

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



АНУФРИЕВ

Игорь Сергеевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРИ СЖИГАНИИ
ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВАХ С ПОДАЧЕЙ
ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА**

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

доктора технических наук

Научный консультант:

Академик РАН, доктор физико-
математических наук

Алексеевко Сергей Владимирович

Новосибирск – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 ОБЗОР НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ. ОБОСНОВАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	22
1.1 НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ГОРЕНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА	22
1.2 ДИСПЕРГИРОВАНИЕ ЖИДКОГО ТОПЛИВА	27
1.3 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДЫ И ПАРА ПРИ СЖИГАНИИ УГЛЕВОДОРОДОВ	33
1.4 ПАТЕНТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	41
1.5 ОБЗОР РЫНКА ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ (МАРКЕТИНГОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ)	50
1.6 ОБОСНОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ	86
ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 1	92
2 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОДЯНОГО ПАРА НА СОДЕРЖАНИЕ САЖИ В ПРОДУКТАХ СГОРАНИЯ	94
2.1 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ	94
2.2 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ	99
ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2	106
3 ДИСПЕРГИРОВАНИЕ ЖИДКОГО ТОПЛИВА СТРУЕЙ ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА	108
3.1 ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ГАЗОВОГО ПОТОКА (НЕСУЩЕЙ ФАЗЫ), ИСТЕКАЮЩЕГО ИЗ ФОРСУНКИ ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА РАСПЫЛИТЕЛЬНОГО ТИПА	109
3.1.1 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ	110
3.1.2 ОЦЕНКА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПО ТЕОРИИ ОДНОМЕРНОГО ТЕЧЕНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА	112
3.1.3 МЕТОД ЦИФРОВОЙ ТРАССЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ (PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY)	118
3.1.4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ	121
3.2 ДИСПЕРГИРОВАНИЕ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ СТРУЕЙ ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА ИЛИ ВОЗДУХА	125
3.2.1 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ	125

3.2.2 МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ	128
3.2.2.1 МЕТОД ТЕНЕВОЙ ФОТОГРАФИИ (SHADOW PHOTOGRAPHY)	130
3.2.2.2 ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ РАЗМЕРОВ КАПЕЛЬ (INTERFEROMETRIC PARTICLE IMAGING).....	131
3.2.2.3 МЕТОД PARTICLE TRACKING VELOCIMETRY	133
3.2.3 УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ	133
3.2.4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ГАЗОКАПЕЛЬНОГО ПОТОКА	136
ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 3	144
4 ПОКАЗАТЕЛИ СЖИГАНИЯ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ ПРИ РАСПЫЛЕНИИ СТРУЕЙ ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА В ПЕРСПЕКТИВНОМ ГОРЕЛОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ	146
4.1 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ.....	146
4.2 МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ	154
4.2.1 КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ	154
4.2.2 ГАЗОВЫЙ АНАЛИЗ	158
4.2.3 ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ПЛАМЕНИ	160
4.2.4 ИЗМЕРЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ В ФАКЕЛЕ.....	163
4.3 УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ	164
4.4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ АНАЛИЗ	167
4.4.1 ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПАРА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СЖИГАНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА	167
4.4.2 ВЛИЯНИЕ РАСХОДА ПАРА НА ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЕ И СОСТАВ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ПРИ ГОРЕНИИ ДИСПЕРГИРОВАННОГО ПАРОМ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА	169
4.4.3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ СЖИГАНИИ ОТРАБОТАННОГО МАШИННОГО МАСЛА.....	178
4.4.4 РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В ФАКЕЛЕ ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА	181
4.4.5 ИЗУЧЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ПРИ РАБОТЕ ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА	188

4.5 АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЖИГАНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА С ПОДАЧЕЙ ПАРА	193
ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 4.....	201
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	203
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	206
ПРИЛОЖЕНИЕ А: КОПИИ ПАТЕНТОВ	226
ПРИЛОЖЕНИЕ Б: РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕХНИЧЕСКОГО И ХИМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ТОПЛИВА	232
ПРИЛОЖЕНИЕ В: ЭСКИЗНАЯ КОНСТРУКТОРСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ НА ЛАБОРАТОРНЫЙ ОБРАЗЕЦ ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА	235
ПРИЛОЖЕНИЕ Г: ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ	245
ПРИЛОЖЕНИЕ Д: ДИПЛОМЫ, ПРЕМИИ, НАГРАДЫ.....	248

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Для теплоэнергетики особое значение имеют задачи, связанные с повышением эффективности использования энергоресурсов. В настоящее время актуальной задачей является утилизация накопленных на промышленных предприятиях огромных количеств жидких углеводородных отходов: отработанные моторные и трансмиссионные масла, смазочные жидкости, нефтяные шламы, отходы нефтедобычи и нефтепереработки. По данным Росприроднадзора, только накопление отходов от добычи углеводородов превышает 7 млн. тонн в год. Значительная часть этих отходов не пригодна для регенерации, но может подвергаться сжиганию. Технологии утилизации этих дешевых энергоносителей с производством тепловой энергии, наряду с высокими теплотехническими показателями, должны обеспечивать экологическую безопасность, в первую очередь – низкий уровень выбросов NO_x и CO . Известные технологии сжигания жидкого топлива не всегда обеспечивают высокую полноту сгорания и соответствие экологическим нормам при использовании низкосортных топлив. Такие топлива плохо воспламеняются, выделяют значительное количество сажи. Для их сжигания нужны специальные конструкции горелочных устройств, обеспечивающие стабильность горения и высокую полноту сгорания топлива без нарушения нормативов по вредным выбросам. Решение этой проблемы важно как с точки зрения улучшения экологической ситуации, так и в целях расширения топливно-сырьевой базы энергетики за счет использования некондиционного жидкого углеводородного топлива (в первую очередь, для обеспечения автономного теплоснабжения, а также для розжига и «подсветки» пылеугольных котлов ТЭС и т.д.).

Создание новых технологий и оборудования основывается на глубоком научном понимании закономерностей физико-химических процессов, определяющих характеристики сжигания жидких углеводородов в зависимости от их состава, динамических и тепловых условий, реализуемых в конкретных условиях и устройствах. Так, разработка перспективных горелочных устройств для сжигания жидких углеводородов требует изучения ряда взаимосвязанных процессов, таких как диспергирование топлива, формирование пространственной структуры двухфазного реагирующего потока, межфазный тепло- и массообмен, образование сажистых частиц,

смесеобразование, воспламенение, газификация и выгорание топлива, производство продуктов сгорания (в том числе – токсичных компонентов). Эти процессы являются предметом многочисленных современных исследований, посвященных разработке научных основ и созданию методов интенсификации процессов тепло- и массообмена в многофазных реагирующих системах. Одним из перспективных направлений является применение метода впрыска пара при сжигании низкокачественных видов жидкого углеводородного топлива и опасных промышленных отходов (утилизация с производством тепловой энергии). Это позволяет в первую очередь снизить концентрации токсичных оксидов азота и повысить эффективность сжигания топлива.

Вода и пар используются во множестве практических приложений на протяжении многих лет: при сжигании водо-топливных эмульсий, в дизельных двигателях, в газотурбинных установках, при газификации твердого топлива и биотоплива. Однако, процессы при сжигании жидких углеводородных топлив в горелочных устройствах с подачей пара на сегодняшний день недостаточно хорошо изучены.

Изучение закономерностей, управляющих характеристиками горения жидкого органического топлива, является актуальной научно-технической проблемой, решение которой имеет принципиальное значение для создания перспективных технологий производства энергии и двигателестроения. Настоящая работа соответствует приоритетному направлению Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации «Переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии». Результаты исследований вносят вклад в развитие научных основ создания инновационных теплоэнергетических технологий, отвечающих высоким современным требованиям энергоэффективности и экологической безопасности при использовании таких нетрадиционных энергоносителей, как некондиционные жидкие углеводородные топлива и производственные отходы. Решение поставленных задач способствует переходу к экологически чистой и ресурсосберегающей теплоэнергетике при расширении сырьевой базы и сокращении накопленных запасов опасных отходов переработки углеводородного сырья.

Цели и задачи

Целью диссертации является разработка и научное обоснование новых технических решений по созданию нового типа горелочного устройства с подачей перегретого водяного пара для энергоэффективного и экологически безопасного сжигания (утилизации) некондиционных жидких углеводородных топлив (и горючих производственных отходов).

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Систематизация сведений об исследуемой проблеме, аналитический обзор зарубежных и отечественных научных информационных источников, выбор и обоснование направления исследований.
2. Разработка и создание экспериментальных установок для исследования характеристик горения жидких углеводородов в присутствии перегретого водяного пара.
3. Разработка и создание горелочного устройства для сжигания жидкого топлива с распылением струей перегретого водяного пара.
4. Экспериментальное (лабораторное) исследование процессов при горении жидких углеводородов с подачей перегретого водяного пара в широком диапазоне изменения управляющих параметров.
5. Определение закономерностей влияния физических параметров (расход топлива, расход и температура пара, способ смесеобразования) на газодинамические, теплофизические и экологические характеристики сжигания некоторых видов жидкого топлива.

Научная новизна

Разработанные оригинальные перспективные горелочные устройства основываются на новых принципиальных технических решениях, позволяющих за счет взаимодействия топлива с высокоскоростной струей перегретого водяного пара обеспечить создание мелкодисперсного двухфазного потока, интенсивное воспламенение и полное выгорание топлива при низком производстве токсичных продуктов.

Научная новизна работы обусловлена как новизной конкретного объекта исследования (способ сжигания топлива – Патент РФ 2219435 (2003), способ

диспергирования топлива – Патент РФ 2450207 (2012) и разработанные оригинальные горелочные устройства для их реализации – Патенты РФ 2684300 (2019), 2647172 (2018)), так и новизной результатов, полученных с применением передовых экспериментальных методов, создающих основу для развития нового направления исследований в рамках теплоэнергетики и опубликованных в высокорейтинговых рецензируемых журналах.

Впервые получены экспериментальные данные о характеристиках газочапельного потока при распылении жидких углеводородов струей перегретого водяного пара или воздуха. Установлено, что режимные параметры (расход и температура газа, соотношение расходов газа и топлива) в рабочем диапазоне слабо влияют на дисперсный состав, преимущественный размер идентифицированных капель составляет 10-20 мкм.

Впервые экспериментально найдены зависимости основных теплотехнических и экологических показателей от параметров пара (температуры и расхода пара) при сжигании в горелочном устройстве жидких углеводородов с распылением струей перегретого водяного пара. Полнота сгорания топлива в режимах с подачей пара достигает 98%. Концентрации CO и NO_x удовлетворяет 3 классу по EN 267, показатели по NO_x в полтора раза ниже нормативного уровня. Показано, что по сравнению с технологией сжигания с подачей струи нагретого воздуха технология паровой газификации позволяет на 30% снизить производство оксидов азота при высокой полноте сгорания топлива.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы определяется важностью полученных результатов для развития таких отраслей знания, как теплофизика и механика многофазных реагирующих сред. Полученные результаты вносят вклад в развитие представлений о закономерностях физико-химических процессов при сжигании жидких углеводородов с подачей перегретого водяного пара и в создание научных основ разработки перспективных теплоэнергетических технологий.

Результаты работы внедрены в учебный процесс на базе Новосибирского государственного технического университета для проведения практических занятий по курсу «Физика горения» на кафедре тепловых электрических станций факультета энергетики.

Полученные результаты обладают высокой практической значимостью и потенциалом масштабного использования в теплоэнергетике и машиностроении. Особая социальная важность результатов связана с перспективой их применения для решения актуальной задачи безопасной и эффективной утилизации отходов добычи, переработки и использования углеводородов, представляющих большую экологическую угрозу.

Практическая значимость полученных результатов подтверждается патентами РФ на изобретения «Горелочное устройство»: 2684300 (2019), 2678150 (2019), 2647172 (2018), 2579298 (2016), 2523591 (2014); и полезную модель 82520 (2018).

Результаты работы внедрены и используются инжиниринговым предприятием ООО «ЗиО-КОТЭС» (г. Новосибирск), выполняющим проектные, пуско-наладочные и конструкторские работы на крупных энергетических объектах, а также осуществляющим проектирование объектов гражданского назначения, строительство «под ключ» автономных источников тепло- и электроснабжения и производство блочно-модульных котельных. «ЗиО-КОТЭС» использует результаты, полученные в рамках работ по Соглашению с Министерством науки и высшего образования РФ № 14.604.21.0185 от 27.09.2017, в котором данное предприятие выступает в качестве Индустриального партнера проекта. Полученные экспериментальные данные использованы при CFD-моделировании процессов горения жидких топлив на этапе верификации математических моделей, применяемых для оценки экологических характеристик и эффективности сжигания жидких углеводородов, усовершенствования способов их сжигания и повышения технико-экономических и экологических показателей.

Методология и методы исследования

В ходе выполнения работ применены методы экспериментального исследования: методы измерения концентрации и дисперсного состава частиц с использованием диффузионного спектрометра аэрозолей; просвечивающая электронная микроскопия – для определения морфологии сажевых частиц; метод цифровой трассерной визуализации (particle image velocimetry, PIV) – для диагностики структуры потоков; метод теневой фотографии (shadow photography, SP) – для анализа структуры и дисперсного состава газочапельных потоков; интерферометрический метод измерения размеров капель (interferometric particle imaging, IPI); particle tracking velocimetry (PTV) –

для измерения скорости капель; методы калориметрии – для измерения тепловыделения при сжигании топлива; методы газового анализа продуктов сгорания; термодарные и оптические методы измерения температуры в пламени.

Положения, выносимые на защиту:

- Разработанная, созданная и испытанная конструкция лабораторного образца перспективного горелочного устройства для сжигания жидкого топлива с распылением струей перегретого водяного пара.
- Результаты экспериментальных исследований характеристик частиц сажи, образующихся в процессе сжигания дизельного топлива с подачей струи перегретого водяного пара (и воздуха).
- Результаты измерений характеристик газочапельных потоков при диспергировании жидкого топлива струей перегретого водяного пара (и воздуха).
- Результаты экспериментальных исследований тепловых и экологических показателей сжигания жидких углеводородов в горелочном устройстве с подачей перегретого водяного пара (и воздуха).
- Закономерности влияния физических параметров (расход топлива, расход и температура пара, способ смесеобразования) на газодинамические, теплофизические и экологические характеристики сжигания исследуемых видов топлива.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов экспериментальных исследований обеспечена: использованием самых современных измерительных методов и устройств при исследовании газодинамических, тепловых и экологических характеристик, хорошо зарекомендовавших себя на практике; повторяемостью и согласованностью результатов измерений, проведенных в разное время; статистической обработкой результатов измерений.

Основные результаты диссертационной работы докладывались на 15 российских и международных научно-технических конференциях: «Наука будущего» (Сочи, 2019), X Всероссийская конференция с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (ИТ СО РАН, Новосибирск, 2018), III Всероссийская научная конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика» с элементами школы

молодых ученых (Ялта, 2018), Всероссийская конференция с элементами школы для молодых ученых «XXXIV Сибирский теплофизический семинар» (ИТ СО РАН, Новосибирск, 2018), IV Всероссийская школа-семинар «Панорамные методы диагностики потоков» (Новосибирск, 2018), Перспективы развития новых технологий в энергетике России (ОАО «ВТИ», Москва, 2017), 9th International Seminar on Flame Structure (Novosibirsk, 2017), Всероссийская конференция «XXXIII Сибирский теплофизический семинар» (ИТ СО РАН, Новосибирск, 2017), XX Всероссийская научная конференция с международным участием «Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии» (ТГУ, Томск, 2016), Научно-практический Симпозиум «Энергия мысли» в рамках лауреатской недели «Глобальная энергия» (ООО «Силовые машины», Санкт-Петербург, 2016), Всероссийская школа-конференция с международным участием «Химия и физика горения и дисперсных систем» (ИХКиГ СО РАН, Новосибирск, 2016), XV Минский международный форум по тепло- и массообмену (Минск, Беларусь, 2016), IX Всероссийская конференция с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (Новосибирск, 2015), Аэрозоли Сибири. XXI Рабочая группа (Томск, 2015), 4th Fire Behavior and Fuels Conference (St. Petersburg, Russia, 2013).

Разработанное горелочное устройство отмечено Дипломами II степени (с вручением серебряной медали) в номинации «Лучший инновационный проект в области: экология, рациональное природопользование, переработка отходов» в конкурсе «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года» на выставке Hi-Tech (Санкт-Петербург, 2015 и 2018).

Кроме этого, результаты работы освещены в научно-популярной форме в ряде СМИ: видеосюжет на телеканале Вести-Новосибирск (26.09.2018) <https://www.vesti.ru/doc.html?id=3064638>, статья в Российской газете (24 июня 2016 пятница № 137 (7005)), видеоролик на канале YouTube <https://www.youtube.com/watch?v=m5uqmeQOiN4> (2014).

Результаты исследований отмечены рядом премий и наград:

– Стипендия Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики (СП-4026.201581) «Закономерности

распыла некондиционных жидких углеводородов при сжигании в режиме с паровой газификацией», 2018-2019 гг.;

– Благодарственное письмо Администрации Советского района города Новосибирска за активное участие в научно-исследовательской работе, предложения по внедрению инновационных проектов на предприятиях и в организациях города Новосибирска, 2017 г.;

– Благодарность ИТ СО РАН за добросовестный труд в Институте, успехи в научных исследованиях и в связи с 60-летием Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 2017;

– Премия мэрии города Новосибирска в сфере науки и инноваций в номинации «лучший молодой исследователь в организациях науки», 2016;

– Стипендия Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики (СП-1410.2015.1) «Сжигание некондиционных жидких углеводородных топлив с паровой газификацией», 2015-2017 гг.;

– Победитель XI Общероссийского конкурса молодежных исследовательских проектов в области энергетики «Энергия Молодости-2014» (НП «Глобальная энергия»).

Исследования, выполняемые в рамках диссертации, получили поддержку в форме грантов под руководством Ануфриева И.С.:

– грант РФФИ № 18-79-10134 «Изучение горения жидких углеводородов в струе перегретого водяного пара применительно к разработке эффективных способов экологически чистой утилизации горючих отходов», 2018-2021;

– грант РФФИ № 17-308-50014-мол_нр «Влияние слабых возмущений на диффузионный режим горения жидких углеводородов», 2017;

– грант РФФИ № 16-38-50006-мол_нр «Тепловизионные исследования пламени при сжигании дизельного топлива с паровой газификацией», 2016;

– грант РФФИ № 15-38-20558-мол_а_вед «Изучение процессов сжигания жидких углеводородных топлив в режиме паровой газификации», 2015-2016;

– грант РФФИ № 15-58-04032-Бел_мол_а «Влияние наноразмерных углеродных частиц на процессы воспламенения и горения жидких органических топлив», 2015-2016;

– грант Некоммерческого партнерства «Глобальная энергия» (в рамках конкурса «Энергия молодости-2014») № МГ-2015/04/01 «Экспериментальное исследование способа интенсификации и экологических характеристик горения жидких углеводородов в оригинальных горелочных устройствах с высокой концентрацией водяного пара», 2015-2016;

– грант РФФИ № 14-08-00177-а «Исследование сажепарового режима горения жидких углеводородов», 2014-2016,

а также при его участии в качестве исполнителя в проекте под руководством академика С.В. Алексеенко:

– Соглашение № 14.604.21.0185 «Разработка научных основ создания новой энергоэффективной и экологически безопасной технологии сжигания некондиционных жидких углеводородных топлив в условиях паровой газификации» (шифр RFMEFI60417X0185), ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», 2017-2020.

Личный вклад автора

Основные научные результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, получены автором лично. Постановка задач исследования и научная проблематика разрабатывались автором как самостоятельно, так и при участии академика РАН Алексеенко С.В. и д.ф.-м.н. Шарыпова О.В. Автор принимал участие в проведении экспериментов, внес определяющий вклад в разработку и создание экспериментальных стендов, разработку измерительных методик, анализ полученных результатов измерений. Исследования характеристик частиц сажи проведены совместно с сотрудниками ИХКГ СО РАН (г. Новосибирск) к.х.н. Баклановым А.М. и к.х.н. Боровковой О.В. Измерения параметров газокапельных потоков и показателей сжигания жидких углеводородов проведены совместно с сотрудниками ИТ СО РАН (г. Новосибирск) м.н.с. Шадриним Е.Ю. и инж.-иссл. Копьевым Е.П., анализ и интерпретация результатов выполнены автором диссертации самостоятельно. Тепловизионные измерения выполнены совместно с зав. кафедрой ТГУ (г. Томск) д.ф.-м.н. Лободой Е.Л., анализ и обобщение результатов выполнены автором диссертации самостоятельно. Новые технические решения, на которые получены патенты РФ,

разработаны совместно с сотрудниками ИТ СО РАН (Алексеев С.В., Шарыпов О.В., Вигриянов М.С., Копьев Е.П.), автор внес существенный вклад в получение результатов и составление заявок.

Представление изложенных в диссертации и выносимых на защиту результатов, полученных в совместных исследованиях, согласовано с соавторами.

Авторство умозаключений, послуживших основой выводов работы, принадлежит соискателю.

Публикации

Результаты, представленные в диссертации, опубликованы более чем в 31 научном труде, в том числе в 17 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК, включая ведущие рецензируемые международные научные журналы, из них 2 статьи опубликованы без соавторов. Получено 5 патентов РФ на изобретения и 1 патент РФ на полезную модель (см. Приложение А).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы и пяти приложений. Работа содержит 254 страницы текста, 70 рисунков и 34 таблицы. Список литературы содержит 201 источник, из них 31 – публикации автора по теме диссертационной работы.

Работа выполнена на кафедре тепловых электрических станций факультета энергетики Новосибирского государственного технического университета.

Содержание работы

Во введении дано обоснование актуальности темы исследований, сформулированы цель и задачи работы, определены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, перечислены и обоснованы применяемые в работе методы исследования, приведены положения, выносимые на защиту, описаны степень достоверности и апробация результатов, охарактеризован личный вклад автора, а также описана структура работы.

В разделе 1 представлен обзор научно-технической литературы, проанализированы отечественные и зарубежные источники по теме диссертации. Описаны основные

особенности сжигания жидкого топлива. При распылении форсунками некондиционного топлива на практике возникают проблемы, связанные с засорением каналов и коксованием элементов форсунки, приводящие со временем к сбою в работе горелочного оборудования. Поэтому является актуальным создание специальных способов получения высокодисперсного устойчивого газочапельного потока для обеспечения эффективного смешения горючих компонентов и окислителя в объеме камеры сгорания.

Выполнен анализ работ по использованию воды (пара) в процессе горения углеводородов, описаны основные эффекты, достигаемые при таком способе сжигания. Показано, что использование водяного пара является эффективным способом снижения содержания NO_x и CO в продуктах сгорания широкого спектра углеводородов. Причина подавления производства оксидов азота NO_x обычно заключается в снижении температуры пламени благодаря увеличению теплоемкости горючей смеси при наличии водяного пара. В отличие от процессов в газотурбинных установках и двигателях внутреннего сгорания, влияние пара на горение жидких углеводородов в горелочных устройствах на сегодня изучено недостаточно полно, ряд важных вопросов остается открытым и требует дальнейшего исследования. В частности, влияние режимных параметров (расход и температура перегрева пара, скорость потока), способов диспергирования и смесеобразования на тепловые и экологические характеристики сжигания топлива.

Проведены патентные исследования жидкотопливных горелочных устройств, показаны основные недостатки аналогов, сделан вывод о том, что исследуемое горелочное устройство обладает новизной и изобретательским уровнем, соответствует условию промышленной применимости. Несмотря на широкое разнообразие конструкций горелочных устройств для сжигания жидкого топлива, задача эффективного и экологически безопасного сжигания некондиционных углеводородов остается по-прежнему актуальной.

Проведен обзор рынка горелочных устройств до 100 кВт на жидком топливе. Маркетинговые исследования показали перспективы коммерциализации и вывода новой продукции на рынок котельного оборудования и горелочных устройств в России.

