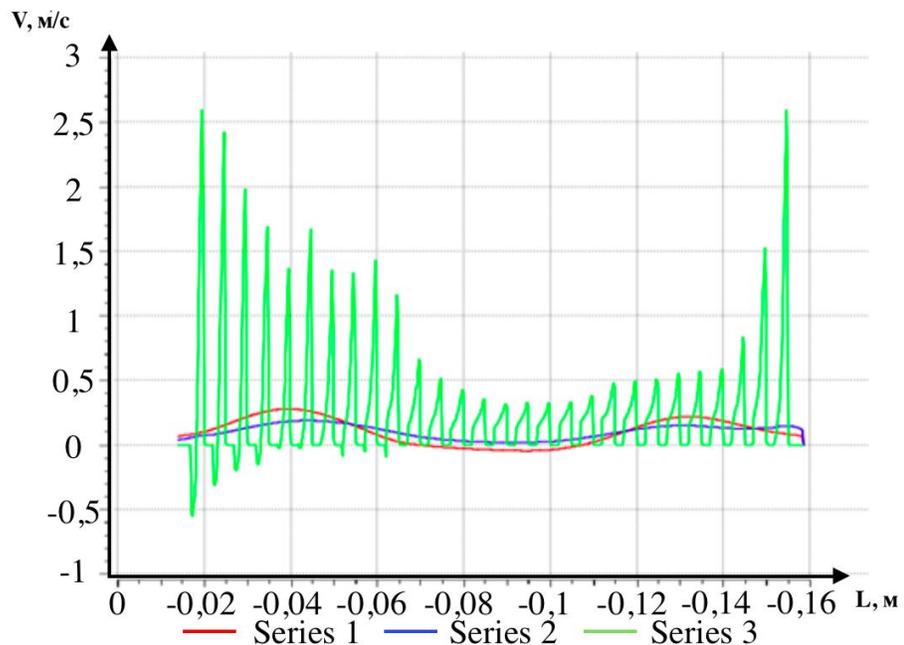


Рисунок 3.4 – График распределения скоростей инжекционной горелки «Модель 1»:

Series 1 – распределение скорости выхода концентраций CH_4 ; Series 2 – распределение скорости выхода газозвушной смеси по центру щелевых отверстий; Series 3 – распределение скорости выхода газозвушной смеси по краю щелевых отверстий

По графику видно, что в инжекционной горелке «Модель 1» скорость выхода неравномерная, неравномерность истечения газозвушной струи составляет около

58%. Имеют место явления проскока пламени. Минимальные скорости соответствуют центру коллектора.

Для получения равномерной скорости истечения газовой смеси были смоделированы варианты ГГУ «Модель 2» и «Модель 3» промежуточных конструкции изменением сечения газового коллектора и с измененным рядом огневых каналов.

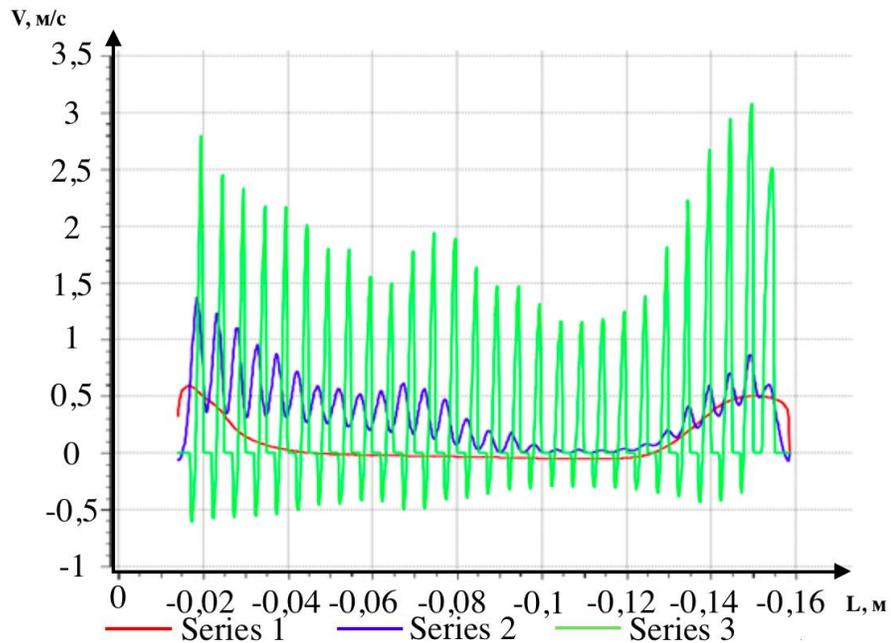


Рисунок 3.5 – График распределения скоростей инжекционной горелки «Модель 2»:
 Series 1 – распределение скорости выхода концентраций CH_4 ; Series 2 – распределение скорости выхода газовой смеси из центральных отверстий круглой формы;
 Series 3 – распределение скорости выхода газовой смеси из крайних отверстий круглой формы

Неравномерность распределения скорости выхода в ГГУ «Модель 2» составляет 45 %, что может привести к проскоку пламени, образованию химического недожога и недолговечности работы ГГУ.

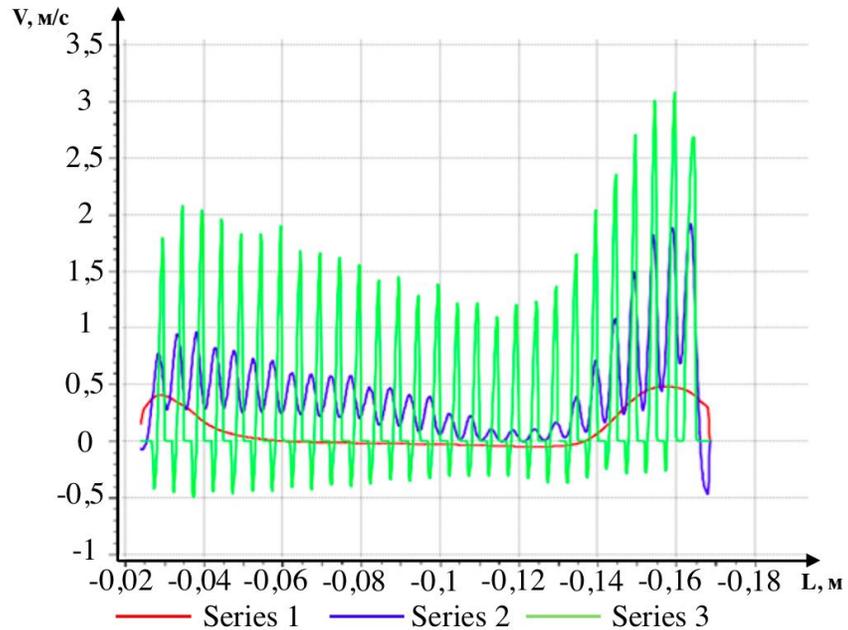


Рисунок 3.6 – График распределения скоростей инжекционной горелки «Модель 3»
 Series 1 – распределение скорости выхода концентраций CH_4 ; Series 2 – распределение скорости выхода газовой смеси из центральных отверстий цилиндрического сечения;
 Series 3 – распределение скорости выхода газовой смеси из крайних отверстий цилиндрического сечения

Неравномерность распределения скорости выхода в ГГУ «Модель 3» составляет 38 %, что может привести к проскоку пламени, повышению концентрации CO в продуктах сгорания, и несоответствию экологическим требованиям, предъявляемым к работе ГГУ.

Результаты исследований показали необходимость в дальнейших изменениях газового коллектора в местах максимального и минимального значения скорости газовой смеси, чтобы избежать отрыва и проскока пламени, а также для получения более равномерной скорости выхода газовой смеси.

На основании проведенных исследований была выбрана оптимальная конструкция ГГУ, которое позволяет получить равномерное распределение скорости выхода газовой смеси из огневых отверстий. Графически распределение

скорости выхода газовой смеси из огневых отверстий разработанного ГГУ приведено на рисунке 3.7.

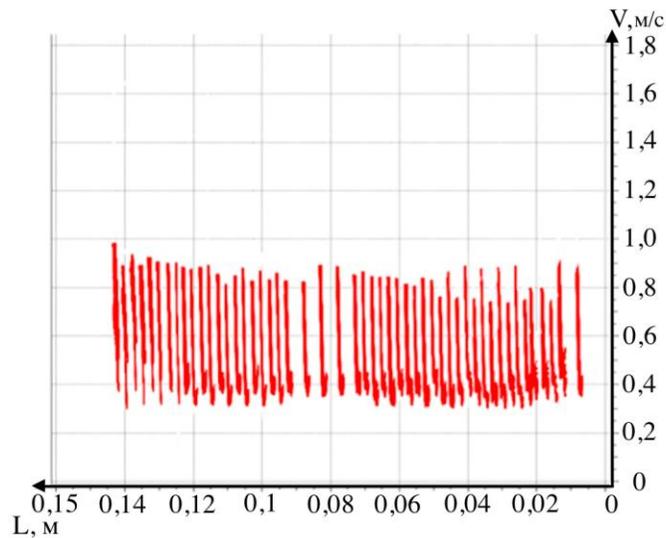


Рисунок 3.7 – Распределения скорости выхода газовой смеси из огневых отверстий в горелке разработанной конструкции

По графику распределения скорости выхода видно, что равномерное истечение газовой смеси в топку котла происходит из огневого коллектора разработанной конструкции ГГУ.

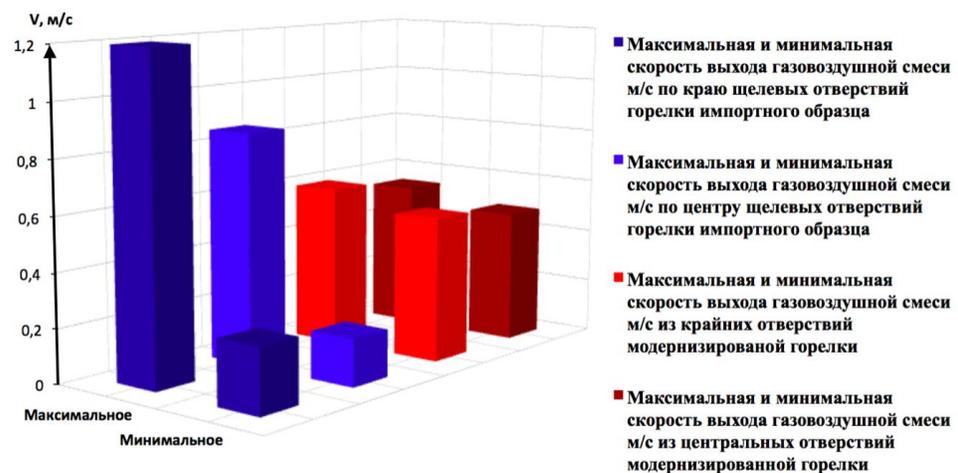


Рисунок 3.8 – Сравнительная гистограмма распределения скорости газовой смеси ГГУ импортного образца «Модель 1» и разработанной модели ГГУ

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

Анализ приведенной гистограммы (рисунок 3.8) показал:

Для разработанной инжекционной горелки неравномерность скорости выхода газовой смеси из огневых отверстий, расположенных в крайних рядах составляет 8,9%, а для огневых отверстий центрального ряда – 11 %.

Сравнительная гистограмма показывает, что амплитуда колебаний скорости истечения газовой смеси в горелке разработанной конструкции не превышает 11%, в то время как, в горелке зарубежного образца этот показатель достигает 58%.

При моделировании работы ГГУ были проведены исследования распределения потока газовой смеси в зависимости от формы огневого канала. Были исследованы огневы коллекторы с цилиндрическими отверстиями (рисунок 3.9) и с цилиндрическими отверстиями, имеющими форму усеченного конуса (рисунок 3.10).

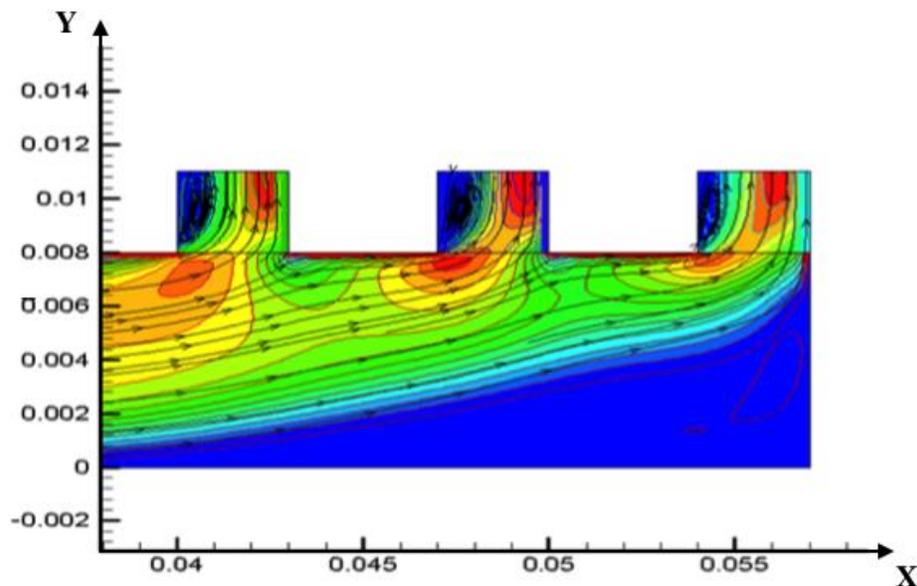


Рисунок 3.9 – Огневой коллектор с цилиндрическими отверстиями

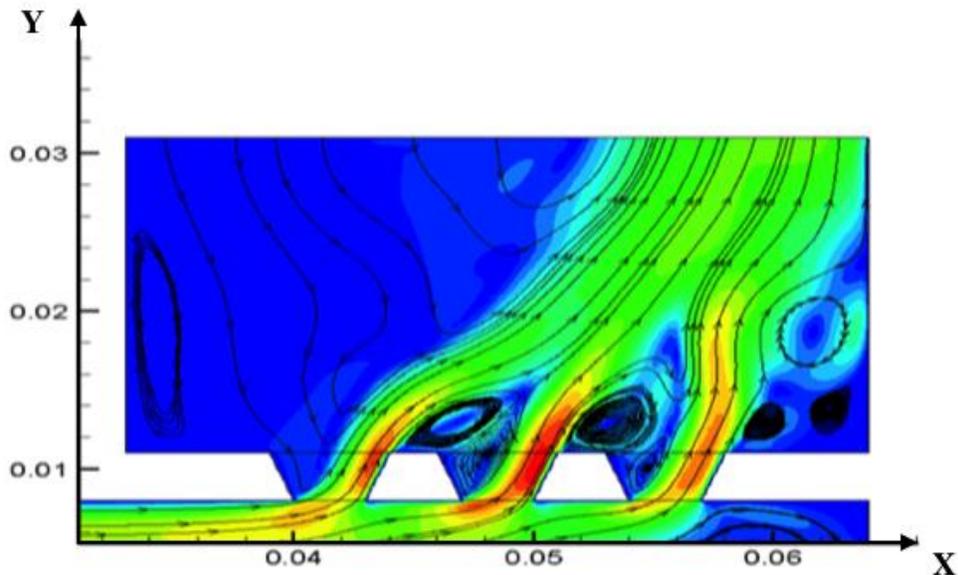


Рисунок 3.10 – Огневой коллектор с цилиндрическими отверстиями в виде усеченного конуса

Из графиков видно, что в обоих случаях имеет место зона циркуляции потока. Однако в случае огневых отверстий конической формы поле скорости при выходе газовой смеси более равномерно. Отсутствуют локальные зоны повышенной скорости в коллекторе вблизи острых углов огневых отверстий.

Наиболее равномерное истечение газовой смеси происходит из ГГУ с огневыми отверстиями в виде усеченного конуса вследствие большего угла выхода газовой смеси. Структура потока газовой смеси, выходящей в топку котла (рисунок 3.10), способствует увеличению подсоса вторичного воздуха на выходе смеси из огневых отверстий. Что, в свою очередь, приводит к более равномерному распределению смеси по объему топки.

В процессе исследования методом моделирования были получены также результаты распространения фронта пламени газогорелочного устройства. Исследовались разные модели огневых отверстий ГГУ с разными диаметрами и разным расположением.

Модель I, II и III отличаются друг от друга расположением огневых отверстий относительно друг друга, а также их размерами.

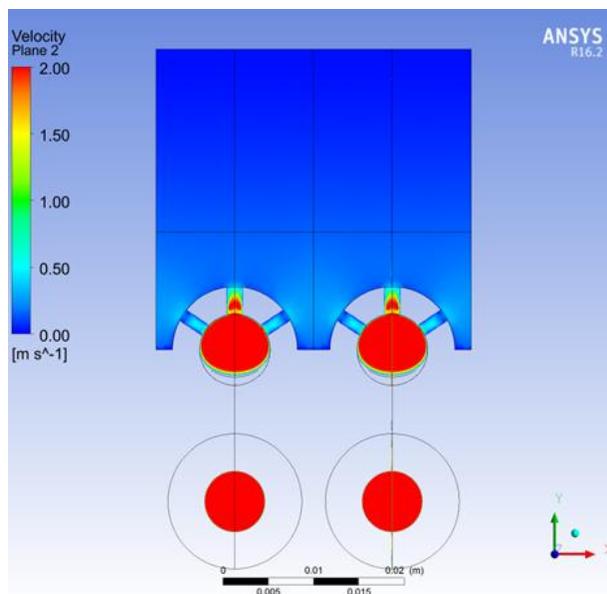


Рисунок 3.11 – Распределение фронта пламени инжекционной горелки «Модель I»

«Модель I» представляет собой инжекционную горелку с огневым коллектором одного диаметра, имеющим три ряда газовыпускных отверстий цилиндрической формы одного диаметра (рисунок 3.11). Фронт пламени не стабильный, низкая скорость выхода из отверстий. Не обеспечивается должный прогрев теплоносителя в теплообменнике.

«Модель II» представляет собой инжекционную горелку с огневым коллектором одного диаметра, имеющим три ряда газовыпускных отверстий цилиндрической формы и разного диаметра (рисунок 3.12). Фронт пламени ярко выраженный и имеет высокую скорость в центральных отверстиях. Равномерность истечения газовойоздушной смеси выше, чем в ГГУ «Модель I», но имеется эффект настипания струй боковых отверстий друг на друга, что приводит к смешению потоков и нестабильности горения.

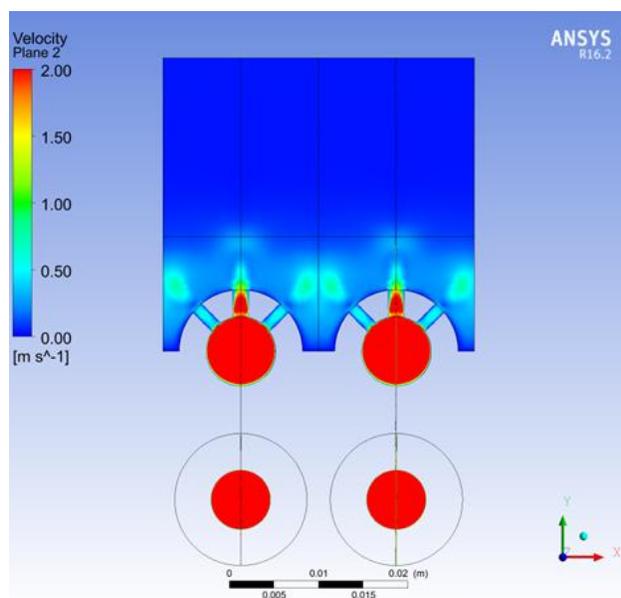


Рисунок 3.12 – Распределение фронта пламени инжекционной горелки «Модель II»

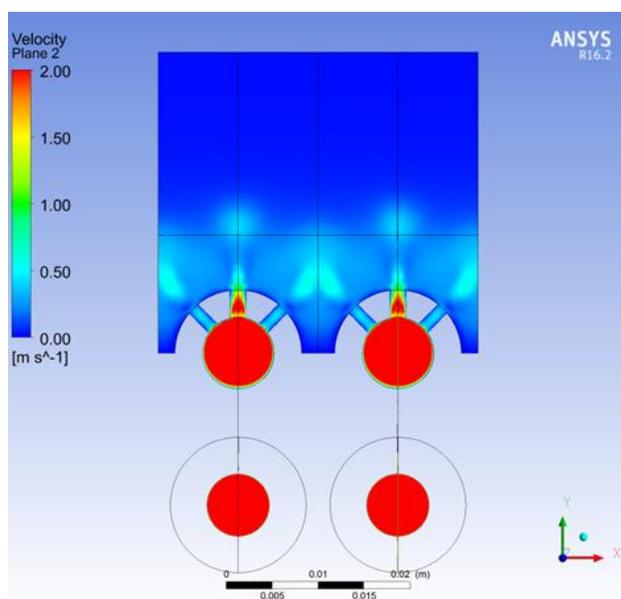


Рисунок 3.13 – Распределение фронта пламени инжекционной горелки «Модель III»

ГГУ «Модель III» представляет собой инжекционную горелку с огненным коллектором усеченной формы, имеющим три ряда газовыпускных отверстий цилиндрической формы, расположенных в шахматном порядке, и одного диаметра (рисунок 3.13). Фронт пламени ярко выраженный, имеет высокую скорость в

центральных отверстиях. Равномерность истечения газовой смеси из центральных и боковых отверстий не обеспечена.

Разработанная модель ГГУ – инжекционная горелка с тремя рядами огневых каналов цилиндрического сечения разного диаметра, которые расположены в шахматном порядке (рисунок 3.14). Скорость истечения газовой смеси из центральных и боковых отверстий практически одинакова, что свидетельствует о равномерности истечения газовой смеси в топку котла и равномерности нагрева теплоносителя в теплообменнике.

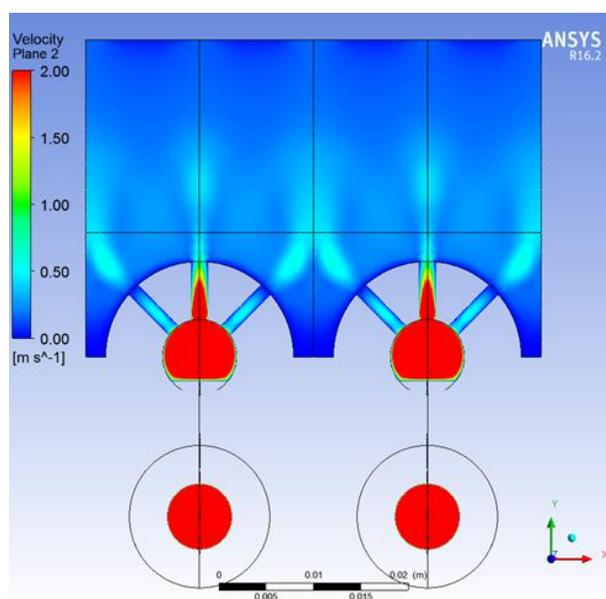


Рисунок 3.14 – Распределение фронта пламени инжекционной горелки разработанной конструкции

При моделировании оценивалось также взаимодействие струй газовой смеси, выходящих из огневых отверстий разработанной инжекционной горелки.

Анализ условий истечения газовой смеси из боковых отверстий (рисунок 3.15), показал, что потоки, истекающие из боковых отверстий разработанной инжекционной горелки, не смешиваются друг с другом, а движутся параллельно без смешения. Принятое расположение огневых отверстий в

разработанной конструкции обеспечит равномерность процесса горения и долговечность работы ГГУ и котлоагрегата.

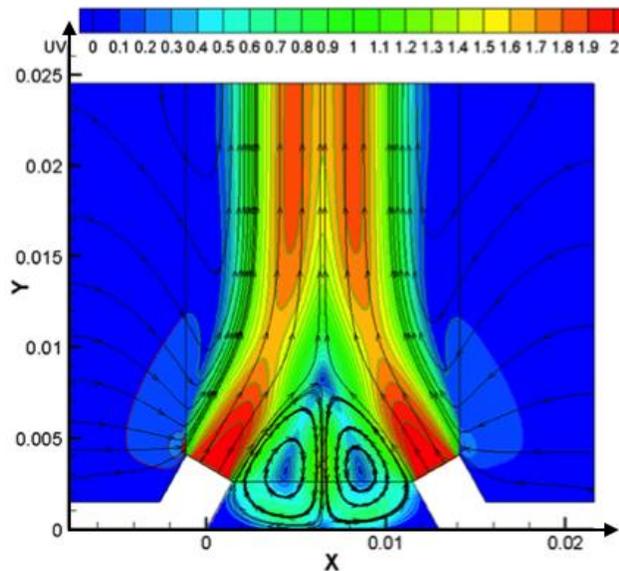


Рисунок 3.15 – Линии тока газозвоздушной смеси при истечении из боковых отверстий разработанной горелки

В результате проведенного математического моделирования было обоснованы конструктивные элементы разработанного ГГУ и показано преимущество разработанной конструкции.

3.3 Исследование процесса горения в топке котла методом моделирования

В диссертационной работе для обоснования качества сжигания газа в топке бытового газового котла «NEVALUX–8230» с разработанным автором ГГУ (рисунок 3.16) разработана математическая модель горения.

Для моделирования многокомпонентного неизотермического течения используются уравнения Навье–Стокса усредненные по Рейнольдсу (RANS) и

модель турбулентности $k-\omega$ SST, которая позволяет оценить (смоделировать) величину турбулентных напряжений в различных условиях.

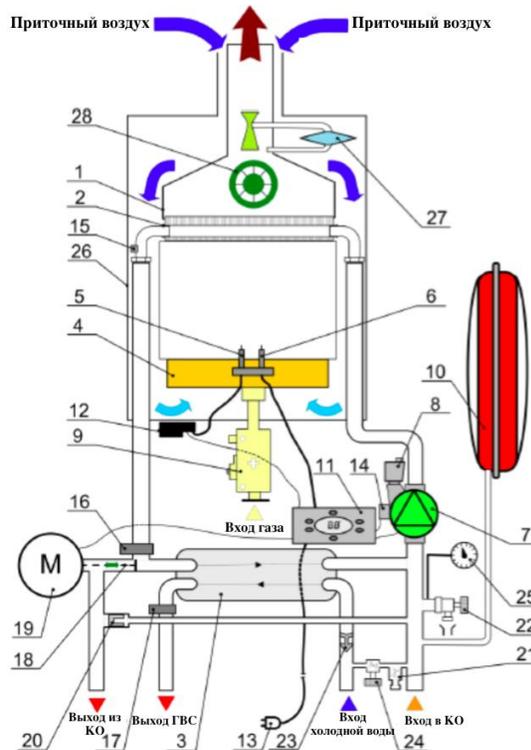


Рисунок 3.16 – Схема водогрейного котла «NEVALUX–8230» с инжекционной горелкой разработанной конструкции:

- 1 – вентилятор; 2 – вентилятор; 3 – газоотводящее устройство; 4 – теплообменник;
 5 – газогорелочный блок (горелка); 6 – свеча розжига; 7 – герметичная камера; 8 – регулятор подачи газа; 9 – датчик перегрева теплоносителя (термореле); 10 – датчик температуры контура отопления; 11 – электродвигатель трехходового клапана; 12 – трехходовой клапан; 13 – клапан байпаса; 14 – дренажный клапан; 15 – датчик температуры контура ГВС; 16 – вторичный теплообменник; 17 – датчик подпитки контура ГВС; 18 – кран подпитки контура отопления; 19 – предохранительный клапан (контур отопления); 20 – манометр; 21 – насос; 22 – клапан отвода воздуха (автоматический); 23 – расширительный бак; 24 – свеча;
 25 – электронная плата с трансформатором розжига; 26 – обратный клапан;
 27 – кабель питания; 28 – датчик давления

В данной модели уравнения движения преобразуются к виду, в котором добавлено влияние флуктуации средней скорости (в виде турбулентной

кинетической энергии) и процесса уменьшения этой флуктуации за счёт вязкости (диссипации). Решается два дополнительных уравнения для транспорта кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации турбулентности [144]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho k + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho k u_i = \frac{\partial}{\partial x_j} \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} + G_k - Y_k, \quad (3.21)$$

$$G_k = -\rho u'_i u'_j \frac{\partial u_j}{\partial x_i}, \quad (3.22)$$

$$Y_k = \rho \beta^* f_\beta k \omega, \quad (3.23)$$

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{Pr_k}, \quad (3.24)$$

где G_k – генерация турбулентной кинетической энергии за счёт градиентов поля скорости;

Y_k – учёт диссипации турбулентной кинетической энергии;

Γ_k – коэффициент эффективной диффузии кинетической энергии турбулентности.

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho \omega u_i = \frac{\partial}{\partial x_j} \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + G_\omega - Y_\omega, \quad (3.25)$$

$$G_\omega = \alpha \frac{\omega}{k} G_k, \quad (3.26)$$

$$Y_\omega = \rho \beta \omega^2, \quad (3.27)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{Pr_\omega}, \quad (3.28)$$

где G_ω – генерация скорости диссипации турбулентности;

Y_ω – учёт диссипации скорости диссипации турбулентности;

Γ_ω – коэффициент эффективной диффузии скорости диссипации [144].

3.3.1 Моделирование теплового излучения

Моделирование горения выполнялось в соответствии с концепцией когерентных турбулентных флеймлетов (TFC – Turbulent Flamelet Closure [144]). Моделирование лучистого теплообмена производилось в соответствии с моделью дискретных ординат (DO), наиболее пригодных для моделирования переноса теплового излучения через оптически толстый слой.

Адекватность моделирования горения и тепломассообмена при горении в большой степени определялось расчётом переноса теплового излучения. Модель теплового излучения, прежде всего, должна правильно описывать лучистый теплоперенос внутри пламени и в потоке продуктов сгорания, поскольку от этого зависит строение и динамика пламени, а также интенсивность и полнота процессов сгорания.

Моделирование теплового излучения в процессах горения требует решения двух задач: расчёт процесса переноса теплового излучения и расчёт радиационных свойств среды.

Перенос излучения в реальной (непрозрачной) среде определяется собственным излучением, поглощением и рассеянием излучения газами. Излучение, распространяющееся в направлении s , ослабляется вследствие поглощения и рассеяния. Одновременно излучение усиливается за счёт собственного излучения и излучения, пришедшего со всех направлений и рассеянного в направлении s . Уравнение переноса излучения имеет вид [135]:

$$\frac{\partial I_{\lambda}(r,s)}{\partial s} = -k_{\lambda} r + k_{\lambda}^s r I_{\lambda}(r,s) + k_{\lambda} r I_{black,\lambda}(r) + \frac{1}{4\pi} k_{\lambda}^s(r) \int_{\alpha=0}^{4\pi} I_{\lambda}(r,s') \gamma_{\lambda}(r,s,s') d\alpha, \quad (3.29)$$

где I_{λ} – спектральная интенсивность излучения;

$I_{black,\lambda}$ – спектральная интенсивность излучения абсолютно чёрного тела;

k_{λ} и k_{λ}^s – спектральные коэффициенты поглощения и рассеяния соответственно;

$\gamma_{\lambda}(r,s,s')$ – индикатриса рассеяния из направления s' в направлении s .

Интенсивность излучения определяет все характеристики лучистого теплообмена, в частности плотность энергии излучения и лучистый тепловой поток. Все характеристики зависят от следующих шести переменных: три пространственные координаты радиус–вектора r , два угла, определяющих направление s и s' , и длина волны излучения λ .

В диссертационной работе моделирование теплового излучения производилось по методу «DO» – дискретных ординат. В основе этого метода лежит численное решение системы дифференциальных уравнений переноса излучения записанной для каждого элемента объёма расчётной сетки, во всех направлениях. При расчетах в работе весь телесный угол был разбит на 16 сегментов (направлений). Также для ускорения расчёта были использованы следующие допущения:

- не учитывалось рассеяние теплового излучения;
- вместо спектральных интенсивностей рассматривались интегральные величины [135]:

$$I = \int_0^{\infty} I_{\lambda} d\lambda, \quad (3.30)$$

$$I_b = \int_0^{\infty} I_{black,\lambda} d\lambda = \frac{\sigma T^4}{\pi}, \quad (3.31)$$

- вместо спектрального коэффициента поглощения вводилось эффективное значение, осреднённое по спектру. При этом для приближённого учёта спектрального состава излучения использовался один эффективный коэффициент поглощения для среды в целом («серое» приближение).

3.3.2 Моделирование горения

Расчёт газового состава и динамики горения в расчётной области определялся в соответствии по заранее табулированным зависимостям, определённым из подробной химической кинетики реакции (GRI–Mech 3.0). Расчёт переноса

компонентов производился через решение уравнения всего для одной искусственной переменной: смеси доли (mixture fraction « χ », уравнение 3.32). Возможность описания переноса всех компонентов смеси посредством одной переменной объясняется законом сохранения массы на атомарном уровне (в ходе любых реакций в замкнутой системе число атомов в смеси остаётся постоянным). Распространение фронта пламени решается посредством другой искусственной переменной: прогрессивной переменной (progress variables « c », уравнение 3.33).

$$\frac{\partial p\chi}{\partial t} + \frac{\partial p u_j \chi}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \Gamma_\chi \frac{\partial \chi}{\partial x_j}, \quad (3.32)$$

$$\frac{\partial p c}{\partial t} + \frac{\partial p u_j c}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \Gamma_c \frac{\partial c}{\partial x_j} + \omega, \quad (3.33)$$

где ω [40, 44]:

$$\omega = A p_u S_t \nabla c, \quad (3.34)$$

где A – модельная константа;

p_u – плотность несгоревшей смеси;

S_t – скорость турбулентного пламени, вычисленного по модели Зимонта [144].

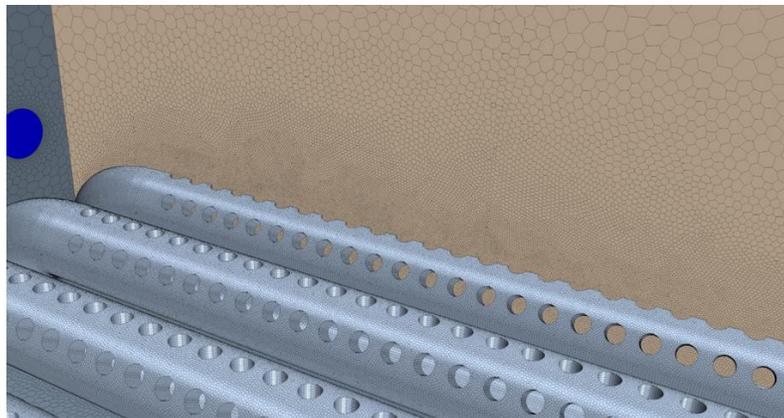


Рисунок 3.17 – Многогранная расчетная сетка топки котла и разработанной горелки

Для расчета смоделирована неструктурированная многогранная расчётная сетка в 10 млн. элементов (рисунок 3.17). Использование многогранной сетки оправдано тем, что конструкция горелочных устройств имеет криволинейную форму (рисунок 3.18).

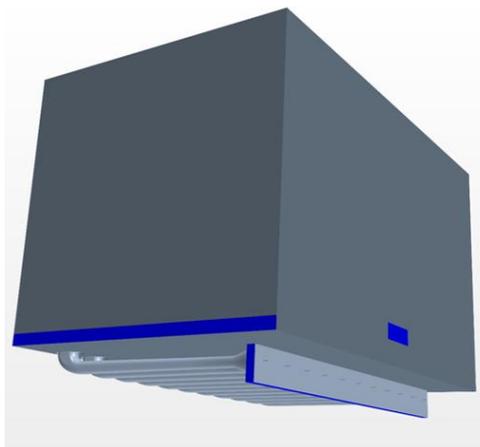


Рисунок 3.18 – Модель топки котла и разработанной горелки

Минимальный линейный размер элемента составляет 0,15 мм (газовое сопло), максимальный 12 мм. Сгущение сетки произведено в областях выхода топлива в расчётное пространство для более детального моделирования турбулентной струи и в местах отверстий горелочного устройства для более детального моделирования пламени и теплового факела (рисунок 3.19).

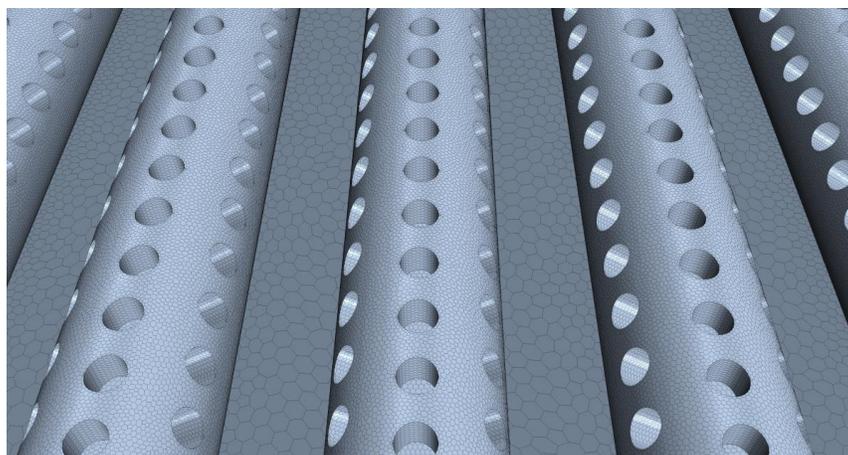


Рисунок 3.19 – Расчётная сетка в области горелки

Параллельно с этим были сгенерированы расчетные таблицы тепловыделений и массовых долей интересующих компонентов смеси от двух переменных (смесевой доли и прогрессной переменной). Сгенерированные таблицы были рассчитаны программой «STAR-CCM+». Далее были заданы фиксированные значения смесевой доли и прогрессной переменной. На входе газовых сопел они равны 1 и 0 соответственно. По табличным значениям означает абсолютно чистый газ и сгоревший. На границах подсоса воздуха эти значения также фиксированы и равны. Так как рассматривается чистый не сгоревший воздух. На выходе из топки и на твердых стенках был задан нулевой градиент этих величин. В процессе расчета получилось, что на выходе из топки по всей площади распределения прогрессная переменная равна 1, это значит, что все потоки газа прореагировали.

На разработанной модели был произведен расчёт процесса горения при разных мощностях. Это связано с тем, что современное газогорелочное оборудование должно иметь плавное регулирование мощностных параметров.

Температурные поля, полученные в результате расчета процесса горения в топке котла при разной мощности, приведены на рисунках 3.20 и 3.22. При расчете определялись также равномерность горения, полнота сгорания и концентрация продуктов сгорания.

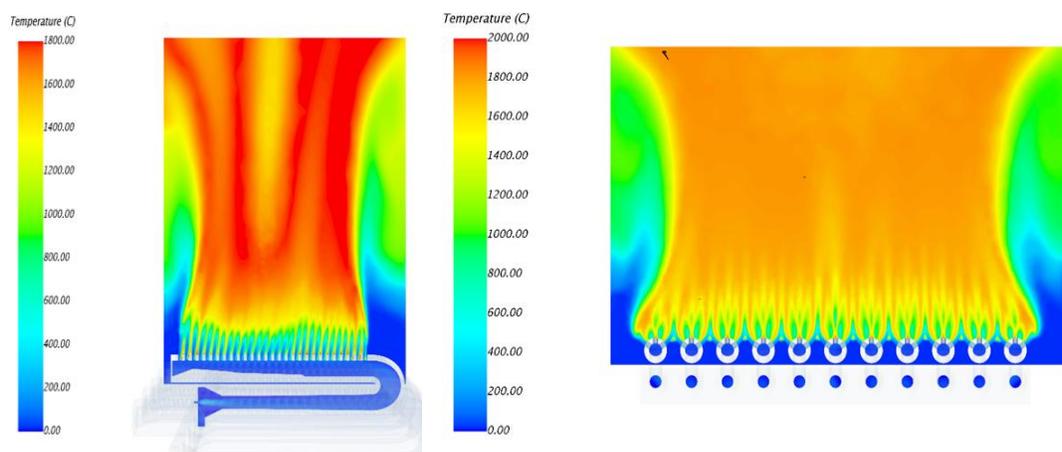


Рисунок 3.20 – Распределение поля температур при работе котла на 25 кВт

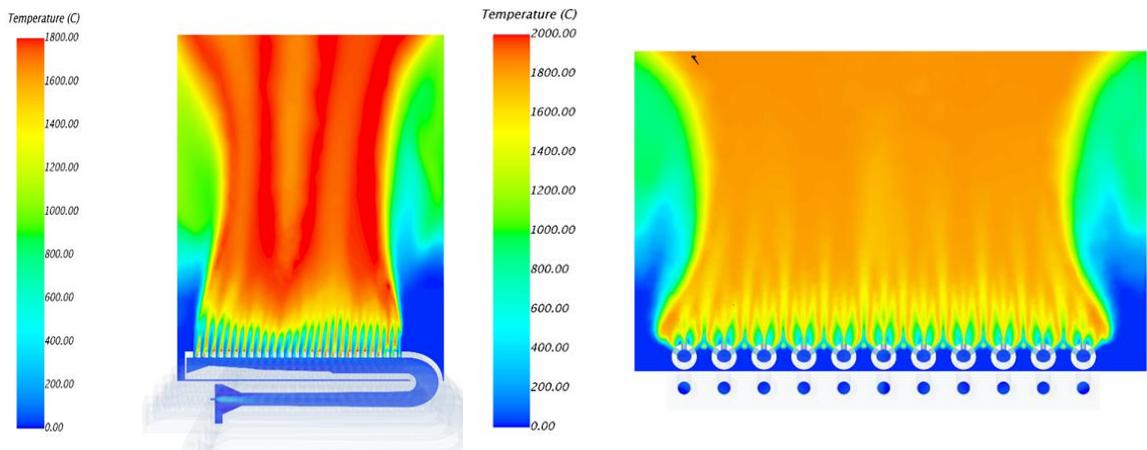


Рисунок 3.21 – Распределение поля температур при работе котла на 30 кВт

Анализ распределения полей температуры по длине ГГУ показал равномерность распределения факелов горения, что характеризует устойчивый процесс горения. Что в совокупности с расчётом равномерности распределения газозадушной смеси подтверждает качественную работу разработанной горелки.

Исследование параметров температурного поля, приведенного в аксонометрии на рисунке 3.22, позволяет сделать вывод о равномерности прогрева теплоносителя в теплообменнике и внутренних стен топки.



Рисунок 3.22 – Аксонометрия температурного поля процесса горения

Качества сжигания газа при разной тепловой нагрузке подтверждается исследованиями, результаты которых показаны на рисунке 3.23–3.24 в графической и табличной форме (таблица 3.1). Содержание вредных веществ соответствует нормам предельно–допустимых концентраций (далее по тексту ПДК).

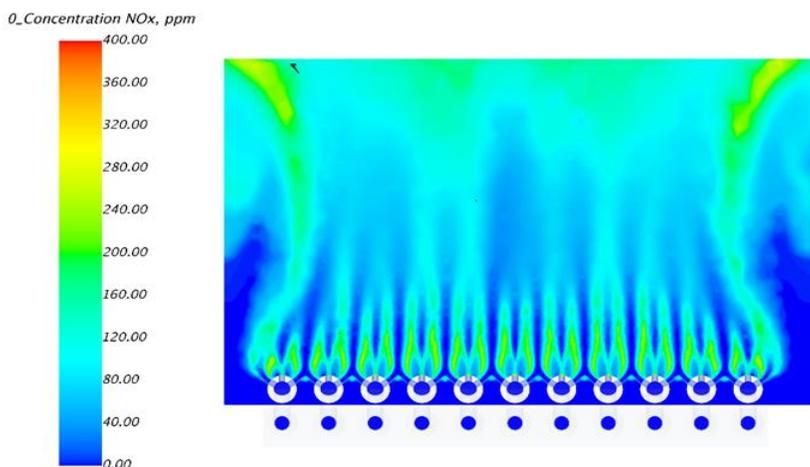


Рисунок 3.23 – Концентрации NO_x в топке котла

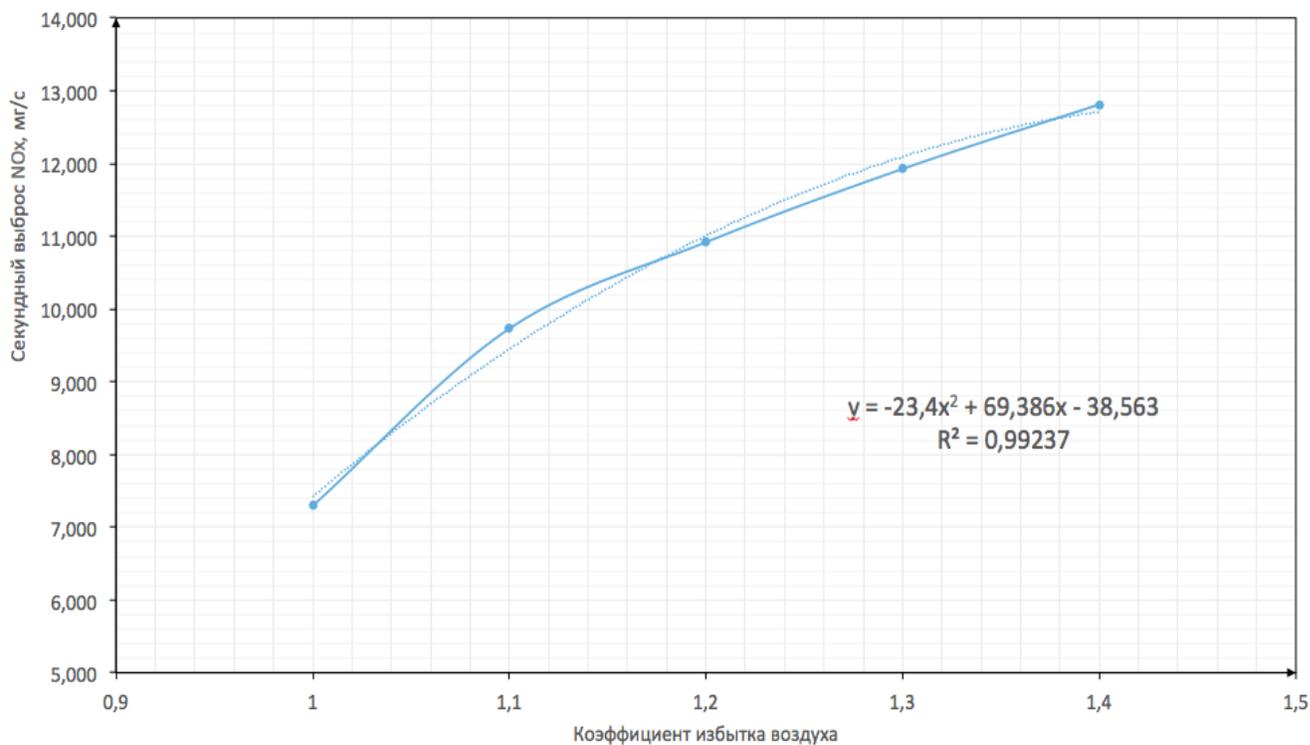


Рисунок 3.24 – Концентрации NO_x в топке котла при работе котла на разных тепловых режимах

Таблица 3.1 – Концентрации NO_x топке котла

Мощность котла, кВт	NO_x , ppm	NO_x , мг/м ³
15	189,5	236,4
20	173,6	216,7
25	155,9	194,6
30	133,0	166,1

По результатам расчета получена эмпирическая зависимость концентрации NO_x топке котла от тепловой мощности топки, которая имеет вид (коэффициент детерминации 0,9997):

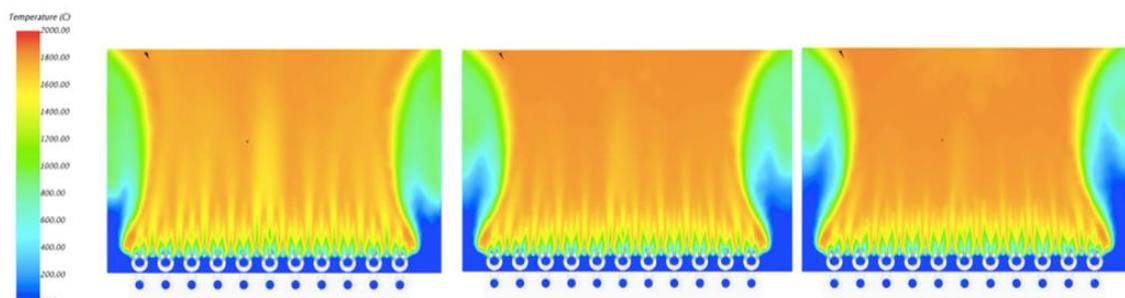
$$NO_x = 0,888Q^2 + 0,7Q + 266,5, \quad (3.35)$$

где NO_x – концентрация в мг/м³;

Q – тепловая нагрузка, кВт.

Так как на зону устойчивого горения и на качество сжигания газа влияет величина коэффициента избытка воздуха. Были проведены исследования процессов горения на максимальную мощность котла (30 кВт) при разных значениях коэффициента избытка воздуха α с выбором наиболее оптимальных значений. Результаты расчетов приведены на рисунках 3.25–3.28.

На основании полученных результатов построен график (рисунок 3.29) зависимости концентраций окислов азота от коэффициента избытка воздуха. Полученные значения концентраций NO_x не превышают допустимых величин ПДК (таблица 3.2).

Рисунок 3.25 – Распределение температурного поля при $\alpha = 1,0$ / $\alpha = 1,1$ / $\alpha = 1,2$

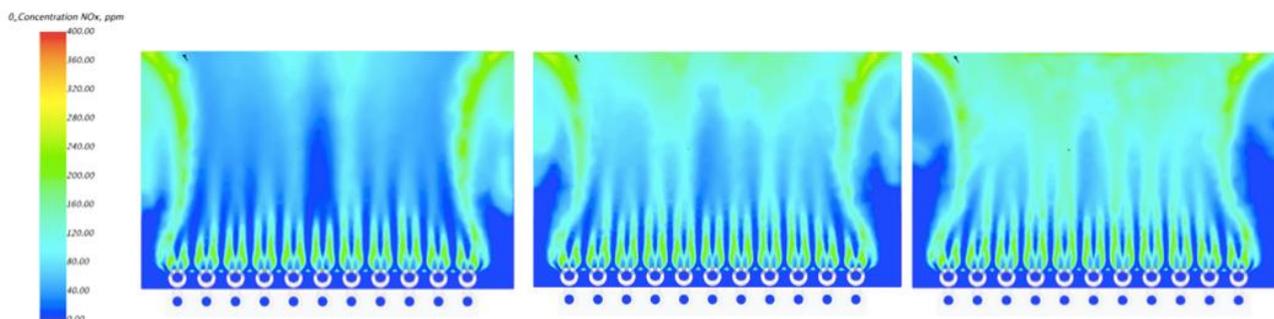


Рисунок 3.26 – Распределение концентраций NO_x при $\alpha = 1,0 / \alpha = 1,1 / \alpha = 1,2$

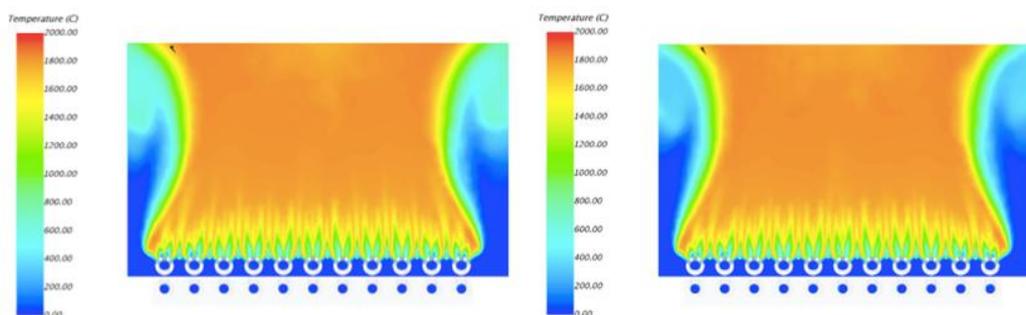


Рисунок 3.27 – Распределение температурного поля при $\alpha = 1,3 / \alpha = 1,4$

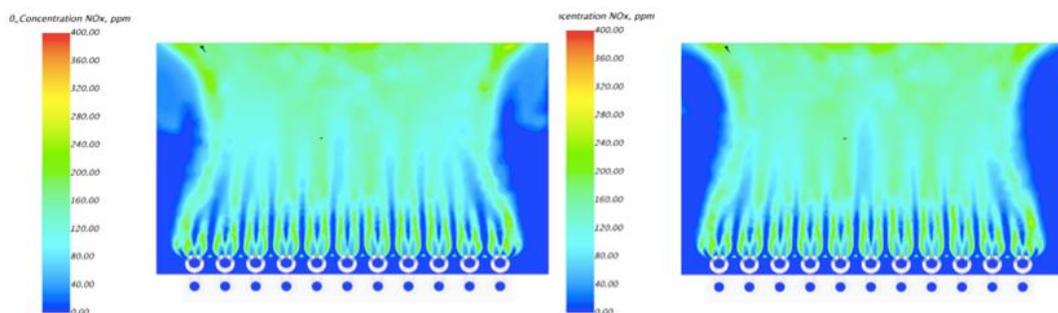


Рисунок 3.28 – Распределение концентраций NO_x при $\alpha = 1,3 / \alpha = 1,4$

Таблица 3.2 – Концентрации NO_x в топке котла

Коэффициент избытка воздуха	NO_x , ppm	NO_x , мг/м ³	NO_x , мг/с
$\alpha = 1,0$	108,3	135,2	7,296
$\alpha = 1,1$	133,0	166,1	9,729
$\alpha = 1,2$	139,1	173,6	10,918
$\alpha = 1,3$	141,2	176,3	11,925
$\alpha = 1,4$	140,1	175,9	12,811

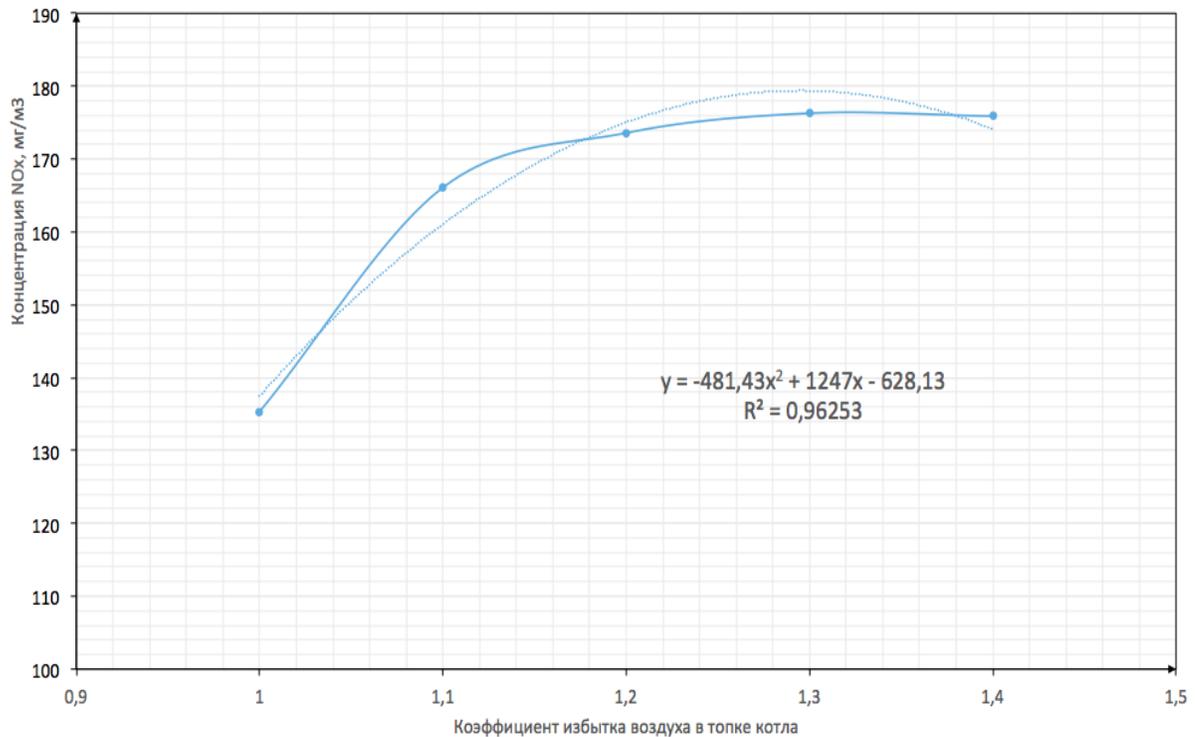


Рисунок 3.29 – Графическая зависимость концентраций NO_x в топке котла от коэффициента α

По результатам расчета получена эмпирическая зависимость концентрации NO_x топке котла от коэффициента избытка воздуха, которая имеет вид (коэффициент детерминации 0,963):

$$NO_x = -481,43\alpha^2 + 1247\alpha - 628,13, \quad (3.36)$$

где NO_x – концентрация топке котла, мг/м³;

α – коэффициент избытка воздуха в топке котла.

Влияние мощности котлоагрегата на содержание NO_x в уходящих газах при полном коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,1$ по результатам расчета приведено на рисунке 3.30.

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 как в топке котла, так и в уходящих газах.