Обосновано направление исследования и актуальность работы. Проведенные ранее испытания на прямоточных автономных горелках испарительного типа продемонстрировали существенное влияние параметров водяного пара на основные

характеристики процесса. Специфика такого способа сжигания связана с подачей в зону горения перегретого водяного пара, что обеспечивает паровую газификацию углеродосодержащих продуктов термического разложения и неполного сгорания жидкого топлива с образованием водяного газа ($\text{H}_2\text{O} + \text{C} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$), интенсификацию реакции и высокую степень выгорания углерода (сажи). Для данного способа сжигания характерны устойчивое воспламенение, интенсификация горения, высокая полнота сгорания топлива, экономичность, возможность практической реализации в автономных горелочных устройствах различной мощности. Результаты проведенного комплекса экспериментальных исследований свидетельствуют в пользу того, что способ сжигания в струе перегретого водяного пара является перспективным для достижения поставленной цели диссертации по эффективной и экологически безопасной утилизации жидких углеводородов и производственных отходов с получением тепловой энергии.

В разделе 2 приведены результаты экспериментальных исследований характеристик частиц сажи, образующихся в процессе сжигания дизельного топлива в лабораторном образце автономного горелочного устройства испарительного типа с подачей струи перегретого водяного пара или струи воздуха. Исследовалось влияние водяного пара на концентрацию и дисперсный состав сажи.

С помощью диффузионного спектрометра аэрозолей (ДСА), разработанного в ИХКГ СО РАН, найдены преимущественные размеры частиц в потоке, получены распределения частиц по размерам и зависимость концентрации от координаты. В режиме горения с подачей струи пара основное количество частиц на выходе из горелки имеет размер 40 ± 15 нм. Т.е. основную часть от общего количества частиц сажи в потоке составляют первичные, не агрегированные частицы. В режиме горения с подачей струи воздуха спектр распределения частиц по размерам существенно шире, и наиболее представительный размер частиц оказывается примерно вдвое выше. Это означает, что при подаче пара в зону горения часть сажи вступает в реакцию с паром, повышая полноту сгорания топлива.

Концентрация частиц сажи в факеле горелочного устройства достигает 10^8 см^{-3} . Вследствие перемешивания потока с воздухом из окружающей атмосферы концентрация быстро понижается с удалением от основания факела и в продуктах сгорания составляет $5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$.

С использованием просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) изучена

морфология агрегатов, образующихся при коагуляции первичных частиц сажи. В факеле агрегаты имеют цепочно-разветвленную структуру, в продуктах сгорания они имеют более компактную форму с характерными размерами 200–500 нм. Первичные наночастицы в агрегатах характеризуются квази-сферической формой и луковичной структурой, с диаметром около 40 нм, который соответствует характерному размеру первичных частиц, определенному ДСА.

Массовый анализ показал, что 1 м³ продуктов сгорания содержит 35 мг сажи. В относительном выражении, при расходе дизельного топлива в эксперименте 600 г/ч (515 г углерода в час) и среднем объемном расходе уходящих газов 15 м³/ч масса сажи в режиме с подачей перегретого водного пара (расход пара 0,27 кг/ч, температура пара 400 °С) составляет ~0,1 %. Это свидетельствует о высокой степени сгорания топлива в режиме с паром.

Достоинством автономных горелочных устройств является создание потока перегретого водяного пара без использования внешних устройств и источников энергии. В то же время такая конструкция горелочного устройства не позволяет регулировать параметры пара для управления горением. Кроме этого, в испарительных горелочных устройствах сжигание «тяжелых» топлив не является эффективным по причине неустойчивости воспламенения, высокой нестабильности горения в топочной камере, относительно быстрого коксования поверхностей горелок и др. Поэтому для сжигания таких топлив в режиме с паровой газификацией необходима разработка специальных способов подачи топлива и смешения его с паром.

В разделе 3 исследуются характеристики газочапельного потока при диспергировании жидкого топлива струей перегретого водяного пара (и воздуха) применительно к условиям перспективного прямоточного горелочного устройства, реализующего разработанный эффективный способ диспергирования и сжигания некондиционного жидкого топлива. Практическим преимуществом такого способа служит отсутствие контакта жидкого топлива с форсункой и непосредственное распыление топлива высокоскоростной струей пара, что позволяет использовать загрязненное топливо и отходы.

С использованием современных оптических методов диагностики потоков проведены исследования основных параметров газочапельного потока (размеры капель, дисперсный состав, скорость несущей и дисперсной фазы, угол раскрытия струи) при

распылении жидкого топлива струей газа при различных режимных параметрах (расход и температура пара/воздуха, расход и температура топлива).

С помощью метода PIV экспериментально исследована структура течения в высокоскоростной струе газа (несущей фазе), истекающей из форсунки перспективного жидкотопливного горелочного устройства. На примере сжатого воздуха получены характерные поля скорости в однофазном потоке при различных режимных параметрах. Для ряда режимов работы горелочного устройства с подачей перегретого водяного пара, а также с подачей воздуха поведено сопоставление с оценками газодинамических параметров, полученными в приближении одномерного изэнтропического течения. Показано, что течение несущей фазы на выходе из форсунки имеет вид, характерный для сверхзвуковой затопленной струи (максимальная скорость в потоке достигает 458 м/с) с ударно-волновой структурой в окрестности форсунки и наличием «дисков Маха». Угол раскрытия воздушной струи составляет около 20° . Такой угол струи и скорость потока позволяют организовать сконцентрированный газокапельный поток с дальнейшим формированием компактного и устойчивого факела.

Измерения основных характеристик газокапельного потока при распылении жидких углеводородов струей перегретого водяного пара или струей воздуха проведены в открытом пространстве на примере дизельного топлива и отработанного машинного масла при распылении струей перегретого водяного пара или воздуха. В качестве измерительной области выбрана область на оси симметрии форсунки, соответствующая зоне воспламенения в горелочном устройстве. Показано, что в этой области скорость капель достигает 50 м/с и соответствует скорости несущей фазы, т.е. на расстоянии до 60 мм от форсунки происходит диспергирование топлива и скоростная релаксация фаз.

В результате обработки изображений, полученных SP- и IPI-методами получена детальная информация о дисперсном составе газокапельного потока при распылении жидкого топлива высокоскоростным потоком газовой фазы в зависимости от режимных параметров. Характерный диаметр капель во всех исследованных режимах составляет в зоне воспламенения 10-20 мкм, что является достаточным условием для эффективного сжигания таких типов топлива с использованием предложенного способа диспергирования жидкого топлива. Режимные параметры (расход и температура газа, соотношение расходов газа и топлива) в исследуемом диапазоне не оказывают заметного влияния на дисперсный состав. Также размер капель в зоне воспламенения не зависит от

типа используемых жидких углеводородов. Выбор несущей фазы (пар или воздух) тоже не приводит к изменению характерного диаметра капель (10-20 мкм) в области измерений. Но в то же время, перегретый водяной пар помимо распыления оказывает дополнительное положительное воздействие в случае с горением жидкого топлива – понижает производство оксидов азота, вместе с уменьшением количества воздуха, необходимого для горения. Кроме этого, можно сделать вывод, что характерные для некоторых режимов особенности, такие как срыв пламени и высокое содержание СО в продуктах сгорания не связаны с размерами капель.

В разделе 4 описаны экспериментальные исследования характеристик сжигания жидких углеводородов при распылении струей перегретого водяного пара (или воздуха) в зависимости от режимных параметров работы горелочного устройства. Проведена опытная оптимизация режимных параметров горелочного устройства и достигнуто устойчивое воспламенение жидких углеводородов.

Впервые найдены зависимости основных теплотехнических и экологических показателей горелки от температуры и расхода перегретого водяного пара и расхода жидкого топлива. Установлено, что температура перегретого водяного пара в исследуемом диапазоне значений оказывает слабое влияние на процесс сжигания дизельного топлива. Получены распределения температуры в факеле, проанализировано влияние режимных параметров на уровень температуры. Установлено, что увеличение расхода пара приводит к значительному снижению температуры пламени благодаря увеличению теплоемкости горючей смеси при наличии водяного пара, что способствует снижению производства оксидов азота. Построены карты режимов горения дизельного топлива и отработанного машинного масла в струе перегретого водяного пара и воздуха. Установлены границы режимов срыва горения и режимов с высоким содержанием монооксида углерода в продуктах сгорания;

На примере дизельного топлива и отработанного машинного масла определены режимные параметры (массовая доля пара в смеси с топливом 36-38%), при которых обеспечивается высокая полнота сгорания топлива (более 97%), а показатели по содержанию в продуктах сгорания монооксида углерода и оксидов азота соответствуют по нормативу EN 267 третьему классу, показатели по NO_x в полтора раза ниже нормативного уровня. Показано, что по сравнению с технологией сжигания с подачей струи нагретого воздуха технология паровой газификации обладает существенными

экологическими преимуществами: при низком производстве CO позволяет на 30% снизить производство оксидов азота при высокой энергоэффективности.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Предложен и реализован перспективный способ сжигания некондиционных жидких углеводородов в горелочном устройстве с распылением струей перегретого водяного пара. Разработано и создано оригинальное жидкотопливное горелочное устройство распылительного типа, практическим преимуществом которого служит отсутствие контакта жидкого топлива с форсункой и непосредственное распыление топлива высокоскоростной струей пара, что позволяет использовать загрязненное топливо и отходы. На ряд новых технических решений получены патенты РФ.

Применительно к созданному горелочному устройству выполнено экспериментальное исследование характеристик газочапельного потока при распылении жидких углеводородов струей перегретого водяного пара или воздуха. С использованием современных бесконтактных методов в широком диапазоне режимных параметров получены данные о структуре двухфазного потока, дисперсном составе, пространственном распределении скоростей фаз. Определен преимущественный размер идентифицированных капель топлива, составляющий 10-20 мкм для дизельного топлива и отработанного машинного масла.

Впервые экспериментально исследованы тепловые и экологические характеристики горения жидких углеводородов в высокоскоростной струе перегретого водяного пара или воздуха в широком диапазоне режимов работы созданного горелочного устройства.

Получены распределения температуры в факеле, проанализировано влияние режимных параметров на уровень температуры. Установлено, что увеличение расхода пара приводит к значительному снижению температуры пламени благодаря увеличению теплоемкости горючей смеси при наличии водяного пара, что способствует снижению производства оксидов азота.

Изучены основные характеристики сажевых частиц, образующихся при сжигании дизельного топлива в горелочном устройстве с подачей в зону горения струи перегретого водяного пара или струи воздуха. Их преимущественный размер на выходе из горелочного устройства составляет 40 ± 15 нм, а концентрация достигает 10^8 см⁻³ и понижается до $5 \cdot 10^6$ см⁻³ в продуктах сгорания при массовом содержании 35 мг/м³ (что

эквивалентно 0.1% массы углерода топлива и свидетельствует о высокой полноте сгорания).

В широком диапазоне режимных параметров измерены тепловая мощность горелочного устройства и концентрации CO и NO_x в продуктах реакции. Полнота сгорания топлива в режимах с подачей пара достигает 98%. Показано, что исследуемый способ сжигания жидкого топлива с запасом удовлетворяет наиболее жестким существующим нормативам (третий класс EN 267): по количеству NO_x на единицу тепловой энергии показатели в полтора раза ниже нормативного уровня для режимов с низким производством CO.

Найдена эмпирическая зависимость, позволяющая для заданной мощности горелки определить значения расхода пара и топлива, обеспечивающие минимальные выбросы CO.

Проведено сравнение теплотехнических и экологических показателей сжигания дизельного топлива в режимах горения в струе перегретого водяного пара и в струе нагретого воздуха. Показаны существенные преимущества сжигания с использованием пара: в области минимальных {CO}<20 мг/кВт ч значения {NO_x} оказываются на 30 % выше в режиме с воздухом.

Построены карты режимов горения дизельного топлива и отработанного машинного масла в струе перегретого водяного пара и воздуха. Установлены границы режимов срыва горения и режимов с высоким содержанием монооксида углерода в продуктах сгорания.

Установлено, что температура перегретого водяного пара (или воздуха) оказывает слабое влияние на показатели горения исследуемых видов горючего в горелочном устройстве.

В результате выполненного комплексного экспериментального исследования научно обоснован перспективный способ энергоэффективного сжигания некондиционных видов жидкого углеводородного топлива и производственных отходов в струе перегретого водяного пара, обеспечивающий низкое содержание монооксида углерода, оксидов азота и сажи в продуктах сгорания, удовлетворяющее самым жестким экологическим нормативам.

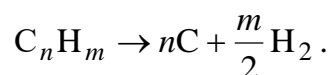
1 ОБЗОР НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ. ОБОСНОВАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ГОРЕНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА

Процесс горения жидких углеводородов можно разделить на следующие стадии [1], [2], [3]: подогрев и испарение, термическое разложением топлива (пиролиз), образование газообразных горючих компонентов и смешение с окислителем, воспламенение и газофазное горение. Возможна также стадия механического диспергирования конденсированного топлива в результате того или иного динамического воздействия.

Если процесс нагревания и испарения частиц топлива протекает быстро и при этом наблюдается окисление, то создаются наиболее благоприятные условия для полного сгорания, в противном случае происходит глубокий распад углеводородов с образованием трудносжигаемых частиц. Если частицы топлива мелко распылены и равномерно распределены в несущем потоке, то создаются условия быстрого нагрева и испарения частиц и легкого их соединения с кислородом вследствие большой поверхности контакта частиц и хорошего их смешения с воздухом.

При нагреве жидкого топлива с недостатком воздуха происходит испарение углеводородов и их термическое разложение, сопровождающееся расщеплением углеводородов [2]. Конечная степень расщепления углеводородов характеризуется выражением:

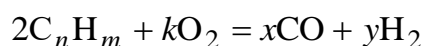


Однако, чаще всего расщепление ограничивается образованием легких и тяжелых углеводородов. Простейшие, легкие углеводороды и водород быстро сгорают при благоприятных условиях (необходимая температура, наличие кислорода). Тяжелые, высокомолекулярные углеводороды и сажистый углерод очень трудно сжигаются и вследствие этого в значительной мере либо уносятся из камеры сгорания несгоревшими, либо откладываются в виде кокса на поверхностях камеры. Копоть и сажа в пламени

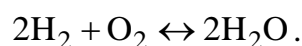
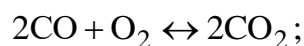
также являются результатом образования тяжелых, высокомолекулярных углеводородов.

Разложение углеводородов идет симметрично при сравнительно низких температурах (например, для мазута – до 600 °С). При более же высоких температурах (> 650 °С) распад молекул идет несимметрично: наряду с легкими углеводородами образуются тяжелые углеводородные комплексы, наиболее трудно сжигаемые.

При достаточном количестве кислорода углеводороды окисляются. Начальная стадия окисления проходит с образованием горючих газов – окиси углерода и водорода [2]:



В результате облегчается конечная стадия горения, проходящего по реакциям:



Для лучшего горения жидкого топлива необходимо обеспечить: быстрое и наиболее тщательное смешение частиц топлива и воздуха; предварительное мелкое распыление, увеличивающее свободную активную поверхность частиц горючего, взаимодействующего с кислородом воздуха; подвод к основанию факела всего необходимого для горения воздуха; создание условий движения воздуха и топлива, обеспечивающих наиболее интенсивное их перемешивание (завихрение); интенсивное и быстрое протекание стадии подогрева и испарения, для чего необходима высокая температура в области, куда подается топливо-воздушная смесь.

Образующаяся после прохождения первых стадий горения газовая смесь легко воспламеняется и быстро сгорает. Горение газовой смеси можно ускорить, повышая давление и ее температуру, используя турбулентность, а также применяя катализаторы.

Важно также, чтобы образование частиц тяжелых углеводородов и сажистого углерода, неизбежное в той или иной степени, происходило до зоны интенсивного горения газовой смеси, или в крайнем случае, в этой зоне, чтобы частицы не уносились в атмосферу, а успевали полностью сгореть [3].

Таким образом, первые подготовительные стадии имеют очень важное значение для более эффективного сжигания жидкого топлива. Они же в известной мере определяют роль, назначение форсунок и предъявляемые к ним требования.

Учитывая, что горение жидкого топлива происходит в паровой фазе, процесс горения капли жидкого топлива можно представить следующим образом [1].

Капля жидкого топлива окружена атмосферой, насыщенной парами горючего. Вблизи от капли по сферической поверхности устанавливается зона горения. Химическое реагирование смеси паров жидкого топлива с окислителем происходит весьма быстро, поэтому зона горения весьма тонка. Скорость горения определяется наиболее медленной стадией – скоростью испарения горючего. В пространстве между каплей и зоной горения находятся пары жидкого топлива и продукты горения. В пространстве вне зоны горения – воздух и продукты сгорания.

В зону горения изнутри диффундируют пары топлива, а снаружи – кислород. Здесь эти компоненты смеси вступают в химическую реакцию, которая сопровождается выделением тепла. Из зоны горения тепло переносится наружу и к капле, а продукты сгорания диффундируют в окружающее пространство и в пространство между зоной горения и каплей. По мере выгорания капли из-за уменьшения поверхности общее испарение уменьшается, зона горения суживается и исчезает при полном выгорании капли. Так протекает процесс горения капли полностью испаряющегося жидкого топлива, находящейся в покое в окружающей среде или движущейся вместе с ней с одинаковой скоростью.

Количество кислорода, диффундирующее к поверхности капли при прочих равных условиях, пропорционально квадрату ее диаметра, поэтому установление зоны горения на некотором удалении от капли обуславливает большую скорость ее горения по сравнению с такой же частицей твердого топлива, при горении которой химическая реакция практически протекает на самой поверхности.

Так как стадии газофазного горения предшествует испарение жидких углеводородов, то интенсификация горения напрямую связана с интенсификацией процессов испарения и смесеобразования [1]. Это достигается путем увеличения удельной межфазной поверхности путем распыления жидкого топлива через форсунки, которые фрагментируют топливо на капли и обеспечивают хорошее смесеобразование посредством равномерного распределения топлива в воздухе.

Воздух, необходимый для горения, подается в устье форсунки, увлекает мелко распыленное жидкое топливо и образует в топочной камере неизотермическую затопленную струю. Струя, распространяясь, нагревается за счет увлечения продуктов сгорания высокой температуры. Капли жидкого топлива, нагреваясь, благодаря конвективному теплообмену в струе, испаряются. Нагрев распыленного топлива происходит также за счет поглощения ими тепла, излучаемого топочными газами и поверхностью камеры сгорания.

На начальном участке и в особенности в пограничном слое струи интенсивный нагрев вызывает быстрое испарение капель. Пары горючего, смешиваясь с воздухом, создают газоздушную горючую смесь, которая, воспламеняясь, образует факел.

Температура и концентрация газоздушной смеси изменяются по сечению струи. По мере приближения к внешней границе струи температура повышается, а концентрация компонентов горючей смеси падает. Скорость распространения пламени в паровоздушной смеси зависит от состава, концентрации и температуры и достигает максимальной величины в наружных слоях струи, где температура близка к температуре окружающих топочных газов несмотря на то, что здесь горючая смесь разбавлена продуктами сгорания. Поэтому воспламенение в факеле начинается у корня с периферии и затем распространяется вглубь струи на все сечение, достигая ее оси на значительном расстоянии от форсунки, равном перемещению центральных струй за время распространения пламени от периферии до оси. Зона воспламенения принимает форму вытянутого конуса, основание которого находится на малом расстоянии от выходного сечения амбразуры горелки.

Положение зоны воспламенения зависит от скорости смеси; зона занимает такое положение, при котором во всех ее точках устанавливается равновесие между скоростью распространения пламени и скоростью движения. Скорость струи в центральной части, имеющая максимальное значение, снижается по мере продвижения в топочном пространстве, определяя длину зоны воспламенения местом, где скорость падает до абсолютной величины скорости распространения пламени.

Горение основной части парообразных углеводородов происходит в зоне воспламенения, занимающей наружный слой факела небольшой толщины. Горение высокомолекулярных углеводородов, сажи, свободного углерода и неиспарившихся капель жидкого топлива продолжается за зоной воспламенения и определенного

пространства, обуславливающего длину факела.

Зона воспламенения делит пространство, занимаемое факелом, на две области [1]: внутреннюю и наружную (Рисунок 1.1). Во внутренней области протекает процесс испарения и образования горючей смеси. Здесь парообразные углеводороды подвергаются нагреву, который сопровождается их окислением и расщеплением. Процесс окисления начинается при сравнительно низких температурах – порядка 200-300 °С для мазута. При температурах 350-400 °С и выше наступает процесс термического расщепления.

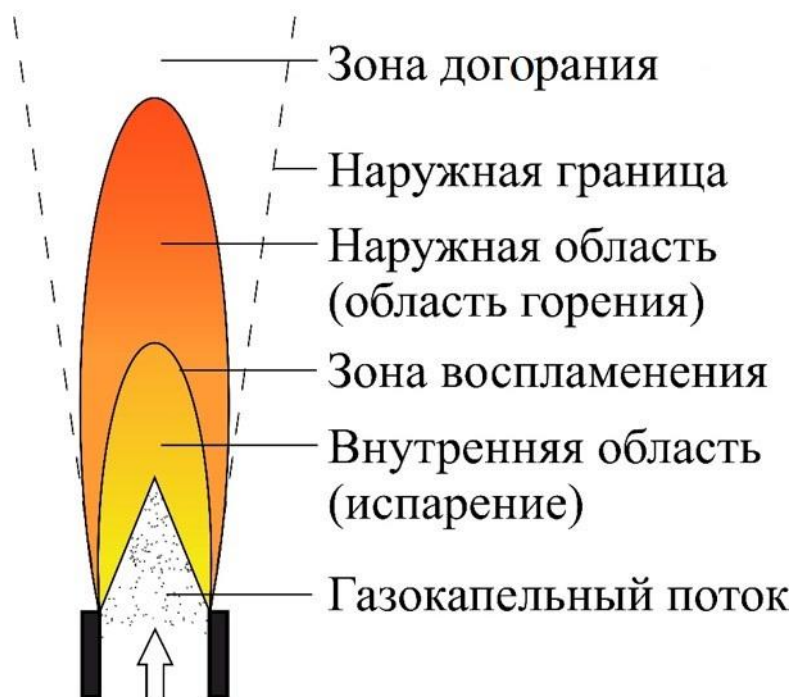


Рисунок 1.1 – Схема горения диспергированного жидкого топлива

Диспергированное жидкое топливо центральных струй факела при своем движении во внутренней области до зоны воспламенения находится в среде, менее насыщенной кислородом, и более длительно пребывает в этой области. В этих условиях пары углеводородов, обладая определенной теплоустойчивостью, продолжают нагреваться до некоторого температурного предела, после которого наступает процесс теплового расщепления. В случае местного недостатка кислорода процесс расщепления может продолжаться и во внешней зоне. Характер расщепления главным образом зависит от температуры и в меньшей степени от природы сжигаемого топлива.

В факеле зажигание капель осуществляется за счет конвективного нагрева; вокруг каждой капли устанавливается зона горения. Горение капли сопровождается химическим недожогом в виде сажи и СО. Капли высокомолекулярных углеводородов при горении дают твердый остаток – кокс.

Образующиеся в факеле твердые соединения – сажа и кокс сгорают так же, как происходит гетерогенное горение частиц твердого топлива. Сажа, находящаяся в мелкодисперсном состоянии, раскаляясь, дает сильное излучение, факел получается ярко-желтого цвета, светящимся. Затяжка процесса гетерогенного горения сажи при недостатке воздуха и образование СО в процессе восстановления СО₂ приводят к значительному химическому недожогу.

Свободный углерод и сажа, в области с высокой температурой при наличии достаточного количества воздуха могут сгореть. В случае же локального недостатка воздуха или недостаточной температуры они сгорают не полностью с некоторой химической неполнотой горения, окрашивая продукты сгорания в черный цвет – коптящий факел.

Зона догорания газообразных продуктов неполного сгорания и твердых частиц, следующая за зоной горения, увеличивает общую длину факела.

Факелу необходимо достаточное пространство для развития процесса горения, т.к. в случае соприкосновения продуктов сгорания (до завершения процесса горения) с холодными поверхностями нагрева температура факела может настолько понизиться, что содержащиеся в газах недогоревшие частицы сажи и свободного углерода, а также высокомолекулярные углеводороды не смогут сгореть.

1.2 ДИСПЕРГИРОВАНИЕ ЖИДКОГО ТОПЛИВА

Для эффективного и экономичного использования жидкого топлива в горелочных устройствах необходимо подготовить топливо к сжиганию, мелко и равномерно распылив его и хорошо смешав с окислителем [1]. Распыление жидкого топлива является ключевым этапом при разработке эффективных горелочных устройств. Увеличение удельной площади межфазной поверхности при диспергировании повышает скорость испарения топлива и интенсивность межфазного обмена энергией и импульсом. Качество диспергирования топлива определяет эффективность

смесеобразования, стабильность воспламенения, скорость химической реакции и полноту выгорания топлива, тепловыделение и состав продуктов сгорания (в том числе – эмиссию токсичных компонентов). Как правило, распыление жидкого топлива осуществляется форсункой, которая является основным инструментом для регулирования, распыления топлива, смешения его с окислителем и создания требуемого по форме, длине и направлению факела. Форма и длина факела должны соответствовать технологическим требованиям, однако горение топлива должно заканчиваться в рабочем пространстве печи или в топке котла. Выполнение этой задачи достигается хорошей работой форсунки и правильным выбором формы и размеров камеры сгорания. Форма и размеры факела должны обеспечить создание наиболее простой и экономичной топочной камеры. Нецелесообразно создавать топки с увеличенными камерами горения, с форкамерами, рассекателями и т.п. только потому, что факел форсунки вызывает потребность в таком усложнении. Факел форсунки должен быть приспособлен к наиболее простой и рациональной форме камеры, а не наоборот. При этом форсунка должна быть относительно недорогой, удобной и простой в эксплуатации, а ее конструкция и монтаж – несложными.

С учетом этого, можно сформулировать основные требования, предъявляемые к форсункам [2]:

- эффективное распыление жидкого топлива и создание однородного мелкодисперсного газочапельного потока;
- тщательное перемешивание топлива и окислителя в самой форсунке или непосредственно за нею до выхода смеси в топочную камеру;
- тонкое и легкое регулирование расхода с максимальным использованием энергии распылителя и сохранением нужного соотношения топливо-окислитель при различных режимах;
- стабильное воспламенение, устойчивый факел требуемой формы и длины;
- прочность и простота конструкции;
- надежность в эксплуатации, отсутствие засоряемости, подтеков;
- удобство эксплуатации, ремонта, профилактических работ.

По основным конструктивным признакам и по способу распыления все форсунки можно разделить на четыре группы:

- 1) механические – форсунки непосредственного распыления топлива;

2) высокого давления – форсунки с распыляющей средой высокого давления (пневматические);

3) низкого давления – форсунки с распылением вентиляторным или эжекторным воздухом;

4) комбинированные, преимущественно форсунки комбинирования механического и паро-воздушного распыления.

Форсунки каждой группы можно классифицировать по ряду других признаков.

Механические форсунки делятся на:

По движению частиц топлива на:

– брандспойтные – с прямоструйным, осевым движением частиц топлива, продавливаемого через одно или несколько отверстий;

– вихревые – с завихривающимися винтовыми или тангенциальными каналами;

– центробежные – с тангенциальным подводом топлива в камеру сгорания, создающим центробежные силы распыления;

– вращающиеся – с распылением топлива вращающимися элементами форсунки.

Форсунки высокого давления делятся:

По типу распыляющей среды – на паровые и воздушные.

По форме выходного отверстия – плоские (или щелевые) и круглые.

По движению смеси топлива и распылителя на: прямоструйные (большинство форсунок) и вихревые.

По способу распыления и образования смеси с распылителем: с внутренним распылением и смесеобразованием и с наружным распылением и смесеобразованием.

По всасывающему действию распылителя на: эжекционные и безэжекционные.

По числу ступеней распыления на: одноступенчатые, двухступенчатые и многоступенчатые.

Форсунки низкого давления делятся:

По относительному движению воздуха и топлива на: прямоструйные, встречных потоков; вихревые; турбулентные.

По способу распыления: одноступенчатого распыления; двухступенчатого распыления; внутреннего распыления; смешанного распыления.

По способу регулирования: с переменными выходными скоростями воздуха и топлива и неизменным выходным сечением; с регулируемым у входа сечением для

воздуха; двухпроводные с нерегулируемым первичным потоком и регулируемым вторичным потоком воздуха; с регулированием у входа сечения для воздуха и топлива; сблокированного регулирования – с изменением выходных сечений и постоянными выходными скоростями воздуха и топлива.

Комбинированные форсунки делятся:

По комбинации способов распыления на: паро-воздушные с комбинированным распылением вентиляторным воздухом и паром и паро-механические или воздушно-механические.

Недостатками механических форсунок является:

- грубое распыление и недостаточное смешение с воздухом. Необходимость больших избытков воздуха. Возможность полного сжигания лишь в больших печах;
- частое засорение форсунок за счет узких каналов, и как следствие – ограничение минимальных размеров форсунки;
- неблагоприятные условия регулирования за счет дросселирования топлива. Сложность регулирования другими способами и недостаточная тонкость регулирования.

Недостатки форсунок высокого давления:

- большой расход энергии на распыление, который значительно выше, чем для механических форсунок и форсунок низкого давления;
- недостаточно хорошее смесеобразование с основным воздухом, необходимым для горения;
- очень длинный факел у большинства круглых форсунок, что требует увеличенных размеров топki.

Недостатки форсунок низкого давления:

- сравнительно большие размеры воздухопроводов к форсункам, ограничивающие их производительность;
- трудности применения высокого подогрева воздуха (подогрев воздуха ограничивается температурой 300 °С).

Комбинированные форсунки сочетают особенности описанных форсунок других типов.

Общими минусами форсунок для распыления жидкого топлива является их коксование в процессе работы за счет прямого контакта топлива с металлическими поверхностями форсунки и излучением от факела. Со временем это приводит к сбою в

работе оборудования и требует профилактических или ремонтных работ, что снижает надежность устройств. Кроме этого, использование форсунок является эффективным для распыления качественных видов топлива. В случае сжигания некондиционного жидкого топлива, загрязненного механическими примесями или водой, использование форсунок не является эффективным, т.к. происходит их засорение. Поэтому является актуальным создание специальных способов получения высокодисперсного устойчивого газочапельного потока для обеспечения эффективного смешения горючих компонентов и окислителя в объеме камеры сгорания.

Распыление жидкого топлива представляет сложный процесс распада струи топлива и ее дробления на мелкие капли под влиянием механического воздействия распылителя, завершаемый испарением и горением капель в потоке. Основные факторы распыления: разность скоростей среды (распылителя) и топлива, плотность среды (распылителя), температура среды и топлива, поверхностное натяжение жидкости, турбулентность потоков, взаимное направление и углы встречи струй топлива и распылителя, поверхность и время взаимодействия соприкасающихся струй топлива и распылителя, отношения масс распылителя и топлива, испаряемость топлива, перепад давления топлива.

Качество распыления определяется размером капель, их однородностью и равномерностью распределения в камере сгорания, а также интенсивность распада капель, сопровождающегося значительным испарением. Размеры капель жидкого топлива для его эффективного сгорания в среднем должны составлять 40-50 мкм в диаметре. В монографии [4] приведена классификация различных категорий дисперсной фазы, согласно которой распыленное топливо не должно превышать 100 мкм. В [5] найден оптимальный для воспламенения размер частиц жидкого топлива – менее 30 мкм.

Важной характеристикой при диспергировании жидкого топлива является скорость распылителя (несущей фазы). Согласно [2], выходная скорость распылителя должна составлять 60÷400 м/с. При этом с увеличением числа Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{\rho U d}{\mu} = \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \frac{d}{v}$$

эффективность распыления повышается, т.е. увеличение скорости топливо-воздушной смеси и размеров форсунки должно благоприятно отражаться на качестве распыления. Здесь ρ – плотность среды, U – относительная скорость между воздухом и жидкостью, d – диаметр сопла форсунки, μ – коэффициент динамической вязкости среды; p – давление в форсунке, ν – коэффициент кинематической вязкости среды.

Для определения режима распада капли можно использовать число Вебера We [6], если значение числа Онезорге $Oh < 0.1$ [7]. Oh характеризует отношение силы вязкого трения к корню квадратному из произведения сил поверхностного натяжения и сил инерции [8]:

$$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\rho d \sigma}}$$

где μ – динамическая вязкость, ρ – плотность, σ – поверхностное натяжение жидкости, d – характерный размер капли.

Согласно [9], начальный распад струи жидкости происходит аналогично распаду капли, внезапно попадающей в высокоскоростную газовую струю, и определяется числом Вебера:

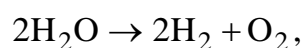
$$We = \frac{\rho_g U_g^2 D}{\sigma}$$

где ρ_g – плотность распыляющего газа, U_g – характерная скорость газа, D – характерный размер топливной струи.

1.3 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДЫ И ПАРА ПРИ СЖИГАНИИ УГЛЕВОДОРОДОВ

Использование воды и пара в процессе горения является известным способом снижения концентрации NO_x [10], [11]. Причина подавления производства оксидов азота NO_x обычно заключается в снижении температуры пламени благодаря увеличению теплоемкости горючей смеси при наличии водяного пара [12]. Вода и пар используются во множестве практических приложений на протяжении многих лет, начиная от снижения тепловой нагрузки и подавления детонации в камере сгорания [13], [14], заканчивая диспергированием тяжелых топлив [15] и сжиганием водо-топливных эмульсий [6], [16], [17], [18], [19], [20].

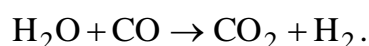
Известно [6], что под действием высокой температуры возможна не только термическая диссоциация молекул паров воды



но и диссоциацию на водород и гидроксил, т.е.

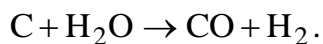
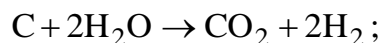


В парах воды, нагретых до $1000\div 1650$ °С появляется гидроксил [6]. Наличие в пламени большого количества активных центров гидроксила и атомарного водорода ($\text{OH} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{H}$) может во много раз ускорить реакцию окисления и горения углеводородных топлив. Ускоряющее действие водяных паров на процесс горения окиси углерода объясняется суммарной реакцией



Последующее окисление водорода приводит к образованию гидроксила OH и атомов H и O , которые являются активными центрами.

Основным элементом химического недожога топлива является сажа. Поэтому представляет интерес реакции газификации углерода



Выделяющийся водород реагирует с кислородом значительно активнее и быстрее, чем частицы углерода. Обе эти реакции носят эндотермический характер, происходят в зоне высоких температур и низких давлений.

Одним из недостатков струйного смесеобразования является локальное переобогащение топливом центральной части топливо-воздушного факела. Именно здесь, при высоких температурах, имеющих место в камере сгорания, создаются благоприятные условия для термического разложения топлива, сопровождающегося интенсивным выделением свободного углерода (сажи). Сажа реагирует с кислородом недостаточно активно, поэтому процесс сгорания затягивается, и характеристика тепловыделения оказывается неоптимальной. Кроме этого, часть сажи не успевает сгорать за время пребывания в камере сгорания и частично выбрасывается в атмосферу, что снижает полноту сгорания топлива.

В этом случае наличие водяных паров в зоне реакции играет роль катализатора химических реакций окисления и газификации углерода. В работе [21] показано, что газификация образующегося углерода позволяет существенно сократить продолжительность горения, т.к. водород окисляется гораздо быстрее сажи.

Образующуюся в процессе паровой газификации углерода горючую смесь ($\text{CO} + \text{H}_2$) называют «водяным газом» или синтез-газом. Факт получения горючего газа через разложение водяного пара раскаленным углем открыт был итальянским ученым, профессором Фелицием Фонтана, жившим в 1730-1805 гг [22]. Водяной пар при прохождении через раскаленные угли разлагается, при чем образуется водород, окись углерода и углекислый газ. Количество последней зависит от температуры, при которой происходит разложение. При 500 °С происходит полное разложение на водород H_2 и углекислый газ CO_2 , а при 1000÷1200 °С на водород и монооксид углерода CO , согласно приведенным выше формулам. Таким образом, основными составляющими «водяного газа» являются водород и оксид углерода. Поэтому для оценки теплотворной способности «водяного газа» учитываются количество тепла при сгорании водорода в воду и оксида углерода в углекислый газ. Согласно [22], на превращение воды в

парообразное состояние затрачивается около 8 % теплотворной способности углерода.

Газификация – преобразование органической части твердого или жидкого топлива в горючие газы при высокотемпературном нагреве (1200-1500 °С) с образованием окиси углерода, водорода и двуокиси углерода [23-37]. Этот процесс сопровождается термическим разложением углеводородов с выделением свободного углерода (сажи) и образованием углеводородных газов и водорода. В качестве окислителя для газификации используют воздух, водяной пар, кислород (или обогащенный им воздух), углекислый газ или их смеси. Процесс газификации близок к процессу горения топлива, но газификация есть неполное окисление топлива при недостатке кислорода.

Следует различать пиролиз – способ термохимической переработки топлива в химические продукты, основанный на нагреве топлива без доступа окислителя до температуры 450-1800 °С.

Газификация является сложным гетерогенным физико-химическим процессом, можно выделить следующие этапы процесса газификации [29]: нагрев и испарение топлива; пиролитическое разложение топлива на газообразные продукты и твердый сажный остаток; газификация сажи; горение топлива. Очередность зависит от способа организации процесса. Стадии пиролиза и газификации могут идти последовательно (газификация после пиролиза), либо параллельно. Важно отметить, что пиролиз является необходимой составной частью процесса газификации.

Главным преимуществом технологии газификации жидкого топлива с экологической точки зрения является сравнительно низкий уровень негативного воздействия на окружающую среду. Это, в первую очередь, обусловлено достаточно продолжительным нахождением газообразных продуктов газификации сначала в зоне окисления (горения) при температурах от 1000-1200 °С и выше. Такие условия препятствуют образованию различных оксидов, в т.ч. азота и серы.

Значительная часть современных исследований, близких по методологии к настоящей работе, посвящена проблеме снижения эмиссии токсичных продуктов сгорания биотоплив [23], [24], [25], [26], [38], [39]. Причем основным инструментом являются экспериментальные методы, поскольку численное моделирование горения нетрадиционных видов топлива сталкивается с принципиальными трудностями, главной из которых является отсутствие данных о кинетике термического разложения, газификации, которые известны лишь для типичных топлив [40], [41].

Множество современных исследований, в частности, зарубежных, направлены на изучение процессов в дизельных двигателях при впрыске воды и пара [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48], [49], [50], [51], [52], [53], [54]. Zhao и др. [42] отмечают, что впрыск пара в дизельный двигатель позволяет снизить расход топлива до 10%, при температуре пара 600 К и соответствующих массовых концентрациях пара от 10 % до 12 % при разных скоростях струи (Рисунок 1.2). Температура пара оказывает слабое влияние на удельный расход топлива по сравнению с расходом пара и временем впрыска. Это связано с тактами работы цилиндров и соответствующей температурой внутри него. При этом показано, что впрыск «жидкой» воды не влияет на экономию топлива, по причине низкой в сравнении с паром температуры, что снижает температуру в цилиндре и, следовательно, задержка зажигания становится больше.

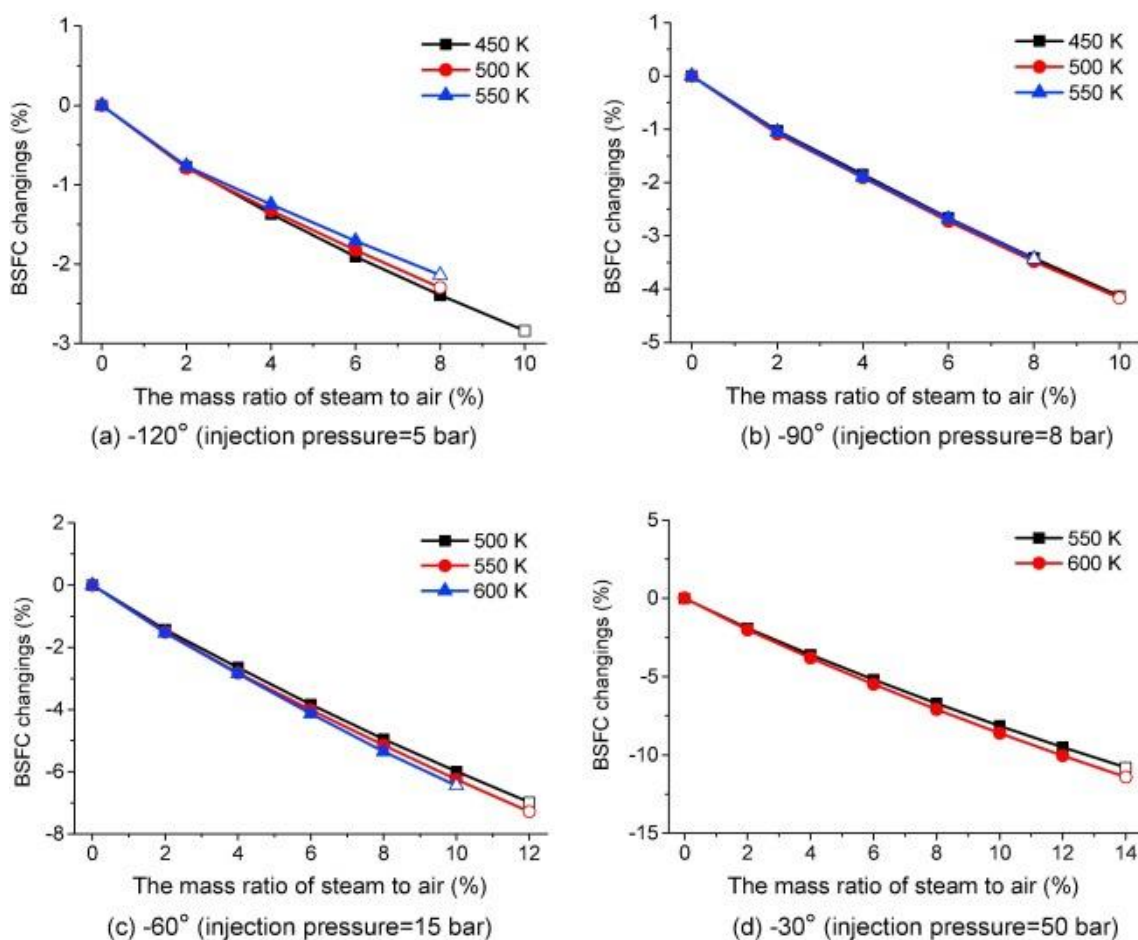


Рисунок 1.2 – Влияние массового расхода пара, температуры пара и времени впрыска пара на удельный расход топлива дизельного двигателя [42]

Метод впрыска пара (steam injected method, SIM) впервые предложил Parlak и др. [43]. Такой метод позволяет снизить выбросы NO_x на 33% по сравнению со стандартными условиями для одноцилиндрового безнаддувного дизельного двигателя. Kokkulunk и др. [44], [45], [46] исследовали влияние впрыска пара и рециркуляции выхлопных газов на характеристики двигателя и выбросы NO дизельного двигателя с прямым впрыском. Этот метод снижает выбросы NO до 46% по сравнению с дизельным двигателем с впрыском пара. На рисунке 1.3 показаны результаты сравнений характеристик дизельного двигателя с впрыском оптимального количества пара (20%) и без него. Максимальное понижение NO достигает 22,4 %, при этом наблюдается уменьшение пиковых температур внутри цилиндров.

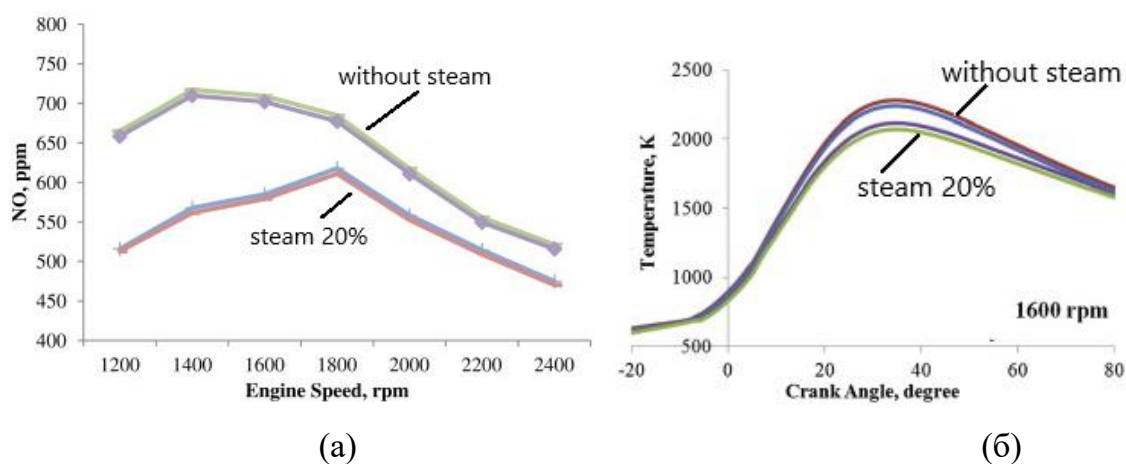


Рисунок 1.3 – Сравнение выбросов NO (а) и температуры внутри цилиндра (б) при работе дизельного двигателя с подачей пара и без [46]

Gopca с соавторами [47], [48] провели теоретическое исследование, чтобы сравнить дизельный двигатель с впрыском пара и дизельный двигатель с циклом Миллера с использованием двухзонной модели сгорания. В работе [48] рассмотрено влияние впрыска пара на рабочие характеристики и параметры выбросов дизельного двигателя с циклом Миллера. Установлено, что при совместном использовании SIM-метода и цикла Миллера, снижается содержание NO_x на 48% при концентрации пара 30%, при этом крутящий момент и эффективность снижаются до 6,4% и 9,2%. Также Gopca [49] применил SIM-метод в дизельном двигателе, работающем на смеси дизель-этанол. Результаты показали, что метод может улучшить характеристики двигателя и уменьшить выбросы NO .

Zhu и др. [50], показали, что массовый расход пара оказывает гораздо большее влияние на характеристики подачи воздуха турбокомпрессора, чем температура пара.

Parlak с соавторами [51] исследовали влияние впрыска пара на дизельный двигатель, работающий на метиловом эфире табачного масла. Показано сокращение выбросов NO_x и дыма при небольшом увеличении выбросов HC и CO.

Mohapatra [52] и Patnaik [53] отмечают повышение эффективности характеристик горения и снижение выбросов дизельного двигателя при совместном воздействии инъекции пара и хлорида железа (FeCl₃) в качестве топливной добавки.

Другим направлением использования воды в процессе горения является впрыск пара в газотурбинных [55], [56], [57], [58], [59], [60], [61], как метода эффективного подавления термического NO_x. В [57] показано, что при сжигании синтез газа в газовой турбине в присутствии водяного пара обеспечивается наибольшее снижение выбросов NO_x по сравнению с эффектом от таких разбавителей как CO₂ и N₂. Kilani и др. [59], показали, что система впрыска пара за пределами генератора пара с рекуперацией тепла приводит к повышению эффективности примерно на 6%. Renzi и др. [60], [61] оценили производительность микрогазотурбины мощностью 100 кВт, работающей на природном газе и синтезе из биомассы, как в стандартной конфигурации, так и в конфигурации с впрыском пара. Предложена правильная стратегия впрыска, прирост электрической мощности оценивается в 24%. При этом выбросы NO_x сокращаются на 75% [61].

Однако, ограниченное количество работ посвящено исследованиям влияния пара при горении жидкого топлива в камерах сгорания, например [62], [63]. В работе [62] рассматриваются три варианта подачи пара при сжигании керосинового спрея (Рисунок 1.4): пар подается непосредственно в топливо и распыляется вместе с ним; пар смешивается с воздухом и подается в камеру сгорания; пар подается через боковые отверстия в камере сгорания. Авторы отмечают снижение концентрации NO при подаче пара (Рисунок 1.5). Однако, в работе используется жидкое топливо высокого качества (керосин), которое хорошо воспламеняется. Кроме того, используется перегретый пар при температуре 110 °С, т.е. с низкой степенью перегрева. Не исследовано влияние температуры пара на образование NO_x, используется распылительная горелка, в которой сжигание жидких углеводородных отходов будет проблематично.