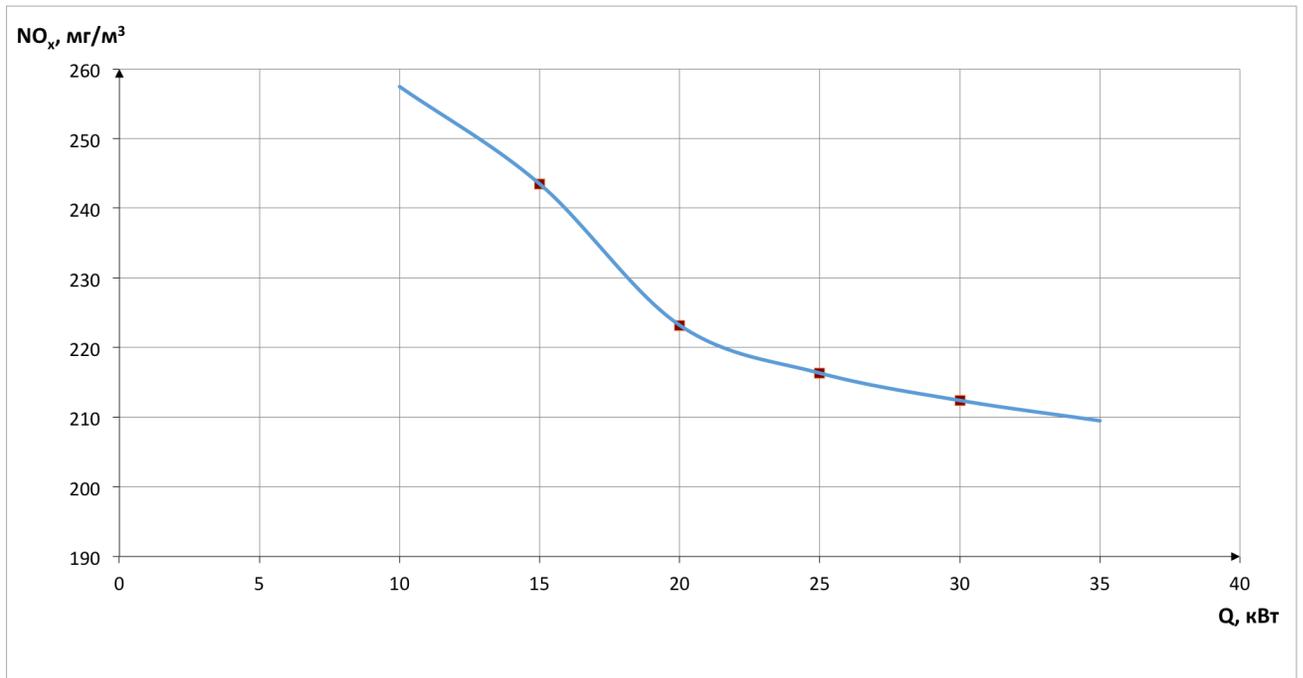


Рисунок 3.30 – Зависимость концентраций NO_x в уходящих газах от мощности котлоагрегата при полном коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,1$

3.4 Выводы по главе 3

1. Разработаны математические модели для обоснования аэродинамических характеристик конструктивных элементов разработанного ГГУ и качества сжигания газа в котле «NEVALUX–8230» при установке разработанного ГГУ.

2. В результате проведенного математического моделирования с использованием программных пакетов «ANSYS Fluent» и «STAR–CCM+» обоснованы форма и размеры элементов разработанного ГГУ и показано преимущество разработанной конструкции:

- эффективное расположение и требуемое количество огневых отверстий на газовом коллекторе;
- равномерность скорости выхода газозоудушной смеси из огневых отверстий;
- отсутствие проскока и отрыва пламени;

- равномерный процесс горения в топке котла;
- концентрации NO_x в топке ниже допустимых значений ПДК;
- отсутствие химического недожога.

3. По результатам моделирования получены эмпирические зависимости для определения концентрации NO_x топке котла производительности котлоагрегата и от коэффициента избытка воздуха.

ГЛАВА 4 КАСКАДНАЯ КОМПОНОВКА КОТЛОАГРЕГАТОВ С РАЗРАБОТАННЫМ ГАЗОГОРЕЛОЧНЫМ УСТРОЙСТВОМ

4.1 Каскадная схема компоновки котлов с разработанным ГГУ

Каскадная схема компоновки котлов с разработанным ГГУ реализована в котельной, расположенной в Ленинградской области, Кировский район, Никольское шоссе, участок № 55. Расчет режимов работы котельной выполнен в соответствии с нормативной литературой [99, 107, 108]. Котельная включает 4 котла «NEVALUX–8230». Функциональная схема котла «NEVALUX–8230» приведена на рисунке 3.16 [116].

Производительность котельной рассчитана из условий, что расчетная температура наружного воздуха для систем отопления в холодный период года минус 26 °С, продолжительность отопительного периода 220 суток, а средняя температура отопительного периода минус 1,8°С [109].

Теплоносителем является вода с параметрами:

- система отопления 95/70 °С;
- температура в системе ГВС– 55 °С.

В котельной помещении устанавливается каскад из четырех настенных котлов, тепловая мощность каждого котла составляет 30 кВт. Каждый котел оборудован встроенной атмосферной горелкой, работающей на природном газе с параметрами: низшая теплота сгорания $Q_H^p = 33496$ кДж/м³ и плотность $\rho = 0,683$ кг/м³.

Общая максимальная теплопроизводительность теплогенерирующей установки составляет 120 кВт. Предусмотрена установка емкостного водоподогревателя ГВС «Wolf Se–2–200» объемом 0,2 м³ [107].

Использование ёмкостного водоподогревателя позволяет иметь значительный запас воды на нужды ГВС (0,2 м³), что сглаживает колебания нагрузки горячего

водоснабжения, и в свою очередь, уменьшает число циклов включения и выключения горелок котлов [85, 89, 110, 124].

С целью уменьшения содержания солей жёсткости в исходной водопроводной воде, вызывающих образование накипи, и снижения коррозии трубопроводов, для ГВС принята установка ХВП [85, 92, 102, 107].

Работа отопительного оборудования предусмотрена в зимний, переходный и летний периоды.

При расчете годовых расходов тепла и топлива нагрузка на системы отопления была принята из расчета продолжительности всего отопительного периода – 5280 часов [92, 107].

Работа котлов при различных режимах теплоснабжения сведена в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Режим теплоснабжения каскада котлов «NEVALUX–8230»

Наименование	Ед. изм.	Режим теплоснабжения		
		зимний	переходный	летний
Расход тепла	кВт	105	50	20
Число работающих котлов	шт.	4	2	1
Теплоноситель	вода			
Температура теплоносителя в системе отопления	°С	95/70		
Давление теплоносителя в системе максимальное	МПа	0,6		
Номинальная производительность работающих котлов	кВт	120	60	30
Загрузка котлов от номинальной производительности	%	87,5	83,3	66,6
Основное топливо	Природный газ низкого давления			

Технические данные котла «NEVALUX–8230», установленного в каскаде, представлены в таблице 4.2 [116].

Таблица 4.2 – Технические характеристики котла «NEVALUX–8230»

Наименование	Примечание	Единицы Измерения
Номинальная теплопроизводительность	30	кВт
Номинальная тепловая мощность	33	кВт
Минимальная теплопроизводительность	10	кВт
Максимальная температура воды на входе	85	°С
Температура уходящих газов не ниже – при номинальной мощности котла	120	°С
КПД	92	%
Габаритные размеры		
– глубина	326	мм
– ширина	410	мм
– высота	720	мм

Применяемые настенные водогрейные котлы «NEVALUX–8230» являются двухконтурными настенными котлами с принудительной циркуляцией теплоносителя [116]. 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, принято решение о применении зависимой тепловой схемы отопительного помещения с гидравлическим разделителем «Meibes MH 50 MA» [85, 92, 107, 124]. Решение о применении гидравлического компенсатора позволяет значительно сгладить влияние контуров отопления и вентиляции (контур потребителя) на котловой контур [28, 124].

Тепловая схема помещения котельной делится на две составляющие:

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

Каждый устанавливаемый котёл, оборудован встроенным циркуляционным насосом, обеспечивающим постоянный расход теплоносителя через котёл. Работа котлов настроена на выработку теплоносителя с постоянной температурой 85 °С. Регулирование отпуска тепла, производится модуляцией горелок котлов, количеством работающих котлов и трехходовыми клапанами в контуре отопления и

вентиляционных установках. Схема обвязки котлов оснащена минимально–необходимым количеством запорной и предохранительной арматуры, а также средствами контрольно–измерительных приборов (КИП) и автоматики, обеспечивающими безопасную и экономичную работу котлового контура [4, 15, 52, 55, 68, 69, 70, 71, 78, 85, 102, 116, 121, 131].

Схема отопительных контуров – закрытая, четырёхтрубная.

Контур теплопотребления оснащены индивидуальными циркуляционными насосами:

– насос системы отопления «Grundfos UPS 25–120» ($G = 2,5 \text{ м}^3/\text{ч}$; $H_{зск.} = 0,058 \text{ МПа}$);

– насос системы ГВС «Grundfos UPS 25–120» ($G = 1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$; $H_{зск.} = 0,029 \text{ (0,049) МПа}$)

Применённые насосы являются трёхскоростным – это позволяет максимально выгодно настроить их работу при пуско–наладке [85].

Контур отопления имеет трёхходовой клапан с необходимой автоматикой регулирования, создающей в соответствии с погодными условиями необходимую температуру теплоносителя. Контур отопления и вентиляции оснащены минимально–необходимой запорной и предохранительной арматурой, а также средствами КИП и автоматики, обеспечивающими безопасную, экономичную и комфортную работу контуров [70].

Следует отметить, что данная тепловая схема работает с отрицательным градиентом давления между подающим и обратным коллектором, то есть давление в подающем коллекторе ниже, чем в обратном. Поэтому настройка работы линии подпитки системы производится по давлению в подающем коллекторе. На линии подпитки устанавливается регулятор давления «после себя», обеспечивающий поддержание статического давления и подпитку системы при утечках.

Для приёма излишков воды, вызванной её нагревом и поддержания статического давления, в тепловой схеме, устанавливается разборный мембранный

расширительный бак «Flamco Flexcon Pro 200 (1,0/6,0)». Расширительный бак вместе с регулятором давления «после себя» создают «нейтральную точку» в гидравлическом компенсаторе. Конструкция бака, позволяет заменять мембрану в случае её износа [85]. В водоразборном контуре ГВС устанавливается гидроаккумулятор (расширительный бак) для горячего водоснабжения «Flamco Airfix A 35 (4,0/6,0)».

Газоснабжение оборудования предусматривается от газопровода среднего давления диаметром 32x3,2 мм и газораспределительной установки (ГРУ) «ГРУ–10,5», которая находится снаружи здания [17, 20, 70, 100, 101, 106]. «ГРУ–10,5» оснащён техническим узлом учёта природного газа, который до ввода в работу основного учётного узла выполняет функцию коммерческого. «ГРУ–10,5» понижает газ среднего давления на газ низкого давления [111].

Газопровод низкого давления диаметром 57x3,5 мм через стену в футляре диаметром 108x4,5 мм входит в отопительное помещение на высоте 2,1 м [17, 20, 70, 100, 101, 106].

Первым по ходу газа устанавливается термозапорный клапан «КТЗ–50» (условный диаметр 50 мм), отключающий подачу газа на оборудование, при достижении температуры в помещении 100 °С [70, 100, 101, 106, 111]. Следом за термозапорным клапаном установлен управляемый отсечной электромагнитный клапан «ВН2Н–1» (условный диаметр 50 мм), входящий в систему автоматического контроля загазованности «САКЗ–МК–3–2–6» [70, 100, 101, 106, 111]. Система «САКЗ–МК–3–2–6» предназначена для непрерывного автоматического контроля содержания топливного и угарного газов в отопительном помещении. Система имеет два порога срабатывания по природному газу на метан CH_4 (нижней концентрационный предел распространения 10% и 20%) и два порога срабатывания по угарному газу CO [70]. Система срабатывает также и по пожарной сигнализации [70, 117].

После узла клапанов безопасности газопровод низкого давления диаметром 57x3,5 мм поднимается на высоту 2,9 м и на стене прокладывается к котлам №1 – №4 «NEVALUX–8230» [17]. Возле котла №4 газопровод низкого давления диаметром 57x3,5 мм опускается до высоты 0,5 м и проходит вдоль котлов. Газопровод, проложенный вдоль котлов, выполняет функцию газового коллектора, от которого к каждому котлу, выполнены отводы газопроводов диаметром 20x3,2 мм с установленными на них кранами «КШ–20ф» [17, 100, 106].

Подключение продувочного газопровода диаметром 20x2,8 мм предусмотрено в крайней точке газового коллектора диаметром 57x3,5 мм по ходу газа [17, 106]. На продувочном газопроводе установлены краны «КШ–20р» и «КШ–15р» со штуцером для отбора проб. Продувочный газопровод диаметром 20x2,8 мм должен быть выведен из помещения отопительного оборудования выше кровли здания [17, 106]. Проход продувочного газопровода через стену отопительного помещения следует выполнять в футляре диаметром 40x3,5 мм [70, 106].

Работа теплогенераторной предусматривается без постоянного обслуживающего персонала [70]. На диспетчерский пульт выводятся следующие сигналы:

- клапан закрыт;
- порог 1 по метану CH_4 со звуковой сигнализацией (объёмная доля, в процентах – 0,5);
- порог 2 по метану CH_4 с отключением подачи газа (объёмная доля, в процентах – 3,5);
- порог 1 по угарному газу CO со звуковой сигнализацией (концентрация в – 20 мг/м³);
- порог 2 по угарному газу CO с отключением подачи газа (концентрация – 100 мг/м³);
- сигнал общей неисправности оборудования отопительного помещения.

В помещении котельной оборудована система пожарной сигнализации и сигнализации несанкционированного доступа, с выводом сигнала на пульт [70, 117]. Термозапорный клапан «КТЗ–50», установленный на вводе газопровода в теплогенераторную, автоматически перекрывает газопровод при достижении температуры воздуха в помещении 100 °С [106].

Газогорелочный блок позволяет осуществлять плавное регулирование, и оснащен средствами автоматики и безопасности, которые предусматривают автоматическое прекращение подачи топлива при следующих аварийных условиях:

- понижение и повышение давления газа перед горелками;
- нарушение работы вентилятора котла;
- повышение температуры воды на выходе из котла;
- повышение и уменьшение давления воды на выходе из котла;
- погасание факела горелки;
- понижение циркуляции воды через котел;
- неисправности цепей защиты;
- осуществляет контроль герметичности запорной газовой арматуры.

Автоматическая отсечка топлива сопровождается светозвуковыми сигналами, указывающими первопричину срабатывания защиты [70].

Для контроля давления [106] природного газа перед котлами №1 – №4, в крайней точке газового коллектора диаметром 57х3,5 мм [17] предусмотрена установка манометра «Wika 611.10» на диапазон измерений 0 – 4 кПа.

Вентиляция помещения котельной – естественная. Кратность воздухообмена рассчитана на компенсацию тепловыделений [3, 10, 22, 41, 42, 78, 110, 111, 118, 127]. Приток воздуха предусмотрен через жалюзийную решетку (НЖР) размером 300х300 мм с живым сечением 0,06 м².

Вытяжка осуществляется через вентканал круглого сечения с диаметром воздуховода 250 мм.

Дымоудаление осуществляется по коаксиальным дымоходам типа «труба в трубе» «DN 125/80». Дымоходы выводятся через наружную стену котельной. Коаксиальные дымоходы выполняют двойную функцию: отвод дымовых газов и забор воздуха на горение [106].

В соответствии с правилами устройства электроустановок [71] предусматривается защитное заземление. Тип применяемой системы заземления в сети переменного тока «220/380В–TN–S».

Разработанная тепловая схема компоновки представлена на рисунке 4.1.

4.2 Методика проведения наладочных испытаний

Наладка работы котлов проводится согласно нормативным документам [92, 96, 98, 103, 105, 107, 116].

Наладка котлов на режимах близких к номинальным, проводится поочередно. Для стабилизации теплового режима испытуемый котел устанавливается под постоянную нагрузку в режиме ручного регулирования, сглаживание колебаний расхода тепла обеспечивают остальные котлы каскада в автоматическом режиме регулирования [55, 57, 58, 60].

В процессе подготовительных работ, предшествующих испытаниям, проводится проверка технического состояния газового и котельного оборудования.

Перед началом балансовых испытаний проводится прикидочная оценка с целью выявления критических избытков воздуха при каждой нагрузке. Для этих целей на котлах выбирается по десять нагрузочных режимов со стабилизацией горения на промежуточных точках пропорциональных мощности. Для получения надежной информации проводится несколько опытов [55, 60].

Нагрузка зависит от технологических требований. Расход топлива задается регулятором расхода газа на каждом котле.

По данным предоставленным АО «Газпром газораспределение Ленинградская область» в котельной используется природный газ следующего состава (приложение Б).

Заполнение котлового контура водой производится последовательным открытием запорной арматуры. Расход воды для заполнения принимается не более $10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$. При заполнении контура необходимо обеспечить отсутствие воздуха. В дальнейшем воздух из системы будет удаляться автоматически. Испытания производятся при положительной температуре в здании. Температура воды должна быть также не ниже $5 \text{ }^\circ\text{C}$ и не выше $40 \text{ }^\circ\text{C}$.

Минимальное значение пробного давления при гидравлическом испытании для котлового контура принимается:

– при рабочем давлении более $0,5 \text{ МПа}$ минимальное значение пробного давления принимается $1,25$ рабочего, но не менее рабочего, плюс $0,3 \text{ МПа}$.
Принимается $0,8 \text{ МПа}$.

Давление воды при испытании контролируется двумя манометрами, из которых один с классом точности не ниже $1,5$.

Время выдержки под пробным давлением составляет не менее 10 минут.

После снижения пробного давления до рабочего производится тщательный осмотр всех элементов котловых блоков.

Испытание на прочность и плотность считается выдержавшим, если не обнаружено:

- признаков разрыва;
- течи, слезок и потения на основном металле и в сварных соединениях;
- остаточных деформаций.

В развальцованных и разъемных соединениях допускается появление отдельных капель, которые при выдержке времени не увеличиваются в размерах.

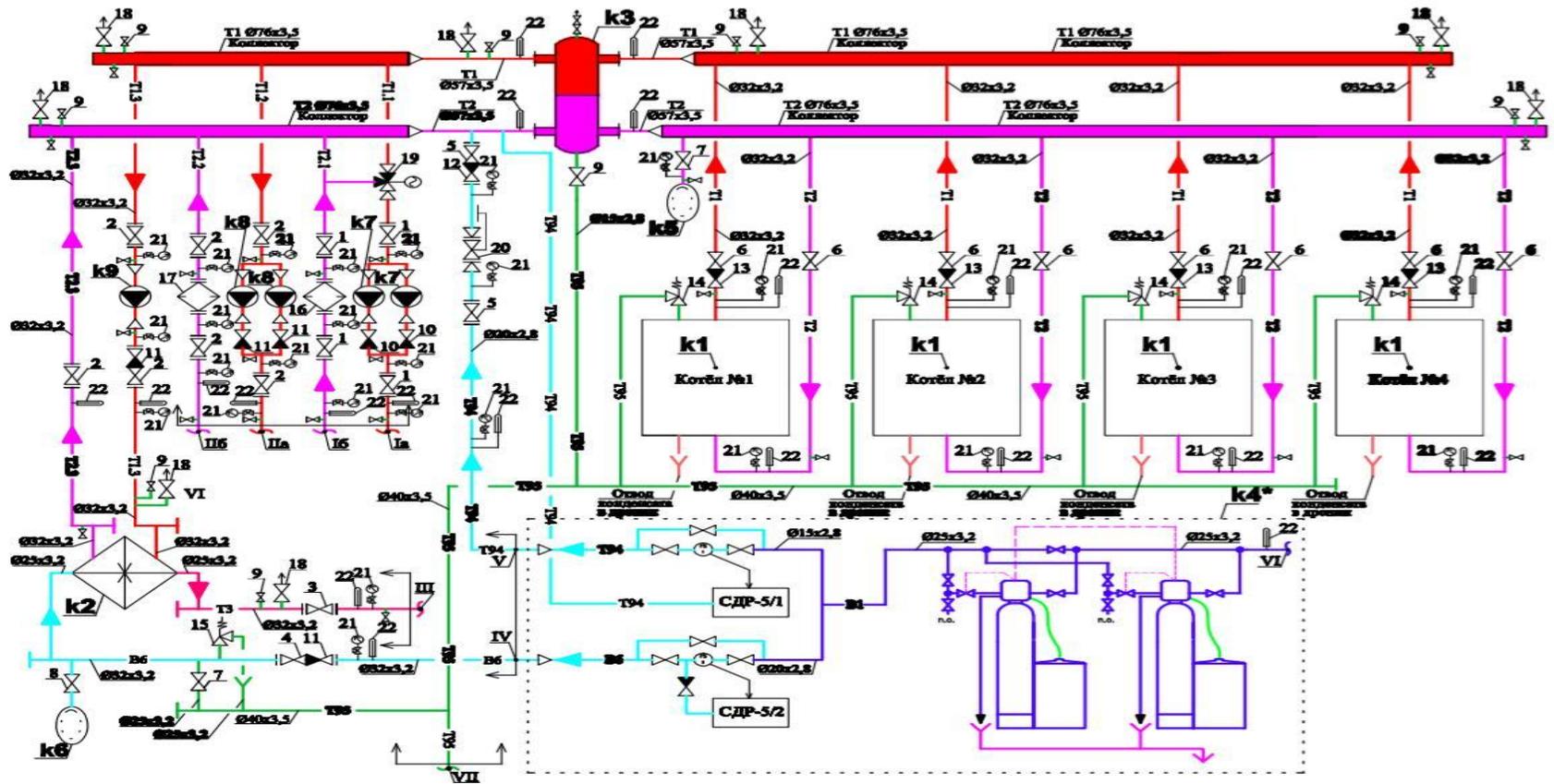


Рисунок 4.1 – Тепловая схема компоновки котлами «NEVALUX–8230»:

K1 – настенный газовый котел; K2 – вертикальный бойлер; K3 – гидравлический компенсатор; K4 – химводоподготовка; K5 – разборный мембранный расширительный; K6 – мембранный расширительный бак; K7 – насос контура системы отопления; K8 – насос контура системы вентиляции; K9 – насос греющего контура ГВС; 1, 2, 5 – кран фланцевый; 3, 4 – вентиль фланцевый; 6, 8 – вентиль муфтовый; 7, 9 – кран муфтовый; 10, 13 – клапан обратный; 11, 12 – клапан обратный фланцевый; 14, 15 – клапан предохранительный угловой пружинный; 16, 17 – грязевик; 18 – автовоздушник; 19 – клапан регулирующий трехходовой с электроприводом; 20 – клапан; 21 – манометр показывающий; 22 – термометр показывающий

При проведении гидравлических испытаний производится настройка предохранительных клапанов (ПК) блоков. Начало открытия ПК должно соответствовать требованиям инструкции завода–изготовителя. При полном открытии ПК давление не превышает расчетное. По окончании проверки настройки груз ПК (или пружина) фиксируется, пломбируется и вывешивается табличка с указанием:

- давления срабатывания клапана;
- срока проведения испытания;
- срока следующего проведения испытания.

Эксплуатация котлоагрегатов с недействующим предохранительным устройством не допускается.

Для испытания на гидравлическую прочность и плотность трубопроводов котельной, необходимо обеспечить заполнение трубопроводов контура системы отопления и системы ГВС [55, 60]. Для этого при помощи пресса давление поднимается до 0,8 МПа и выдерживается 10 минут, затем снижается до рабочего и произвести тщательный осмотр всех элементов систем – сварных швов по всей их длине, фланцевых соединений трубопроводов и каждого теплообменного аппарата.

Испытание водяных систем теплоснабжения должно производиться при отключенных котлах и расширительных сосудах гидростатическим методом: давление равно 1,5 рабочего давления, но не менее 0,2 МПа в самой нижней точке системы [20, 55, 57, 60]. Система признается выдержавшей испытание, если в течение 5 мин нахождения ее под пробным давлением падение давления не превысит 0,02 МПа, а также будут отсутствовать течи в сварных швах, трубопроводах, резьбовых соединениях, арматуре, отопительных приборах и оборудовании. Величина пробного давления при гидростатическом методе испытания для систем теплоснабжения не должна превышать предельного пробного давления для установленных в системе отопительных приборов.

По окончании гидравлических испытаний составляется акт, где указывается:

– состояние запорно–регулирующей арматуры по водяному тракту котельной, газопроводов и газового оборудования, электрооборудования и систем управления, средств учета и автоматического регулирования тепловой энергии и теплоносителя, средств аварийной блокировки;

– дооснащение (при необходимости) котлов поверенными контрольно–измерительными приборами, измеряющими давление в топке, давление воздуха после вентилятора, температуру уходящих газов, давление, температуру и расход теплоносителя;

– давление на вводе исходной (подпиточной) воды из существующего хозяйственно–питьевого водопровода, которое должно составлять не менее 2,5 бар;

– диапазон регулирования расхода сетевой воды через нагревательный модуль и модуль ГВС.

Перед заполнением водой водогрейные котловые блоки должны быть подвергнуты реагентной промывке и техническому освидетельствованию (внутренний осмотр и гидравлические испытания) с записью в паспорт котлов. Также необходимо осуществить проверку качества исходной (подпиточной) воды (определение pH , содержания железа Fe , гидрокарбоната кальция $Ca(HCO_3)_2$, кислорода O_2 , свободной углекислоты CO_2 , цветности, мутности) на соответствие требованиям нормативно технической документации. При несоответствии фактических показателей нормативным, применяют химобработку. Фактические показатели качества воды указываются в техническом паспорте котла.

После проведения пуско–наладочных работ было выполнено комплексное опробование каскадной котельной установки, с разработанным ГГУ.

Целью комплексного опробования являлась проверка работы всего технологического оборудования котельной при нагрузке в течение 72 часов [55, 60]. При комплексном опробовании на территории и в помещении котельной было обеспечено соблюдение необходимых требований и правил безопасности [55].

Все работы, связанные с комплексным опробованием, проводились совместно с представителями монтажной, пусконаладочной и обслуживающей организации.

Перед началом комплексного опробования были обеспечены [55, 57, 60, 71, 72, 94, 95]:

- проверка удостоверений персонала и целевой инструктаж;
- бесперебойное газоснабжение;
- бесперебойное водоснабжение;
- подача электроэнергии на щит (ГРЩ) котельной;
- готовность к пуску основного и вспомогательного оборудования пускового комплекса согласно инструкциям по эксплуатации оборудования.

Комплексное опробование включало в себя проведение испытаний основного и вспомогательного оборудования [55, 57, 60]:

- топливного;
- тепломеханического;
- электрооборудования;
- вентиляции;
- систем контроля автоматики на различных нагрузках.

По окончании комплексных испытаний была составлена режимная карта работы котельного оборудования, приведенная в пятой главе настоящей диссертации (таблица 5.3), а также была проведена его наладка (приложение В таблица 1).

Режимно–наладочные испытания проводились в эксплуатационных условиях, и с их помощью, были определены оптимальные условия работы каждой секции котлового нагревательного контура и вспомогательного оборудования на различных нагрузках, а также их технико–экономические показатели [55, 60].

При проведении режимно–наладочных испытаний определялись и регулировались следующие параметры работы:

- оптимальный режим горения;

- минимальные значения коэффициента избытка воздуха;
- основные потери тепла и КПД каждого блока;
- значения собственных нужд котельной в тепловой энергии;
- проверка настройки автоматики регулирования и безопасности;
- анализ качества подпиточной, сетевой и котловой воды;

Также было произведено опробование автоматического и ручного управления арматурой, определение соответствия порядка отработки устройств и элементов систем защиты, сигнализации и управления, установка необходимых значений срабатывания пороговых устройств.

Была произведена проверка срабатывания технических защит, блокировок, сигнализации и АВР в соответствии с инструкциями по монтажу, эксплуатации и техническому обслуживанию завода–изготовителя котлов.

4.3 Выводы по главе 4

Применение каскадной схемы компоновки с разработанным газогорелочным устройством имеет следующие преимущества по сравнению с каскадной схемой компоновки с ГГУ импортного образца:

1. Увеличивается эффективность сжигания газа на 3%.
2. Снижается себестоимость котлоагрегатов, установленных в каскаде.
3. Перераспределяется тепловая нагрузка по котлам, установленных в каскаде.
4. Повышается срок службы котельного оборудования.

ГЛАВА 5 МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1 Экспериментальные исследования работы разработанного ГГУ

Экспериментальные исследования работы котла «NEVALUX–8230» с разработанным ГГУ, входящего в состав каскадной установки, проводились на действующем теплогенерирующем оборудовании в котельной, расположенной в Ленинградской области, Кировский район, Никольское шоссе, участок № 55.