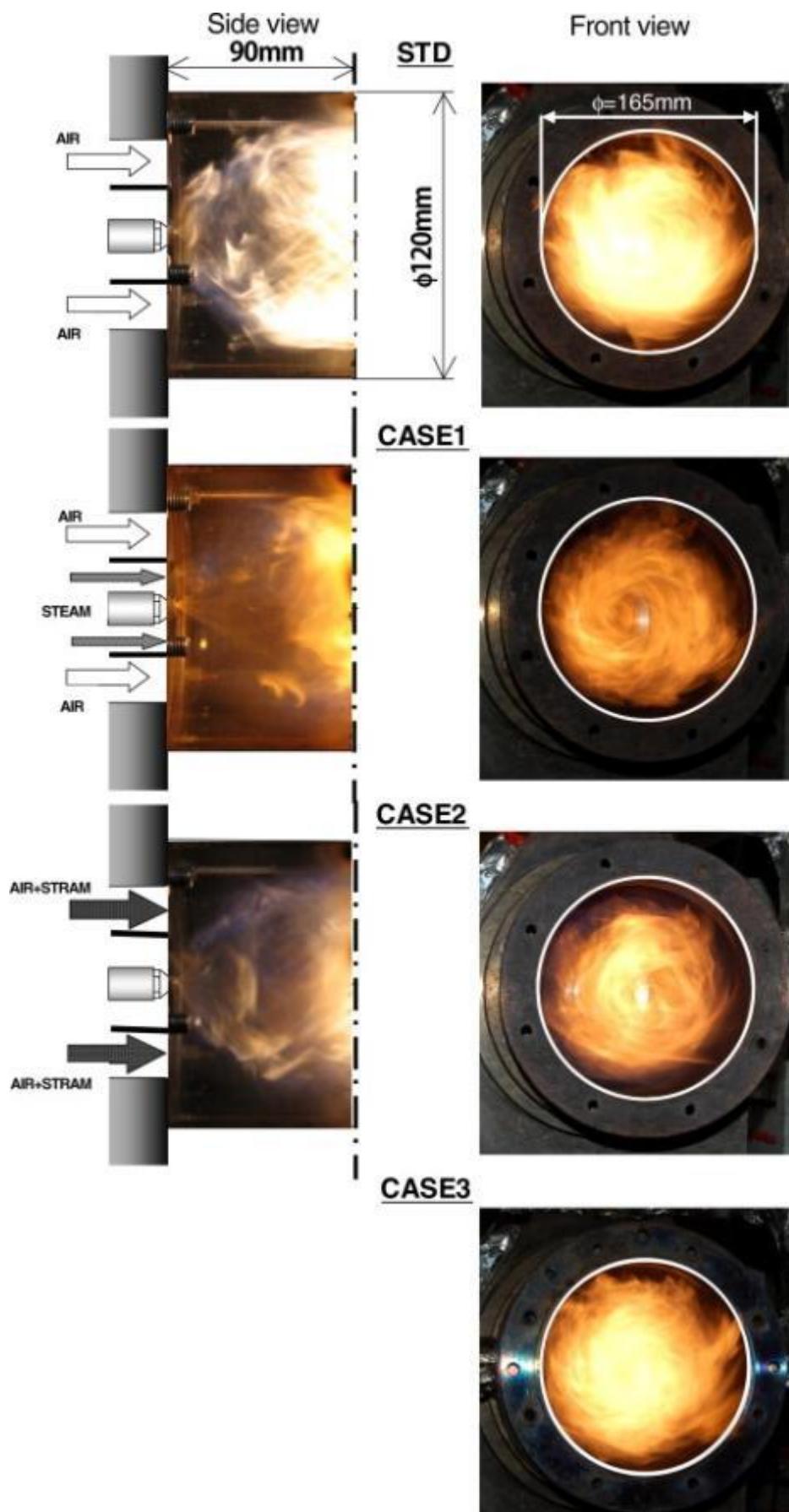


Рисунок 1.4 – Факел керосиновой горелки при различных способах ввода перегретого водяного пара в зону реакции [62]

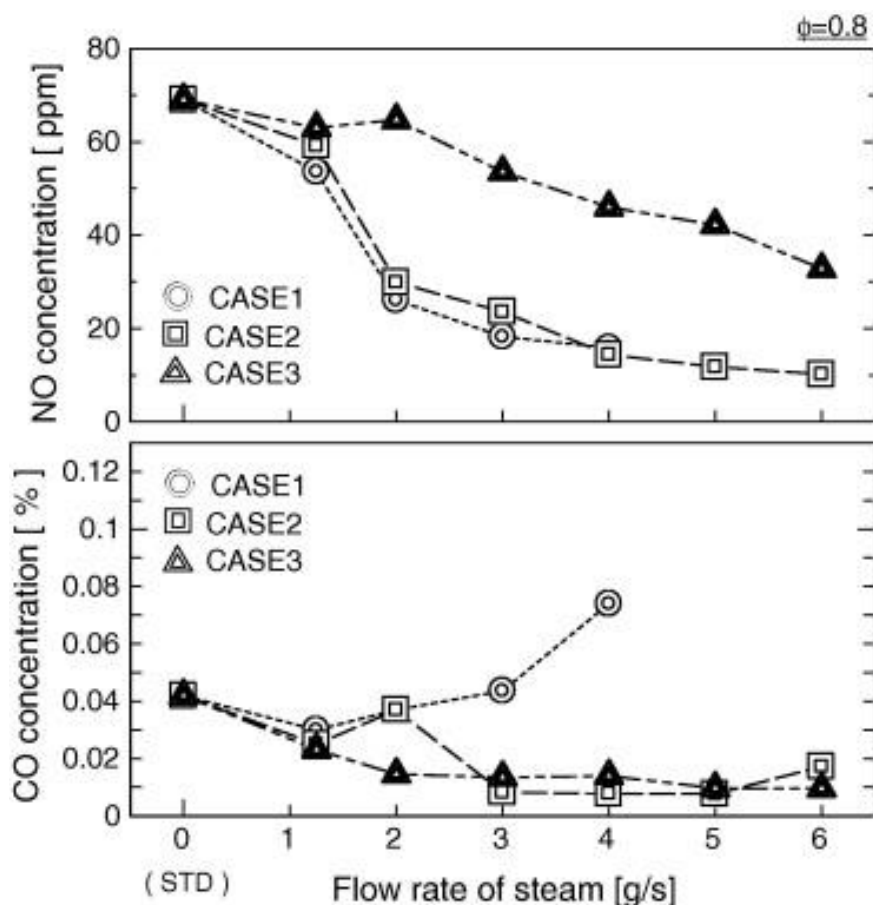


Рисунок 1.5 – Концентрации NO и CO на выходе из горелки при разном расходе пара [61]

В работе Алексеенко С.В. и др. [64] проведены масштабные эксперименты по сжиганию в режиме нанокластерного инициирования пульсационного горения таких некондиционных топлив, как соляровое масло, водоугольное топливо, отработанные картерные отходы, сырая нефть и другие, на лабораторном образце автономной горелки Института теплофизики СО РАН. Применение современных диагностик позволило получить обширную информацию об особенностях протекающих физико-химических процессов такого горения в присутствии перегретого водяного пара. Опытные и теоретические исследования показали, что в результате гетерогенно-каталитического разложения молекул воды на нанокластерах сажи в зоне смешения образуются высокие концентрации ОН-радикала и что это разложение может эффективно идти на углеродных частицах размером 1-5 нм при температурах, характерных для традиционных факелов. Генерация активного ОН-радикала приводит к значительному увеличению скоростей химических реакций и устойчивому высокотемпературному горению «тяжелых» топлив с соблюдением экологических нормативов.

1.4 ПАТЕНТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведен автоматизированный поиск охранных документов в Российской патентной базе (<http://www.fips.ru/russite/default.htm>), патентной базе Европейского патентного ведомства (<http://ep.espacenet.com>), базе Патентного ведомства США (<http://uspto.gov>) по состоянию на 15 января 2019 года.

Поиск осуществлён по ключевым словам:

жидкотопливное горелочное устройство, паромасляная горелка, газификационное горение, водяной газ (синтез-газ), горелки с использованием перегретого водяного пара, некондиционные жидкие углеводородные топлива, паровая газификация;

liquid fuel burner, steam-oil burner, combustion, gasification, water gas (synthesis gas), burners with the use of superheated steam, low-grade liquid hydrocarbon fuels, steam gasification.

Проверка проводилась в отношении действующих охранных документов США, Японии, Китая, Ю. Кореи, России, стран Евросоюза в соответствии с классами Международной патентной классификации: F23C 5/06, F23C 11/00, F23C 99/00, F23L 7/00, F23L 7/005, F23D 11/20, F23D 11/44, F23B 99/00, C10B 55/08, C10J 1/12, F23G 7/05, F23C 3/00, F23D 5/04, F23D 11/00, F23D 14/00, F23D 14/32, F23D 14/36, F23D 14/38, F23N 01/02, F23D 11/44, F23D 5/00, F23D 11/18, F23D 11/20.

Проведен анализ найденных документов [65-95] с целью отбора аналогов и прототипа исследуемого объекта. При анализе отобранных документов выбирались технические решения, относящиеся к устройствам и способам сжигания некондиционных жидких углеводородных топлив, которые по совокупности признаков и получаемому техническому результату близки к исследуемому объекту (аналоги).

Совокупность признаков исследуемого объекта, по которым проводилось сравнение и отбор аналогов:

- вертикальный цилиндрический корпус;
- паровая форсунка для подачи перегретого водяного пара;
- воздухоподводящие отверстия в корпусе;
- паропровод и топливоподающую трубку, конец которой расположен в непосредственной близости от выходного отверстия паровой форсунки для создания паромасляной струи;

- топливоподающая трубка установлена так, что не касается стенки корпуса;
- конструктивная форма сопла позволяет создать зону рециркуляции паромасляной струи.

Задачи, решаемые при создании исследуемого объекта:

- кратковременный запуск горелочного устройства;
- стабилизированное воспламенение паромасляной струи во время работы устройства без дополнительных устройств и топлива.

Технический результат, получаемый в результате использования исследуемого объекта:

- интенсификация процесса газификации топлива;
- интенсификация тепломассообмена в топливовоздушной паровой смеси;
- снижение вредных выбросов в атмосферу;
- повышение долговечности конструкции;
- возможность сжигать сильно загрязненное жидкое топливное сырье;
- бессажное сжигание;
- кратковременный запуск горелочного устройства;
- стабилизированное воспламенение паромасляной струи во время работы устройства без дополнительных устройств и топлива.

Известен «Способ и устройство для сжигания жидкого топлива в присутствии воды» («A method and apparatus for burning liquid fuel in the presence of water», США) [88]. Способ включает подачу смеси воздуха для горения и пара во впускной канал камеры сгорания, характеризующийся предотвращением конденсации пара перед его контактом с топливом путем предварительного испарения определенного количества воды по отношению к количеству воздуха, перегрев водяного пара и смешивание перегретого водяного пара с воздухом для горения таким образом, что относительная влажность во впускном канале составляет менее 100%, предпочтительно около 90%. Капли топлива нагреваются до температуры выше температуры вспышки топлива за счет контакта с паром. Перегрев пара осуществляется за счет тепла в горелочном устройстве. Недостатком этого устройства является то, что при сжигании загрязненного твердыми частицами и водой отходами картерных масел и других промышленных отходов углеводородного топливного сырья, может происходить засорение.

Известно горелочное устройство [89], содержащее цилиндрический корпус с двумя коаксиально расположенными полостями и насадкой виде сопла Лавала. Во внутреннюю полость подается водяной пар под высоким давлением, а в наружную полость подается мазут под низким давлением. Водяной пар, за счет инжекторного эффекта, захватывает мазут, перемешивается с ним в диффузоре и выносится наружу (в топку печи) где сгорает виде факела. Недостатком такого устройства является то, что при сжигании загрязненных твердыми частицами и водой отходами картерных масел и других промышленных отходов углеводородного топливного сырья, может происходить засорение внутренних полостей горелочного устройства, что приведет к выходу из строя такого горелочного устройства.

Горелочное устройство для газификации топлива [90] дополнительно содержит пароподводящий узел виде коллектора с соплами для подачи водяного пара, установленный в цилиндрической камере в зоне распыла топлива, что позволяет интенсифицировать процесс газификации топлива за счет каталитических свойств водяного пара и теплообмена в топливовоздушной паровой смеси, а также снизить вредные выборы в атмосферу и повысить долговечность конструкции. Недостатком такого устройства является то, что для стабилизации воспламенения паромасляной струи здесь используется дополнительное устройство и дополнительное топливо.

Горелочное устройство [91] содержит цилиндрический корпус, состоящий из трех скрепленных отсеков. В первом отсеке размещены элементы, регулирующие подачу топлива, воздуха и воды под давлением. Во втором, центральном отсеке, размещены трубопроводы. В третьем отсеке размещена камера смешивания топлива, воздуха и перегретого водяного пара, спереди нее установлен распределитель с большим количеством каналов (диск с отверстиями). Далее камера газогенерации и после нее соосно размещен теплообменник змеевикового типа для получения перегретого водяного пара от тепла собственного факела. В этом горелочном устройстве топливо, вода и воздух подаются от отдельных источников под давлением. В змеевиковом теплообменнике вода испаряется, превращается в насыщенный пар, а затем перегревается. Из камеры смешивания через распределитель продукты горения вместе с перегретым водяным паром попадают в камеру газогенерации, где происходит процесс паровой газификации. Здесь генерируется синтезгаз, который совместно с сажистыми

частицами, парами жидкого топлива, под действием давления нагнетающих устройств выносятся в зону змеевикового теплообменника и сгорает в виде факела.

Способ бесплажного сжигания топлива с помощью паровых форсунок [92] заключается в подаче топлива самотеком, а пара под давлением. Топливо и пар перемешиваются в форсунке и далее смесь топлива и пара сгорает в факеле. Топливо, в частности мазут, перед подачей в форсунку подогревают до температуры 85-115 °С, а пар подают под давлением 5-15 кг/см² и более, при этом температура пара выше 150 °С. Водяной пар при высокой температуре диссоциирует на кислород и водород, и чем выше температура пара, тем выше степень диссоциации. Углерод топлива соединяется с кислородом воды, при этом топливо газифицируется, превращаясь в раскаленные газы - окись углерода и водород, которые сгорают в кислороде атмосферного воздуха, превращаясь в диоксид углерода и воду. Эффект диссоциации воды позволяет повысить эффективность сгорания топлива за счет дополнительного кислорода, поэтому паровые форсунки создают бесплажный факел. В данном способе пар, имеющий более высокую температуру, перемешивается с относительно холодным топливом. Температура пара при этом снижается, и чтобы пошел процесс диссоциации, необходимо поднять температуру пара, для чего требуется тратить часть химического тепловыделения и отсюда температура факела снижается. Чем ниже температура пара, тем ниже степень диссоциации, а отсюда низкая эффективность сгорания топлива, которая в данном случае определяется количеством кислорода в смеси. Недостатком этого горелочного устройства является то, что во время его пуска происходит отложение сажи на водозаполненной поверхности теплообменника змеевикового типа. При дальнейшей работе, под действием температуры сажа превращается в кокс. Слой сажи и кокса, обладая низкой теплопроводностью, уменьшает тепловой поток от факела к воде, что приводит к увеличению времени закипания воды, а следовательно, к увеличению времени пуска устройства. Кроме того, сгорание топлива в устройстве происходит на развитой поверхности распределителя, а учитывая, что здесь сгорают «тяжелые» погоны нефти, либо сама нефть, распределитель будет сильно и быстро закоксовываться от действия лучистой энергии, идущей от факела. Это также замедляет время пуска устройства. Недостатком также является то, что для работы такого устройства требуются отдельные, дополнительные устройства подающие топливо, воздух.

В основу изобретения «Способ бесплажного сжигания топлива» [93] положена

задача создания способа сжигания топлива, обеспечивающего высокую эффективность его горения без образования сажи. Бессажное сжигание топлива осуществляется путем отдельной подачи в горелочное устройство топлива с воздухом и перегретого водяного пара. При получении сажного пламени в это пламя подается перегретый водяной пар и идет прогревание горелочного устройства. После прогрева подачу воздуха в горелочное устройства перекрывают полностью или частично и перегретый водяной пар производит газификацию углерода (сажи) в синтез-газ. Полученный синтез-газ выводится из горелочного устройства для последующего догорания. Изобретение позволяет обеспечить высокую эффективность горения топлива без образования сажи. Подача топлива здесь производится не через форсунку, а течет прямо из трубки, поэтому засорения топливоподачи здесь не происходит. Однако в таком устройстве могут сгорать только легкие погоны нефтепереработки, включая дизельное топливо. При сжигании низких погоней нефтепереработки, таких как мазут, отработанное моторное, картерное масла и т.д., происходит закоксовка внутренней поверхности дна камеры горения, потому что топливо горит на поверхности. Высокая температура и отсутствие окислителя на поверхности дна камеры горения приводит к отложению и нарастанию кокса.

Решение, согласно патенту [94], позволяет создать автономное, малогабаритное горелочное устройство, вырабатывающее для своей работы водяной пар более высокой, чем у прототипа температуры, что позволяет повысить температуру факела, интенсифицировать процесс горения и повысить полноту сгорания жидкого углеводородного топлива, понизить вредные выбросы монооксида углерода. Горелочное устройство содержит корпус с топкой, парогенератор водяного пара, установленный в корпусе и состоящий из бачка-испарителя, паросепаратора, пароперегревателя, выполненного в виде трубки с полыми стенками, и паровой форсунки, соединенных между собой трубками. Согласно изобретению, бачок-испаритель и паросепаратор выполнены в виде кольцевых камер, пароперегреватель установлен внутри бачка-испарителя, а паровая форсунка установлена снизу пароперегревателя с возможностью подачи пара и, вместе с ним, горячей смеси сквозь пароперегреватель, причем корпус, бачок-испаритель, паросепаратор, пароперегреватель и паровая форсунка расположены соосно. Недостатком такого устройства является невысокая температура (горения) в топочной камере, что приводит к сажеотложению на поверхностях топки и деталях,

расположенных в объеме топки.

Наиболее близким техническим решением по совокупности признаков (прототипом) является горелочное устройство [95]. В основу изобретения положена задача распыления жидкого топливного сырья и последующего его сжигания не на поверхности, а в газовом потоке. Горелочное устройство (Рисунок 1.6), включающее цилиндрический корпус в виде стакана, паровую форсунку для подачи перегретого водяного пара, вмонтированную в дно корпуса, воздухоподводящие отверстия, выполненные на цилиндрической стенке корпуса, топливопровод, содержит дополнительные паровые форсунки, закрепленные на держателе форсунок, имеющем форму кольцевой камеры, который установлен внутри корпуса с возможностью подачи перегретого пара в камеру газогенерации, а также камеру распыла жидкого топлива, образованную внутренними поверхностями корпуса и держателя форсунок, а топливопровод вмонтирован в стенку камеры распыла с возможностью подачи топлива сверху, на струю пара, из паровой форсунки, установленной в дне корпуса. В камере газогенерации топливо горит сажным пламенем, куда из дополнительных форсунок поступает перегретый водяной пар, который газифицирует продукты сажного горения, образуя синтез-газ. Горелочное устройство может сжигать загрязненное твердыми частицами и водой топливное сырье, такое как отработанное моторное масло. В горелке работает эффект вакуумного засасывания в паровую струю текущего сверху топливного сырья, а также эффект огневого предохранения паро-топливного потока от разбрызгивания. Капли топливного сырья, стремящиеся отделиться от потока (в результате вскипания капель воды, находящихся в топливном сырье), попадают в огненный поток, где испаряются (становятся легче) и засасываются в паровую струю. Распыленное в паровом потоке топливное сырье движется далее и, не касаясь стенок горелочного устройства, попадает в камеру газогенерации, где за счет струй перегретого пара из дополнительных форсунок происходит процесс паровой газификации продуктов горения и горячий газовый поток выносится наружу и сгорает в кислороде атмосферного воздуха в виде факела. Недостатком этого устройства является то, что для его запуска требуется дополнительное время, поскольку требуется прогрев держателя форсунок до температуры, позволяющей не конденсироваться перегретому пару. Для этого используется дополнительное устройство, электрический нагреватель.

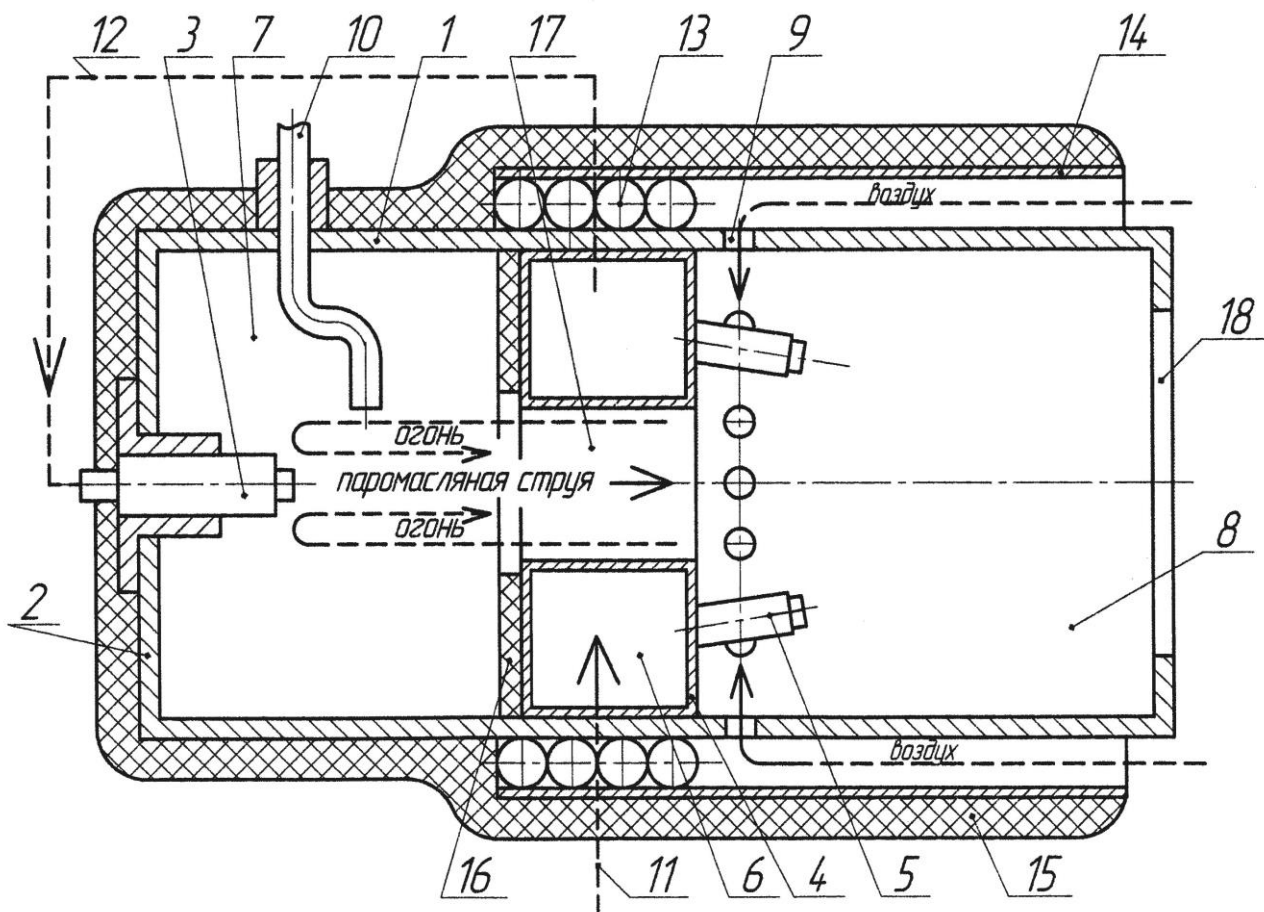


Рисунок 1.6 – Схема наиболее близкого аналога (прототипа) [95]: корпус 1, дно 2, паровая распылительная форсунка 3, держатель форсунок 4, дополнительные форсунки 5, кольцевая камера 6, камера распыла 7, камера газогенерации 8, воздухоподводящие отверстия 9, топливопровод 10, паропроводы 11, 12, электрический нагреватель 13, воздухозаборный кожух 14, утеплитель 15, 16.

В основу изобретения, разработанного в данной работе, положена задача создания паромасляного горелочного устройства с вертикальным факелом, горящим в открытом пространстве, имеющим кратковременный запуск и стабилизированное воспламенение паромасляной струи во время работы устройства без дополнительных устройств и топлива.