При проведении исследований определялись:

- энерго–экологические показатели работы каскадных котельных установок при отсутствии химического недожога;
- тепловой баланс каскадных котельных установок;
- величина потерь теплоты каскадных котельных установок в окружающую среду.

5.2 Методика исследований энерго–экологических показателей работы каскадной котельной при отсутствии химического недожога

Котел «NEVALUX–8230» имеет поверхность нагрева 1,03 м², секции – фронтальная, две боковых, верхняя и нижняя [116].

Разработанное газогорелочное устройство инжекционного типа, установленное в котлах «NEVALUX–8230», работает на газе низкого давления. Подробное описание разработанного газогорелочного устройства приводится во второй главе диссертации.

Методика исследований энерго–экологических показателей работы каскадной котельной при отсутствии химического недожога разработана в соответствии с нормативными документами [65, 66, 67, 80, 81]

Газоснабжение каскадной котельной с котлами отечественного образца осуществляется от газопровода среднего давления и газораспределительную

установку (ГРУ) «ГРУ–10,5», которая оснащена техническим узлом учёта и снижения давления природного газа до значений 2000 Па.

Все исследования проводились на установившихся тепловых режимах работы котельных установок в соответствии с программой инструментальных измерений, которая была согласованна с газораспределяющей организацией (приложение В таблица 1).

Целью экспериментальных исследований было определение концентрации вредных веществ, которые образуются при сгорании природного газа в зависимости от тепловой нагрузки, а именно угарного газа CO и окислов азота NO_x .

Измерения выполнялись на восьми тепловых режимах. На каждом режиме проводилась серия из 10 измерений для оценки статистической погрешности. По результатам экспериментальных исследований была разработана режимная карта работы котла (таблица 5.1) и построены графические зависимости (рисунки 5.3–5.12).

В ходе испытаний регулировались расход газа, V_2 , м³/ч и давление газа перед горелкой, P_2 , Па.

Температура газа, t_2 , °С и температура воздуха, t_6 , °С, а также низшая теплота сгорания топлива, Q_H^p , кДж/м³ при испытаниях оставались постоянными.

Характеристики приборов, которые использовались при проведении испытаний, представлены в приложении В таблица 2.

Определение расхода природного газа на котельную установку каскада котлов «NEVALUX–8230» осуществлялась по показаниям ультразвукового портативного расходомера марки «Взлет ПР» (заводской номер 301064), который был установлен на подающей линии трубопровода, с учетом давления газа, его плотности и фактической температуры.

Для определения давления природного газа перед горелками на установке каскада котлов «NEVALUX–8230» использовался манометр марки «Д60», цена деления 0,1, погрешность измерений 0,6%.

Для измерения температуры питательной воды до и после котельной установки каскада котлов «NEVALUX–8230» использовались термометры, установленные в точках измерения на оборудовании и трубопроводе. Предел измерения термометра биметаллического 120 °С, цена деления 1 °С.

Для анализа содержания продуктов сгорания использовался автоматический цифровой газоанализатор «TESTO–300», который зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений № 46839.



Рисунок 5.1 – Газоанализатор «TESTO–300»:

- 1 – блок–анализатор; 2 – сенсорный дисплей; 3 – ПО с базой данных; 4 – интерфейс;
- 5 – гнездо подключения зондов контроля качества воздуха в помещении;
- 6 – гнездо для зондов определения концентрации окислов азота NO_x , угарного газа CO , диоксидов серы SO_2 и кислорода O_2 ; 7 – встроенный сенсор измерения дифференциального давления, настройка таймера/часов для ΔP ; 8 – разъем подключения к сети,
- 9 – клавиатура управления; 10 – встроенный принтер

Газоанализатор «TESTO–300» состоит из блока–анализатора, сенсорного экрана, комплекта подключаемых пробоотборных зондов, фильтров тонкой очистки, интерфейса, встроенного принтера, блока питания для работы от сети 220 В, зарядного устройства для аккумуляторов (рисунок 5.1). Технические характеристики газоанализаторы «TESTO–300» представлены в приложении В таблица 3.

Схема проведения измерений на каждом водогрейном котле «NEVALUX–8230» каскадной установки с инжекционной многофакельной горелкой разработанной конструкции представлена на рисунке 5.2.

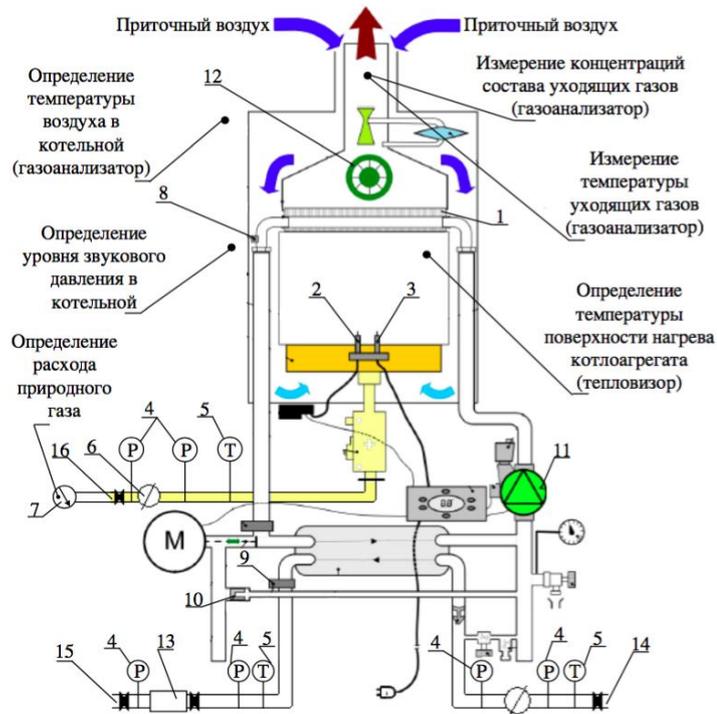


Рисунок 5.2 Схема проведения измерений на водогрейном котле «NEVALUX–8230» № 1 каскадной установки, с инжекционной многофакельной горелкой разработанной конструкции:

- 1 – вентилятор; 2 – инжекционная многофакельная горелка (новой конструкции); 3 – свеча розжига; 4 – манометр; 5 – термометр; 6 – секундомер; 7 – расходомер; 8 – датчик температуры контура ГВС; 9 – датчик подпитки контура ГВС; 10 – манометр;
- 11 – насос «Wilо»; 12 – датчик давления; 13 – теплосчетчик; 14 – подающий трубопровод;
- 15 – обратный трубопровод; 16 – газопровод низкого давления

Приведение концентраций компонентов окислов азота $NO_{x_{np}}$ и оксида углерода CO_{np} к $\alpha=1$, определялось по формулам [65, 66, 67, 80, 81, 129]:

$$CO_{np} = CO \cdot \alpha, \quad (5.1)$$

$$NO_{x_{np}} = NO \cdot \alpha, \quad (5.2)$$

Температура уходящих газов в точках тракта была измерена термопарой типа «К(Ni–CrNi)», которая входит в состав пробного зонда газоанализатора.

Разряжения в топке котла и по газовому тракту котельной установки осуществлялось с помощью газоанализатора «TESTO–300, в состав которого входит прессостат

Приведенные ниже параметры рассчитываются по результатам экспериментальных исследований по формулам, приведенным в [65, 66, 67, 73, 129].

Потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива q_3 , в процентах [66, 73]:

$$q_3 = V_{с.г} \cdot CO \cdot \frac{Q_{CO}}{Q_H^p}, \quad (5.3)$$

где $V_{с.г}$ – объем сухих продуктов сгорания, м³/м³;

CO – объемная концентрация оксида углерода, приведенная к $\alpha=1$, в процентах;

Q_{CO} , Q_H^p – низшая теплота сгорания оксида углерода и сжигаемого газа соответственно, кДж/м³.

Определение КПД котлоагрегата нетто $\eta_{нетто}$ по формуле обратного баланса, в процентах [14, 25, 75, 89, 111, 115]:

$$\eta_{нетто} = 100 - q_2 - q_3 - q_5, \quad (5.4)$$

Тепловая мощность котлоагрегата в МВт [14, 25, 75, 89, 111, 115]:

$$Q = Q_H^p \cdot B_{г}, \quad (5.5)$$

где $B_{г}$ – часовой расход газа, м³/ч, определяемый по формуле [75, 111]:

$$B_{г} = B_{сч} \cdot \frac{T+20}{760} \cdot \frac{P_{г}+P_6}{273+t_{г}}, \quad (5.6)$$

где $B_{сч}$ – расход газа по счетчику, м³/ч;

$P_{г}$ – давление газа перед счетчиком, мм вод. ст.;

P_6 – барометрическое давление, мм рт. ст.;

t_r – температура газа, °С.

Определение удельного расхода топлива b на выработку 1 Гкал тепла, м³/Гкал [75, 115]:

$$b = \frac{10^8}{Q_H^p \cdot \eta^{6p}}, \quad (5.7)$$

где η^{6p} – коэффициент полезного действия Брутто, в процентах.

Определение удельного расхода условного топлива b_y на выработку 1 Гкал тепла, кг у.т./Гкал [75, 115]:

$$b_y = \frac{10^8}{7000 \cdot \eta^{6p}}, \quad (5.8)$$

Определение расхода воды через котел D , т/ч [14, 25, 75]:

$$D = \frac{Q}{c(t_B'' - t_B')} \cdot 10^{-3}, \quad (5.9)$$

где Q – теплопроизводительность котлоагрегата, ГДж/ч;

t_B' , t_B'' – температура прямой и обратной воды на входе и выходе из котлоагрегата, °С;

c – теплоёмкость воды, кДж/кг·°С.

Определение теплового напряжения q_v поверхностей нагрева (теплосъема), кДж/м²·ч [75]:

$$q_v = \frac{Q}{F_n}, \quad (5.10)$$

где F_n – площадь поверхности нагрева, м².

Пересчет количества содержания угарного газа CO и окислов азота NO_x из показаний прибора газоанализатора цифрового комбинированного «TESTO-300» (ppm) в мг/м³ с приведением к O_2 [65, 66, 67, 129]:

$$CO = CO_{(ppm)} \cdot 1,25, \quad (5.11)$$

$$NO_x = NO_{x(ppm)} \cdot 2,05, \quad (5.12)$$

где $CO_{(ppm)}$ – концентрация угарного газа CO в продуктах сгорания, измеренная с помощью газоанализатора цифрового комбинированного «TESTO–300», ppm;

$NO_{x(ppm)}$ – концентрация NO_x в продуктах сгорания, измеренная с помощью газоанализатора цифрового комбинированного «TESTO–300», ppm.

5.3 Определение теплового баланса каскадной котельной

Исследования и разработка режимной карты проводились для 8 режимов работы котлов, начиная с минимально возможной по тепловой мощности, которая для котлов «NEVALUX–8230» составляет 10 кВт. Для каждого режима по достижению котельным агрегатом стабильности показаний по температуре уходящих газов и температуре теплоносителя проводились инструментальные исследования энерго–экологических показателей, результаты которых приводятся в режимной карте (таблица 5.1).

Для определения потерь теплоты и КПД котельного агрегата, с установленной горелкой новой конструкции, применялись формулы (1.1–1.11).

Значения температуры поверхности котлоагрегатов, полученные при измерении тепловизором «Testo 820» и контактным термометром ТК5–01М, приведены в приложении Г.

Результат проведенных испытаний показал, что изменение теплового напряжения при увеличении тепловой нагрузки котла имеет линейный характер (рисунок 5.3).

Для каждого режима определялся необходимый расход газа, изменение которого показано на рисунке 5.4.

Эмпирическая зависимость часового расхода газа от тепловой мощности котла «NEVALUX–8230» имеет вид:

$$B = 3,38 + 0,002 \cdot Q \quad (5.13)$$

Данная зависимость позволяет приблизительно оценить расход газа для различных значений мощности котла.

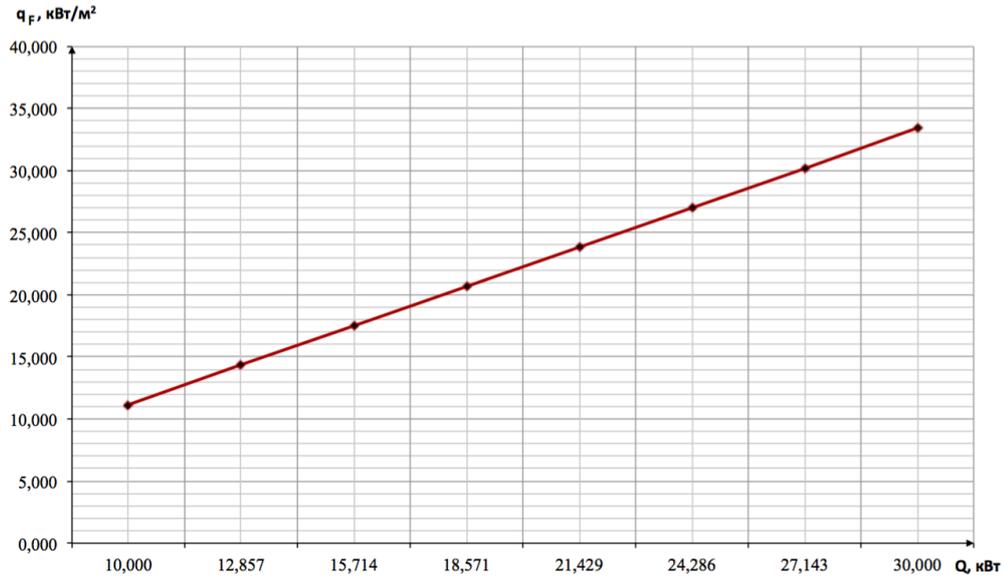


Рисунок 5.3 – Зависимость теплового напряжения от тепловой мощности котла

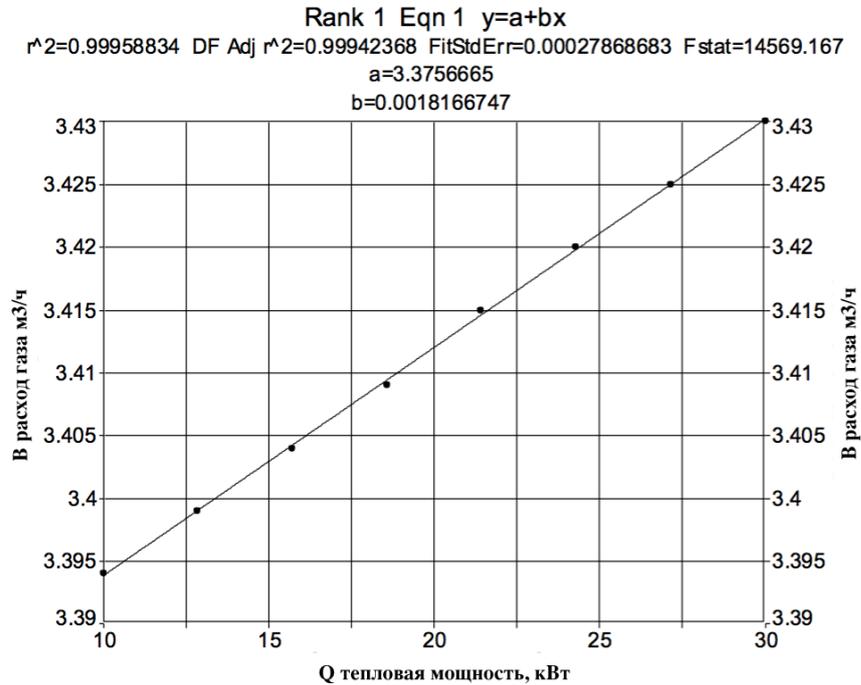


Рисунок 5.4 – Зависимость расхода газа от тепловой мощности котла

Таблица 5.1 – 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 за котлом α_1	–	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	%	12,0	8,5	7,0	6,3	5,9	5,5	5,3	5,2
Содержание NO _x за котлом	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

Продолжение таблицы 5.1 – 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
Температура уходящих газов	°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	94,05
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							

5.4 Энерго–экологические показатели работы горелки новой конструкции

Схема испытательного стенда была приведена на рисунке 5.2.

Результаты энерго–экологических исследований приведены в таблице 5.1.

Энерго–экологические показатели работы котлоагрегата [26]:

- расход газа;
- тепловая мощность газогорелочного устройства;
- коэффициент избытка воздуха;
- КПД котлоагрегата;
- температура уходящих газов;
- потери теплоты с уходящими газами;
- потери теплоты от поверхности нагрева в окружающую среду;
- потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива;
- концентрации продуктов сгорания (окислов азота и углерода, бенз/а/пирена).

Результаты испытаний показали следующее:

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

Зависимость между коэффициентом избытка воздуха и расходом газа оказывает непосредственное влияние на концентрацию окислов азота и углерода, а также бенз/а/пирена в уходящих газах. На рисунке 5.5 показана характерная зависимость между коэффициентом избытка воздуха и расходом газа для котлов малой мощности в сравнении с результатами эксперимента.

Экспериментальные значения коэффициента первичного воздуха в исследованном диапазоне расхода газа достаточно хорошо согласуются с результатами, построенными по данным [75].

К факторам, влияющим на концентрацию NO_x и CO_x в продуктах сгорания природного газа, относятся расход газа, тепловая мощность, а также коэффициент избытка воздуха [66, 88, 129]. Экспериментальные исследования показали, что изменения коэффициента избытка воздуха незначительны для диапазона работы котла от 10 до 30 кВт, поэтому их влиянием можно пренебречь.

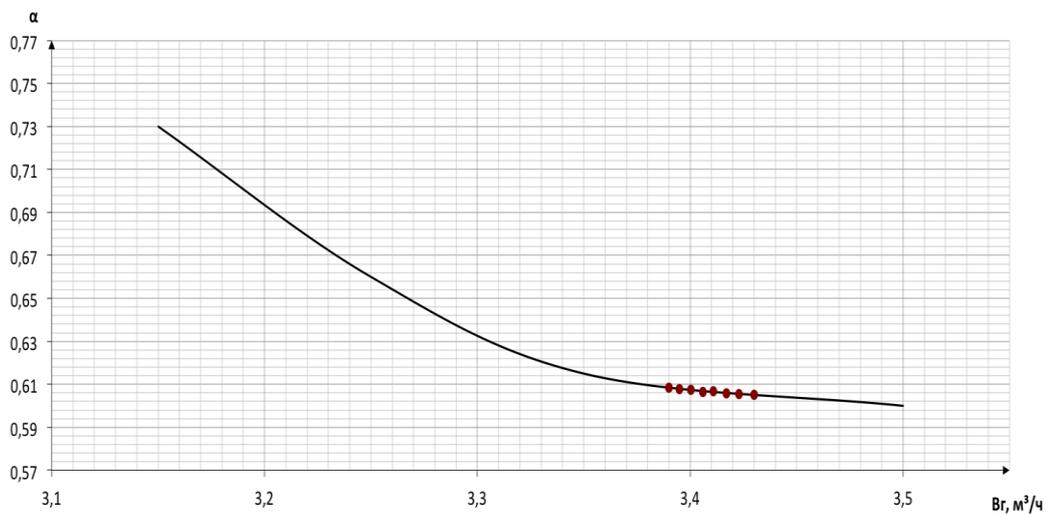


Рисунок 5.5 – Зависимость коэффициента первичного избытка воздуха от расхода газа:

— изменение коэффициента первичного воздуха, построенная по литературным данным;

● – экспериментальные точки

Зависимость образования оксидов азота от величины расхода газа имеет ярко выраженный не линейный характер и при уменьшении тепловой нагрузки от 100 до 30 %, концентрация NO_x снижается на 0,1 % (рисунок 5.6).

На рисунках 5.6–5.7 приведены характеристики работы горелки, полученные по экспериментальным данным на 8 режимах работы котла, из которых видно, что исследуемые значения концентраций оксидов углерода и бенз/а/пирена не превышают нормируемых [66, 67, 80].

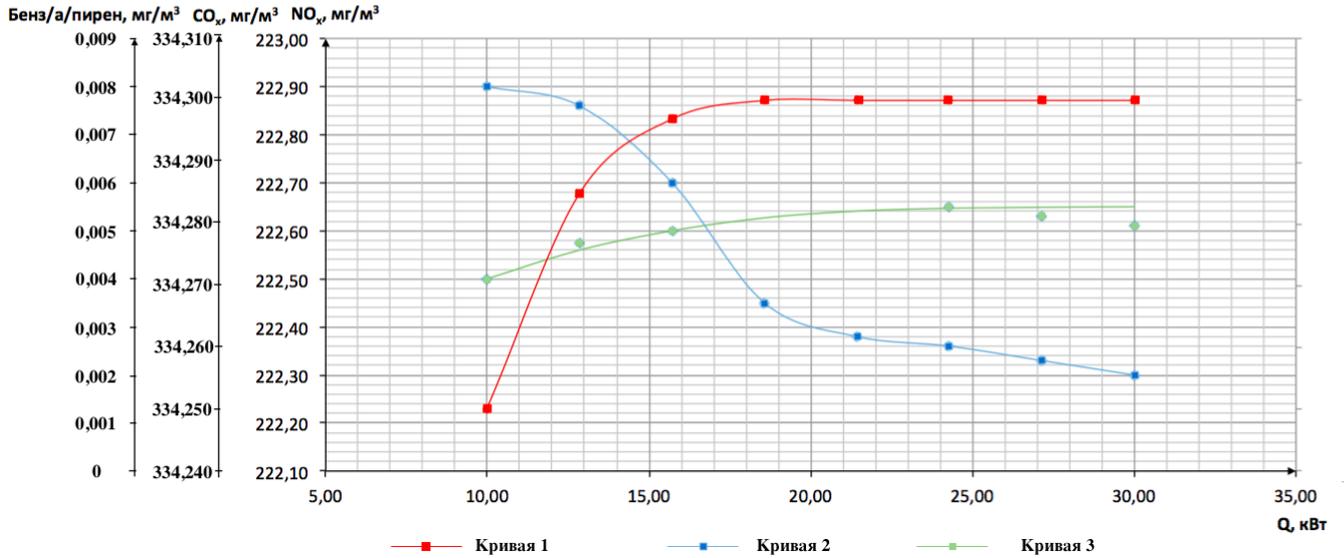


Рисунок 5.6 – Содержание вредных веществ CO_x , NO_x и бенз/а/пирена в уходящих газах в зависимости от тепловой мощности:

Кривая 1 – изменение концентрации CO_x ; Кривая 2 – изменение концентрации бенз/а/пирена;
Кривая 3 – изменение концентрации NO_x ,

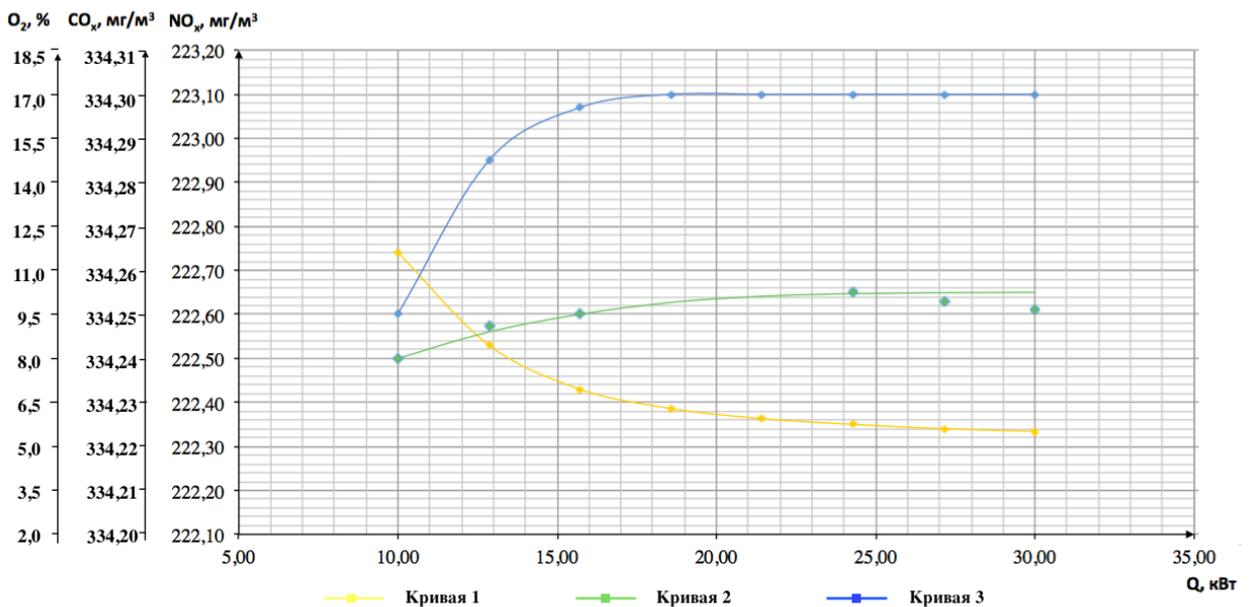


Рисунок 5.7 – Содержание вредных веществ CO_x , NO_x и O_2 в уходящих газах в зависимости от тепловой мощности:

Кривая 1 – изменение концентрации O_2 ; Кривая 2 – изменение концентрации NO_x ; Кривая 3 – изменение концентрации CO_x

Концентрации CO_x , начиная с тепловой мощности 18 кВт практически не изменяется, а на низких значениях тепловой мощности до 18 кВт увеличивается на 0,02 %.

Полученные значения бенз/а/пирена значительно ниже норм ПДК. Концентрация бенз/а/пирена в уходящих газах снижаются на 75 % при увеличении тепловой мощности котлоагрегата.

Концентрация O_2 при увеличении тепловой мощности также снижается на 6,8 %, что подтверждает качественное сжигание газа. Характер изменения кривой совпадает с изменением количества воздуха необходимого для процесса горения.

Характер изменения значений температуры уходящих газов и потерь теплоты с уходящими газами в зависимости от тепловой мощности котла совпадают, что показано на рисунке 5.8, и сохраняют тенденцию к увеличению при повышении тепловой нагрузки. Такой характер изменения величин подтверждается теорией горения газа.

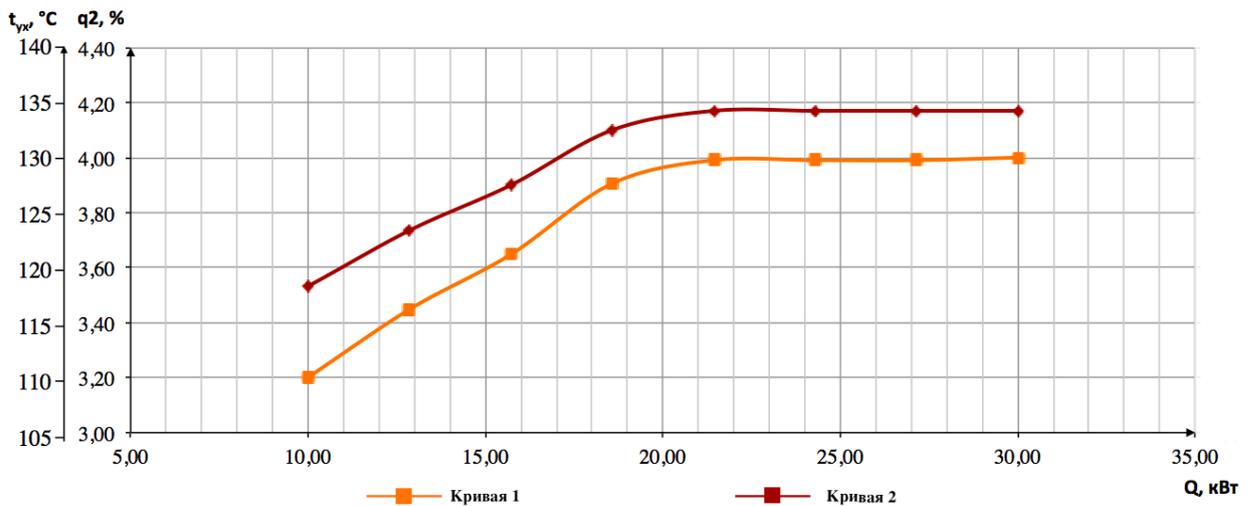


Рисунок 5.8 – Зависимость температуры уходящих газов и потерь теплоты с уходящими газами от тепловой мощности котла:

Кривая 1 — изменение температуры уходящих газов; Кривая 2 — изменения потерь теплоты с уходящими газами

Концентрация кислорода в продуктах сгорания в разработанной инжекционной горелки по сравнению с горелкой, такого же типа, импортного образца снижена на 30 – 50% (приложение Д).

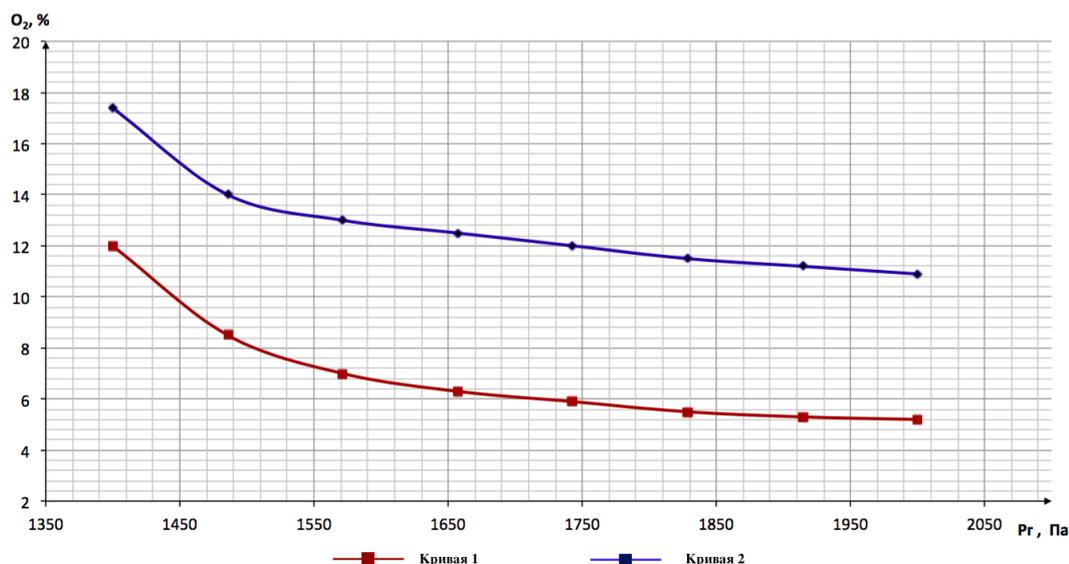


Рисунок 5.9 – Изменение концентрации кислорода за котлом при работе инжекционных горелок в зависимости от давления газа:

Кривая 1 – импортный образец; Кривая 2 – разработанная конструкция ГГУ

При этом сохраняется характер снижения концентрации при увеличении давления газовой смеси. На рисунке 5.9 кривая 1 характеризует изменение концентрации кислорода за котлом для инжекционной горелки импортного образца (см. режимную карту работы котла, приложение Д). Кривая 2 характеризует изменение концентрации кислорода за котлом при работе разработанного ГГУ (см. таблицу 5.1).

Сравнивая характеристики режимов работы котлоагрегата с разработанным ГГУ, приведенных в режимной карте (таблица 5.1), можно сделать вывод, что максимальное значение КПД соответствует минимальным значениям потерь теплоты с уходящими газами q_2 и потерь теплоты от нагретых поверхностей в окружающую среду q_5 (рисунок 5.10).

По результатам натурных испытаний эффективности сжигания газа в котле типа «NEVALUX–8230» с разработанным ГГУ можно сделать следующие выводы:

- концентрации вредных веществ в уходящих газах зависят от тепловой мощности котла и в рабочем диапазоне тепловых нагрузок не превышают ПДК по отдельным ингредиентам;

– при работе котлоагрегата при минимальном тепловом режиме (10 кВт) концентрации вредных веществ в уходящих газах выше, но также не превышают ПДК по отдельным ингредиентам;

– концентрации NO_x в уходящих газах, полученные при математическом моделировании процесса горения в котле NEVALUX–8230» с разработанным ГГУ, также не превышают ПДК.

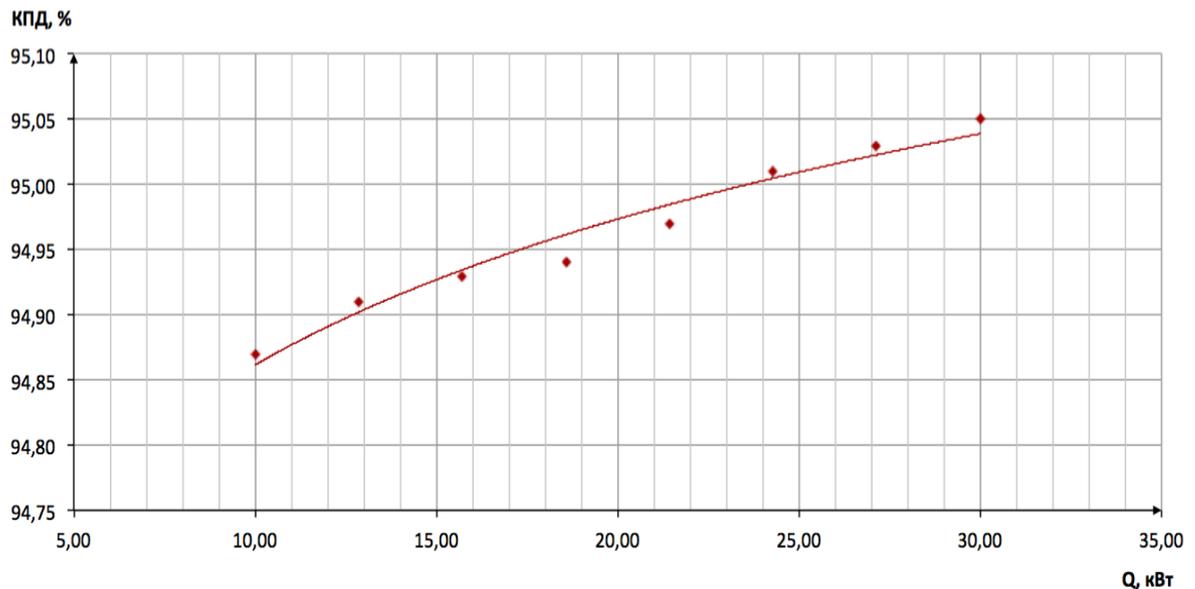


Рисунок 5.10 – Зависимость КПД от тепловой мощности котла

Сравнение натуральных значений NO_x в уходящих газах и полученных при моделировании процесса горения в топке котла приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Сравнение расчетных и экспериментальных значений концентрации NO_x в уходящих газах (ПДК $NO_x=250$ мг/м³)

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

Из таблицы следует, что отличие натуральных данных от расчетных зависит от тепловой мощности котлоагрегата и соответствует диапазону 0,3%–8,6%. Таким образом, максимальное отличие значений концентраций NO_x в уходящих газах не превышает 10%. Это позволяет сделать вывод, что концентрации вредных веществ в топке котла при сжигании газа также соответствуют нормативным требованиям (см. таблицу 3.1).

5.5 Результаты исследований потери теплоты в окружающую среду

В результате исследований скорректированы значения величины теплотерь в окружающую среду от нагретых поверхностей котлоагрегата (рисунок 5.11).

Температура поверхности каждого котла t_n каскадной установки определялась с помощью тепловизора «Testo 820», пирометра и контактного термометра ТК 5–01М. Результаты измерения температуры приведены в приложении Г.

На рисунке 5.11 приведена зависимость потерь теплоты от нагретой поверхности котла в окружающую среду от тепловой мощности котла.

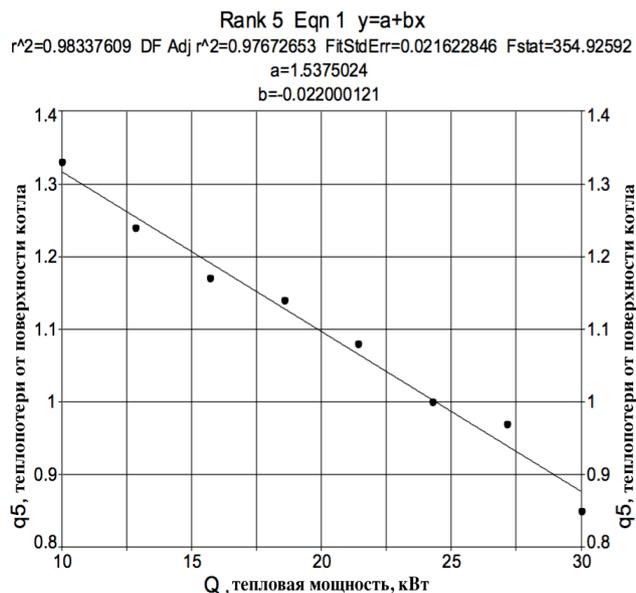


Рисунок 5.11 – Зависимость потерь теплоты от нагретой поверхности котла в окружающую среду от тепловой мощности котла

Эмпирическая зависимость, потери теплоты водогрейным котлом малой мощности в окружающую среду имеет вид:

$$q_5 = 1,54 - 0,022 \cdot Q, \quad (5.14)$$

где q_5 , Q – соответственно потери теплоты водогрейным котлом малой мощности в окружающую среду и тепловая мощность котлоагрегата.

На рисунке 5.12 дано сравнение полученных значений теплотерь с поверхности котлоагрегата при натурных исследованиях с известными в литературе зависимостями [8, 11, 75].

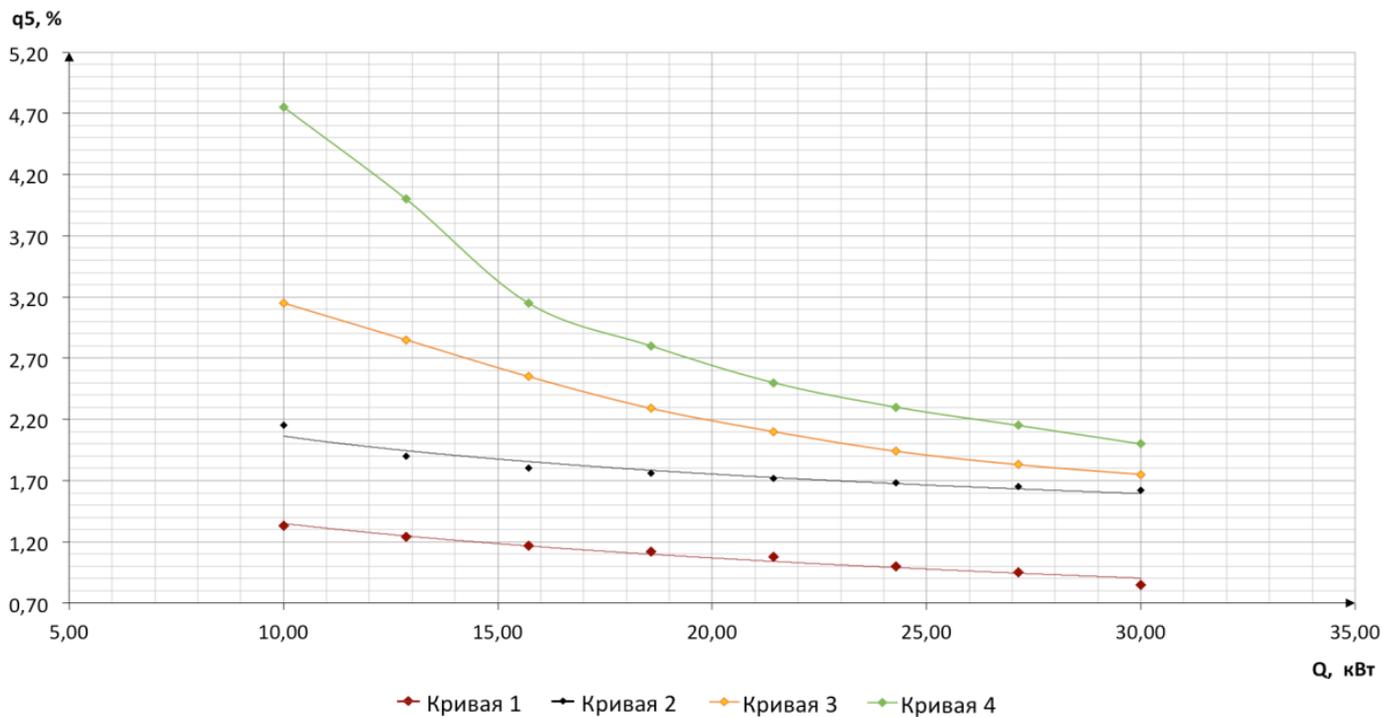


Рисунок 5.12 – Зависимость потерь теплоты в окружающую среду от тепловой мощности для водогрейных котлов:

Кривая 1 – изменения величины потерь теплоты котла в окружающую среду, построенная по результатам экспериментальных исследований, в зависимости от тепловой мощности;

Кривая 2 – изменения величины потерь теплоты котла в окружающую среду, построенная по результатам расчета, выполненного по известным методикам, в зависимости от тепловой мощности;

Кривая 3 – изменения величины потери теплоты по диссертационным значениям [8, 11];

Кривая 4 – изменения величины потери теплоты у котлов малой мощности по литературным значениям [75]

По результатам сравнения величины потерь теплоты q_5 котлов разного типа (рисунок 5.12) можно сделать следующие выводы:

- теплотери q_5 с нагретой поверхности котла «NEVALUX–8230» с горелкой разработанной конструкции в 1,6 раза ниже, чем для котла «NEVALUX–8230» с импортной горелкой, вследствие повышения качества эффективности сжигания газа;

- теплотери q_5 с нагретой поверхности котла «Энергия 3», площадь которой в 77 раза больше, чем у «NEVALUX–8230» с горелкой нового образца в 2,4 раза выше (поверхность нагрева «NEVALUX–8230» – 1,03 м², с поверхностью нагрева «Энергия 3» – 69,1 м²);

- величина потерь теплоты q_5 , по результатам, известным в литературе [75], снижается в 2–3 раза с увеличением тепловой мощности котлов, что соответствует результатам натуральных экспериментов.

5.6 Экономическое обоснование стоимости нового газогорелочного устройства

Анализируя рыночную стоимость (на период – весна 2016 г.) инжекционных газовых горелок была получена процентная составляющая каждого показателя, входящего в стоимость ГГУ:

- материал, из которого изготавливается ГГУ – 15 процентов;
- стоимость изготовления изделия – 25 процентов;
- заработанная плата рабочих, задействованных в изготовлении изделия 45 процентов;
- налог – 15 процентов.

Был выполнен сравнительный анализ рыночной стоимости, который показал преимущества разработанной инжекционной горелки, благодаря минимальной себестоимости за счет снижения металлоемкости оборудования, пуско–наладочных работ, простоты изготовления и монтажа:

- Импортная горелка Polidoro (Италия) 8300 рублей (по сведению завода изготовителя);
- Инжекционная горелка водонагревателя 6500 рублей;
- Инжекционная горелка разработанной конструкции 3000 рублей.

По результатам сравнительного анализа, представленного на рисунке 5.13 экономия затрат на производство инжекционной горелки разработанной конструкции, составляет 50% по отношению к зарубежным и отечественным аналогам.

В расчет себестоимости не учитывалась стоимость установки горелки и пуско–наладочных работ, так как горелки устанавливаются заводом–изготовителем котельного оборудования в комплексе с котлом во всех трех вариантах.

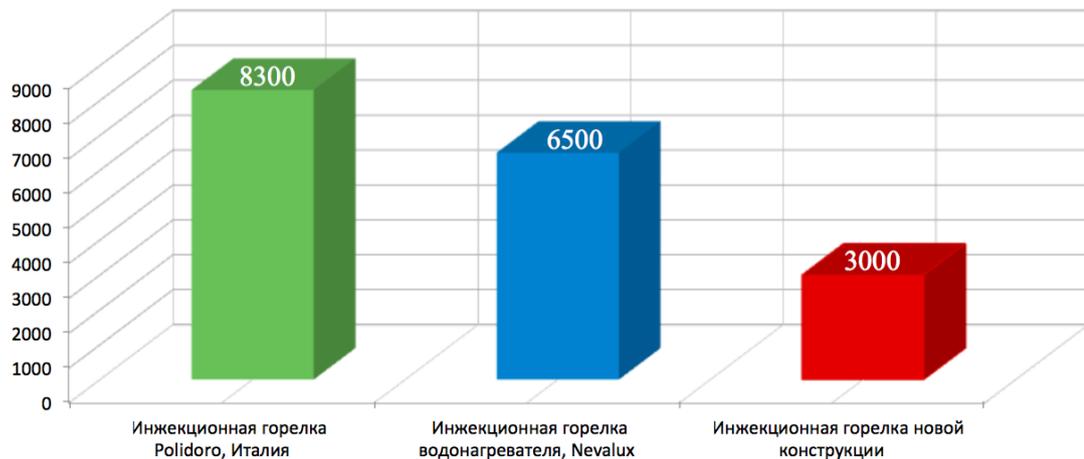


Рисунок 5.13 – Сравнительная диаграмма стоимости исследуемых газогорелочных устройств инжекционного типа

5.7 Выводы по главе 5

По результатам экспериментальных исследований были получены следующие энерго–экологические показатели работы ГГУ новой конструкции:

1. Устойчивая работа котла осуществляется в диапазоне нагрузок от 10 до 30 кВт.
2. Потери теплоты от химической неполноты сгорания отсутствуют.

3. Потери теплоты с уходящими газами с ростом теплопроизводительности котла изменялись от 3,34 до 5,5%, при этом температура уходящих газов изменялась от 110 до 130°C.

4. КПД котла в пределах исследуемых нагрузок составило 93,5–95%.

5. Максимальное значение КПД котла соответствует минимальным значениям потерь тепла q_5 и максимальной величине тепловой нагрузки.

6. Уточнено значение величины теплотерь в окружающую среду от нагретых поверхностей котла по сравнению с литературными данными и результатами расчетов выполненных по известным методикам:

– теплотери q_5 с нагретой поверхности котла «NEVALUX–8230» с горелкой разработанной конструкции в 1,6 раза ниже, чем для котла «NEVALUX–8230» с импортной горелкой, вследствие повышения качества эффективности сжигания газа;

– теплотери q_5 с нагретой поверхности котла «Энергия 3», площадь которой в 77 раза больше, чем у «NEVALUX–8230» с горелкой нового образца в 2,4 раза выше (поверхность нагрева «NEVALUX–8230» – 1,03 м², с поверхностью нагрева «Энергия 3» – 69,1 м²);

– величина потерь теплоты q_5 , по результатам, известным в литературе [75], снижается в 2–3 раза с увеличением тепловой мощности котлов, что соответствует результатам натурных экспериментов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

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 газовой смеси, поступающей в коллектор;

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

– конструктивное исполнение огневого насадка и взаимное расположение огневых отверстий, что 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 натурных 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 натурных исследований работы котла типа «NEVALUX» доказана достоверность использования математического моделирования для изучения процессов сжигания газа.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахмедов, Р. Б. Технология сжигания горючих газов и жидких топлив / Р. Б. Ахмедов, Л. М. Цирюльников. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Недра, 1984. – 238 с.
2. Бадагуев, Б. Т. Безопасная эксплуатация паровых и водогрейных котлов / Б. Т. Бадагуев. – М. : Альфа-Пресс, 2012. – 296 с.
3. Бадагуев, Б. Т. Газовое хозяйство. Безопасность при эксплуатации. Приказы, инструкции, журналы, положения, графики, протоколы, паспорта / Б. Т. Бадагуев. – 2-е изд., перераб и доп. – М. : Альфа-Пресс, 2013. – 232 с.
4. Бадагуев, Б. Т. Работы с повышенной опасностью. Эксплуатация и ремонт тепловых энергоустановок / Б. Т. Бадагуев. – М. : Альфа-Пресс, 2012. – 224 с.
5. Беликов, С. Е. Малые котлы и защита атмосферы. Снижение вредных выбросов при эксплуатации промышленных и отопительных котельных / С. Е. Беликов, В. П. Котлер. – М. : Энергоатомиздат, 1996. – 125 с.
6. Берсенев, И. С. Слесарь-газовик : справочное руководство / И. С. Берсенев, П. Н. Бекетов, Д. Я. Вигдорчик. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 1977. – 392 с.
7. Берхман, Е. И. Экономика систем газоснабжения / Е. И. Берхман. – Л. : Издательство «НЕДРА», 1975. – 375 с.
8. Бирюзова, Е. А. Совершенствование сжигания природного газа на отопительных чугунных секционных котлах с горизонтально–щелевыми (подовыми) горелками : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.03 / Бирюзова Елена Александровна. – СПб., 2003. – 231 с.
9. Борщов, Д. Я. Устройство и эксплуатация отопительных котельных малой мощности / Д. Я. Борщов. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Стройиздат, 1989. – 198 с.
10. Борщов, Д. Я. Эксплуатация отопительной котельной на газообразном топливе / Д. Я. Борщов. – М. : Стройиздат, 1988. – 239 с.

11. Бриллиантова, М. М. Исследование горелок малой тепловой мощности с целью снижения вредностей в продуктах сгорания : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.03 / Бриллиантова Марина Михайловна. – Л., 1978. – 129 с.
12. Видин, Ю. В. Инженерные методы расчета задач теплообмена : монография / Ю. В. Видин, В. В. Иванов, Р. В. Казаков. –, Красноярск : СФУ, 2014. – 167 с.
13. Воликов, А. Н. Направления развития котлов малой мощности для централизованного теплоснабжения /А. Н. Воликов // Труды молодых учёных. Часть 2. – СПб. : СПбГАСУ. – 1998. – С. 100–105.
14. Воликов, А. Н. Совершенствование энергосберегающих и природоохранных технологий и конструкций отопительно-коммунальных котельных малой мощности : дис. ... д-ра. техн. наук : 05.23.03 / Воликов Анатолий Николаевич. – СПб., 2001. – 393 с.
15. Воликов, А. Н. Тепловой расчет паровых и водогрейных котлов / А. Н. Воликов. – СПб. : СПбГАСУ, 2006. – 130 с.
16. Воликов, А. Н. Энергоэкологическая эффективность природоохранных технологий и аппаратов при сжигании топлива (Часть 1) / А. Н. Воликов, В. И. Шаврин, С. Г. Прохоров. – СПб. : СПбГАСУ, 2012. – 168 с.
17. ГОСТ Р 50838 Трубы из полиэтилена для газопровода. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2010. – 53 с.
18. Гребенюк, В. Ф. Теплообеспечение помещений (повышение качества жизнеобеспечения) / В. Ф. Гребенюк; под ред. В. А. Бондаренко. – 3-е изд. – М. : Вуз. Книга, 2016. – 116 с.
19. Гуревич, Д. Ф. Трубопроводная арматура : справочное пособие / Д. Ф. Гуревич. – М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2016. – 368 с.
20. ГЭСН 81–02–24–2001 Теплоснабжение и газопровода – наружные сети. – М. : Госстрой России, 2009. – 49 с.
21. Добрянский, В. Л. Патент на изобретение «Многопоточная инжекционная горелка» №2163325, Российская Федерация; МПК F23 D 14/04 [Электронный ресурс] / В. Л. Добрянский, Я. В. Зарецкий, Л. В. Коротков, А. И.

Кривошеев, Ф. Ш. Серазетдинов, Р. Ш. Серазетдинов, В. А. Тимонин; заявитель и патентообладатель государственное унитарное предприятие «АВИАГАЗ–СОЮЗ» (дочернее предприятие КОКБ «СОЮЗ») – № 991415694/06; заявка 19.07.1999; публикация 27.04.2000, Бюллетень №34. – Режим доступа: <http://bd.patent.su/2163000–2163999/pat/servl/servleta5b8.html>

22. Жаров, В. И. Безопасная эксплуатация газовых сетей, инженерных коммуникаций, жилых и общественных зданий / В. И. Жаров, Г. М. Тележко // ежеквартальный журнал ГАЗинформ №2/42. – 2013. С. 56–57.

23. Законы Российской Федерации. Федеральный закон об охране окружающей среды. – М. : Омега-Л, 2013. – 42 с.

24. Законы Российской Федерации. Федеральный закон о техническом регулировании. – М. : Омега-Л, 2014. – 52 с.

25. Зах, Р. Г. Котельные установки / Р. Г. Зах. – М. : Издательство «Энергия», 1986. – 352 с.

26. Иванов, Ю. В. Газогорелочные устройства / Ю. В. Иванов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Недра, 1972. – 276 с.

27. Иванов, Ю. В. Основы расчета и проектирования газовых горелок / Ю. В. Иванов. – М. : Гос. науч.-техн. издательство нефтяной и горно-топливной лит-ры., 1963. – 360 с.

28. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – М. : Машиностроение, 1992.– 534 с.

29. Изюмов, М. А. Проектирование и расчет горелок / М. А. Изюмов, П. В. Росляков. – М. : Моск. энергет. ин-т, 1990. – 113 с.

30. Исследование и разработка энергоэффективных систем производства, транспортировки, распределения и потребления тепловой энергии : отчет о НИР / Васильев В.Ф., Бирюзова Е.А., Нефедова М.А. и др. – СПб. : СПбГАСУ, 2014. – 110 с.

31. Исследование систем и установок, вырабатывающих и использующих тепловую энергию с целью повышения их энергоэффективности : отчет о НИР /

Васильев В.Ф., Бирюзова Е.А., Нефедова М.А. и др. – СПб. : СПбГАСУ, 2015. – 180 с.

32. Исследование установок и систем теплогазоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха с целью повышения их энергоэффективности : отчет о НИР / Васильев В.Ф., Бирюзова Е.А., Нефедова М.А. и др. – СПб. : СПбГАСУ, 2015. – 100 с.

33. Каплун, А. Б. ANSYS в руках инженера : практическое руководство / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Шамраева; [предисл. А. С. Шадского]. – 5-е изд. – М. : ЛЕНАНД, 2017. – 272 с.

34. Карякин, Е. А. Промышленное газовое оборудование : справочник / Е. А. Карякин. – Саратов : Газовик, 2006. – 400 с.

35. Киселев, В. Н. Патент на изобретение «Многофакельная инжекционная горелка» №2157485, Российская Федерация; МПК F23 D 14/04 [Электронный ресурс] / В. Н. Киселев, Э. Т. Коришев – № 99104062/06; заявка 26.02.1999; публикация 10.10.2000, Бюллетень №02. – Режим доступа: [http://www1/filps.ru](http://www1.filps.ru)

36. Кривоногов, Б. М. Повышение эффективности сжигания газа и охрана окружающей среды / Б. М. Кривоногов. – Л. : Недра, 1986. – 280 с.

37. Кузнецов, Е. П. Управление энергосбережением. Ч. 1. Совершенствование организации управления энергосбережением / Е. П. Кузнецов. – СПб. : ПЭИПК, 2007. – 78 с.

38. Кузнецов, Е. П. Управление энергосбережением. Ч. 2. Классификационный стандарт энергосбережения / Е. П. Кузнецов. – СПб. : ПЭИПК, 2007. – 32 с.

39. Кузнецов, Е. П. Управление энергосбережением. Ч. 3. Анализ и оценка резервов энергосбережения / Е. П. Кузнецов. – СПб. : ПЭИПК, 2009. – 139 с.

40. Кутепов, А. М. Химическая гидродинамика / А. М. Кутепов, А. Д. Полянин, З. Д. Запрянов, А. В. Вязьмин, Д. А. Казенин. – М. : Квантум, 1996. – 336 с.

41. Кязимов, К. Г. Газовое оборудование промышленных предприятий. Устройство и эксплуатации : справочник / К. Г. Кязимов. – М. : Энас, 2014. – 240 с.
42. Кязимов, К. Г. Справочник газовика: справочное пособие / К. Г. Кязимов. – 3-е изд., стер. – М.: Высшая школа. Издательский центр «Академия», 2000. – 272 с.
43. Кязимов, К. Г. Устройство и эксплуатация газового хозяйства / К. Г. Кязимов, В. Е. Гусев. – М. : Академия, 2013. – 432 с.
44. Ландау, Л. Д. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – Издание 4-е, стереотипное. – М. : Наука, 1988. – 736 с.
45. Максименко, Ю. Л. Природоохранные нормы и правила проектирования : справочник / Ю. Л. Максименко, В. А. Глухарев. – М. : Стройиздат, 1990. – 527 с.
46. Маркин, В. В. Что такое модернизация в энергетике /В. В. Маркин // Ежеквартальный журнал ГАЗинформ №1/32. – 2011. С. 20–21.
47. МДС 81–35.2004 Методические указания по определению стоимости строительной продукции на территории Российской Федерации. – М. : Стройинформиздат, 2004. – 72 с.
48. Миклан, А. Модульный принцип построения котельной – путь к энергоэффективности, на базе оборудования венгерской компании «вара фег» / А. Миклан // Ежеквартальный журнал ГАЗинформ №2/33. – 2011. С. 40–41.
49. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева – 3-е изд., репринтное – М. : ООО «ИД «БАСТЕТ»», 2010. – 344 с.
50. Недлин, М. С. Вопросы совершенствования нормативной базы газораспределения и газопотребления / М. С. Недлин // Ежеквартальный журнал ГАЗинформ №1/36. – 2012. С. 57–61.
51. Нефёдова, М. А. Анализ технических характеристик современных газогорелочных устройств [Электронный ресурс] / М. А. Нефёдова // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело» №5. – 2015. С. 411–423. – Режим доступа: <http://ogbus.ru/years/52015/>

52. Нефёдова, М. А. Анализ требований, предъявляемых к подбору котлоагрегата для каскадных котельных / М. А. Нефёдова // Естественные и технические науки №11. М. : ООО «Издательство «Спутник +»», 2015. С. 568–572.