В исследуемом объекте решены недостатки аналогов и прототипа:

- кратковременный запуск горелочного устройства;
- стабилизированное воспламенение паромасляной струи во время работы устройства без дополнительных устройств и топлива.

Решение задач достигается за счёт конструктивных особенностей горелке. В исследуемом устройстве распыл топлива производится струей перегретого водяного пара инжекционным способом, что позволяет значительно уменьшить вязкость и поверхностное натяжение жидкого топлива. Скорость истечения паровой струи сверхзвуковая, что позволяет получить в распыле частички топлива размером 10-20 микрон. От размера распыленных частиц зависит степень выгорания топлива, энергетические и экологические показатели горения. Кроме того, за счет конструкции сопла в периферийной зоне струи формируется область рециркуляции. Горение внутри корпуса устройства происходит вблизи сопла, что свидетельствует о том, что именно эта зона, является зоной инициации воспламенения и зоной стабилизации горения.

Преимущества предлагаемого решения:

1. простота конструкции, что повышает безопасность и уменьшает металлоёмкость;
2. малое время запуска;
3. стабилизированное воспламенение паромасляной струи во время работы устройства без дополнительных устройств и топлива;
4. экологичность (уровень CO и NO_x соответствуют действующим европейским нормативам);
5. возможность сжигания загрязнённых некондиционных жидких углеводородов.

Таким образом, согласно вышеизложенным сведениям:

Совокупность существенных отличий заявляемого технического решения и взаимосвязь между ними позволяет решить поставленную задачу и сделать вывод о соответствии заявляемого технического решения условию патентоспособности «новизна» по действующему законодательству.

Сведений об известности отличительных признаков заявляемого технического решения в совокупностях признаков известных технических решений с достижением тех же результатов, как у заявляемого, не найдено. На основании этого сделан вывод о соответствии заявляемого технического решения условию патентоспособности «изобретательский уровень».

Исследуемое техническое решение соответствует условию «промышленная применимость», т.к. при его использовании выполнена следующая совокупность условий:

- средство, воплощающее заявленное изобретение при его осуществлении,

предназначено для использования в промышленности, а именно, предприятиями теплоэнергетики.

- для заявленного решения подтверждена возможность осуществления с помощью известных средств и методов.
- средство, воплощающее заявленное решение при его осуществлении способно обеспечить достижение указанного выше технического результата.

Таким образом, исследуемый объект обладает новизной и изобретательским уровнем, соответствует условию промышленной применимости, т.е. патентоспособен.

Для выявления тенденции развития объекта исследования сделана предварительная оценка динамики патентования в исследуемой области техники, по отобранным патентным документам (Рисунок 1.7). Анализ показывает, что выбранное направление исследований является перспективным.



Рисунок 1.7 – Динамика патентования в исследуемой области техники

Таким образом, согласно анализу найденных документов и источников научно-технической информации исследуемый объект соответствует мировому уровню техники в заданной области, выбранное направление исследований является перспективным.

1.5 ОБЗОР РЫНКА ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ (МАРКЕТИНГОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ)

Для определения перспектив вывода на рынок нового горелочного устройства проведен анализ рынка горелочных устройств, работающих на жидком топливе: поиск, систематизация и анализ информации о структуре рынка, аналогах, производителях, потребителях; определение перспектив выхода на рынок.

Для проведения маркетингового исследования был использован метод «кабинетные исследования», то есть сбор и анализ собранной информации по интересующей проблеме, ее обобщение на основе логических умозаключений. В рамках исследования проведены следующие работы:

1. Сбор информации открытых источников информации печатных [96, 97] и электронных, представленных в сети Интернет:

- деловых и специализированных изданий;
- рекламных и информационных материалов компаний – участников рынка;
- аналитические обзорные статьи;
- результаты ранее проведенных маркетинговых исследований в данной области;
- материалы отраслевых учреждений;
- данные таможенного союза и Росстата;
- патентные базы данных;
- базы данных научно-технической литературы;
- данные надзорных и контролирующих органов государственной власти.

2. Систематизация и анализ собранной информации.

Выполнены исследования рынка горелочных устройств мощностью до 100 кВт, работающих на жидком топливе и предназначенных для использования с отопительными бытовыми котлами, а также в другом технологическом оборудовании.

Жидкотопливные горелки – это устройства, предназначенные для сжигания жидкого топлива, которым может служить дизель, мазут, отработанное масло, биотопливо, печное бытовое топливо или нефтепродукты различных стадий перегонки.

Применение жидкого топлива актуально в случае, если нет доступа к магистральному газу (удаленные регионы, воинские части, погранзаставы, геологоразведочные экспедиции), либо он слишком дорог.

В настоящее время важной задачей является также утилизация большого объема накопленных на предприятиях теплоэнергетики и других отраслей жидких углеводородных отходов (отработанные масла и смазочные жидкости, некондиционные остатки топлив, отходы нефтепереработки и др.), которые не находят масштабного практического применения и представляют значительную опасность техногенного загрязнения окружающей среды.

Оценочный анализ рынка горелочных устройств выполняется на основе данных импорта-экспорта горелочных устройств.

На основе информации, представленной в научно-технических источниках и в сети Интернет, определены основные направления совершенствования горелочной техники:

1. Частотное регулирование, чем достигается экономия электроэнергии.

Известно, что большую часть времени отопительные котлы (а значит – и горелки) работают на сниженной нагрузке. Частотный преобразователь снижает обороты вентилятора в зависимости от мощности горелки, поддерживая тем самым заданное соотношение «топливо–воздух» без дросселирования потока воздуха.

Если мощность горелки составляет 3 МВт, то привод вентилятора должен иметь мощность 5,5 кВт. При снижении нагрузки котла до 60 % номинальной двигатель обычной горелки будет нести нагрузку примерно 5 кВт, а двигатель с частотным регулированием числа оборотов – только 2 кВт. Если же нагрузка котла снизится до 20 % номинальной, то вентилятор с частотным регулированием будет потреблять мощность всего 0,75 кВт. С учетом общего времени работы котла на сниженных нагрузках годовая экономия электроэнергии может оказаться весьма существенной.

2. Снижение образования токсичных оксидов азота NO_x .

Как правило, промышленные и коммунальные котельные располагаются вблизи жилых массивов и имеют невысокие (по сравнению с тепловыми электростанциями) дымовые трубы. В этих условиях единственным средством обеспечения санитарно-гигиенических норм по допустимой концентрации NO_x в приземном слое атмосферы становится снижение выбросов оксидов азота. Именно поэтому производители горелочной техники уделяют такое внимание снижению эмиссии NO_x .

Уменьшение эмиссии NO_x достигается за счет:

– интенсификации внутренней рециркуляции продуктов сгорания (например, опыт использования горелок LX итальянской компании Baltur подтвердил: они работают

надежно и экономично в диапазоне нагрузок от 15 до 100 % номинальной и обеспечивают удельные выбросы оксидов азота не более 80 мг/кВт·ч);

– понижения температуры, при которой протекает сгорание топлива (высокие показатели получены при использовании так называемых бесфакельных горелок, на рынке бытового оборудования такие аппараты уже не редкость, но в промышленном секторе их применение пока ограничено);

– использование электроники для управления горением (электронная система управления с микропроцессорным менеджером горения контролирует работу горелки и гарантирует настройку серводвигателей с точностью до 0,1 град.);

– использование технологии Multiflame (среди ноу-хау компании Weishaupt (Германия), выпускающей газовые, жидкотопливные и комбинированные горелки мощностью до 17,5 МВт, – технология Multiflame, обеспечивающая полное и чистое сжигание жидкого топлива за счет его распыления вокруг первичного пламени; кроме высокой эффективности горения, такая схема обеспечивает снижение удельных выбросов NO_x до 120 мг/кВт·ч);

– ротационные горелки (в 1990-е гг. на рынке приобрели популярность горелки английской фирмы Hamworthy. В ассортименте компании имеются ротационные горелки типа AW, рассчитанные на сжигание большинства сортов нефтяного (в том числе высоковязкого) топлива. Особенность ротационных горелок – отсутствие механической или паромеханической форсунки в традиционном понимании. Жидкое топливо подается в распылительный стакан, вращающийся со скоростью до 6000 об/мин. В результате появляется пленка из топлива, равномерно распределенная по внутренней поверхности стакана. При отрыве этой пленки от кромок стакана образуется чрезвычайно тонкая струя, распыляемая потоком первичного воздуха. Высокая эффективность сжигания топлива (в том числе битумов, гудронов и остатков тяжелых минеральных масел) при их использовании обеспечивается за счет качественной регулировки различных потоков топлива).

Производители горелочных устройств и их продукты (аналоги)

Для анализа выбирались представленные на рынке России одноступенчатые жидкотопливные горелочные устройства до 100 кВт для сжигания мазута и нефти (мазутные горелки), дизельного топлива (дизельные горелки) и для сжигания широкого

спектра топлив, в т.ч. отработки, (универсальные горелки).

На российском рынке жидкотопливных горелочных устройств представлено большое количество разнообразных брендов, большинство из которых импортного производства. Согласно данным экспертов, на российском рынке жидкотопливных горелочных устройств доля российских производителей составляет 70%, зарубежных – 30%.

Согласно данным статистики¹², основными поставщиками в Россию горелок для жидкого топлива являются: 49% (3,16 млн. USD) – Италия; 25% (1,61 млн. USD) – Германия; 12% (771 тыс. USD) – Финляндия; 2,63% (168 тыс. USD) – США; 2,09% (134 тыс. USD) – Белоруссия; 1,26% (81 тыс. USD) – Швеция; 1,11% (71 тыс. USD) – Китай; 1,07% (68 тыс. USD) – Южная Корея; 1,05% (67 тыс. USD) – Польша; 0,817% (52 тыс. USD) – Украина.

Рейтинг популярности, возглавляют немецкие и итальянские модели таких компаний как: CIB UNIGAS S.p.A. (Италия), LAMBORGINI CALOR (Италия), RIELLO UPS MANUFACTURING (Италия), ECOFLAM (Италия), BALTUR (Италия), Weishaupt GmbH (Германия), Giersch (Германия).

Сегодня на рынке РФ представлены следующие жидкотопливные горелки:

1. Мазутные горелки (нефть / мазут) таких брендов, как Baltur, Lamborghini Calor, Cib Unigas, Ecoflam.

2. Дизельные горелки производства Италии (Baltur; Lamborghini Calor; Ecoflam; Ferroli; SIME; Cib Unigas; F.B.R.), Германии (Giersch; Hansa; Weishaupt; Riello), Финляндии (ELCO; Oilon), Швеции (Bentone), Бельгии (ACV);

3. Универсальные горелки на отработанном масле (отработке) таких брендов, как «CAEQ», «ENERGY LOGIC», «EURONORD», «SMART BURNER», «MASTER», «GIERSCH», «KROLL».

Итальянские компании представляют на рынок России мазутные и дизельные горелочные устройства, немецкие компании – мазутные, дизельные и универсальные горелочные устройства. Следует отметить, что на российском рынке ниша универсальных горелочных устройств занята в основном более дешёвой продукцией китайского производства.

¹ URL: <http://www.gks.ru/>

² URL: <https://infoline.spb.ru/>

Наиболее широко представлены на рынке России итальянские компании и их продукция, аналогичная предлагаемому продукту. Их доля на рынке России – 49%.

Компания *BALTUR* (Италия)

Сегодня компания *BALTUR*³ является лидером в сфере технологических разработок и принадлежит к числу самых крупных игроков рынка. Среди эффективных разработок компании Baltur необходимо выделить устройства, которые останавливают подкапывание жидкого топлива из форсунок. Также не меньшей значимостью обладают системы, снижающие уровень NOx и CO в отходящих газах, и оборудование для предварительного смешивания газа и воздуха. Компания *BALTUR* выпускает горелки газовые, горелки на дизельном топливе и промышленные горелки с автономным вентилятором, работающие на газе, дизельном топливе, нефти (мазуте) и комбинированные, удовлетворяющие самым различным требованиям. Мощность дизельных горелок: одноступенчатые – 16,6-712 кВт, двухступенчатые – 415-7316 кВт. Мощность горелок, работающих на нефти и мазуте – от 55 до 10500 кВт.

Из горелок в одноступенчатом исполнении мощностью до 100 кВт на рынке России представлены: мазутные горелки Baltur BT 17 N; дизельные горелки Baltur BTL, см. таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Характеристики дизельных горелок Baltur

Наименование	Мощность горелки, кВт	Цена, руб.
Baltur BTL 3	43 – 18	41 848-27 201
Baltur BTL 3 H	43 – 17	47 554-30 910
Baltur BTL 4	56 – 26	44 511-28 932
Baltur BTL 4 H	56 – 26	49 076-31 899
Baltur BTL 6	32 – 74	47 554-30 910
Baltur BTL 6 H	74 – 32	54 782-35 609

Дизельные горелки Baltur предназначены для установки как в водогрейные, так и паровые котлы, сушильные камеры, системы воздушного отопления, а также технологичные печи. Дизельные горелки Baltur достаточно универсальны, их можно

³ URL: <http://baltur.ru/>

комбинировать с котлами отопления различных классов.

LAMBORGINI (Италия)

Lamborghini⁴ присутствует в Италии и в 48 странах мира через сеть из 400 агентов и дилеров, гарантирующих постоянное присутствие продуктов на рынке. Lamborghini производит горелки для газа, мазута и дизельного топлива.

Из горелок в одноступенчатом исполнении мощностью до 100 кВт на рынке России представлены дизельные горелки Lamborghini ECO мощностью от 14 до 356 кВт, см. таблицу 1.2.

Таблица 1.2 – Характеристики дизельных горелок Lamborghini

Наименование	Мощность горелки, кВт	Тип горелки	Цена, руб.
Lamborghini ECO 3	35 – 16	Одноступенчатая	35 380-24 766
Lamborghini ECO 3R	35 – 14	Одноступенчатая	40 783-28 548
Lamborghini ECO 5N	59 – 29	Одноступенчатая	37 663-26 364
Lamborghini ECO 5R	59 – 30	Одноступенчатая	42 609-29 826
Lamborghini ECO 7R	86 – 52	Одноступенчатая	48 619-34 034
Lamborghini ECO 8	100 – 35	Одноступенчатая	40 554-28 388

Дизельные горелки Lamborghini предназначены для установки на водогрейные котлы в отопительной системе, а также в воздухонагреватели и сушильные камеры. Производитель рекомендует использовать одноступенчатые горелки для котлов небольшой мощности.

Компания *CIB UNIGAS S.p.A.* (Италия)

Компания CIB UNIGAS⁵ занимает лидирующие позиции на рынках России, СНГ и Европы. Производственная программа завода CIB UNIGAS включает газовые, жидкотопливные (дизельное топливо, газоконденсат, нефть, мазут марок M40, M100 и др.) и комбинированные горелки. Горелки CIB UNIGAS адаптированы для работы с котлами и воздухонагревателями всех известных европейских и российских производителей, включая специфичные российские котлы с объемной топочной камерой

⁴ URL: <http://www.lamborghinicalor.ru/>

⁵ URL: <http://www.cibunigas.com/ru/>

короткой длины, такие как ДЕ, ДСЕ, ДКВр, для которых было найдено уникальное решение – короткофакельная горелка с четырьмя горелочными трубами, при этом на котел устанавливается одна такая горелка взамен двух штатных. За счет этого достигается автоматизация процессов работы котлоагрегата, экономия расхода топлива и его качественное сжигание. В России компания CIB UNIGAS S.p.A. представлена с 1993 г.

Из горелок в одноступенчатом исполнении мощностью до 100 кВт на рынке России представлены: мазутные (нефтяные) горелки Cib Unigas Miniflam, Tecnopress, см. таблицу 1.3; дизельные горелки Cib Unigas LO, см. таблицу 1.4.

Таблица 1.3 – Одноступенчатые мазутные горелки Cib Unigas

Наименование	Мощность горелки, кВт	Макс. вязкость при 50 °С, сСт	Цена, Евро.
Cib Unigas Miniflam N18 N-.TN.S.RU.A	209 – 105	12	4563
Cib Unigas Miniflam N18 P- TN.S.RU.A	209-105	89	4735
Cib Unigas Tecnopress N30 P- TN.S.RU.A	105-349	89	7864
Cib Unigas Tecnopress N30 P- TN.L.RU.A	105-349	89	7899
Cib Unigas Tecnopress N30 P- AB.S.RU.A	105-383	89	8972
Cib Unigas Tecnopress N30 P- AB.L.RU.A	105-383	89	8964

Таблица 1.4 – Дизельные одноступенчатые горелки Cib Unigas

Наименование	Мощность горелки, кВт	Цена, руб.
Cib Unigas LO35 G-.TN.S.RU.A	21 – 41	43 750-31 937
Cib Unigas LO60 G-.TN.S.RU.A	30 – 60	46 717-34 104
Cib Unigas LO90 G-.TN.S.RU.A	35 – 85	49 000-35 770

Серийный ряд мазутных горелок бренда Cib Unigas представлен несколькими сериями, которые используются как для бытового обслуживания, так и для промышленных котельных. Основное преимущество использования мазутных горелок

серии Cib Unigas VS, это установка в коротких камерах сгорания для котельных, в которой трубные пучки или стенки используемого котла расположены очень близко к пламени.

Дизельные горелки Cib Unigas устанавливаются на отопительные котлы бытового и промышленного назначения, печи и теплогенераторы любых конфигураций (термомаслянные установки, сушилки и покрасочные камеры), благодаря разному типу регулирования. Горелки функционируют полностью в автоматическом режиме.

ECOFLAM (Италия)

По объему производства горелок компания ECOFLAM⁶ занимает второе место в Италии и четвертое место в Европе. Диапазон мощностей от 10 до 15000 кВт на природном и сжиженном газе, дизтопливе и мазуте различных марок. Кроме этого, выпускаются комбинированные горелки газ/жидкое топливо с ручным или автоматическим переключением. Мощность жидкотопливных одно- и двухступенчатых с гидравлическим и электрическим приводом воздушной заслонки – от 16 до 5000 кВт, комбинированных одно- и двухступенчатых – с ручным и автоматическим переключением видов топлива – от 23 до 5000 кВт. Одним из преимуществ является то обстоятельство, что дутьевые горелки и жаротрубные котлы изготавливаются на одном предприятии, то есть сочетание горелки с котлом выверено до мельчайших деталей.

Из горелок в одноступенчатом исполнении мощностью до 100 кВт на рынке России представлены: нефтяные мазутные горелки Ecoflam MAXFLAM, см. таблицу 1.5; дизельные горелки Ecoflam MAX, см. таблицу 1.6.

Таблица 1.5 – Характеристики мазутных горелок Ecoflam

Наименование	Мощность горелки, кВт	Макс. вязкость при 50 °С, сСт	Цена, руб.
Ecoflam MAXFLAM 10 TC	68 – 136	50	368 833-295 067_

⁶ URL: <http://ecoflam-burners.com/>

Таблица 1.6 – Дизельные горелки Ecoflam

Наименование	Мощность горелки, кВт	Цена, руб.
Ecoflam MAX 1 TW TC	17.6 – 41.4	39 185-31 348
Ecoflam MAX 1 R TW TC	20 – 39	44 054-35 243
Ecoflam MAX 4 TW TC	20 – 59	40 706-32 565
Ecoflam MAX 4 R TW TC	20 – 59	45 576-36 461
Ecoflam MAX 8 TW TC	47 – 105	42 609-34 087

Дизельные горелки Ecoflam предназначены для установки на котлы и печи в системе отопления бытового и промышленного назначения, сушильные камеры и барабаны, теплогенераторы. Горелки отлично используются на объектах с внедрением экологических технологий. Компания Ecoflam предоставляет горелочные устройства, работающие на дизельном топливе для строительной, пищевой, текстильной промышленности. Горелки используются не только в котлах, работающих на жидком топливе, но и печах нестандартной формы.

На российском рынке представлены также горелки других итальянских производителей, в частности: Ferroli; SIME; F.B.R. Эти компании поставляют в Россию дизельные горелочные устройства.

Доля немецких компаний на российском рынке горелочных устройств на жидком топливе составляет 25%. Наиболее представлены на рынке горелки компаний Giersch, Weishaupt GmbH, Hansa.

Giersch (Германия)

Сегодня компания GIERSCH⁷ входит в состав концерна Enertech Group и ежегодно продает свыше 200 тыс. ед. продукции на рынках более 50 стран. Основная специализация компании – выпуск универсальных жидкотопливных, газовых, а также комбинированных горелок. Горелки Giersch с диапазоном мощностей 7-2800 кВт находят применение в обогревательной технике разного назначения: от установок для хлебопекарных печей до газовых котлов для отопления больших жилых массивов.

Горелки Giersch на дизельном топливе серии M охватывают диапазон мощности 120–2500 кВт, а комбинированные на природном/сжиженном газе и дизельном топливе

⁷ URL: <https://www.giersch.de/de/>

серии МК – от 280 до 2720 кВт. Горелки на дизельном топливе, а также мазуте серий NO (160–4129 кВт) в моноблочном исполнении и PO (3,3–18 МВт) в двухблочном предлагаются на российском рынке под маркой Giersch. Таким же образом представлены комбинированные горелки на природном/сжиженном газе и дизельном топливе или мазуте серий NDF(253–4450 кВт) и PDF (3,3–18 МВт).

Причиной успеха продукции на международном рынке фирма считает конструктивное сотрудничество с производителями оборудования, монтажными предприятиями, а также с рядом крупных специализированных торговых компаний. Ценовая политика фирмы нацелена на широкую потребительскую аудиторию.

Многолетняя успешная реализация продукции вывела торговую марку Giersch в лидеры среди производителей горелок на рынке центральноевропейских стран. Сегодня компания объединяет 25 представительств только в Германии. Офисы техподдержки расположены также в России, Чехии, Словении, Хорватии, Польше, Латвии, Литве, Эстонии, Китае. Центр рынка сбыта горелок Giersch размещен в Швейцарии и Австрии. В целом дилерская сеть компании охватывает не менее 50 государств.

Из горелок в одноступенчатом исполнении мощностью до 100 кВт на рынке России представлены: дизельные горелки Giersch R, предназначенные для наддувных котлов отопления, см. таблицу 1.7; универсальные горелки Giersch серии GU, см. таблицу 1.8, предназначенные для сжигания отработанного масла на натуральной и синтетической основе с высоким показателем КПД. Горелка устанавливается в котлы, теплогенераторы с целью получения тепла для обогрева больших площадей.

Таблица 1.7 – Дизельные горелки Giersch

Наименование	Мощность горелки, кВт	Цена, руб.
Giersch R1	53 – 14	79 663-55 764
Giersch R1-V	53 – 12	89 782-62 848
Giersch R1-V-L	53 – 12	97 924-68 547
Giersch R20	166 – 36	91 076-63 753
Giersch R20-L	166 – 36	99 141-69 399
Giersch R20-AE	166 – 36	99 217-69 452
Giersch R20-V	77 – 36	94 424-66 097
Giersch R20-V-L	77 – 36	111 848-78 293

Таблица 1.8 – Модельный ряд универсальных горелок Giersch

Наименование	Мощность горелки, кВт	Макс. вязкость при 50 °С, сСт	Цена, руб.
Giersch GU20	40 – 30	3	200 784-160 627
Giersch GU55	53 – 40	3	225 603-180 483
Giersch GU70-GU100	100 – 65	3	244 506-195 605

Weishaupt GmbH (Германия)

Фирма WEISHAUPТ8 ежегодно выпускает свыше 100 тыс. горелок. Мах Weishaupt GmbH более 60-ти лет является ведущей мировой фирмой по производству горелочного оборудования. Компания производит газовые, жидкотопливные и комбинированные горелки мощностью от 12,5 до 32000 кВт, которые широко применяются не только в водогрейных и паровых котельных, но и в различных технологических процессах. За 20 лет сотрудничества в Россию и страны СНГ поставлено 65 тыс. горелок, адаптированных к российским условиям эксплуатации. Из горелок в одноступенчатом исполнении мощностью до 100 кВт на рынке России представлены дизельные горелки Weishaupt WL, см. таблицу 1.9.

Таблица 1.9 – Дизельные горелки Weishaupt

Наименование	Мощность горелки, кВт	Тип горелки	Цена, руб.
Weishaupt WL 5/2-B	25 – 55	Одноступенчатая	86 359-73 405
Weishaupt WL 10/2-D	35 – 70	Одноступенчатая	124 250-105 612
Weishaupt WL 10/2-D Z	35 – 70	Двухступенчатая	159 630-135 686
Weishaupt WL 10/3-D Z	50 – 100	Двухступенчатая	166 630-141 636
Weishaupt WL 20/1-C	50 – 120	Одноступенчатая	144 108-122 492

На российском рынке представлены также горелки немецких производителей: компании Hansa⁹, поставляющей дизельные горелочные устройства, компании Kroll¹⁰,

⁸ URL: <https://weishaupt.ru/>

⁹ URL: <https://www.hansa.ru/>

поставляющей универсальные горелочные устройства. Линейка дизельных горелок бренда Hansa представлена следующими модификациями: HS, HVS, HM, HBV. В качестве топлива используется не только дизель, но и растительное и жировое масло специального назначения. В таблице 1.10 приведены характеристики горелок мощностью до 100 кВт с одноступенчатым регулированием.

Таблица 1.10 – Дизельные горелки Hansa

Наименование	Мощность горелки, кВт	Цена, руб.
Hansa HM	44 – 15	47 507-42 756
Hansa HVM	44 – 15	53 703-48 333
Hansa HVS 5.3 K	43 – 12	67 773-60 996
Hansa HVS 5.3	42 – 13	68 620-61 758
Hansa HS 5.3 G1	40 – 25	58 410-52 569
Hansa HVS 5.3 G1	40 – 25	68 620-61 758
Hansa HS 5.3 G2	60 – 40	58 410-52 569
Hansa HVS 5.3 G2	60 – 40	72 807-65 526
Hansa HVS 5.4	40 – 15	68 620-61 758
Hansa HS 10	100 – 40	66 480-59 832
Hansa HVS 10	100 – 40	81 205-73 085
Hansa HBV 18	21 – 10	103 250-92 925
Hansa HBV 20	27 – 20	103 250-92 925
Hansa HBV 22	35 – 26	107 739-96 965
Hansa HBV 27	52 – 37	106 864-96 178
Hansa HBV 29	70 – 49	121 206-109 086

Модельная линейка универсальных горелок Кролл представлена 7 одноступенчатыми типами стандартного устройства с мощностью от 14 до 190 кВт, см. таблицу 1.11. В универсальных горелках Kroll используется следующее топливо:

¹⁰ URL: <https://www.kroll.com/en>

отработанное масло на минеральной и синтетической основе: моторное, гидравлическое, трансмиссионное, промышленное, трансформаторное, компрессорное; керосин и мазут; дизтопливо; растительное отработанное масло; легкое печное топливо.

Таблица 1.11 – Модельный ряд универсальных горелок Kroll

Наименование	Мощность горелки, кВт	Макс. вязкость, при 50 °С, сСт	Цена, руб.
Kroll KG/UB-20P	24 – 14	3	168 800-134624
Kroll KG/UB-20	26 – 38	3	182342-145874
Kroll KG/UB-55	54 – 37	3	182342-145874
Kroll KG/UB-70	81 – 56	3	208160-166528
Kroll KG/UB-100	100 – 81	3	208160-166528

Доля финских компаний на российском рынке горелочных устройств на жидком топливе составляет 12%. Наиболее широко представлены на рынке горелки компаний Elco¹¹, Oilon¹². Жидкотопливные горелки Elco Vectron предназначены для установки на паровые и водогрейные котлы, сушильные и калориферные камеры, хлебопекарные и плавильные печи. В таблице 1.12 приведены характеристики горелок мощностью до 100 кВт с одноступенчатым регулированием.

Таблица 1.12 – Дизельные горелки Elco Vectron

Наименование	Мощность горелки, кВт	Тип горелки	Цена, руб.
Elco VL 1.42	20 – 42	Одноступенчатая	52 500-31 500
Elco VL 1.40 P	40 – 18	Одноступенчатая	62 391-37 435
Elco VL 1.55	30 – 55	Одноступенчатая	55 924-33 554
Elco VL 1.55 P	55 – 30	Одноступенчатая	66 196-39 717
Elco VL 1.95	45 – 95	Одноступенчатая	62 011-37 206

¹¹ URL: <http://elco-cuenod.ru/>

¹² URL: <https://oilon.com/>

Дизельные горелки Oilon предназначены для комплексной системы отопления частного дома, для водогрейных котлов, генераторных установок, а также как узел технологического процесса. Горелка полностью автоматизирована и позволяет сжигать лёгкое топливо дизельного вида, которое имеет вязкость от 4 до 6 мм²/сек при +20°С. В таблице 1.13 приведены характеристики горелок мощностью до 100 кВт с одноступенчатым регулированием.

Таблица 1.13 – Дизельные горелки Oilon

Наименование	Мощность горелки, кВт	Тип горелки
Oilon Junior Pro 2 J 20	27 – 48	Одноступенчатая
Oilon Junior Pro 2 LJ 20	27 – 48	Одноступенчатая
Oilon Junior Pro 2 J 45	36 – 57	Одноступенчатая
Oilon Junior Pro 2 LJ 45	36 – 57	Одноступенчатая
Oilon Junior Pro 2 J 50	27 – 77	Одноступенчатая
Oilon Junior Pro 2 LJ 50	27 – 77	Одноступенчатая

Универсальные горелки на российском рынке в основном представлены китайскими производителями: Smart Burner¹³, Master¹⁴, Euronord¹⁵¹⁶. Универсальная горелка Smart Burner прочно заняла свою нишу на рынке отопительного оборудования, как надежное устройство, которое работает на разнотипном отработанном (трансмиссионном, гидравлическом, машинном) масле и другом аналогичном жидком топливе (дизтопливо и отработанное растительное масло, печное топливо, авиационный керосин). Производитель отмечает, что нельзя перерабатывать не регламентированное топливо, при этом нужно следить, чтобы в отработанном масле не было примесей антифриза, бензина и воды. Горелка устанавливается на водогрейные котлы, теплогенераторы и технологические агрегаты. Модельный ряд состоит из 4 одноступенчатых комбинированных моделей с разной шкалой регулируемой мощности, см. таблицу 1.14.

¹³ URL: <http://www.smartburner.ru/>

¹⁴ URL: <http://master-russia.ru/>

¹⁵ URL: <http://www.euronord.ru/>

¹⁶ URL: <https://euronord.nt-rt.ru/>

Универсальные горелки Master серии MB используются для утилизации переработанного масла в печах и котлах отопления разной мощности ряда компаний–производителей. Конструкционные особенности таких горелок позволяют переходить с одного типа топлива на другой без замены и снятия форсуночного блока. Горелки Master позволяют утилизировать разные отработки: моторное масло, дизельное топливо, легкое печное топливо, трансмиссионное и гидравлическое масло. Модельный ряд универсальных горелок Master включает в себя четыре одноступенчатых модели, мощностью от 17 до 500 кВт, см. таблицу 1.15.

Таблица 1.14 – Модельный ряд универсальных горелок Smart Burner

Наименование	Мощность горелки, кВт	Макс. вязкость, при 50 °С, сСт	Цена, руб.
Smart Burner B-05	59 – 24	3	132 000-125 400
Smart Burner B-10	119 – 24	3	145 000-137 750

Таблица 1.15 – Модельный ряд универсальных горелок Master мощностью до 100 кВт

Наименование	Мощность горелки, кВт	Макс. вязкость при 50 °С, сСт	Цена, руб.
Master MB 70	17 – 65	3	144 000
Master MB 100	40 – 100	3	172 000
Master MB 200	80 – 200	3	182 500

Одно из самых интересных и востребованных предложений по горелкам на отработанном масле на Российском рынке является предложение Euronord. В этих горелках используются комплектующие от европейских производителей Siemens и Fida.

Горелки Euronord модельного ряда EcoLogic предназначены для сжигания разного класса отработанного масла и другого жидкого топлива (дизтопливо, легкий мазут и смеси с ним). Горелки Euronord устанавливаются на несъемные и мобильные тепловые генераторы, печи и котлы водяного отопления в закрытых помещениях. Модельная

линейка Euronord представлена одноступенчатыми типами горелок мощностью от 16 до 236 кВт, см. таблицу 1.16.

Таблица 1.16 – Модельный ряд универсальных горелок Euronord мощностью до 100 кВт

Наименование	Мощность горелки, кВт	Макс. вязкость, при 50 °С, сСт	Цена, руб.
Euronord EcoLogic 30	16 – 43	3	137 015-82 209
Euronord EcoLogic 60	59 – 30	3	143 865-86 319
Euronord EcoLogic 120	118 – 55	3	164 106-98 464

Кроме китайских, на российском рынке универсальные горелки предлагают также компании других стран, в частности, США, Канады.

Универсальные горелки CAEQ лидируют на современном рынке отопительного оборудования, как наиболее надежное, адаптированное именно под утилизацию отработанного масла устройство. Модельный ряд горелок представлен 5 серийными одноступенчатыми надувными образцами с максимальной мощностью 305 кВт, см. таблицу 1.17.

Таблица 1.17 – Модельный ряд универсальных горелок CAEQ мощностью до 100 кВт

Наименование	Мощность горелки, кВт	Макс. вязкость, при 50 °С, сСт	Цена, руб.
Caеq 130	38	3	135 000
Caеq 220	64	3	145 000
Caеq 335	98	3	165 000

Горелка универсальная Energy Logic устанавливаются на отопительное оборудование: печи, водогрейные котлы и тепловые генераторы, камеры покраски. Используемое топливо: трансмиссионное, машинное, турбинное, компрессорное, приборное, промышленное отработанное масло; маслоотработка из АКПП и гидравлических систем, а также масло натурального (животного и растительного)

происхождения. Вязкость отработки должна составлять до 90 единиц по SAE; дизельное топливо и керосин; смесь отработанного масла с дизтопливом с содержанием минерального масла не меньше 25 %; печное светлое и темное топливо. В горелках нельзя перерабатывать масло с вязкостью больше 90 Е по SAE (трансформаторное), а также сырую нефть и любые растворители.

Производитель Energy Logic (США)¹⁷ разработал 5 универсальных одноступенчатых моделей, которые подходят к оборудованию наиболее используемых марок, см. таблицу 1.18.

Таблица 1.18 – Модельный ряд универсальных горелок EnergyLogic, до 100 кВт

Наименование	Мощность горелки, кВт	Макс. вязкость, при 50 °С, сСт	Цена, руб.
EnergyLogic B-140	41 – 0	3	171 000
Energy Logic B-200	58 – 0	3	205 000
Energy Logic B-340	0 – 99	3	239 000

В настоящее время котельная промышленность России – одна из самых крупных отраслей энергетической промышленности страны: у нас более двадцати крупных котельных заводов. Основные отечественные производители котлов для строительства новых энергоблоков – это компании «ЗиО-Подольск» (входит в холдинг «Атомэнергомаш») и «ЭМАльянс», включающая таганрогский завод «Красный котельщик» (входит в концерн «Силовые машины»).

Среди отечественных производителей стоит выделить предприятия котлостроения, выпускающие также и горелки жидкотопливные:

- ОАО «Бийский котельный завод» (Бийск),
- ЗАО «РУСНИТ» (Россия),
- Завод паровых установок «Юнистим» (Челябинская область, г. Миасс),
- АО «Дорогобужкотломаш» (Смоленская область),
- ООО «Пикино» (г. Нижний Новгород),
- «ТеплоЭнергоСнаб» (Владимирская область, г. Кольчугино),

¹⁷ URL: <https://www.energylogic.com/>

- Группа компаний «ТЭП-Холдинг» (г. Екатеринбург),
- Группа компаний «БЕЛАМОС»,
- Производители отечественных горелок: ООО «Старорусприбор-Горелки» (Новгородская область, г. Старая Русса), ООО «СибСтронг» (г. Новосибирск) и др. *ОАО «Бийский котельный завод» (г. Бийск)¹⁸*

С начала освоения серийного выпуска газомазутные котлы типа ДКВр и ДЕ комплектуются универсальными газомазутными горелками типа ГМГ, ГМ и ГМП. С 1996 года Бийским котельным заводом освоено и запущено в серийное производство изготовление следующих горелок: ГМ-2,5; ГМ-4,5; ГМ-7; ГМ-10; ГМП-16, ГМГ-1,5; ГМГ-2,0; ГМГ-4,0; ГМГ-5,0. Горелки газомазутные ГМГ, ГМ и ГМП предназначены для отдельного сжигания природного газа и топочного мазута. Горелки газомазутные ГМГ используются с паровыми котлами типа ДКВр с газомазутными топками, а также с водогрейными котлами, разработанными на базе указанных паровых котлов. Горелки газомазутные ГМ и ГМП используются с паровыми газомазутными котлами типа ДЕ-ГМ, а также с водогрейными котлами, разработанными на базе паровых котлов ДЕ-ГМ.

ЗАО «РУСНИТ» (г. Рязань)

ЗАО «РУСНИТ»¹⁹ образовано 2 августа 1994 года на базе рязанского завода «Красное знамя». Сейчас «РУСНИТ» ведет разработку газовых котлов и горелок, а также горелок на жидком топливе. Горелки «РУСНИТ-5035» и «РУСНИТ-5135» могут быть установлены на водогрейных котлах, генераторах горячего воздуха или использоваться как самостоятельное изделие. Горелки «РУСНИТ-50100» предназначены для сжигания дизельного топлива и могут использоваться также на импортном оборудовании для отопления, горячего водоснабжения, тепловых генераторах, в различных тепловых системах. Технические характеристики горелки «РУСНИТ-50100» представлены в таблице 1.19.

¹⁸ URL: <http://www.bikz.ru/>

¹⁹ URL: <http://www.rusnit.ru/>

Таблица 1.19 – Технические характеристики горелки «РУСНИТ-50100».

Мощность, кВт	20-100
Расход дизельного топлива, л/ч	2-10
Габариты, мм	385x315x261
Масса, кг	15

Завод паровых установок «Юнистим» (Челябинская область, г. Миасс)

Завод паровых установок «Юнистим»²⁰ поставляет на рынок уникальное горелочное устройство, не имеющее аналогов для вертикальных прямоточных котлов. Горелочное устройство UNIFLAMER способно работать как на природном газе, дизельном топливе, так и на пропано-бутановой смеси. Экономические расчеты расхода топлива при работе UNIFLAMER показали, что владельцы установок ППУ, СПУ и АДПМ могут экономить на их эксплуатации более 5 млн. руб. в год. В июле 2016 г. комбинированное горелочное устройство UNIFLAMER было запущено в серийное производство.

АО «Дорогобужкотломаш» (Смоленская область)

Выпуск горелочных устройств традиционно составляет отдельное направление производственной программы АО «Дорогобужкотломаш»²¹. Со времени основания предприятия изготавливаются горелки серий РГМГ, ПГМГ и МГМГ. Учитывая программы импортозамещения, в настоящее время основу ассортимента для данного сегмента составляют горелочные устройства нового поколения ГМГР. Сфера применения ГМГР – водогрейные и паровые котлы, работающие на природном газе или жидком топливе, а также другие агрегаты тепловой мощностью кратной мощности одной горелки. ГМГР используются на котлах серии ПТВМ от 35 до 180 МВт (ГМГР-6, 10 и 12) и серии КВ-ГМ в диапазоне мощности 11,63 x 139,6 МВт (ГМГР-12, 16, 20, 25 и 35). Горелки ГМГРБ мощностью от 0,5 до 5,5 МВт имеют модульную конструкцию, позволяющую собирать изделие с наиболее подходящими заказчику параметрами. Горелки серий ГМГР и ГМГРБ не уступают продукции зарубежных производителей по техническим параметрам и оптимальны для российских бюджетов по цене. Горелки

²⁰ URL: <https://unisteam.com/>

²¹ URL: <http://dkm.ru/>

сертифицированы на соответствие требованиям Технического Регламента Таможенного союза.

ООО «Пикино» (г. Нижний Новгород)

Производственная компания «Пикино» основана на базе ГК «АТРИУМ». При производстве газовых и комбинированных промышленных горелок «Пикино» за основу был взят многолетний опыт эксплуатации горелочных устройств различных производителей. В серийном производстве находятся горелки в трех исполнениях: газовые, жидкотопливные и комбинированные, с диапазоном мощностей от 320 кВт до 10,5 МВт.

ООО «Старорусприбор-Горелки» (Новгородская область, г. Старая Русса)

ООО «Старорусприбор-Горелки» (ООО «СПР-Горелки») ²² является дочерним предприятием одного из ведущих производителей российского приборостроения. Выпускаемая компанией продукция, широко известна в России и странах ближнего зарубежья, успешно используется в жилищно-коммунальном хозяйстве и теплоэнергетике. Одним из направлений деятельности Общества является выпуск промышленных горелочных устройств марок ГБЛ, ЖБЛ, КОМБИ. Производственная программа ООО «СПР-Горелки» на сегодняшний день охватывает выпуск газовых, жидкотопливных и комбинированных горелок мощностью от 0,35 до 5,0 МВт с модулируемым регулированием мощности по газу и ступенчатым по жидкому топливу.

Предприятием выпускаются жидкотопливные горелки ЖБЛ-0,85 мощностью 0,85 МВт и ЖБЛ-1,2 мощностью 1,2 МВт, предназначенные для сжигания дизельного или печного бытового топлива. Горелки применяются для работы с отопительными водогрейными котлами, работающими как с разрежением, так и с избыточным давлением в топке, с отопительно-производственными паровыми котлами, а также с другими теплоагрегатами (сушилками, плавильными печами, теплогенераторами и т. д.).

«ТеплоЭнергоСнаб» (Владимирская область, г. Кольчугино)

Завод котельного оборудования «ТеплоЭнергоСнаб» выпускает горелочное оборудование под торговой маркой TES. В номенклатуру компании входят дизельные, мазутные, газовые и комбинированные горелки номинальной мощностью от 0,2 до 42 МВт. Дизельные горелки модели «ТЭС-ГБЖ» мощностью от 200 кВт до 2,8 МВт широко применяются на котлах водогрейного или парового типа, в жаротрубном или

²² URL: <http://www.staroruspribor.ru/>

водотрубном исполнении. Универсальные житкотопливные или комбинированные горелки серии РМГ, АМГ, РГМГ мощностью от 1,1 до 38 МВт, применяются на котлах типов КВа, КВ, КВ-ГМ, паровых котлах типа Е, печах, сушильных бараках, подогревателях мазута на АБЗ. Это горелки ротационного типа. Горелки работают на дизельном топливе и мазуте. Комбинированные газомазутные горелки МГМГ-6 (8; 10) мощностью от 6 до 10 МВт – это стандартные горелки для котлов серии ПТВМ-30 (ПТВМ-50; 100; 120). Завод выпускает горелки для большой энергетики мощностью до 42 МВт.

Группа компаний «ТЭП-Холдинг» (г. Екатеринбург)

Группа компаний «ТЭП-Холдинг»²³ представляет усовершенствованную линейку продуктов – горелки вихревые газомазутные ГМВА, ГМВТ2, ГМВАТ2. Широкий модельный ряд представлен серией ГМВТ2, включающей шесть автоматизированных моделей мощностью от 12 до 50 МВт, и сериями ГМВА и ГМВАТ2, которые состоят из шести типоразмеров от 0,8 до 7,5 МВт. Вихревые газомазутные горелки с индивидуальным подводом воздуха предназначены для отдельного сжигания природного газа ГОСТ5542-2014 и мазута ГОСТ 10585-2013, а также более легких видов топлива – дизельного ГОСТ 305-2013 и печного ТПБ ГОСТ 26432-85. Конструктивные решения допускают кратковременное совместное сжигание газа и мазута во время перехода с одного вида топлива на другой. Горелки низкотоксичны, имеют низкий уровень шума и выбросов (NO_x, СО). Горелки ГК «ТЭП-Холдинг» адаптированы для котлов российского и зарубежного производства. Устанавливаются на топках стационарных паровых котлов паропроизводительностью от 1 до 500 т пара/ч и для водогрейных котлов мощностью от 0,7 до 209 МВт. Размещение горелок на топке котла обеспечивает полное выгорание топлива и равномерное заполнение сечения топки факелом.

ООО «СибСтронг»

ООО «СибСтронг» (Новосибирск) – один из ведущих производителей горелочных устройств на территории России²⁴. Продукция «СибСтронг» реализуется как в России, так и в странах СНГ. «СибСтронг» специализируется на производстве автоматических дутьевых блочных горелок для мазута, нефти, дизеля и др. под маркой ПКА-N на

²³ URL: <http://www.tep-holding.ru/>

²⁴ URL: <http://www.sibstrong.com/>

различных видах жидкого и газообразного топлива производительностью от 50 кВт до 5,0 МВт. Универсальные горелки ООО «СибСтронг» позволяют сжигать: минеральные и синтетические отработанные автомобильные масла, отработанные моторные масла легкие, средние и некоторые виды тяжелых масел, смешанные масла – моторное с добавлением биокомпонентов рапса (использование данного вида топлива не потребует дополнительного переключения горелки), технические масла с соблюдением мер предосторожности (т.к. вода и осадок, собирающиеся в баке огнестойкие), масла растительного и животного происхождения в том числе использованное масло для жарки пищи, чистое растительное масло, в том числе и рапсовое, печное топливо, дизельное топливо.

Модельный ряд универсальных горелок IL-S-V представлен 4 одноступенчатыми образцами с разной мощностью, см. таблицу 1.20.

Таблица 1.20 – Модельный ряд универсальных горелок IL-S-V

Наименование параметра	Ед.изм.	IL-2SV	IL-2SVA	IL-3SV	IL-3S2V
Тепловая мощность	кВт	40-80	40-150	140-250	140-250
Расход топлива	кг/час	1,8-7,2	4,5-14,5	12,6-22,5	12,6-22,5
Расход сжатого воздуха давления	м ³ /час	3-6	7-10	13-16	13-16
Потребляемая электрическая мощность, не более	кВт	1,5	1,5	2,6	2,6
Мощность электродвигателя	кВт	0,37	0,37	0,75	0,75
Мощность топливоподогревателя	кВт	1	1	1,7	1,7
Диаметр топливопровода вх/вых	Дюйм	1/2	1/2	1/2	1/2
Вес, не более	кг	42	42	60	60

Компания Belamos (Россия)

ООО «БЕЛАМОС»²⁵ осуществляет производство и поставку печей и котлов на отработанных маслопродуктах как с ручным управлением, так и полностью автоматизированных отопительных установок с универсальной жидкотопливной горелкой. Универсальные горелки Тепламос Эко используются для сжигания разного

²⁵ URL: <http://www.otopiteli.ru/>

типа отработанного масла, дизельного и печного (светлого, темного) топлива, мазута, с целью получения тепла. Благодаря специальному разьему, горелка Тепламос Эко используется для монтажа на водогрейный котел или тепловой генератор большинства производителей отопительного оборудования.

Модельный ряд универсальных горелок Тепламос Эко представлен 5 одноступенчатыми образцами с разной мощностью, см. таблицу 1.21.

Таблица 1.21 – Модельный ряд универсальных горелок Тепламос Эко.

Наименование	Мощность горелки, кВт	Вид топлива	Тип горелки	Макс. вязкость °Е при 50 °С	Цена, руб.
Тепламос ЭКО 50	43 – 64	Универсальное	Одноступенчатая	3	90 990-86 441
Тепламос ЭКО 70	60 – 99	Универсальное	Одноступенчатая	3	104 200-98 990
Тепламос ЭКО 100	71 – 120	Универсальное	Одноступенчатая	3	106 600-101 270
Тепламос ЭКО 150	84 – 150	Универсальное	Одноступенчатая	3	116 240-110 428
Тепламос ЭКО 200	130 – 201	Универсальное	Одноступенчатая	3	119 000-113 050

Наиболее близким аналогом рассматриваемого горелочного устройства являются универсальные горелки на отработанном масле. Известные универсальные горелки решают проблему отопления и переработки использованного отработанного топлива, которое является одним из самых доступных видов топлива. Его цена меньше стоимости газа, в профильной промышленности оно подлежит утилизации. Действительно, в России, например, до 77% всех отработанных масел попадает в почву или сбрасывается в водоёмы, отравляя окружающую среду вплоть до грунтовых вод. Лишь 14-15% отработанных масел поступает на регенерацию. В Европе «сбрасывается» около 25%

отработанных масел. Из оставшихся 75% треть регенерируется, 49% используется в качестве топлива и 1% уничтожается.