53. 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>.

54. 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.

55. Нефёдова, М. А. Оптимизация работы котельного оборудования за счет применения новой схемы компоновки / М. А. Нефёдова // В мире научных открытий № 8 (68). – 2015. – С. 134–145.

56. Нефёдова, М. А. Патент на изобретение «Инжекционная горелка низкого давления» №2618137, Российская Федерация; МПК F23D 14/10 (2006.01) [Электронный ресурс] / М.А. Нефедова, Е.А. Бирюзова, Мостафа Фазлави; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт–Петербургский государственный архитектурно–строительный университет» (ФГБОУ ВО «СПбГАСУ»). – № 2016115412; заявка 20.04.2016; публикация 02.05.2017, Бюллетень №13. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/PA_FipsPub/res/BULLETIN/IZPM/2017/05/10/INDEX_RU.HTM].

57. 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.

58. Нефёдова, М.А. Программа инструментальных измерений при пуско-наладочных работах на оборудовании газового хозяйства котельной / М. А. Нефёдова // 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.

59. Нефёдова, М.А. Проектирование, строительство и эксплуатация газопроводов жилых домов из многослойных металлополимерных труб / М.А. Нефёдова, Г.П. Комина // Сборник материалов 62-й Международной научно-технической конференции молодых ученых: Актуальные проблемы современного строительства. Ч. 3. – СПб. : СПбГАСУ. – 2009. – С. 154–158. Режим доступа: www.spbgasu.ru.

60. 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.

61. 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.

62. Нефёдова, М. А. Усовершенствованная горелка для теплогенератора, работающая в аэродинамическом режиме / М. А. Нефёдова, Т. А. Дацюк // Промышленные и отопительные котельные и мини-ТЭЦ 3(34)'. – 2017. – С. 30–32.

63. Нефёдова, М.А. Энерго-экономическое преимущество перевода котлов на газообразное топливо / М.А. Нефёдова // 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

64. Нефёдова, М.А. Энерго-экологическое преимущество использования газообразного топлива в промышленной теплоэнергетике / М.А. Нефёдова // 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.

65. ОНД 1–84. Инструкция о порядке рассмотрения, согласования и экспертизы воздухоохраных мероприятий и выдачи разрешения на выброс загрязняющих веществ в атмосферу по проектным решениям. – М. : ВПТИТРАНССТРОЙ, 1984. – 24 с.

66. ОНД–86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. – Л. : Гидрометеиздат, 1987. – 68 с.

67. ОНД–90. Руководство по контролю источников загрязнения атмосферы. Часть 1. Часть 2. – СПб., 1992. – 200 с.

68. Палей, Е. Л. Котельные. Нормативные требования и практические рекомендации при проектировании : справочно–практическое пособие / Е. Л. Палей. – Санкт–Петербург : Газовый клуб, 2010. – 119 с.

69. Палей, Е. Л. Проектирование котельных в секторе ЖКХ : справочное практическое пособие / Е. Л. Палей. – Санкт–Петербург : Газовый клуб, 2006. – 175 с.

70. ПБ 12–529–03 Правила безопасности систем газораспределения и газопотребления. – М. : Российская газета, 2003. – 72 с.

71. Правила технической эксплуатации тепловых энергоустановок. – М. : Министерство Энергетики РФ, 2003. – 112 с.

72. Правила устройства электроустановок (издание 7). – М. : ДЕАН, 2016. – 255 с.

73. Равич, М. Б. Газ и эффективность его использования в народном хозяйстве / М. Б. Равич. – М. : Недра, 1987. – 237 с.

74. Рогозин, А. С. Бытовая аппаратура на газовом, жидком и твердом топливе / А. С. Рогозин. – Л. : Недра, 1982. – 303 с.

75. Роддатис, К. Ф. Справочник по котельным установкам малой производительности / К. Ф. Роддатис, А. Н. Полтарецкий; под ред. К. Ф. Роддатиса. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 488 с.

76. Розенфельд, Э. И. Газовые горелки / Э. И. Розенфельд. – М. : Всесоюз. ин-т науч. и техн. информ., 1973. – 123 с.

77. Розенфельд, Э. И. Горелочные устройства для сжигания газа и других видов топлива с минимальным содержанием окислов азота в уходящих газах тепловых агрегатов / Э. И. Розенфельд. – М. : Всесоюз. науч.-исслед. ин-т экономики, орг. пр-ва и техн.-экон. информ. в газовой пром-ти, 1976. – 53 с.

78. Российская Федерация. Федеральный закон от 21 июля 1997 №116–ФЗ о промышленной безопасности опасных производственных объектов – М. : Российская газета, 1997. – 21 с.

79. Сажин, Б. С. Средства измерения массы и дисперсного состава частиц, взвешенных в газовом потоке / Б. С. Сажин, С. С. Янковский. – М. : ЦИНТИхимнефтемаш, 1990. – 43 с.

80. СанПиН 2.1.6.1032–01 Гигиенические требования к обеспечению качества атмосферного воздуха населенных мест. – СПб. : ЦОТПБСППО, 2008. – 20 с.

81. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200–03 Санитарно–защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов. – М. : ДЕАН, 2004. – 48 с.

82. Себастьяни, Э. Патент на изобретение «Способ управления воздухом в установке сжигания газа и устройство для сжигания газа» №2129236, Российская Федерация; МПК F23 D 14/04 [Электронный ресурс] / Энрико Себастьяни – № 94007344/06; заявка 10.03.1994; публикация 20.04.1999. – Режим доступа: <http://www1/fips/ru>

83. Северинец, Г. Н. Патент на изобретение «Инжекционная газовая горелка» №2038536, Российская Федерация; МПК F23 D 14/04 [Электронный ресурс] / Г. Н. Северинец, Г. П. Комина, И. В. Нефёдова; заявитель и патентообладатель Санкт–Петербургский инженерно–строительный институт – № 5021486/06; заявка 13.01.1992; публикация 27.06.1995. – Режим доступа: <http://www1/fips/ru>

84. Семенов, Ю. С. Горение / Ю. С. Семенов. – М. : Советский писатель, 1977. – 640 с.
85. Сергеев, А. В. Справочное пособие для персонала котельных : Тепломеханическое оборудование котельных / А. В. Сергеев. – СПб. : Издательство ДЕАН, 2012. – 256 с.
86. Сигал, И. Я. Газогорелочные устройства котельных установок / И. Я. Сигал. – Киев : Гостехиздат УССР, 1961. – 162 с.
87. Сигал, И. Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива / И. Я. Сигал. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Недра, 1988. – 310 с.
88. Сигал, И. Я. Образование окислов азота в процессах горения и пути снижения выброса их в атмосферу / И. Я. Сигал. – Киев : Наук. думка, 1979. – 171 с.
89. Сидельковский, Л. Н. Котельные установки промышленных предприятий / Л. Н. Сидельковский, В. Н. Юренев. – М. : Бастет, 2009. – 528 с.
90. Скафтымов, Н. А. Основы газоснабжения : репринтное воспроизведение издания 1975 г. / Н. А. Скафтымов. – М. : Эколит, 2012. – 344 с.
91. СН 2.2.4/2.1.8.562–96 Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы. – М. : Минздрав России, 1996. – 8 с.
92. СНиП П–35–76* Котельные установки (с Изменением). – М. : Стройиздат, 1977. – 51 с.
93. СНиП 11–01–95 Инструкция о составе, порядке разработки, согласовании и утверждении проектно–сметной документации при строительстве зданий и сооружений. – М. : Минстрой России, 1995. – 21 с.
94. СНиП 12–03–2001 Безопасность труда в строительстве. Часть 1. Общие требования. – М. : Госстрой России, 2001. – 48 с.
95. СНиП 12–04–2002 Безопасность труда в строительстве. Часть 2. Строительное производство. – М. : Госстрой России, 2003. – 102 с.
96. СНиП 23–02–2003 Тепловая защита зданий. – М. : Госстрой, 2004. –

17 с.

97. СНиП 23–03–2003 Защита от шума. – М. : Госстрой России, 2004. –

34 с.

98. СНиП 31–03–2001 Производственные здания. – М. : ДЕАН, 2002. – 32

с.

99. СНиП 41–02–2003 Тепловые сети. – М. : Госстрой, 2003. – 36 с.

100. СП 42–101–2003 Общие положения по проектированию и строительству газораспределительных систем из металлических полиэтиленовых труб. – М. : Госстрой, 2004. – 114 с.

101. СП 42–101–2004 Проектирование и строительство газопроводов из металлических и полиэтиленовых труб. – М. : Госстрой, 2004. – 336 с.

102. СП 42–104–2000 Проектирование автономных источников теплоснабжения. – М. : Госстрой, 2000. – 23 с.

103. СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция. – М. : Минрегион России, 2012. – 100 с.

104. СП 51.13330.2011 Защита от шума. Актуализированная редакция. – М. : Минрегион России, 2010. – 41 с.

105. СП 56.13330.2011 Производственные здания. Актуализированная редакция. – М. : Минрегион России, 2011. – 18 с.

106. СП 62.13330.2011 Газораспределительные системы. – М. : ДЕАН 2011. – 128 с.

107. СП 89.1330.2012 Котельные установки. Актуализированная редакция. – М. : Минрегион России, 2012. – 93 с.

108. СП 124.13330.2012 «Тепловые сети». – М.: Госстрой, 2012. – 73 с.

109. СП 131.13330.2012 «Строительная климатология и геофизика». – М. : Госстрой, 2012. – 109 с.

110. Справочник эксплуатационника газовых котельных / В. Е. Берхман, С. А. Лобков, О. С. Махорев и др.; под ред. Е. Б. Столпнера. – Л. : Издательство «НЕДРА», 1976. – 528 с.

111. Стаскевич, Н. Л. Справочник по газоснабжению и использованию газа / Н.Л. Стаскевич, Г. Н. Северинец, Д. Я. Вигдорчик. – Л. : Недра, 1990. – 762 с.
112. Табунщиков, Ю. А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий / Ю. А. Табунщиков, М. М. Бродач. – М. : АВОК-ПРЕСС, 2002. – 194 с.
113. Тележко, Г. М. Обеспечение экономии топлива в теплоснабжении / Г. М. Тележко, Г. В. Ягов // ежеквартальный журнал ГАЗинформ №2/33. – 2011. С. 35–37.
114. Темам, Р. Уравнение Новье–Стокса. Теория и численный анализ. – 2-е изд. – М. : Мир, 1981. – 408 с.
115. Тепловой расчет котельных агрегатов / Н. В. Кузнецов, В. В. Митор, И. Е. Дубовский, Э. С. Карасина, М. М. Рубин, А. Г. Блох, Ю. Л. Маршак, Р. А. Петросян, В. А. Локшин, С. И. Мочан, П. Н. Кендысь; [под ред. Н. В. Кузнецов и др.]. – М. : Издательство «Энергия», 1973. – 296 с.
116. ТУ 4931–011–26985921–2012 NEVALUX. Котле газовый настенный двухконтурный с принудительной циркуляцией теплоносителя : руководство по эксплуатации. – СПб. : ОАО «Газаппарат», 2012. – 78 с.
117. Федеральный закон Российской Федерации. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности от 22 июля 2008 г. ФЗ №123. – М. : Проспект, 2016. – 112 с.
118. Федеральный закон Российской Федерации. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений от 30 декабря 2009 ФЗ №384. – М. : ДЕАН, 2013. – 48 с.
119. Фёдорова, Н. Н. Основы работы в Ansys 17 / Н. Н. Фёдорова, С. А. Вальгер, М. Н. Данилов, Ю. В. Захарова. – М. : ДМК Пресс, 2017. – 212 с.
120. Хаванов, П. А. Водогрейные котлоагрегаты малой мощности. Теплотехнические особенности применения [Электронный ресурс] / П. А. Хаванов // Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы» №11. – 2011. Режим доступа: http://esco.co.ua/journal/2011_11/art176.htm

121. Хаванов, П. А. Источники теплоты автономных систем теплоснабжения / П. А. Хаванов // Журнал АВОК №1. – М. : АВОК. – 2002. – С. 14–21.
122. Хаванов, П. А. Определение потерь теплоты с уходящими газами при составлении теплового баланса конденсационных котлов / П. А. Хаванов, Ю. Г. Маркевич, А. С. Чуленев // Промышленное и гражданское строительство № 12. – 2014. – С. 80–83.
123. Хаванов, П. А. Оценка загрязнения воздушного бассейна выбросами теплогенерирующих установок для различных архитектурно–планировочных решений / П. А. Хаванов // Журнал АВОК №1. – М. : АВОК. – 2011. – С. 78–81.
Режим доступа: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=4813
124. Хаванов, П. А. Принципиальные тепловые схемы автономных источников теплоснабжения с коллекторами малых перепадов давления / П. А. Хаванов // Журнал АВОК № 3. – М. : АВОК. – 2002. – С. 26–34.
125. Хаванов, П. А. Системы теплоснабжения от автономных теплогенераторов / П. А. Хаванов // Журнал АВОК № 2. – М. : АВОК. – 2002. – С. 22–29.
126. Чепель, В. М. Сжигание газов в топках котлов и печей и обслуживание газового хозяйства предприятий / В. М. Чепель, И. А. Шур. – 7-е изд., перераб. и доп. – Л. : Недра, 1980. – 591 с.
127. Чучакин, Л.А. Сельская газовая служба / Л. А. Чучакин. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Недра, 1993. – 255 с.
128. Шевырев, С. В. Энергоэффективность в газораспределении / С. В. Шевырев // ежеквартальный журнал ГАЗинформ №1/32. – 2011. С. 17–19.
129. Шкаровский, А. Л. Основы практической экологии. Очистка, обезвреживание и утилизация выбросов : авторское издание / А. Л. Шкаровский. – СПб. : «Северо–Запад», 1995 – 54 с.
130. Шур, И. А. Газовые горелки среднего и низкого давления для сжигания природного и смешанного газа / И. А. Шур. – Л. : Ленингр. дом науч.-техн. пропаганды, 1959. – 39 с.

131. Щеглова, Н. Каскадные котельные – источник автономного теплоснабжения / Н. Щеглова, Е. Бирюзова, М. Нефёдова // Берг–коллегия. Промышленная безопасность. Энергетика. Экология №9(144). – 2016. – С. 22–23.
132. Энциклопедия газовой промышленности – 4-е изд., пер с франц.; ред. пер. К. С. Басниев – М. : Акционерное общество «ТВАНТ», 1994. – 884 с.
133. Энергоэкологическая эффективность использования топлива, тепловой энергии в промышленной теплоэнергетике и ЖКС : отчет о НИР / Бирюзова Е.А., Воликов А.Н, Нефедова М.А. и др. – СПб. : СПбГАСУ, 2013. – 120 с.
134. Haase, W. ECARP – European Computational Aerodynamics Research Project: Validation of CFD Codes and Assessment of Turbulence Models / W. Haase, E. Chaput, E. Elsholz, M. A. Leschziner, U. R. Muller // Notes on Numerical Fluid Mechanics (NNFM), 1997. – v. 58.
135. Meneveau, C. / Stretching and quenching of flamelets in premixed turbulent combustion / C. Meneveau, T. Poinsot // Combust. Flame № 86. – 1991. – pp. 311–332.
136. Menter, F. R. Zonal two–equation k – ω turbulence models for aerodynamic flows / F. R. Menter // AIAA–Paper. – 1993. – 2906.
137. Shur, M. L. A hybrid RANS–LES approach with delayed–DES and wall–modeled LES capabilities / M. L. Shur, P. R. Spalart, M. K. Strelets, A. K. Travin // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2008. – pp. 1639–1649.
138. Shur, M. L. Turbulence modelling in rotating and curved channels: assessment of the Spalart–Shur correction term / M. L. Shur, M. K. Strelets, A. K. Travin, P. R. Spalart // AIAA Journal № 5. – 2000. – pp. 784–792.
139. Spalart, P. R. Editorial: RANS modeling into a second century / P. R. Spalart / Special issue of International J. of CFD № 4. – 2009. – pp. 291–293.
140. Spalart, P. R. On the sensitization of simple turbulence models to rotation and curvature / P. R. Spalart , M. L. Shur / Aerospace Science and Technology № 5. – 1997. – pp. 297–302.
141. Technical permission. Режим доступа: <http://polidoro.com>

142. Travin, A. K. Physical and numerical upgrades in the detached–eddy simulation of complex turbulent flows, Proceedings of Euromech Coll. Les of complex transitional and turbulent flows // A. K. Travin, M. L. Shur, M. K. Strelets, P. R. Spalart // Fluid Mechanics and Its Applications № 5. – Munich, Germany. – 2002. – pp. 239–254.

143. Wilcox, D. C. Turbulence Modeling for CFD / D. C. Wilcox. – California, Glendale : Griffin Printing, 1993. – 477 p.

144. Zimont, V. L. /An Efficient Computational Model for Premixed Turbulent Combustion at High Reynolds Numbers Based on a Turbulent Flame Speed Closure / V. L. Zimont, W. Polifke, M. Bettelini, W. Weisenstein. // ASME J. Eng. Gas Turbines and Power, 120(3), 1998. – pp. 526–532.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

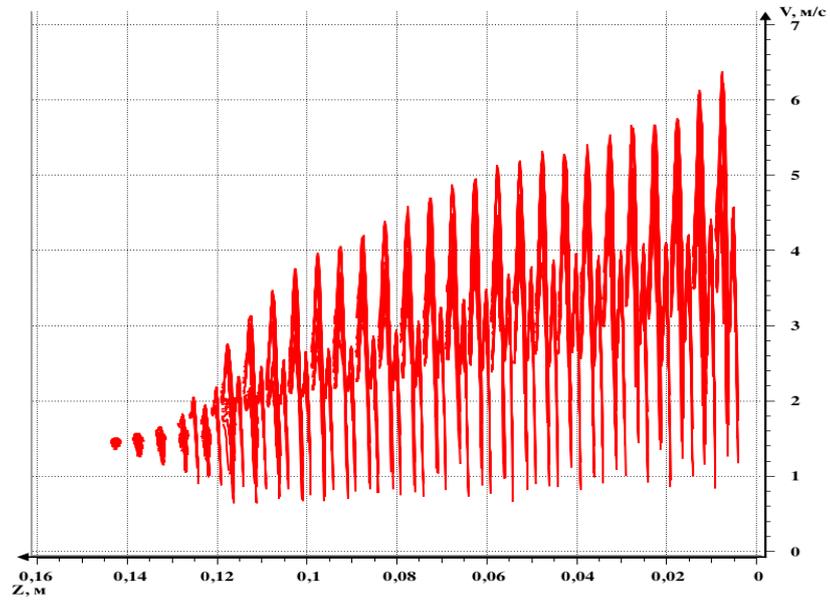


Рисунок А.1 – График распределения скорости моделируемой инжекционной горелки
«Модель А»

ПРИМЕЧАНИЕ: Цилиндрический огневой коллектор, постоянного диаметра, с
огневыми каналами разного диаметра.

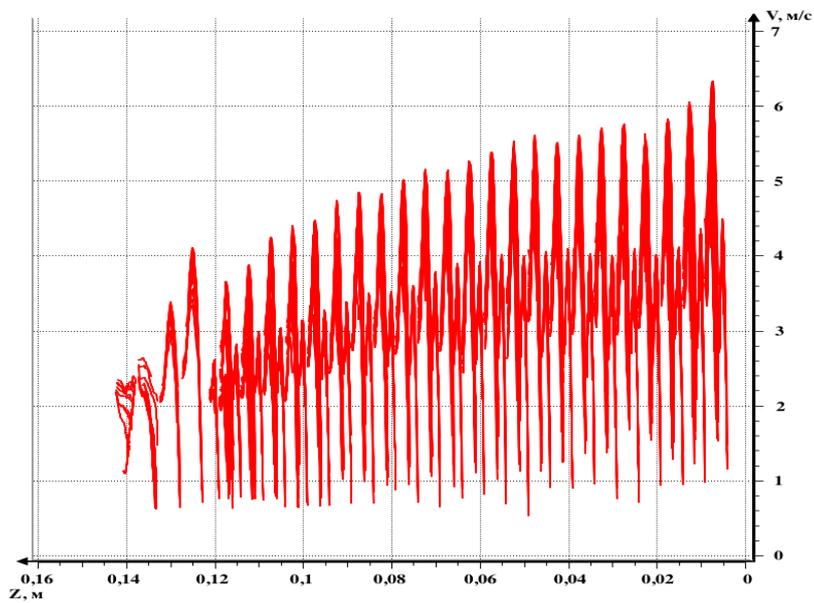


Рисунок А.2 – График распределения скорости моделируемой инжекционной горелки
«Модель В»

ПРИМЕЧАНИЕ: Цилиндрический огневой коллектор, постоянного диаметра, с
огневыми каналами одного диаметра.

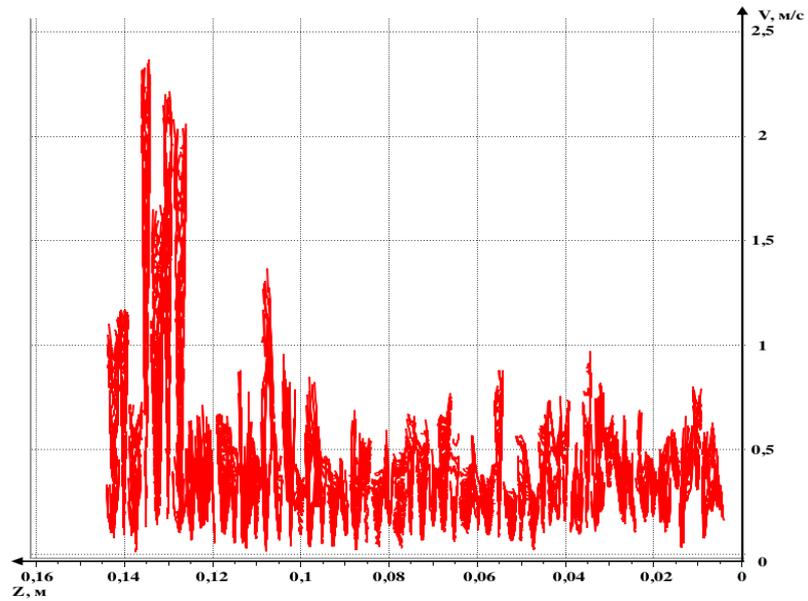


Рисунок А.3 – График распределения скорости моделируемой инжекционной горелки
«Модель С»

ПРИМЕЧАНИЕ: Цилиндрический огневой коллектор, постоянного диаметра, с уменьшенным диаметром огневых каналов последних трех рядов отверстий.

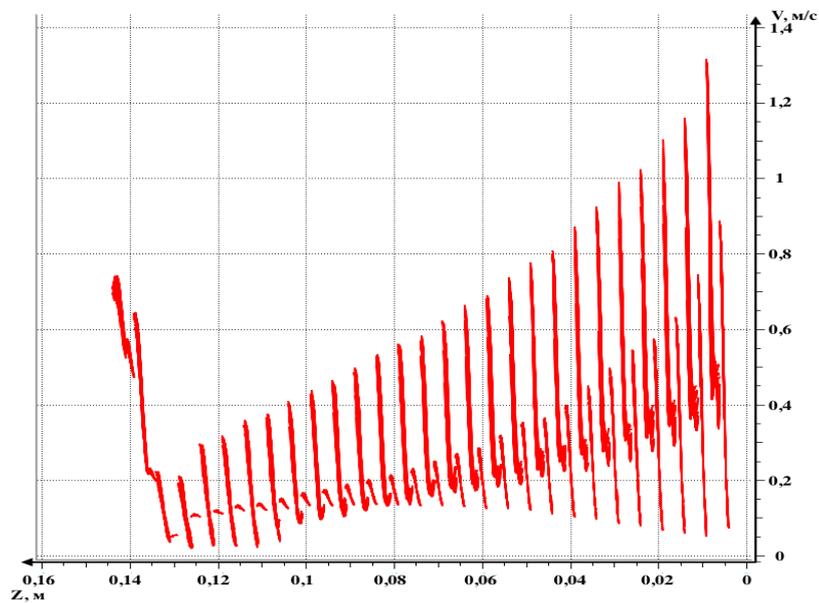


Рисунок А.4 – График распределения скорости моделируемой инжекционной горелки
«Модель D»

ПРИМЕЧАНИЕ: Цилиндрический огневой коллектор, постоянного диаметра, с огневыми каналами разного диаметра для двух крайних и центрального ряда.

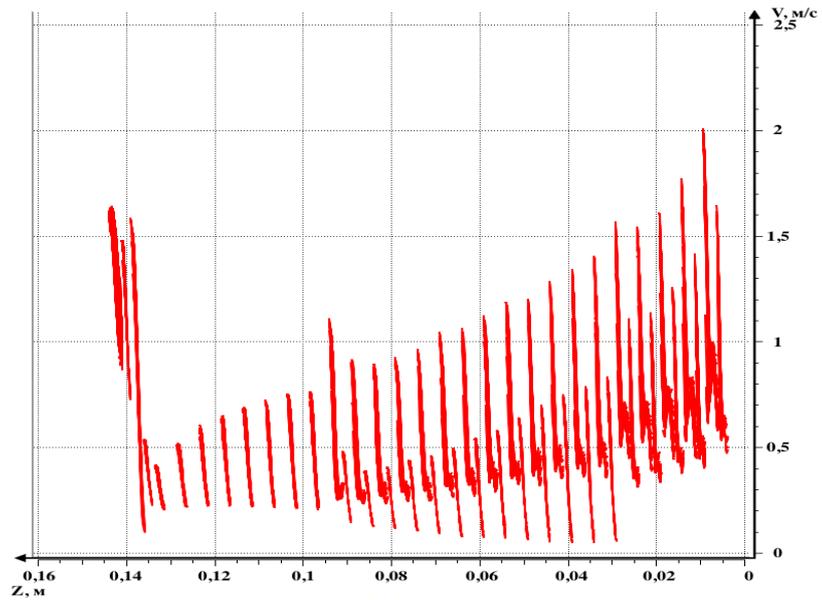


Рисунок А.5 – График распределения скорости моделируемой инжекционной горелки
«Модель Е»

ПРИМЕЧАНИЕ: Цилиндрический огневой коллектор, постоянного диаметра, с огневыми каналами разного диаметра. Ряд огневых каналов был закрыт.

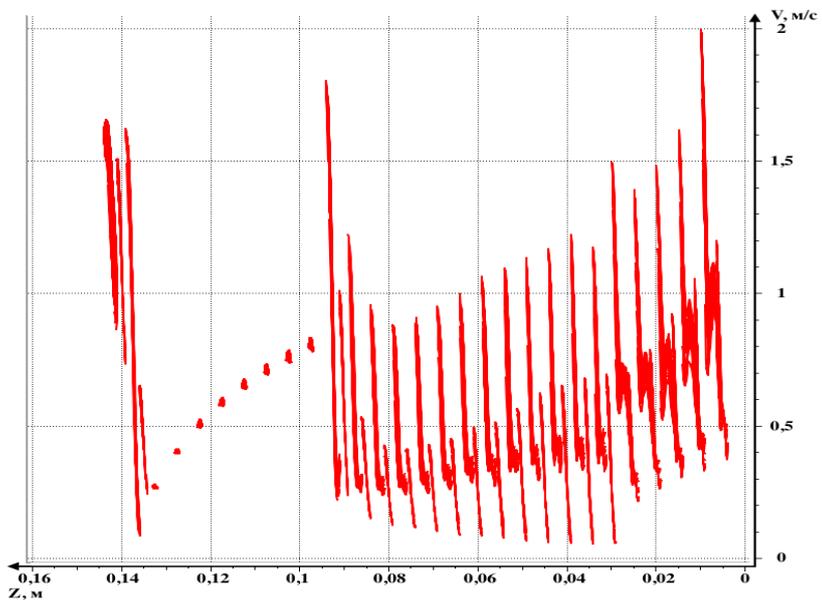


Рисунок А.6 – График распределения скорости моделируемой инжекционной горелки
«Модель F»

ПРИМЕЧАНИЕ: Цилиндрический огневой коллектор, постоянного диаметра, с увеличенными диаметрами огневых каналов последних пяти рядов.