Существует мнение, что котлы на отработке, снабженные специальными жидкотопливными горелками, к примеру, немецкими KROLL или отечественными ГШ, улучшают экологию планеты. Между тем известно, что использование отработки или любого другого жидкого топлива неблагоприятно воздействует на окружающую среду – несмотря на то, что при его сжигании в атмосферу выпускается сравнительно небольшое количество углекислого газа. Выделение микрочастиц сажи часто оказывается значительно вреднее CO₂. Также необходимо учесть, что при отапливании данным способом нужен специальный резервуар для отработанного топлива и жесткие условия транспортировки, чтобы «отработка» снова не попала в почву, в источники воды. Есть и еще один важный аспект – хранение отработки или солярки. Так, в случае с поквартирным отоплением, которое становится все более популярным в нашей стране, это практически невозможно, а при индивидуальном строительстве требует дополнительных вложений, неудобно и достаточно опасно. Кроме того, хранение больших объемов отработки может привести к неблагоприятным экологическим последствиям.

Тем не менее, предлагаемые на рынке универсальные горелки на отработке используются в разных областях промышленности (пищевая, химическая, аграрная), в отоплении, для тепловых генераторов и технологического оборудования, в частном пользовании (кухонных плит, отопительных котлов, бойлеров). Горелки на отработанном масле сжигают избыток переработанного масла на СТО, в гаражах ремонтно-транспортных предприятий, локомотивных депо.

Горелки этой системы эффективно работают на отработке разного происхождения: моторное, вакуумное масло, трансформаторное, промышленное, компрессорное, АКПП масло, дизельный субстрат, трансмиссионное масло, печное топливо легкой структуры. Конструкционные особенности таких горелок позволяют переходить с одного типа топлива на другой без замены и снятия форсуночного блока. На рынке представлен большой ассортимент моделей с разной мощностью.

В состав предлагаемых горелок на жидком топливе обычно входят:

1. Электродвигатель привода вентилятора подачи воздуха. Выполняет принудительное всасывание и нагнетание воздуха в запальную головку и имеет полусферическую систему пропорциональной регулировки давления воздуха на выходе.

2. Топливный насос высокого давления с электродвигателем привода. Он всасывает горючее через топливопровод и подает его под давлением к форсунке распыления (впрыскивания). Линия подачи топлива на запальник может включать в себя специальный завихритель и запальный электрод.

3. Система подогрева топлива. Наличие такой системы позволяет поддерживать температуру на заданном уровне и проводить качественное распыление и сжигание топлива.

4. Форсунка с воспламеняющими смесь электродами. Засасывает и распыляет топливо, обеспечивает условия для его воспламенения.

5. Система фильтрации топлива.

6. Блок управления для запуска, управления и контроля в процессе работы горелки.

7. Регулятор вторичного воздуха поддерживает сформированный факел горения.

Особенность состоит в том, что топливный бак и непосредственно горелка жидкотопливная могут располагаться отдельно друг от друга и даже в отдельных помещениях. Расстояние между этими двумя элементами влияет на мощность топливного насоса.

Работа таких горелок основана на процессе смешивания нагнетаемых к выходному отверстию топлива и воздуха и полному сжиганию этой смеси. Топливо фильтруется, затем с помощью топливного насоса поступает в камеру подогрева, где оно приобретает необходимую вязкость, и подается на форсунку. Одновременно идет всасывание воздушного потока вентилятором. Разогретое горючее всасывается сжатым воздухом, после чего под давлением распыляется форсункой и подается в запальную головку. Продукты горения выводятся на улицу через дымоход, а полученная энергия нагревает теплоноситель.

Недостатки известных жидкотопливных горелок:

– Процесс горения горючей смеси сопровождается сильным шумом, несмотря на использование шумопоглощающих материалов для корпуса. Поэтому некоторые

владельцы загородных домов предпочитают устанавливать системы в отдельной комнате и даже в отдельном здании.

- Нельзя перерабатывать не регламентированное топливо, нужно следить, чтобы в отработанном масле не было примесей антифриза, бензина и воды.
- Неблагоприятное воздействие на окружающую среду.
- Сложность обслуживания.
- Высокая цена.

Предлагаемое горелочное устройство с использованием перегретого водяного пара включает:

- Парогенератор.
- Паровую форсунку для подачи перегретого водяного пара.
- Воздухоподводящие отверстия для подачи воздуха.
- Топливный насос.
- Систему подогрева топлива.
- Блок управления.

Устройство работает следующим образом. В сверхзвуковую паровую струю, истекающую из отверстия паровой форсунки, подают жидкое топливо. Увлекаемое паровой струей жидкое топливо разбивается на мельчайшие частички (капли). К воздухоподводящим отверстиям подносят пламя газовой горелки и через несколько секунд устройство запускается. Однако горение внутри корпуса и, соответственно, нагревание корпуса происходит только вблизи сопла.

Предлагаемое горелочное устройство предназначено для использования в системах автономного отопления, и позволяет перерабатывать широкий ряд топлив, в т.ч. отработку, что свидетельствует о целесообразности сравнивать его с универсальными горелками мощностью до 100 кВт с одноступенчатым регулированием, представленными на рынке. Сравнительные характеристики приведены в таблице 1.22.

Таблица 1.22 – Сравнительные характеристики универсальных горелок малой мощности

Производитель/ вид горелки	Мощность, кВт	Макс. вязкость °Е при 50 °С	Стоимость, тыс. руб
EnergyLogic (США)	0-99	3	171 - 239
Smart Burner (Китай)	24-119	3	125-145
Master (Китай)	17-200	3	144-182
Euronord / EcoLogic(Китай)	16-118	3	82-164
Kroll (Германия)	14-100	3	134-208
Giersch (Германия)	30-100	3	160-245
Тепламос ЭКО (Россия)	43-120	3	86-106
ООО «СибСтронг» / IL-2SV (Россия)	40-80	3	125
ЗАО "РУСНИТ" / "РУСНИТ-50100» (Россия)	20-100	3	34
Исследуемый продукт	до 100	любая	до 30

Особенности универсальных горелок российского производства:

- Устройства имеют в своей конструкции импортные детали европейского качества и стандарта.
- Горелки адаптированы для утилизации отработки и другого жидкого топлива любой модификации. Чтобы перейти от одного класса топлива до другого, нужно произвести регулировку температурного режима нагрева и объем воздушного соединения. Эффективность в работе с альтернативным видом топлива.
- Широкий ряд мощностей, что позволяет выбрать нужную модель под определенный тип котла или теплогенератора.
- Простота в сервисном обслуживании и очистке устройства.
- Прочный корпус горелки шумоизолирован.
- Экологические нормы безопасности.
- Высокий показатель КПД, надежность функционала и долгий срок эксплуатации.
- Продукция имеет все сертификаты качества по ГОСТу.

- Цена горелок не зависит от курса доллара и евро.

Основные преимущества предлагаемого устройства в сравнении с представленными на рынке:

- Низкие показатели по токсичным выбросам.
- Возможность использования нерегламентированных видов топлива.
- Не требуется фильтрация топлива.
- Конструкция проще, т.к. не используются электродвигатель, топливная форсунка с воспламеняющей смесью электродами, система фильтрации, регулятор вторичного воздуха, что влияет на простоту использования и обслуживания и цену устройства.
- Не используется насос высокого давления.
- Используется пар, генерируемый в котле за счет тепла, выделяемого при сжигании самого топлива.
- Цена на порядок ниже импортных горелок.

Таким образом:

В России горелки производят в основном производители котельного оборудования для промышленных котлов большой и средней мощности.

Производителей горелок для котлов малой мощности в России не достаточно, чтобы удовлетворить растущий, в первую очередь, за счёт роста коттеджного и частного домостроения спрос на горелки малой мощности. Дорогие горелки западного производства предпочитают владельцы коттеджей, горелки китайского производства используют другие (менее требовательные) категории потребителей.

Российские горелки не уступают зарубежным по техническим характеристикам и при этом существенно дешевле. В условиях кризиса цена на сопоставимые по характеристикам горелки играет основополагающую роль.

Использовать продукцию российского производителя, специализирующегося на разработке и выпуске надёжных, долговечных, эффективных горелок – как газовых, так и жидкотопливных, а также комбинированных – лучший вариант для коттеджных поселков, частных домовладельцев, ЖКХ и малых промышленных производств. А в период мирового кризиса это удобный способ уложиться в выделенные на замену горелок средства и при этом обеспечить высокое качество теплоснабжения.

Сложившаяся ситуация на рынке будет способствовать успешному продвижению продукта на рынок, в первую очередь российский.

Структура потребителей

Применение горелок на сегодняшний день очень разнообразно, начиная от простой установки горелки для получения тепла для отопления и/или производства горячего водоснабжения, до их использования в технологических процессах, установках по сжиганию мусора, теплогенераторах, котлах. Способные работать на любом типе топлива, жидком и газообразном, горелки могут быть использованы также для сжигания жидкого топлива с очень высокой вязкостью, газоторичной переработки попутного газа и других особенных видов топлива.

Ключевые потребители горелочных устройств:

- производители котельного оборудования (отопительных котлов и горелочных устройств);
- объекты энергетической инфраструктуры (котельные, бытовые котлы);
- промышленные предприятия;
- нефтяные танкеры;
- потребители в местности с отсутствием доступа к централизованному газоснабжению.

Требования потребителей к системам отопления: стабильная работа горелки, соответствие экологическим нормам, длительный срок службы котлов, возможность полной автоматизации работы теплоэнергетической установки, низкий расход топлива и энергоресурсов.

Требования потребителей к горелкам: простота обслуживания; стабильность в работе и высокий показатель КПД; соответствие экологическим стандартам; низкое потребление электрической энергии; бесшумность; возможность установки на котлы любого типа.

Детальная характеристика ключевых потребителей.

1. Производители котельного оборудования.

Среди отраслей тяжелого машиностроения важную роль играет энергетическое машиностроение, представленное производством мощных паровых турбин и

генераторов, гидротурбин и паровых котлов. Оно размещается преимущественно в крупных центрах развитого машиностроения при наличии высококвалифицированных кадров. Основные производители котлов в России: АО «Подольский машиностроительный завод» (ЗиО), ТКЗ «Красный Котельщик», ПАО «Бийский котельный завод», АО «Буммаш», ПАО «БКМЗ», ПАО «Кировский завод», ПАО «Камбарский ЗГО», ООО «Каменский ЗГО», ООО «Белэнергомаш-БЗЭМ», АО «Завод котельного оборудования» и другие.

На сегодняшний день под маркой АО «Подольский машиностроительный завод» (ЗиО)²⁶ выпущено около 900 паровых котлов различной мощности и параметров для 190 отечественных и зарубежных ТЭС общей мощностью свыше 85 млн. кВт, в том числе более 16 млн. кВт на экспорт. Котлы успешно работают на тепловых электростанциях России, Беларуси, Болгарии, Вьетнама, Германии, Греции, Казахстана, Китая, Румынии, стран бывшей Югославии и др.

Таганрогский котлостроительный завод «Красный котельщик»²⁷, входящий в состав концерна ПАО «Силовые машины», одна из ведущих компаний отечественного котлостроения. Предприятием поставлено более 3000 котельных агрегатов. География поставок: Казахстан, Беларусь, Россия, Монголия, Украина, Узбекистан, Азербайджан, Югославия, Хорватия, Иран, Греция, Вьетнам и др. страны

«Бийский котельный завод», входящий в «ТЭП-Холдинг» до недавнего времени специализировался на производстве котлов и оборудования исключительно для сегмента «малой энергетики» (паровые и водогрейные котлы). В настоящее время завод расширяет номенклатурный ряд производимого оборудования в сторону рынка «средней энергетики». Доля «БиКЗ» на рынке по паровым котлам – не менее 30%, по водогрейным котлам – около 3%.

Крупные производители котлов производят также и горелочное оборудование. Как правило, они имеют не только производственные мощности, но научно-технические подразделения, занимающиеся разработками новой продукции. Крупные производители заинтересованы в сохранении лидирующих позиций на рынке, что достигается, в том числе, за счет внедрения новейших разработок.

²⁶ URL: <http://podolskmash.ru/>

²⁷ URL: <http://www.tkz.su/>

2. Объекты энергетической инфраструктуры для отопления и водоснабжения (котельные, бытовые котлы).

Применение: отопление и горячее водоснабжение обогрев одно- и многоквартирных домов, обогрев административных зданий, подогрев хозяйственной воды, подогрев воды в бассейнах, генераторы теплого воздуха, установки инфракрасного излучения тепла, передвижные котельные.

Наибольшее распространение жидкотопливные горелки получили:

- для оснащения водогрейных котлов в отоплении жилых кварталов (городские, районные котельные), промышленных объектов (заводские котельные);
- для «подсветки» и розжига угольных котлов ТЭС.

Основная область применения промышленных и бытовых котлов – отопление жилого сектора. В России теплоснабжение обеспечивают кроме 500 ТЭЦ и 6,5 тыс. котельных мощностью более 20 Гкал/ч, более 180 тыс. мелких котельных и около 600 тыс. автономных индивидуальных котлов.

Задача модернизации оборудования котельных является важнейшей и актуальнейшей для ЖКХ, и её решение не терпит отлагательства. Устаревшие горелки выходят из строя.

Драйвером роста рынка в этом сегменте потребителей являются следующие факторы:

- физический износ оборудования котельных, достигающий 56,7%;
- низкий КПД (не превышает 80% на более чем 50% котельных);
- высокая себестоимость генерации тепла (до 5-6 тыс. руб. за 1 Гкал);
- убыточность 94% муниципальных и ведомственных котельных.

В сегменте горелок для систем индивидуального отопления (горелки мощностью до 500–600 кВт, которые устанавливаются в котельных частных домов, небольших производственных и торгово-административных зданий) потребители проявляют интерес к системам отопления, имеющим низкий расход топлива и энергоресурсов, а также высокий уровень автоматизации.

Для систем отопления (котельных) с высоким уровнем автоматизации, погодозависимым регулированием, а также низким расходом топлива и энергоресурсов лучше подходят модулируемые горелки или горелки с плавно-двухступенчатым регулированием, которые обеспечат возможность программирования мощности и

широкий рабочий диапазон регулирования горелки. Такие системы требуют больших первоначальных финансовых вложений.

Для более дешевых систем отопления, которые не требуют больших первоначальных финансовых вложений и при этом обеспечивают надежную работу, низкий расход топлива и энергоресурсов, подходят горелки с одноступенчатым, двухступенчатым режимами работы.

В сегменте горелок для систем отопления крупных жилых комплексов (горелки мощностью более 600 кВт для нужд жилищно-коммунального хозяйства, центрального отопления, а также для теплоснабжения крупных производственных и торгово-административных зданий) потребители проявляют интерес к системам отопления, имеющим высокий уровень автоматизации, максимально низкий расход топлива и электроэнергии, а также возможность автоматического регулирования по остаточному кислороду в дымовых газах (кислородное регулирование), что обусловлено: большой мощностью котельных. Для данной группы идеально подходят плавно-двухступенчатые или модулируемые горелки.

Владельцы малых котельных и бытовых котлов, требующих замены или модернизации, заинтересованы в приобретении надёжного и качественного оборудования, обеспечивающего надежную работу, низкий расход топлива и энергоресурсов и при этом не дорогостоящего. С учётом тенденций на рынке «средней и малой энергетики» они будут приобретать оборудование отечественных или китайских производителей.

Если учесть, что многие производители продают свои котлы без установленной горелки, а пользователь уже сам выбирает, какая горелка ему нужна, данная ниша представляет интерес, особенно с учетом существенных преимуществ предлагаемого продукта при низкой его стоимости.

Рост спроса на рынке котлов малой и средней мощности для автономных систем отопления в новостройках, таких как, малоэтажные дома, таунхаусы, индивидуальные коттеджи, сельские и дачные строения, способствует росту спроса на горелочные устройства.

Особенно перспективна ниша сельских и дачных новостроек. Здесь владельцы отдают предпочтение оборудованию более низкого ценового диапазона.

3. Промышленные предприятия.

Горелочные устройства могут быть использованы не только на котлоагрегатах, но и на другом технологическом оборудовании. Например, в печном хозяйстве предприятий, на сушильных барабанах, зерносушилках, технологических печах, печах по перегонке нефтепродуктов и т. д.

Интерес представляет ниша использования горелок как в котельных промышленных предприятий, так и в печном хозяйстве, технологических процессах промышленных предприятий, где сжигаемое топливо является либо попутным продуктом, либо результатом технологического процесса (химическое производство).

В сегменте горелок для применения на технологическом оборудовании используются горелки любой мощности, в зависимости от мощности технологического оборудования. Для данных потребителей предпочтительны модулируемые горелки. Выбор таких горелок определен в первую очередь технологическими требованиями производства. Например, при некоторых производственных процессах требуется выдерживать строго определенный температурный график и не допустить перепадов температуры, иначе это может привести к нарушению технологического процесса, порче продукции и как результат к значительным финансовым потерям. Горелки со ступенчатым регулированием также могут применяться на технологических установках, но лишь в тех случаях, когда незначительные колебания температуры допустимы и не влекут за собой негативных последствий.

Потребители горелок для применения в составе технологического оборудования:

- Химическая промышленность: выпаривание, дистилляция, подогрев, прокаливание, сушка, расщепление, экстракция.
- Деревообрабатывающая промышленность: сушка дерева и шпона, производство натяжных плит, сжигание стружки и опилок, сушка древесного угля, клееварка.
- Содовая промышленность, продукция которой применяется в стекольной и химической, а также в цветной металлургии, целлюлозно-бумажной промышленности, текстильной и в быту.
- Металлургическая промышленность: плавильные печи (цветные металлы), обезжиривающие установки, прессы, оцинковка, гальванизация, эмалировка, промывка и чистка, сушка лака, защитный газ.
- Кожевенная промышленность: подвесные сушилki, вальцовые сушилki, водогрейные и паровые котлы, экстракторы.

- Текстильная промышленность: сушилки для тканей и пряжи, окраска, отбеливание, аппретирование, стиральные машины, гладка, чистка.
- Производство бумаги и пленки: ленточные и вальцовые сушилки, рабочий пар, производство клетчатки (кипятильники), упаковка из сжимающейся пленки.
- Пищевая промышленность: фритюрницы, камерные и распылительные сушилки, хлебопекарные печи, паровые котлы, дистилляционные аппараты, сушловарочные и другие котлы, обжарочные аппараты.
- Строительство: производство строительных материалов, сушка песка, производство кирпича, керамическая промышленность, стекольная промышленность, строительные сушилки.
- Сельское хозяйство: сушка зерновых, трав, овощей и фруктов, производство зеленого корма, пропаривание различных поверхностей, труб и фольги, консервирование, дистилляция, стерилизация, варка и пропаривание.
- Транспорт: обогрев вагонов, стрелок и постов централизации; водный транспорт: производство паровых двигателей для отопления, водогрейные котлы для обогрева баков, обогрев плавучих деррик-кранов для морского бурения; воздушный транспорт: обогрев взлетно-посадочных полос, покрасочные материалы.
- Предприятия по переработке отходов: сжигание вредных веществ, переработка туш животных, сжигание загрязнений воздуха, документов, запальные устройства.
- Предприятия, утилизирующие отработанное масло.

Химическая промышленность России по количеству основных фондов уступает лишь топливно-энергетическому комплексу, машиностроению и металлургии. Доля химической отрасли в объеме выпуска всей обрабатывающей промышленности составляет 9%. Всего в Российской Федерации функционирует около 8 300 предприятий, чья экономическая деятельность относится к «химическому производству». Самые крупные из них – это «Сибур Холдинг», «Салаватнефтеоргсинтез» и «Нижникамскнефтехим», занятые в сфере нефтехимии, а также «Уралкалий», «Еврохим», «ФосАгро» и «Уралхим», производящие минеральные удобрения. Большинство предприятий химической промышленности было построено еще в годы существования Советского Союза. Их потенциал позволял обеспечивать как внутренний, так и внешний рынки необходимой продукцией. Однако сегодня данная отрасль требует реформирования. Перспективы развития химической промышленности во многом

связаны с переоснащением производства.

Рынок производства кальцинированной соды в РФ стабильно показывает положительную динамику роста. Всего в РФ 10 предприятий: В числе важнейших можно выделить: АО «Башкирская содовая компания» из Республики Башкортостан, ПАО «Березниковский Содовый Завод» из Пермского Края, ЗАО «Пикалевская сода» из Ленинградской области. Предприятия в настоящее время реализуют мероприятия по обновлению оборудования и оптимизации технологических процессов.

Сегодня металлургическую промышленность России представляют 9 крупнейших компаний, которые обеспечивают 80% всего производимого металла. Это такие компании, как «ЕвразХолдинг», «Новолипецкий металлургический комбинат», «Северсталь», Магнитогорский металлургический комбинат», «Мечел», «УК Металлинвест», «Объединенная металлургическая компания», «Трубная металлургическая компания», «Группа Челябинский трубопрокатный завод». Развитие металлургической промышленности идёт по пути укрупнения. Металлургические заводы потребляют значительное количество тепла в виде водяного пара на технологические нужды, а также горячей воды для вентиляции, отопления и горячего водоснабжения. Прогнозные ожидания уровня спроса на металлургическую продукцию в 2018 году оптимистичные: рост производства стали в мире ожидается на уровне 1-2%, рост спроса по итогам прошедшего года составил 2-3%. Россия – не исключение, здесь также ожидается повышение показателей производства по сравнению с 2017 годом. Спрос на металл в рамках программы импортозамещения сохраняется, Правительство предпринимает меры для поддержки металлургии. В соответствии с трендом металлургические компании России наращивают производственные мощности, модернизируют оборудование, расширяют номенклатуру производимой металлопродукции.

Большинство промышленных предприятий России, в первую очередь средних и мелких, требует переоснащения производства, не только котельного, но и другого энергогенерирующего оборудования.

4. Использование горелочного устройства на нефтяных танкерах в силовых установках.

Общее количество танкеров в мире на составляет около 13 тыс. Самыми крупными судовладельцами до недавнего времени считались нефтяные гиганты «семь сестер»,

включая «Эксон», «Шелл», «Бритиш Петролеум», «Мобил» и др. Флот «Бритиш Петролеум», например, по грузоподъемности в два раза превышал флот Советского Союза в период его расцвета в 1970-е годы. В наши дни 20 крупнейших компаний контролируют 25-28% мирового танкерного флота. Российский торговый флот в целом находится сегодня в состоянии упадка и перевозит приблизительно 1,5% всего внешнеторгового оборота страны в отличие от 65-70% во времена СССР, когда он обеспечивал ежегодные поступления в бюджет в сумме более 2,5 млрд. USD. Самыми крупными судоходными компаниями России являются: «Совкомфлот» (100% акций у государства) в группе с «Новошипом» (50,3% акций у государства), Приморское морское пароходство (ныне частная компания). Эта ниша имеет перспективы в случае развития танкерного флота России.

5. Использование жидкотопливных горелочных устройств в местности с отсутствием доступа к централизованному газоснабжению.

В России существуют регионы, где возможно использование только мазута, как энергоносителя. Регионы Крайнего Севера, удаленные воинские части и погранзаставы и т.п. потребители являются наиболее перспективной нишей для использования жидкотопливных горелочных устройств в системах отопления.

Крупные производители котлов производят также и горелочное оборудование. Как правило, они имеют не только производственные мощности, но научно-технические подразделения, занимающиеся разработками новой продукции. Крупные производители заинтересованы в покупке исключительных лицензий на новый продукт с целью внедрения в производство и поддержания лидирующих позиций на рынке. Их возможности: наличие бюджета на организацию производства, его развитие, наличие сбытовой базы (потребителей).

В России насчитывается более 180 тыс. мелких котельных и 600 тыс. автономных бытовых котлов. Интерес потребителей заключается в приобретении качественного оборудования, обеспечивающего надежную работу, низкий расход топлива и при этом не дорогостоящего.

Интерес представляет ниша использования горелок, как в котельных промышленных предприятий, так и в печном хозяйстве, технологических процессах промышленных предприятий, где сжигаемое топливо является либо попутным продуктом, либо результатом технологического процесса (химическое производство).

Перспективность этой ниши подтверждается тем, что большинство промышленных предприятий России, в первую очередь средних и мелких, требует переоснащения производства, не только котельного, но и другого энергогенерирующего оборудования. Такие предприятия вынуждены внедрять более прогрессивные технологии для того, чтобы быть конкурентоспособными на рынке. В качестве приоритетных факторов роста они делают ставку на инновационные и ресурсосберегающие технологии.