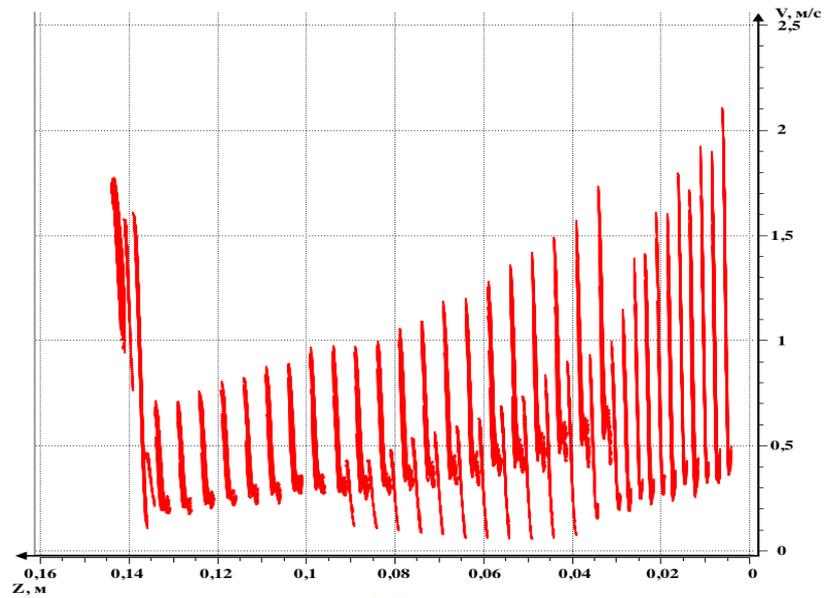


Рисунок А.7 – График распределения скорости моделируемой инжекционной горелки
«Модель G»

ПРИМЕЧАНИЕ: Цилиндрический огневой коллектор, переменного диаметра, с огневыми каналами одного диаметра.

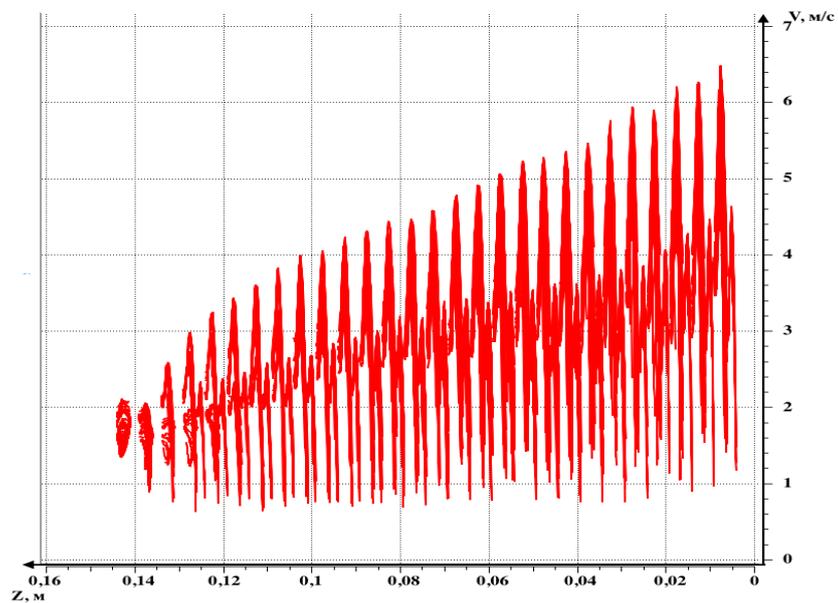


Рисунок А.8 – График распределения скорости моделируемой инжекционной горелки
«Модель H»

ПРИМЕЧАНИЕ: Цилиндрический огневой коллектор, усеченного диаметра, с огневыми каналами одного диаметра.

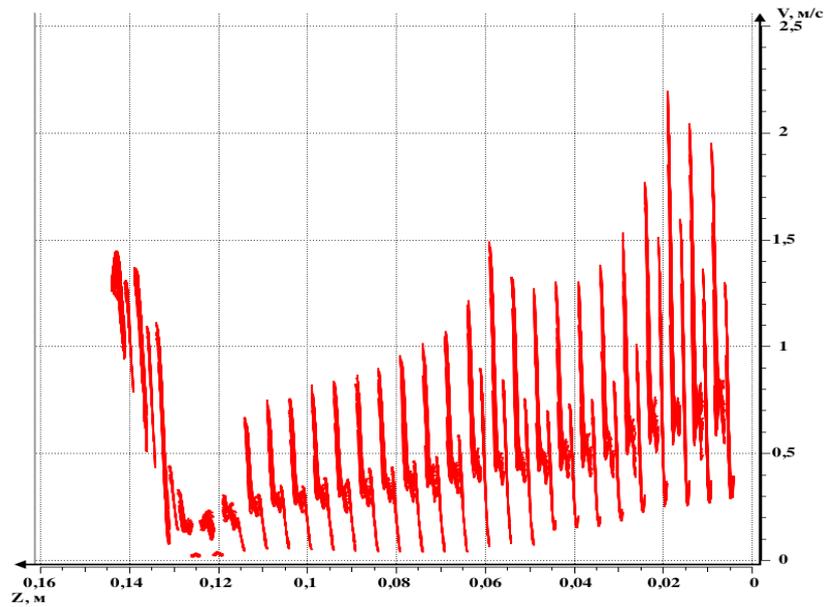


Рисунок А.9 – График распределения скорости моделируемой инжекционной горелки
«Модель I»

ПРИМЕЧАНИЕ: Цилиндрический огневой коллектор, усеченного диаметра, с огневыми каналами разного диаметра.

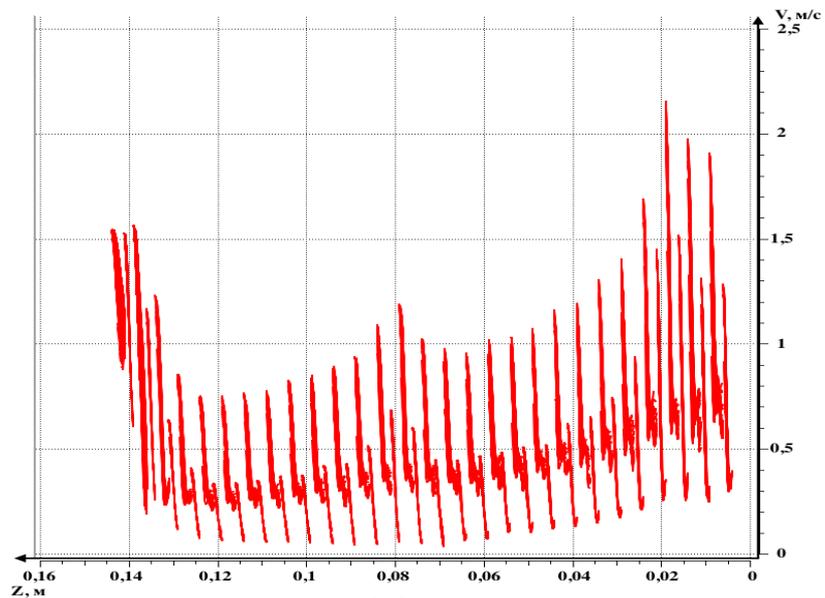


Рисунок А.10 – График распределения скорости моделируемой инжекционной горелки
«Модель J»

ПРИМЕЧАНИЕ: Цилиндрический огневой коллектор, переменного диаметра, с огневыми каналами разного диаметра, с удлиненным поворотным сегментом на 5 мм.

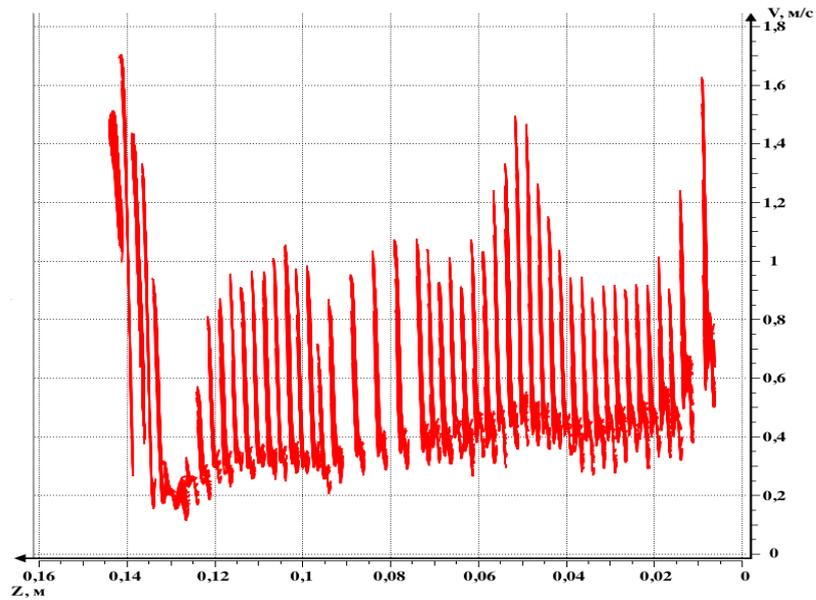


Рисунок А.11 – График распределения скорости моделируемой инжекционной горелки
«Модель К»

ПРИМЕЧАНИЕ: Цилиндрический огневой коллектор, переменного диаметра, с измененной длиной сегментного поворота, с частичным закрытием боковых огневых каналов в начале и середине коллектора. Диаметр огневых каналов разный.

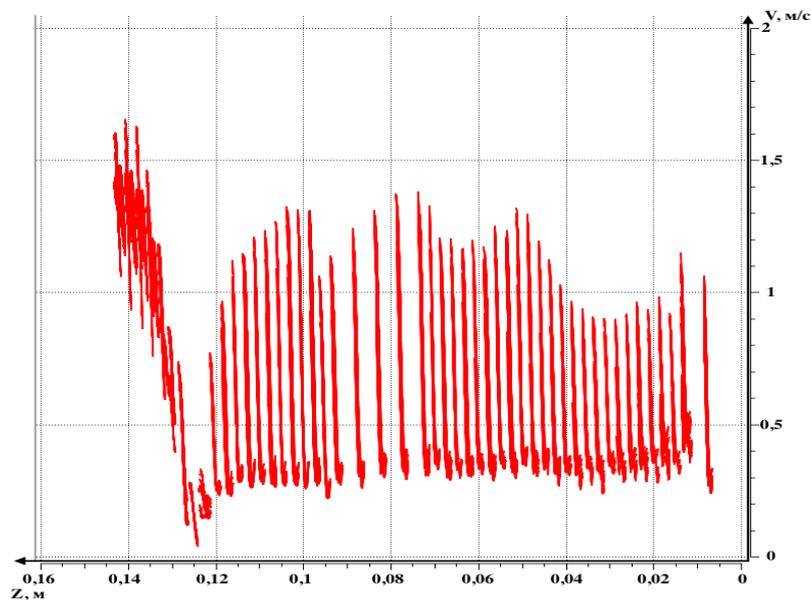


Рисунок А.12 – График распределения скорости моделируемой инжекционной горелки
«Модель L»

ПРИМЕЧАНИЕ: Цилиндрический огневой коллектор, с изменением диаметра в конце, с измененной длиной сегментного поворота, с частичным закрытием боковых огневых каналов в начале и середине коллектора. Диаметр огневых каналов разный.

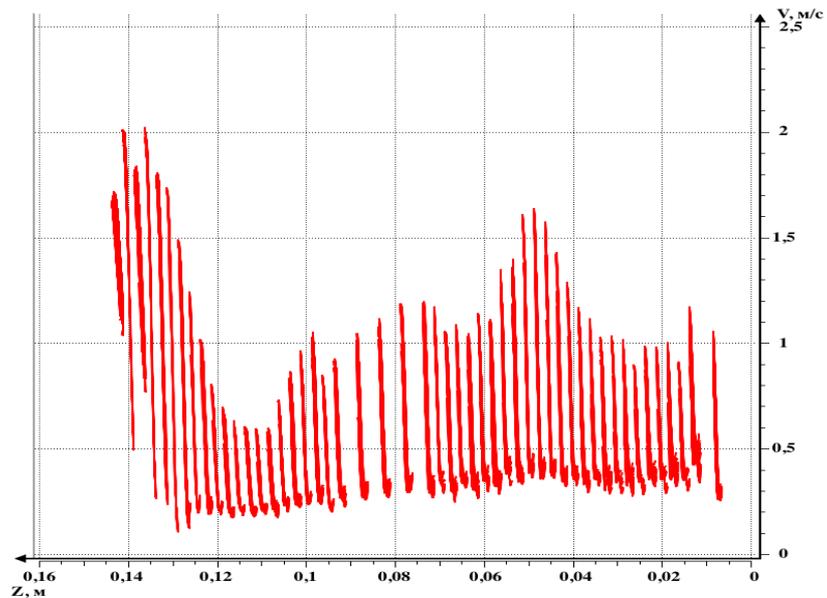


Рисунок А.13 – График распределения скорости моделируемой инжекционной горелки
«Модель М»

ПРИМЕЧАНИЕ: Цилиндрический огневой коллектор, переменного диаметра, с измененной длиной сегментного поворота, с частичным закрытием центральных огневых каналов в начале и середине коллектора. Диаметр огневых каналов разный.

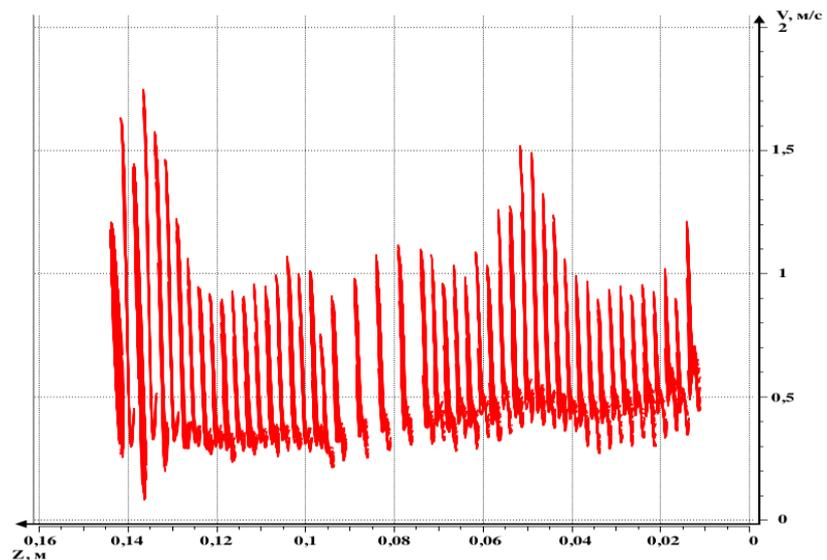


Рисунок А.14 – График распределения скорости моделируемой инжекционной горелки
«Модель N»

ПРИМЕЧАНИЕ: Цилиндрический огневой коллектор, переменного диаметра, с измененной длиной сегментного поворота, с частичным закрытием центральных огневых каналов в середине коллектора. Диаметр огневых каналов разный.

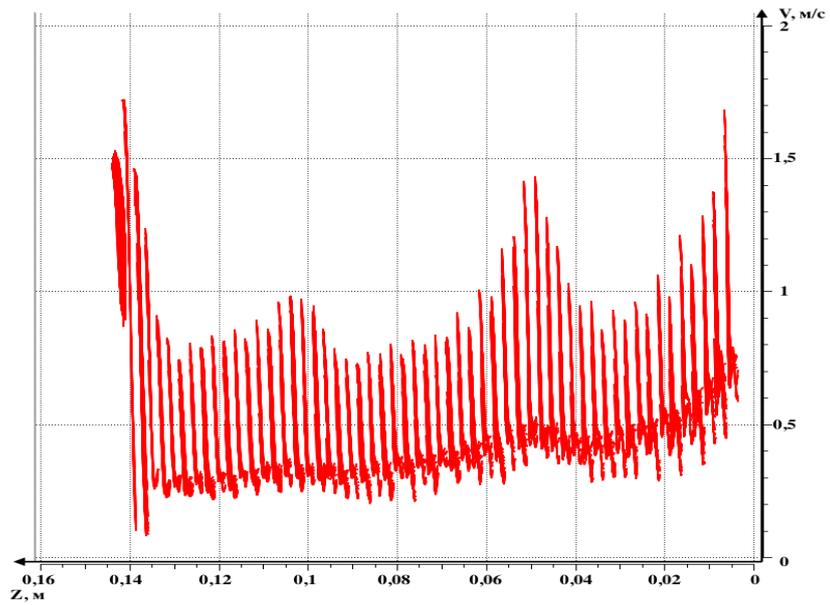


Рисунок А.15 – График распределения скорости моделируемой инжекционной горелки
«Модель О»

ПРИМЕЧАНИЕ: Цилиндрический огневой коллектор, переменного диаметра, с измененной длиной сегментного поворота, с частичным закрытием центральных огневых каналов в середине и конце коллектора. Диаметр огневых каналов разный.

Приложение Б



АО «ГАЗПРОМ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЕ»
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ГАЗПРОМ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЕ
ЛЕНИНГРАДСКАЯ ОБЛАСТЬ»
 (АО «Газпром газораспределение
 Ленинградская область»)

Адрес юридический лица:
 Здание административного корпуса, Чкалова, Блок А, 41,
 пос. Новоселье, Пушкинское р-н, Ленинградская обл., РФ, 188007
 Адрес для корреспонденции:
 ул. Ленинградская, д. 4, Санкт-Петербург, РФ, 192146
 Тел: +7 (812) 703 1950, факс: +7 (812) 703 1949
 www.gazprom-gas.ru, E-mail: info@gazprom-gas.ru
 OJATO 00224066, OJPH 1024102184113, ИНН 4700002039, КПП 472030021

№ _____
 от _____

Состав природного газа, используемый на объекте по адресу Ленинградская область, Кировский район, Никольское шоссе, участок № 55, кварталы 65, 66, 75, 76.

Таблица 1 – Состав природного газа

Вещество	Объемный состав	Единицы измерения
Метан	97,98	%
Этан	0,71	%
Пропан	0,24	%
Нормальный бутан	0,05	%
Изобутан	0,05	%
Нормальный пентан	0,01	%
Изопентан	0,01	%
Кислород	0,01	%
Азот	0,90	%
Двуокись углерода	0,04	%



Приложение В



Программа-график проведения пуско-наладочных работ и режимно-наладочных испытаний проектируемого здания, по адресу Ленинградская область, Кировский район, г. Никольское приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Программа-график проведения пуско-наладочных работ и режимно-наладочных испытаний

№ п.п.	Состав работ	Дата проведения работы	Отметка о выполнении
1	Подготовительные работы		
1.1	Ознакомление с технической документацией Ознакомление с Программой ПНР котельной (6 часов). (18 часов).	03.02.2016 – 05.02.2016	выполнено
1.2	Проверка соответствия монтажа технологических и вспомогательных систем, систем теплотехнического контроля и регулирования оборудования их элементов и узлов проекту, техническим условиям заводов-изготовителей и нормам (8 часов). Индивидуальное опробование: после промывки трубопроводов котлового контура, контура отопления и ГВС выполняется: – заполнение каждого водогрейного котлового блока; – пуск газа в газовую линейку каждого блока; – пуск горелочных устройств; – проверка значений установок срабатывания автоматики регулирования, безопасности и защиты каждого водогрейного блока в отдельности;	08.02.2016 09.02.2016 – 11.02.2016	выполнено



Продолжение таблицы 1 – Программа–график проведения пуско–наладочных работ и режимно–наладочных испытаний

№ п.п.	Состав работ	Дата проведения работы	Отметка о выполнении
1.2	<p>– опробование срабатывания предохранительных клапанов на каждом блоке методом подрыва; проверка и (при необходимости) регулирование, с помощью заневоливания пружины стопорным кольцом;</p> <p>– показание проверяется и регулируется при подаче давления гидравлическим прессом. Предохранительные клапаны при проверке поочередно отключаются заглушками. Теплосъем с котловых блоков должен быть уменьшен до минимума.</p> <p>Горелки остаются выключенными в ручном режиме управления до тех пор, пока температура котловой воды не достигнет температуры срабатывания защитного ограничителя температуры.</p> <p>После отключения горелки защитным ограничителем температуры, необходимо подождать, пока температура котловой воды не опустится до уровня на 15-20 °С ниже установленной температуры срабатывания, затем, нажатием кнопки, разблокировать защитный ограничитель температуры. Составление перечня обнаруженных при осмотре и опробовании дефектов, отклонений и разработка мероприятий по их устранению (16 часов).</p>		
2.	Пусковые работы		
2.2	<p>Наладка топочного режима водогрейных котловых блоков для достижения их высоких технико-экономических показателей, осуществляется по инструкции завода-изготовителя:</p> <ul style="list-style-type: none"> – приборное определение расхода топлива на горение за 0,5 часа; – приборное определение состава отходящих газов в контрольной точке газохода; – приборное определение температуры отходящих газов: <ul style="list-style-type: none"> • приборное определение потерь тепловой энергии с отходящими газами; • приборное определение выработки тепловой энергии; 	15.02.2016 – 16.02.2016	выполнено



Продолжение таблицы 1 – Программа–график проведения пуско–наладочных работ и режимно–наладочных испытаний

№ п.п.	Состав работ	Дата проведения работы	Отметка о выполнении
2.2	<ul style="list-style-type: none"> составление теплового баланса и определение КПД установки и собственных нужд котельной. <p>По результатам расчета регулируется давление газа перед каждым котловым блоком. Повторно проводятся замеры параметров и расчет показателей. Настройка ведется до получения технико-экономических показателей, близких к гарантированным заводом - изготовителем. (24 часа).</p>		
2.3	Подготовка технологического оборудования котельной к комплексному опробованию (4 часа).	17.02.2016	выполнено
3.	Наладка и комплексное опробование оборудования		
3.1	Определение оптимальных условий работы водогрейного котлового модуля, состоящем из трех котлов и вспомогательного оборудования при различных нагрузках (16 часов).	17.02.2016 – 18.02.2016	выполнено
3.2	Проверка работоспособности оборудования котельной на всех режимах: котел, горелка, запорно-регулирующая и предохранительная арматура трубопроводов, котловые насосы, сетевые насосы, насосы ГВС, автоматика регулирования и автоматика безопасности (16 часов).	19.02.2016 – 20.02.2016	выполнено
3.3	<p>Методические указания</p> <p>Отработка установок срабатывания автоматики безопасности оборудования котельной:</p> <p>1. Отключение электропитания по основному вводу имитируется отключением рубильника на вводе. Автоматически (не более 1 сек) отсечной клапан перекрывает трубопровод подачи газа в котельную. На пульт диспетчера выдается сигнал о срабатывании отсечного клапана по газу. Проверяется прохождение сигнала и загорание контрольной лампы на пульте. Проверяется автоматическое переключение на аварийное питание оборудования котельной (0,5 часа).</p> <p>2. Загазованность помещения котельной метаном имитируется подачей в пробоотборник сигнализатора CO-CH4 поверочной газовой смеси с содержанием метана 0,5%. Срабатывает звуковой сигнал, проверяется появление сигнала на пульте диспетчера.</p>	22.02.2016 – 24.02.2016	выполнено



Продолжение таблицы 1 – Программа–график проведения пуско–наладочных работ и режимно–наладочных испытаний

№ п.п.	Состав работ	Дата проведения работы	Отметка о выполнении
3.3	<p>При подаче поверочной газовой смеси с содержанием 1,0% метана, закрывается отсечной клапан на вводе газопровода в котельную с передачей сигнала на пульт диспетчера. Аналогично загазованность помещений котельной окисью углерода имитируется подачей в пробоотборник прибора CO–CH4 поверочной газовой смеси с содержанием CO 20 мг/м3. Срабатывает звуковой сигнал. Проверяется появление сигнала на пульте-щите диспетчера. При подаче поверочной газовой смеси с содержанием 100 мг/м3 CO закрывается отсечной клапан на вводе газопровода в котельную с передачей сигнала на пульт диспетчера (2 часа).</p> <p>3. Срабатывание пожарной сигнализации имитируется включением тест–вилки. Проверяется срабатывание отсечного газового клапана и прохождение сигнала на пульт диспетчера (1 час).</p> <p>4. Неисправность работающих сетевых насосов контролируется имитацией отключения. Проверяется прохождение сигнала на пульт диспетчера и автоматическое включение резервного насоса. Так же проверяется неисправность насосов контура ГВС (1,5 часа).</p> <p>5. Неисправность работающего насоса подпитки контура теплоснабжения контролируется имитацией отключения. Проверяется прохождение сигнала на пульт диспетчера и автоматическое включение резервного насоса. (0,5 часа).</p> <p>6. Понижение давления теплоносителя в котле и определение установки датчика давления имитируется открытием спускника при закрытых поворотных затворах на входе и выходе воды из котла. При достижении давления воды 0,2 МПа должно произойти отключение котла с передачей сигнала на пульт диспетчера (1,5 часа).</p> <p>7. Повышение давления теплоносителя в котле и определение установки датчика давления имитируется закрытием затвора на выходе воды из котла при включенных насосах котлового контура и работающей горелке. При достижении давления воды 0,5 МПа должно произойти отключение котла с передачей сигнала на пульт диспетчера (1,5 часа).</p>		



Продолжение таблицы 1 – Программа–график проведения пуско–наладочных работ и режимно–наладочных испытаний

№ п.п.	Состав работ	Дата проведения работы	Отметка о выполнении
3.3	<p>8. Понижение давления воды в обратном трубопроводе котельной имитируется открытием сливного штуцера на трубопроводе при отключенной системе подпитки. При достижении давления воды 0,1 МПа должно произойти отключение котельной с передачей сигнала на пульт диспетчера. Повышение давления воды в обратном трубопроводе имитируется плавным закрытием поворотного затвора на входе обратной воды в котельную при включенных сетевых насосах. При повышении давления воды до 0,6 МПа датчик давления выдает сигнал на аварийное отключение котельной и сигнал на пульт диспетчера. Контролируется значение давления срабатывания датчика и прохождение сигнала на пульт.(2 часа).</p> <p>9. Срабатывание защиты при погасании факела имитируется отключением фотоэлемента (ионизационного электрода). Контролируется время отключения горелки (менее 1 сек), прохождение сигнала на пульт (0,5 часа).</p> <p>10. Понижение давления газа перед отсечными клапанами горелки: Медленно прикрывая газовым шаровым краном подачу газа к горелке и наблюдая за U-образным манометром (или электронным манометром) контролирующим давление газа, добиться снижения давления газа перед отсечными клапанами горелки до момента срабатывания датчика минимального давления газа (порядка 10 15 мбар перед горелкой). Горелка останавливается и контролируется прохождение сигнала на панель аварийных параметров щита управления установки. Повторное включение горелки производится только после квитирования аварии (2 часа).</p> <p>11. Повышение давления газа перед горелкой: Поворачиваем реле давления газа в максимальное положение и переводим горелку на номинальную мощность. Затем поднимаем мощность горелки до 1,15–кратной от номинального значения увеличивая давление газа на регуляторе давления.</p>		



Продолжение таблицы 1 – Программа–график проведения пуско–наладочных работ и режимно–наладочных испытаний

№ п.п.	Состав работ	Дата проведения работы	Отметка о выполнении
3.3	После этого медленно повернуть реле в направлении минимального значения, пока горелка не остановится. Зафиксировать это значение и, квитиравав аварию (кнопкой на датчике давления газа максимум), запустить горелку снизив ее мощность до номинальной (2 часа).		
3.4	72-х часовое комплексное опробование котлового модуля и вспомогательного оборудования котельной. (72 часа).	25.02.2016 – 27.02.2016	выполнено
3.5	Определение недостатков монтажа, выявившихся во время проведения комплексного опробования котлового модуля и вспомогательного оборудования, а также разработка мероприятий по их устранению (4 часа).	29.02.2016	выполнено
3.6	Замеры и запись в акт пуско-наладочных работ параметров теплоносителя, давления газа, температуры отходящих газов, выброса вредных примесей, давление теплоносителя в котле и отопительном контуре. (8 часов).	01.03.2016	выполнено
3.7	Обработка результатов испытаний, составление временной режимной карты водогрейного модуля (16 часов).	02.03.2016 – 03.03.2016	выполнено





АО «ГАЗПРОМ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЕ»
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ГАЗПРОМ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЕ
ЛЕНИНГРАДСКАЯ ОБЛАСТЬ»
 (АО «Газпром газораспределение
 Ленинградская область»)

Адрес юридический адрес:
 Здание административного корпуса, полевая, Петер А. 51,
 пос. Московский, Ленинградский р-н, Ленинградская обл., РД, 188207
 Адрес для корреспонденции:
 ул. Ломоносова, д. 4, Санкт-Петербург, РД, 192148
 Тел.: +7 (812) 703 1900 (812) 703 1902; факс: +7 (812) 703 1949
 www.gazprom-leningrad.ru E-mail: office@gazprom-leningrad.ru
 OGRN: 50204068, ОГРН: 5024021940713, ИНН: 470000106, КПП: 470300001

№ _____
 на № _____ от _____



Таблица 2 – Перечень используемых приборов

№	Наименование прибора	Тип марка	Характеристика прибора	Заводской номер
1	Газоанализатор цифровой комбинированный	TESTO-300	0-100%	46839
2	Секундомер механический	C22B	0-30-30	T12840
3	Микроманометр	Testo 506	0-200 гПа	30651185/6 12
4	Термометры лабораторные (кт)	TBI-300	0-300	Клеймение
5	Термометр ртутный	Сп-1а №3	0...+500	Клеймение
6	Манометр деформационный образцовый	МО	0...1,0 мПа	70931
7	Манометр деформационный образцовый	МО	0...0,6 мПа	29289
8	Ультразвуковой портативный расходомер	«Взлет ПР»	0,1-13 м/сек, Ду 20-5000 мм	301064
9	Пирометр	Ravtfik	-60 – 900 °С	243364
10	Пресс ручной гидравлический	-	0...20,0 тн	-
11	Компрессор	МКЗ-100	0...12 бар	-
12	Охладитель проб теплоносителя	027-ЭФ.232СБ	0-4атм, 3 л	-
13	Измеритель плотности теплового потока с датчиком ПТП-20П	ИПП-2М	0-2000 Вт	611
14	Преобразователь расхода электромагнитный	ЭРСВ-410	5-300	Паспорт
15	Манометр пружинный	Д 60	0-0,6 Мбар	Клеймение
16	Термометр биметаллический	-	0-120 °С	Клеймение
17	Термопреобразователь	КТПТР-0,1	0,0-300 °С	Паспорт
18	Тепловычислитель	СПТ 943	-	Паспорт
19	Водосчетчик	СВГ-40	0-40	Паспорт
20	Водосчетчик	СВХ-25	0-25	Паспорт





АО «ГАЗПРОМ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЕ»
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ГАЗПРОМ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЕ
ЛЕНИНГРАДСКАЯ ОБЛАСТЬ»

(АО «Газпром газораспределение
 Ленинградская область»)

Адрес юридического лица:
 Здание административного корпуса «Жемчужка» Петер А, 31,
 пос. Новоселье, Лососновский р-н, Ленинградская обл., РФ, 188507
 Адрес для корреспонденции:
 ул. Ленинская, д. 4 Санкт-Петербург, РФ, 192140
 Тел.: +7 (812) 703 1950, (812) 703 1952, факс: +7 (812) 703 1949
 e-mail: gazprom@lensgas.ru
 ОГРН: 0324066, ИНН: 4304702947/1, ОГРН/ИНН: 4307-472030001

№ _____
 от _____

Таблица 3 – Технические характеристики газоанализатора «TESTO-300»

Измеряемые величины	Диапазон измерений	Разрешающая способность	Допускаемая погрешность
температура	- 40... ± 1200 °С	1 °С	± 0,5 % от измеренного значения
давление/разряжение	± 800 Па	0,1 Па	0,3 Па
концентрация NOx*	0... 3000 ppm	1 ppm	± 5 ppm
концентрация CO** (с H ₂ компенсацией)	0... 10000 ppm	-	± 5 % от измеренного значения
концентрация O ₂ *	0... 25 % об.	0,1 % об.	± 0,2 % об.



Таблица 4 – Технические характеристики модульного анализатора типа 2260 «Bruel&Kgear»

Номинальная чувствительность	Частотный диапазон		Динамический диапазон
	октавный анализ	1/3-октавный анализ	
26 ± 1,5 дБ на 1 В/Па	-16 Гц... 16Гц	-8 Гц... 20Гц	80 дБ



Приложение Г

Расчет потерь теплоты q_5 по измеренным значениям температуры поверхности нагрева котлоагрегата:

Минимальный режим мощности работы котла на 10 кВт

Таблица Д.1 – Температура поверхности нагрева котлоагрегата «NEVALUX–8230» с установленной горелкой, °С

				36,5	29,9	30,4	30,7	35					
				37,5	36,1	Дымовая труба	36,2	36,5					
				36,5	34,8		35	37,5					
				33	30	30,5	30,8	33,75					
35	36,5	37,5	36,5	29,5	30	30,5	30,8	31	36,5	37,5	36,5	35	
35,8	36	37,2	36	29,8	30,2	30,2	30,6	30,5	36	37,2	36	35,8	
36,5	36,8	37,8	36,7	30,2	30	30,8	30,4	29,5	36,7	37,8	36,8	36,5	
37,5	37,8	38	37	30,5	30,4	30,5	30	29	37	38	37,8	37,5	
35,2	35	34,5	34	30,2	30,2	30,2	30,2	29,5	34	34,5	35	35,2	
32,5	32	31,5	31	29,8	30	29,8	29,5	29,8	31	31,5	32	32,5	
28	29,5	29	29,5	29,5	29,8	29,5	29,8	30	29,5	29	29,5	28	
26,5	28	28,8	28,5	29,8	29,6	29,8	30	29,2	28,5	28,8	28	26,5	
26,1	27	28,2	27,5	29,8	29,4	29,2	29,8	28,5	27,5	28,2	27	26,1	
26,1	26,5	28	27	29,5	29,2	29	29,5	28	27	28	26,5	26,1	

Таблица Д.2 – Результаты расчета

				8,550	2,803	3,206	3,451	7,173					
				9,488	8,179	Дымовая труба	8,272	8,550					
				8,550	6,992		7,173	9,488					
				5,396	2,883	3,287	3,533	6,054					
6,298	7,507	8,331	7,507	2,196	2,547	2,904	3,121	3,267	7,507	8,331	7,507	6,298	
6,939	7,101	8,082	7,101	2,405	2,689	2,689	2,976	2,904	7,101	8,082	7,101	6,939	
7,507	7,753	8,580	7,671	2,689	2,547	3,121	2,832	2,196	7,671	8,580	7,753	7,507	
8,331	8,580	8,747	7,917	2,904	2,832	2,904	2,547	1,851	7,917	8,747	8,580	8,331	
6,457	6,298	5,902	5,510	2,689	2,689	2,689	2,689	2,196	5,510	5,902	6,298	6,457	
4,358	3,983	3,612	3,247	2,405	2,547	2,405	2,196	2,405	3,247	3,612	3,983	4,358	
1,177	2,182	1,840	2,182	2,196	2,405	2,196	2,405	2,547	2,182	1,840	2,182	1,177	
0,261	1,177	1,704	1,504	2,405	2,265	2,405	2,547	1,988	1,504	1,704	1,177	0,261	
0,047	0,552	1,307	0,859	2,405	2,126	1,988	2,405	1,513	0,859	1,307	0,552	0,047	
0,047	0,261	1,177	0,552	2,196	1,988	1,851	2,196	1,184	0,552	1,177	0,261	0,047	

Режим мощности работы котла на 15 кВт

Таблица Д.3 – Температура поверхности нагрева котлоагрегата «NEVALUX–8230» с установленной горелкой, °С

				39	34,8	35,5	36	39					
				38,8	34,2	Дымовая труба	35,2	38,8					
				38,5	33,8		34,8	38,5					
				34,5	32,8	33,5	34	35,75					
39	38,8	38,5	37	32	32,8	33,5	34	34,5	37	38,5	38,8	39	
37	36	36,5	36	31,8	32,5	33	33	33,5	36	36,5	36	37	
34,5	35,5	35	34,5	32,2	32,8	32,8	32,8	32,5	34,5	35	35,5	34,5	
33,5	34,8	34	33	32,5	32,2	32,5	32,2	32	33	34	34,8	33,5	
31	32,5	32,5	32,5	32,2	32,8	32,2	31,8	31,5	32,5	32,5	32,5	31	
29,8	30	31	31,5	32,2	32,5	32,2	31,5	30,8	31,5	31	30	29,8	
28,5	28,8	29,5	29	32	32,2	32,5	31,5	30,5	29	29,5	28,8	28,5	
27	27,5	29,2	28,5	31,5	31,5	31	30,5	30,2	28,5	29,2	27,5	27	
26,2	27,2	29,2	28,8	30,5	30,5	29,8	29,5	29,8	28,8	29,2	27,2	26,2	
26,1	27	29,5	29	30	29,8	29,5	29,2	29,5	29	29,5	27	26,1	

Таблица Д. 4 – Результаты расчета

				10,922	6,992	7,628	8,087	10,922					
				10,729	6,453	Дымовая труба	7,354	10,729					
				10,440	6,098		6,992	10,440					
				6,722	5,223	5,833	6,275	7,857					
9,590	9,421	9,167	7,917	4,008	4,614	5,153	5,544	5,938	7,917	9,167	9,421	9,590	
7,917	7,101	7,507	7,101	3,858	4,385	4,767	4,767	5,153	7,101	7,507	7,101	7,917	
5,902	6,697	6,298	5,902	4,158	4,614	4,614	4,614	4,385	5,902	6,298	6,697	5,902	
5,122	6,139	5,510	4,738	4,385	4,158	4,385	4,158	4,008	4,738	5,510	6,139	5,122	
3,247	4,358	4,358	4,358	4,158	4,614	4,158	3,858	3,635	4,358	4,358	4,358	3,247	
2,391	2,531	3,247	3,612	4,158	4,385	4,158	3,635	3,121	3,612	3,247	2,531	2,391	
1,504	1,704	2,182	1,840	4,008	4,158	4,385	3,635	2,904	1,840	2,182	1,704	1,504	
0,552	0,859	1,976	1,504	3,635	3,635	3,267	2,904	2,689	1,504	1,976	0,859	0,552	
0,098	0,673	1,976	1,704	2,904	2,904	2,405	2,196	2,405	1,704	1,976	0,673	0,098	
0,047	0,552	2,182	1,840	2,547	2,405	2,196	1,988	2,196	1,840	2,182	0,552	0,047	

Минимальный режим мощности работы котла на 20 кВт

Таблица Д.5 – Температура поверхности нагрева котлоагрегата «NEVALUX–8230» с установленной горелкой, °С

				38	35	35,5	36,5	38					
				38,5	34	Дымовая труба	35,2	38,5					
				39,5	33,8		34,8	39,5					
				35,5	33	33,5	34,5	36,75					
38	38,5	39,5	38,5	32,5	33	33,5	34,5	35	38,5	39,5	38,5	38	
38,5	38,2	38,8	37	32,2	32,8	32,2	34,2	34,8	37	38,8	38,2	38,5	
39	38,2	37,5	36,5	31,8	32,5	32,2	34,2	34,8	36,5	37,5	38,2	39	
39,5	38,5	37	36	31,5	32,5	33	34	35	36	37	38,5	39,5	
35	35	35	34	32	32,8	32,8	33	34	34	35	35	35	
32	31,5	32	32	32,2	32,5	32,8	32,5	32	32	32	31,5	32	
30	29	30	29	32,5	32,8	33	32	31	29	30	29	30	
30,2	29,2	29,8	28,8	31,5	32,5	32	31	30,5	28,8	29,8	29,2	30,2	
30,2	29,5	29,8	28,8	31	32,2	31	30	30	28,8	29,8	29,5	30,2	
30,5	30	29,5	29	30,5	32,2	30	29,8	29,5	29	29,5	30	30,5	

Таблица Д. 6 – Результаты расчета

				9,962	7,173	7,628	8,550	9,962					
				10,440	6,275	Дымовая труба	7,354	10,440					
				11,407	6,098		6,992	11,407					
				7,628	5,396	5,833	6,722	8,783					
8,747	9,167	10,016	9,167	4,385	4,767	5,153	5,938	6,337	9,167	10,016	9,167	8,747	
9,167	8,915	9,421	7,917	4,158	4,614	4,158	5,701	6,177	7,917	9,421	8,915	9,167	
9,590	8,915	8,331	7,507	3,858	4,385	4,158	5,701	6,177	7,507	8,331	8,915	9,590	
10,016	9,167	7,917	7,101	3,635	4,385	4,767	5,544	6,337	7,101	7,917	9,167	10,016	
6,298	6,298	6,298	5,510	4,008	4,614	4,614	4,767	5,544	5,510	6,298	6,298	6,298	
3,983	3,612	3,983	3,983	4,158	4,385	4,614	4,385	4,008	3,983	3,983	3,612	3,983	
2,531	1,840	2,531	1,840	4,385	4,614	4,767	4,008	3,267	1,840	2,531	1,840	2,531	
2,673	1,976	2,391	1,704	3,635	4,385	4,008	3,267	2,904	1,704	2,391	1,976	2,673	
2,673	2,182	2,391	1,704	3,267	4,158	3,267	2,547	2,547	1,704	2,391	2,182	2,673	
2,886	2,531	2,182	1,840	2,904	4,158	2,547	2,405	2,196	1,840	2,182	2,531	2,886	

Минимальный режим мощности работы котла на 25 кВт

Таблица Д.7 – Температура поверхности нагрева котлоагрегата «NEVALUX–8230» с установленной горелкой, °С

				38,5	35,2	35,5	36,5	38,5					
				39	34,8	Дымовая труба	36	39					
				40	34		35,5	40					
				36	33,2	33,5	34,5	37					
38,5	39	40	39	33	33,2	33,5	34,5	35	39	40	39	38,5	
38	38,6	39	38,8	32,5	33	33,6	34	34	38,8	39	38,6	38	
37,8	38,7	38,8	35,5	32	32,8	33,8	33,5	33	35,5	38,8	38,7	37,8	
37	38,8	38,5	38	31,5	32,5	34	33	32,5	38	38,5	38,8	37	
35,2	36	35	35	31,5	32,6	33,8	32	31,8	35	35	36	35,2	
31,2	32,5	32	31	31,8	32,7	33,5	31	31	31	32	32,5	31,2	
28,5	29	30	29	32	32,8	33,5	30,2	30,5	29	30	29	28,5	
28,4	29,2	29,8	29,2	31,5	31,5	31,5	30	30,2	29,2	29,8	29,2	28,4	
28,2	29,2	29,8	29,2	31	30,8	30	29,5	29,8	29,2	29,8	29,2	28,2	
28	29	29,5	29	30,5	30	29	29,2	29,5	29	29,5	29	28	

Таблица Д. 8 – Результаты расчета

				10,440	7,354	7,628	8,550	10,440					
				10,922	6,992	Дымовая труба	8,087	10,922					
				11,896	6,275		7,628	11,896					
				8,087	5,571	5,833	6,722	9,017					
9,167	9,590	10,445	9,590	4,767	4,921	5,153	5,938	6,337	9,590	10,445	9,590	9,167	
8,747	9,251	9,590	9,421	4,385	4,767	5,231	5,544	5,544	9,421	9,590	9,251	8,747	
8,580	9,336	9,421	6,697	4,008	4,614	5,387	5,153	4,767	6,697	9,421	9,336	8,580	
7,917	9,421	9,167	8,747	3,635	4,385	5,544	4,767	4,385	8,747	9,167	9,421	7,917	
6,457	7,101	6,298	6,298	3,635	4,461	5,387	4,008	3,858	6,298	6,298	7,101	6,457	
3,392	4,358	3,983	3,247	3,858	4,537	5,153	3,267	3,267	3,247	3,983	4,358	3,392	
1,504	1,840	2,531	1,840	4,008	4,614	5,153	2,689	2,904	1,840	2,531	1,840	1,504	
1,438	1,976	2,391	1,976	3,635	3,635	3,635	2,547	2,689	1,976	2,391	1,976	1,438	
1,307	1,976	2,391	1,976	3,267	3,121	2,547	2,196	2,405	1,976	2,391	1,976	1,307	
1,177	1,840	2,182	1,840	2,904	2,547	1,851	1,988	2,196	1,840	2,182	1,840	1,177	

Максимальный режим мощности работы котла на 30 кВт

Таблица Д.9 – Температура поверхности нагрева котлоагрегата «NEVALUX–8230» с установленной горелкой, °С

				39,5	34,5	35,5	35,8	39,5					
				40	34	Дымовая труба	34,2	40					
				40,5	33,5		34	40,5					
				36	32,5	33,5	33,8	37					
39,5	40	40,5	40	32	32,5	33,5	33,8	34	40	40,5	40	39,5	
39,2	38,5	39,5	38,5	31,8	32,5	33,8	34	34,2	38,5	39,5	38,5	39,2	
38,8	38	38,8	37,5	31,8	32,8	33,9	34,1	34,3	37,5	38,8	38	38,8	
37,5	37,8	38	37	32	33	34	34,2	34,5	37	38	37,8	37,5	
34,2	35,5	35	34	31,8	32,5	33	33	32,5	34	35	35,5	34,2	
30,8	32	31,5	31	31,8	31,8	32,5	31,8	31,2	31	31,5	32	30,8	
29	29,2	29,5	29,2	32	31,5	32	31	30	29,2	29,5	29,2	29	
28	28,8	29,2	29	31	31	31,8	30,8	29,8	29	29,2	28,8	28	
27	28,2	29,1	29,2	30,5	30,8	35,5	30,5	29,6	29,2	29,1	28,2	27	
26,2	27	29,5	29	30	30,5	31	30,2	29,5	29	29,5	27	26,2	

Таблица Д. 10 – Результаты расчета на максимальный режим мощности

				11,407	6,722	7,628	7,903	11,407					
				11,896	6,275	Дымовая труба	6,453	11,896					
				12,388	5,833		6,275	12,388					
				8,087	4,964	5,833	6,098	9,017					
10,016	10,445	10,877	10,445	4,008	4,385	5,153	5,387	5,544	10,445	10,877	10,445	10,016	
9,760	9,167	10,016	9,167	3,858	4,385	5,387	5,544	5,701	9,167	10,016	9,167	9,760	
9,421	8,747	9,421	8,331	3,858	4,614	5,466	5,623	5,780	8,331	9,421	8,747	9,421	
8,331	8,580	8,747	7,917	4,008	4,767	5,544	5,701	5,938	7,917	8,747	8,580	8,331	
5,666	6,697	6,298	5,510	3,858	4,385	4,767	4,767	4,385	5,510	6,298	6,697	5,666	
3,102	3,983	3,612	3,247	3,858	3,858	4,385	3,858	3,413	3,247	3,612	3,983	3,102	
1,840	1,976	2,182	1,976	4,008	3,635	4,008	3,267	2,547	1,976	2,182	1,976	1,840	
1,177	1,704	1,976	1,840	3,267	3,267	3,858	3,121	2,405	1,840	1,976	1,704	1,177	
0,552	1,307	1,908	1,976	2,904	3,121	6,739	2,904	2,265	1,976	1,908	1,307	0,552	
0,098	0,552	2,182	1,840	2,547	2,904	3,267	2,689	2,196	1,840	2,182	0,552	0,098	

Приложение Д



АО «ГАЗПРОМ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЕ»
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ГАЗПРОМ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЕ
ЛЕНИНГРАДСКАЯ ОБЛАСТЬ»
 (АО «Газпром газораспределение
 Ленинградская область»)

Адрес кредитного лица:
 Здание административного корпуса. Ножиков. Литер А, А1,
 пос. Новоселья, Ломоносовский р-н, Ленинградская обл., РФ, 188507
 Адрес для корреспонденции:
 ул. Пискарева, д. 4, Санкт-Петербург, РФ, 192148
 Тел.: +7 (812) 703 1950, (812) 703 1952; факс: +7 (812) 703 1949
 www.gazprom-lening.ru, E-mail: office@gazprom-lening.ru
 ОКПО 03324068, ОГРН 1024702184715, ИНН 4700000109, КПП 472600001

№ _____
 на № _____ от _____

Режимная карта котла «NEVALUX–8230» заводской комплектации на
 01.02.2016 г.

Наименование параметров	Единица измерения	Режим работы котла «NEVALUX–8230»			
		1	2	3	4
Тепловая мощность	%	40	60	80	100
	кВт	13	19	24	30
Давление газа перед горелкой	Па	1485	1657	1828	2000
Расход газа (при н.у.)	м ³ /ч	3,4	3,45	3,47	3,5
Коэффициент избытка воздуха α_1	–	0,4–0,6			
Содержание CO ₂ за котлом	%	6,8	7,3	8,0	8,7
Содержание O ₂ за котлом	%	14,0	12,5	11,5	10,9
Содержание NO _x за котлом	ppm	207	220	231	247
	мг/м ³	258,7	275,0	288,7	308,7
Содержание CO за котлом	ppm	350	373	384	400
	мг/м ³	437,50	466,25	480,00	500
Бенз/а/ирен (3, 4–Бензпирен)	ppm	0,008	0,006	0,004	0,003
	мг/м ³	0,01	0,007	0,005	0,003
Тепловое напряжение поверхностей нагрева (теплосъем)	кВт/м ²	14	21	27	33
Температура уходящих газов t_{yx}	°C	120	137	151	160
КПД котла	%	90,9	91,3	91,5	92,0
q ₅ (по измеренным температурам наружной поверхности котла)	%	5,0	3,4	2,5	1
q ₂	%	4,1	5,3	6,0	7,0
Нагрев воды в котле (перепад на входе и выходе)	°C	20			
Уровень звукового давления	дБ	55			



Приложение Е

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2618137

ИНЖЕКЦИОННАЯ ГОРЕЛКА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет" (ФГБОУ ВПО "СПбГАСУ") (RU)*

Авторы: *Нефёдова Марина Александровна (RU), Бирюзова Елена Александровна (RU), Мостафа Фазлави (RU)*

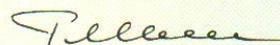
Заявка № 2016115412

Приоритет изобретения 20 апреля 2016 г.

Дата государственной регистрации в
Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 02 мая 2017 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 20 апреля 2036 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



Представитель
АО «Газпром газораспределение
Ленинградская область»

наименование организации, должности
подпись *Е. В. Тимофеева*
Е. В. Тимофеева
И.О.Ф.

М.П.



подпись *М. П. Васильченко*
М. П. Васильченко
И.О.Ф.

А К Т технического внедрения

Представитель АО «Газпром газораспределение Ленинградская область» в лице начальника управления капитального строительства Тимофеевой Елены Владимировны и заместителя руководителя проектно-конструкторского центра Васильченко Максима Петровича составили акт о внедрении результатов разработки раздела «Глава 4. Раздел 4.1. Каскадная схема компоновки котлов с разработанным ГТУ» диссертационной работы «Энергосберегающие технологии при работе котлов малой мощности», выполненного Нефёдовой Мариной Александровной в ходе написания диссертационной работы на кафедре СФХ СПбГАСУ в проектных материалах, разрабатываемых Проектно-конструкторским центром АО «Газпром газораспределение Ленинградская область» и непосредственно в материалах рабочего проекта «Газоснабжение природным газом научно-производственной базы ООО НПП «Новые технологии телекоммуникаций». Ленинградская область, Всеволожский район, п. Токсово, ул. Советов, д. 60» для заказчика ООО НПП «Новые технологии телекоммуникаций».

Результаты диссертационной работы, позволяющие экономить тепловую энергию в системах теплоснабжения, полученные в разделе «Глава 4. Раздел 4.1. Каскадная схема компоновки котлов с разработанным ГТУ», рекомендуются к внедрению в рабочих проектах по проектированию и реконструкции систем теплоснабжения, котельных (ТМ).

Начальник
управления капитального строительства

подпись *Е. В. Тимофеева*
Е. В. Тимофеева

М.П.



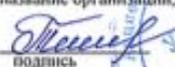
Заместитель руководителя
проектно-конструкторского центра

подпись *М. П. Васильченко*
М. П. Васильченко

« 27 » июля . 2016г.



Представитель
АО «Газпром газораспределение
Ленинградская область»

название организации, должность

подпись Е. В. Тимофеева
И.О.Ф.

М.П.

М. П. Васильченко
И.О.Ф.



А К Т технического внедрения

Представитель АО «Газпром газораспределение Ленинградская область» в лице начальника управления капитального строительства Тимофеевой Елены Владимировны и заместителя руководителя проектно-конструкторского центра Васильченко Максима Петровича составили акт о внедрении результатов разработки раздела «Глава 4. Раздел 4.1. Каскадная схема компоновки котлов с разработанным ГТУ» диссертационной работы «Энергосберегающие технологии при работе котлов малой мощности», выполненного Нефёдовой Мариной Александровной в ходе написания диссертационной работы на кафедре СФХ СПбГАСУ в проектных материалах, разрабатываемых Проектно-конструкторским центром АО «Газпром газораспределение Ленинградская область» и непосредственно в материалах рабочего проекта «Техническое перевооружение системы теплоснабжения предприятия ФГКУ комбинат «Механизация» Росрезерва. Ленинградская область, Лужский район, п. Оредеж» для заказчика ФГКУ комбинат «Механизация» Росрезерва.

Результаты диссертационной работы, позволяющие экономить тепловую энергию в системах теплоснабжения, полученные в разделе «Глава 4. Раздел 4.1. Каскадная схема компоновки котлов с разработанным ГТУ», рекомендуются к внедрению в рабочих проектах по проектированию и реконструкции систем теплоснабжения, котельных (ТМ).

Начальник
управления капитального строительства


подпись Е. В. Тимофеева

М.П.

20 » апреля 2016г.

Заместитель руководителя
проектно-конструкторского центра


подпись М. П. Васильченко

М.П.

20 » апреля 2016г.



Представитель
АО «Газпром газораспределение
Ленинградская область»

название организации, должность
Е. В. Тимофеева
подпись Е. В. Тимофеева
И.О.Ф.

М.П.



М. П. Васильченко
И.О.Ф.

А К Т технического внедрения

Представитель АО «Газпром газораспределение Ленинградская область» в лице начальника управления капитального строительства Тимофеевой Елены Владимировны и заместителя руководителя проектно-конструкторского центра Васильченко Максима Петровича составили акт о внедрении результатов разработки раздела «Глава 4. Раздел 4.1. Каскадная схема компоновки котлов с разработанным ГТУ» диссертационной работы «Энергосберегающие технологии при работе котлов малой мощности», выполненного Нефёдовой Мариной Александровной в ходе написания диссертационной работы на кафедре СФХ СПбГАСУ в проектных материалах, разрабатываемых Проектно-конструкторским центром АО «Газпром газораспределение Ленинградская область» и непосредственно в материалах рабочего проекта «Газоснабжение предприятия АО «Победа ЛСР». Производство №1. Ленинградская область, Кировский район, Никольское шоссе, участок № 55, кварталы 65, 66, 75, 76 (первая очередь строительства)» для заказчика ОАО «Победа ЛСР».

Результаты диссертационной работы, позволяющие экономить тепловую энергию в системах теплоснабжения, полученные в разделе «Глава 4. Раздел 4.1. Каскадная схема компоновки котлов с разработанным ГТУ», рекомендуются к внедрению в рабочих проектах по проектированию и реконструкции систем теплоснабжения, котельных (ТМ).

Начальник
управления капитального строительства

Е. В. Тимофеева
подпись Е. В. Тимофеева
И.О.Ф.

М.П.

Заместитель руководителя
проектно-конструкторского центра

М. П. Васильченко
подпись М. П. Васильченко
И.О.Ф.



«15» марта 2016г.

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»
(СПбГАСУ)

2-я Красноармейская ул., 4. Санкт-Петербург, 190005. Тел: (812) 100-06-67. Факс: (812) 316-58-72. E-mail: rector @ spbgasu.ru
 ИНН 7809011023 / КПП 783901001, ОКПО 02068580, ОКВЭД 80.30.1

№ _____
 г _____ 1

На № _____ от _____ 1



УТВЕРЖДАЮ
 Проректор по УР
 ФГБОУ ВО «СПбГАСУ»
 Луговская И. Р.

АКТ

о практическом использовании научных результатов
 кандидатской диссертации Нефёдовой М. А. в учебном процессе СПбГАСУ

Мы, нижеподписавшиеся: заведующий кафедрой Теплогазоснабжения и вентиляции к.т.н., доцент Васильев В. Ф., к.т.н., профессор Шаврин В. И. и к.т.н., доцент Бирюзова Е. А. составили настоящий акт о том, что научные результаты кандидатской диссертационной работы Нефёдовой М. А.:

- усовершенствованная инженерная методика расчета КПД котлов малой мощности, выполненная методом обратного баланса, с уточнением потерь теплоты от нагретых поверхностей котлов в окружающую среду;
- влияние конструктивных элементов разработанной инжекционной газовой горелки на аэродинамические характеристики и качество сжигания газозоудшной смеси с использованием математического моделирования и экспериментальных исследований;
- каскадная схема компоновки котельной, позволяющая осуществлять регулирование тепловой мощности в широком диапазоне, обеспечивая эффективность работы и максимальные КПД отдельных котлоагрегатов;
- обзор классификации газогорелочных устройств и параметров их работы, устанавливаемых в котлах малой мощности, используются в учебном процессе на кафедре «Теплогазоснабжение и вентиляция» в лекционном курсе дисциплин «Топливо и теория горения», «Современные системы теплогазоснабжения зданий и населенных мест» направления 13.03.01 – «Теплоэнергетика и теплотехника» с 2016/2017 учебного года.

05 апреля 2017 г

Зав. каф. ТГВ к.т.н., доцент

к.т.н., профессор каф. ТГВ

к.т.н., доцент каф. ТГВ

Васильев В. Ф.

Шаврин В. И.

Бирюзова Е. А.