Таким образом результаты проведенных маркетинговых исследований позволяют сделать вывод о перспективе коммерциализации разработанного горелочного устройства и вывода его на рынок жидкотопливных горелочных устройств.

1.6 ОБОСНОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Выполненный обзор научно-технической, методической и нормативной литературы показал, что использование водяного пара является эффективным способом снижения концентрации NO_x и CO в продуктах сгорания широкого спектра углеводородов. Причина подавления производства оксидов азота NO_x обычно заключается в снижении температуры пламени благодаря увеличению теплоемкости горючей смеси при наличии водяного пара. Водяной пар используется во множестве практических приложений для достижения ряда важных эффектов, от снижения тепловой нагрузки и подавления детонации в камере сгорания до эффективного диспергирования тяжелых топлив и сжигания водо-топливных эмульсий. В отличие от процессов в газотурбинных установках и двигателях внутреннего сгорания, влияние пара на горение жидких углеводородов в горелочных устройствах на сегодня изучено недостаточно полно, ряд важных вопросов по-прежнему остается открытым и требует дальнейшего исследования. В частности, влияние режимных параметров (расход и температура перегрева пара, скорость потока), способов диспергирования и смесеобразования на тепловые и экологические характеристики сжигания топлива.

Основные направления исследований, по которым в последние годы появилось особенно много зарубежных публикаций (включая патенты), связаны с изучением сжигания биотоплива. Наиболее близкой по методологии является работа [62], в которой рассматриваются три варианта подачи пара при сжигании керосинового спрея: пар подается непосредственно в топливо и распыляется вместе с ним; пар смешивается с

воздухом и подается в камеру сгорания; пар подается через боковые отверстия в камере сгорания. Авторы отмечают снижение производства оксидов азота при подаче пара. Однако эти результаты получены для высококачественного жидкого топлива (керосин), которое хорошо воспламеняется. Используемая распылительная горелка не обеспечит сжигание жидких углеводородных отходов. Кроме того, используется пар при температуре 110 °С, т.е. с низкой степенью перегрева. Не изучено влияние температуры и расхода пара на образование NO_x .

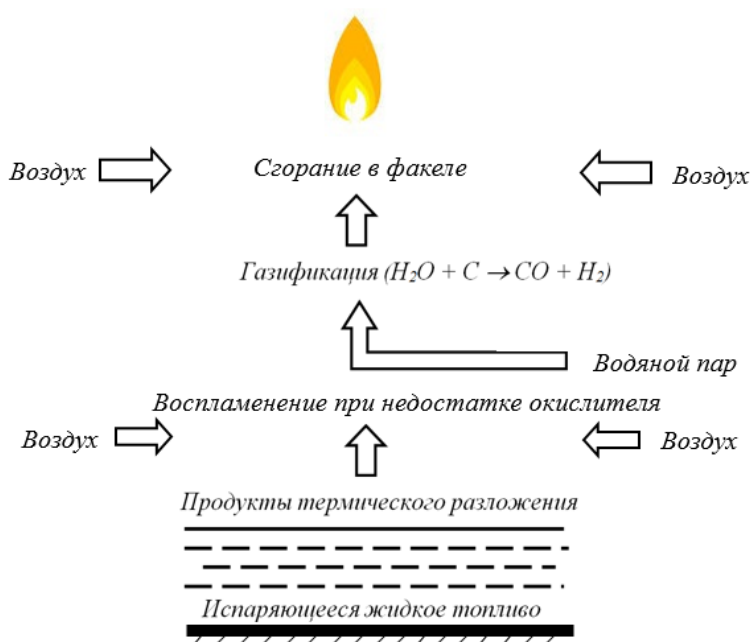
Не вызывает сомнений актуальность диссертации, направленной на разработку технических решений и создание нового типа горелочного устройства для энергоэффективного и экологически безопасного сжигания некондиционных жидких углеводородных топлив с применением паровой газификации. Как показал анализ научно-технической литературы, эффект повышения экологических характеристик процесса сжигания (в том числе – «тяжелых» углеводородных топлив) в существенной мере зависит от организации подвода водяного пара и его параметров. Это убедительно подтверждается результатами цикла экспериментов, проведенных ранее в ИТ СО РАН по сжиганию «тяжелых» и некондиционных жидких топлив (картерные отходы, сырая нефть и т.п.) в опытных горелочных устройствах испарительного типа с подачей струи перегретого водяного пара в зону горения, см. Рисунок 1.8-а. Специфика такого способа сжигания [93] (см. схему на Рисунке 1.8-б) связана с подачей в зону горения перегретого водяного пара, что обеспечивает паровую газификацию углеродосодержащих продуктов термического разложения и неполного сгорания жидкого топлива, интенсификацию реакции и высокую степень выгорания углерода [98], [99].

На примере горения дизельного топлива в автономных горелочных устройствах (до 50 кВт) получен ряд новых научно-технических результатов [98], [99], [100], [101], позволивших задать направление развитие работ, которые вошли в диссертацию. Разработана и применена методика измерения скорости высокотемпературного потока на основе метода цифровой трассерной визуализации, успешно апробирован способ засева реагирующего потока трассерами – микроскопическими частицами оксида кремния, образующимися в факеле при добавлении силиконового масла в жидкое топливо [98]. Проведены термопарные и тепловизионные измерения распределения температуры в факеле горелочного устройства испарительного типа, показано, что температура в факеле достигает 1500°С [100], [101]. Сопоставлены экологические

показатели при сжигании дизельного топлива в режимах с подачей в зону горения паровой струи и с подачей воздушной струи [99]. Показано, что состав продуктов сгорания при использовании пара удовлетворяет действующим экологическим нормативам. Это относится, прежде всего, к низкому содержанию угарного газа (на уровне 10 ppm – в 10 раз ниже ПДК) и оксидов азота (на уровне 30 ppm – в 6 раз ниже ПДК). Причем этот эффект становится слабее, если интенсифицировать горение не паром, а воздухом: по оксидам углерода – на порядок, а по оксидам азота – вдвое. Показано, что в режиме с паровой газификацией обеспечиваются высокие интенсивность и полнота сгорания топлива – измеренные значения тепловыделения с точностью до погрешности измерений соответствуют высшей теплоте сгорания дизельного топлива (около 46 МДж/кг).



(а)



(б)

Рисунок 1.8 – (а) Горение дизельного топлива в автономном горелочном устройстве испарительного типа с подачей струи перегретого водяного пара; (б) схема процесса горения жидкого топлива в горелочном устройстве [137], [138]

Проведенные испытания на проточных автономных горелках испарительного типа [94], [101], [103], [104], продемонстрировали существенное влияние параметров водяного пара на основные характеристики процесса. Для данного способа сжигания характерны устойчивое воспламенение, интенсификация горения, высокая полнота

сгорания топлива, экономичность, возможность практической реализации в автономных горелочных устройствах различной мощности. Результаты проведенного комплекса экспериментальных исследований свидетельствуют в пользу того, что способ сжигания в струе перегретого водяного пара является перспективным для достижения поставленной цели диссертации по эффективной и экологически безопасной утилизации жидких углеводородов и производственных отходов с получением тепловой энергии.

Достоинством автономных горелочных устройств является создание потока перегретого водяного пара без использования внешних устройств и источников энергии. В то же время такая конструкция горелочного устройства не позволяет регулировать параметры пара для управления горением и изучения закономерностей влияния параметров водяного пара на основные характеристики процесса горения жидких углеводородов (состав продуктов сгорания и удельная тепловая мощность). С целью обеспечения такой возможности в данной работе используется электрический парогенератор, позволяющий получать поток перегретого пара в широком диапазоне задаваемых значений расхода и температуры.

Кроме этого, в испарительных горелочных устройствах сжигание «тяжелых» топлив не является эффективным по причине неустойчивости воспламенения, высокой нестабильности горения в топочной камере, относительно быстрого коксования поверхностей горелок и др. Поэтому для сжигания таких топлив в режиме с паровой газификацией необходимы разработка и исследование принципиально иных способов подачи топлива и смешения его с водяным паром.

Одним из перспективных способов распыла жидких углеводородов является техническое решение, основанное на взаимодействии жидкости с высокоскоростным потоком пара [95]. Отличительной особенностью данного способа является то, что топливо и распыляющая среда (несущая фаза) – водяной пар – предварительно не смешаны друг с другом: перегретый пар выходит из форсунки в виде струи, в которую подается жидкое топливо, в результате чего формируется мелкодисперсный газочапельный поток (Рисунок 1.9). На практике это является важным преимуществом, поскольку нет контакта жидкого топлива с форсункой, что предотвращает коксование ее поверхностей и последующие сбои в работе горелочного устройства, а также позволяет сжигать загрязненное топливо и жидкие горючие отходы (Рисунок 1.10). Данный способ распыла топлива может быть успешно применен при создании опытных горелочных

устройств и является одним из важных факторов, определяющих новизну разрабатываемых принципиальных технических решений.



Рисунок 1.9 – Диспергирование жидкого топлива струей водяного пара



Рисунок 1.10 – Примеры закоксованных топливных форсунок

Целью диссертации является разработка и научное обоснование новых технических решений по созданию нового типа горелочного устройства с подачей перегретого водяного пара для энергоэффективного и экологически безопасного сжигания (утилизации) некондиционных жидких углеводородных топлив (и горючих производственных отходов).

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Систематизация сведений об исследуемой проблеме, аналитический обзор зарубежных и отечественных научных информационных источников, выбор и обоснование направления исследований.
2. Разработка и создание экспериментальных установок для исследования характеристик горения жидких углеводородов в присутствии перегретого водяного пара.
3. Разработка и создание горелочного устройства для сжигания жидкого топлива с распылением струей перегретого водяного пара.

4. Экспериментальное (лабораторное) исследование процессов при горении жидких углеводородов с подачей перегретого водяного пара в широком диапазоне изменения управляющих параметров.

5. Определение закономерностей влияния физических параметров (расход топлива, расход и температура пара, способ смесеобразования) на газодинамические, теплофизические и экологические характеристики сжигания некоторых видов жидкого топлива.

Полученные результаты также востребованы для верификации математической модели и численного моделирования процесса горения жидких углеводородов с подачей перегретого водяного пара [105].

ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 1

В результате обзора научно-технической литературы, проанализированы отечественные и зарубежные источники по теме диссертации. Описаны основные особенности сжигания жидкого топлива. При распылении форсунками некондиционного топлива на практике возникают проблемы, связанные с засорением каналов и коксованием элементов форсунки, приводящие со временем к сбою в работе горелочного оборудования. Поэтому является актуальным создание специальных способов получения высокодисперсного устойчивого газочапельного потока для обеспечения эффективного смешения горючих компонентов и окислителя в объеме камеры сгорания.

Выполнен анализ работ по использованию воды (пара) в процессе горения углеводородов, описаны основные эффекты, достигаемые при таком способе сжигания. Показано, что использование водяного пара является эффективным способом снижения содержания NO_x и CO в продуктах сгорания широкого спектра углеводородов. Причина подавления производства оксидов азота NO_x обычно заключается в снижении температуры пламени благодаря увеличению теплоемкости горючей смеси при наличии водяного пара. В отличие от процессов в газотурбинных установках и двигателях внутреннего сгорания, влияние пара на горение жидких углеводородов в горелочных устройствах на сегодня изучено недостаточно полно, ряд важных вопросов остается открытым и требует дальнейшего исследования. В частности, влияние режимных параметров (расход и температура перегрева пара, скорость потока), способов диспергирования и смесеобразования на тепловые и экологические характеристики сжигания топлива.

Проведены патентные исследования жидкотопливных горелочных устройств, показаны основные недостатки аналогов, сделан вывод о том, что исследуемое горелочное устройство обладает новизной и изобретательским уровнем, соответствует условию промышленной применимости. Несмотря на широкое разнообразие конструкций горелочных устройств для сжигания жидкого топлива, задача эффективного и экологически безопасного сжигания некондиционных углеводородов остается по-прежнему актуальной. Предложенное решение за счет особенностей конструктивного исполнения позволяет создать компактное и эффективное горелочное устройство с кратковременным запуском, стабилизированным воспламенением паромасляной струи

во время работы устройства без дополнительных устройств и топлива, и возможностью сжигания загрязненных некондиционных жидких углеводородов с соблюдением действующих экологических нормативов.

Проведен обзор рынка горелочных устройств до 100 кВт на жидком топливе. Маркетинговые исследования показали перспективы коммерциализации и вывода новой продукции на рынок котельного оборудования и горелочных устройств в России.

Обосновано направление исследования и актуальность работы. Проведенные ранее испытания на прямоточных автономных горелках испарительного типа продемонстрировали существенное влияние параметров водяного пара на основные характеристики процесса. Специфика такого способа сжигания связана с подачей в зону горения перегретого водяного пара, что обеспечивает паровую газификацию углеродосодержащих продуктов термического разложения и неполного сгорания жидкого топлива с образованием водяного газа ($\text{H}_2\text{O} + \text{C} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$), интенсификацию реакции и высокую степень выгорания углерода (сажи). Для данного способа сжигания характерны устойчивое воспламенение, интенсификация горения, высокая полнота сгорания топлива, экономичность, возможность практической реализации в автономных горелочных устройствах различной мощности. Результаты проведенного комплекса экспериментальных исследований свидетельствуют в пользу того, что способ сжигания в струе перегретого водяного пара является перспективным для достижения поставленной цели диссертации по эффективной и экологически безопасной утилизации жидких углеводородов и производственных отходов с получением тепловой энергии.

2 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОДЯНОГО ПАРА НА СОДЕРЖАНИЕ САЖИ В ПРОДУКТАХ СГОРАНИЯ

В данном разделе приводятся результаты экспериментальных исследований характеристик частиц сажи, образующихся в процессе сжигания дизельного топлива в лабораторном образце автономного горелочного устройства испарительного типа с подачей струи перегретого водяного пара или струи воздуха.

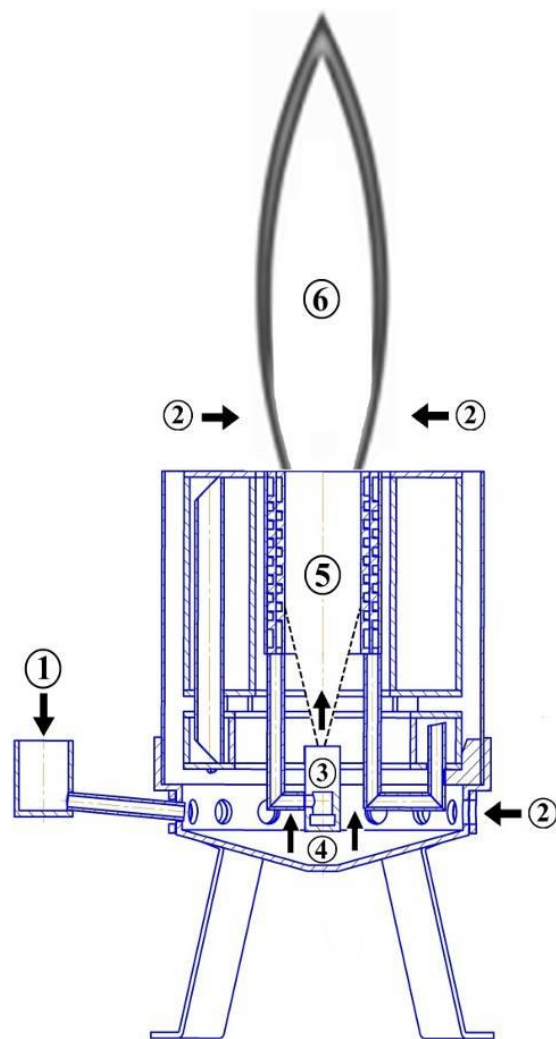
2.1 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Исследования выполнялись на лабораторном образце оригинального автономного горелочного устройства испарительного типа мощностью 10 кВт [94], [98], [100], см. рисунок 2.1-а, реализующего способ сжигания топлива с использованием перегретого водяного пара [93]. Нагрев воды и перегрев пара (~ 400 °С), поступающего через форсунку в зону горения, обеспечиваются за счет тепловыделения реакции. Подача воздуха в горелку – естественная. Для данного способа сжигания характерно то, что испаряющиеся компоненты топлива вначале воспламеняются в условиях недостатка окислителя (кислород воздуха) и промежуточные продукты содержат большое количество сажи (зона 4 на рисунке 2.1-б). Подача в зону горения струи перегретого водяного пара приводит к газификации продуктов неполного сгорания топлива, интенсификации реакции и выгоранию углерода. Образующийся синтез-газ (СО и Н₂) догорает в факеле, смешиваясь с кислородом из внешней атмосферы (зона 6 на рисунке 2.1-б). Зона смешения продуктов неполного сгорания топлива и водяного пара находится внутри горелки (зона 5 на рисунке 2.1-б). В случае сжигания топлива в режиме с подачей струи воздуха, вместо струи водяного пара, положение зоны 5 не изменяется.

При измерениях режимные параметры работы горелочного устройства составляли: расход пара 0,27 кг/ч; расход топлива 0,6 кг/ч; видимая высота факела 120–140 мм.



(a)



(б)

Рисунок 2.1 – Внешний вид автономного испарительного горелочного устройства (а); схема процесса сжигания топлива в горелочном устройстве (б): 1 – жидкое топливо, 2 – атмосферный воздух, 3 – перегретый водяной пар, 4 – зона воспламенения продуктов термического разложения топлива, 5 – зона смешения продуктов неполного сгорания топлива и водяного пара (зона газификации), 6 – внешний факел (зона догорания непрореагировавших компонентов смеси в атмосферном воздухе)

Средняя концентрация и распределение по размерам (дисперсный состав) частиц сажи во внешнем факеле горелочного устройства определялись с помощью диффузионного спектрометра аэрозолей (ДСА), см. рисунок 2.2, разработанного в Институте химической кинетики и горения СО РАН [106], [107], [108]. ДСА представляет собой последовательно соединенные диффузионную батарею (для сепарации частиц по размерам), конденсационный укрупнитель (в котором наночастицы

вырастают до микронных размеров за счет конденсации паров дибутилфталата) и фотоэлектрический счетчик (для регистрации укрупненных частиц). Принцип действия диффузионных батарей основан на определении коэффициента диффузии наночастиц и восстановлении их распределения по размерам из известной зависимости коэффициента диффузии частиц от их размера. Коэффициент диффузии наночастиц определяется из измерения коэффициента осаждения (или проскока) аэрозольных частиц при прохождении через пористую среду или капиллярные трубки за счет диффузии. В качестве пористой среды используется пакет сеток, установленный перпендикулярно двухфазному потоку газа с частицами. Разработанная математическая модель диффузионного осаждения наночастиц в таких процессах позволяет восстанавливать распределение наночастиц по размерам. Для регистрации и счета частиц, прошедших данную секцию диффузионной батареи, они направляются в конденсационную камеру, где укрупняются до оптически регистрируемого размера и далее поступают в оптический счетчик. В ходе цикла накопления первичных данных происходит регистрация концентрации аэрозоля, взятого последовательно из каждой секции диффузионной батареи. Далее проводится компьютерная обработка набора коэффициентов проскока с помощью программного пакета для работы с ДСА, и в результате определяется распределение частиц по размерам. Основные характеристики прибора: диапазон измеряемых диаметров частиц 3–200 нм; диапазон измеряемой концентрации без использования дополнительного разбавления не более $5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$; объемный расход анализируемого аэрозоля 1 л/мин; время одного измерения дисперсного состава 3 мин, концентрации – 5 с; относительная погрешность 10 %. Для измерения более высоких концентраций (до 10^9 см^{-3}) используется два типа разбавления: 1) разбавление в камере эжектора при смешивании потока аэрозоля с чистым воздухом; 2) разделение потока с аэрозолем при помощи специальных разбавителей на две части, одна из которых проходит через аэрозольный фильтр, после чего две части смешиваются (с помощью турбулизатора). Прибор хорошо зарекомендовал себя на практике [109].



Рисунок 2.2 – Диффузионный спектрометр аэрозолей

При отборе проб из факела необходимо немедленное разбавление для охлаждения и «замораживания» происходящих процессов горения и коагуляции [110]. Отбор проб осуществлялся через специальный эжектор. Зонд эжектора – керамическая трубка длиной 95 мм, внутренний диаметр 0,8 мм, внешний диаметр 3 мм. При расходе через зонд 1,2 л/ч скорость потока составляет 0,6 м/с, а характерное время пребывания аэрозоля в зонде до разбавления – 160 мс. Коэффициент разбавления эжектора определяется объемным расходом подаваемого потока чистого воздуха. Эжектор прокалиброван в диапазоне расхода от 100 до 800 л/ч при помощи плёночного расходомера. На коэффициент разбавления аэрозольного потока влияет осаждение частиц в зонде. При продолжительном отборе регулярно проводилась прочистка зонда при помощи нагнетания большого потока воздуха.

Методика проведения измерений заключалась в следующем (см. рисунок 2.3). Поток сжатого воздуха из магистрали (300 л/ч) поступал через редуктор и ротаметр в эжектор. Характерный коэффициент разбавления эжектора – 100. При таком разбавлении концентрация частиц была выше предела измерения прибора. Поэтому после эжектора дополнительно устанавливались разбавители концентрации аэрозолей (в 20 и 10 раз, в зависимости от измеряемой концентрации), после которых устанавливался турбулизатор для гомогенизации потока. В другом варианте (рисунок 2.3) поток из эжектора поступал через буферный объём в течение 1 мин с расходом 1 л/мин, из которого затем бралась проба на анализ в ДСА.

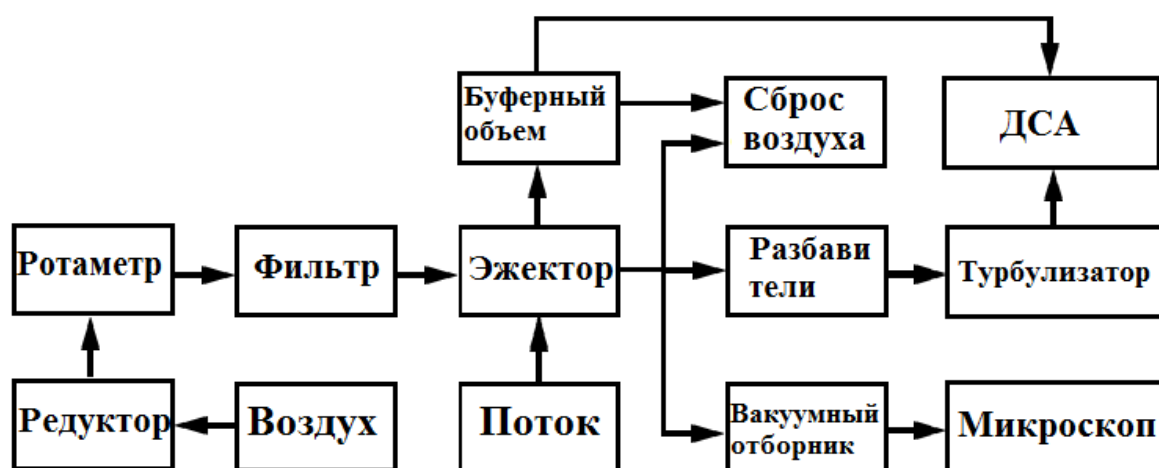


Рисунок 2.3 – Схема измерений

С помощью вакуумного пробоотборника выполнен отбор проб для электронного микроскопа. К преимуществам такого отборника можно отнести относительно высокую производительность (время отбора 20 с), а недостатком является искажение спектра из-за преимущественного отбора более крупных частиц. При помощи координатно-перемещающего устройства зонд эжектора помещался в различные точки потока. Частицы осаждались на медную сеточку (\varnothing 3 мм, размер ячейки 40×40 мкм), покрытую плёнкой поливинилформала. С использованием просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на двух разных микроскопах (JEM-100SX, JEOL JEM-2010) получены снимки сажевых частиц, отобранных из разных точек пламени, с целью изучения размеров и структуры образующихся агрегатов. Кроме того, измерены концентрация и дисперсный состав частиц в продуктах сгорания, охлажденных до комнатной температуры в проточном калориметре [99]. На выходе из калориметра также производился отбор частиц на аэрозольный фильтр для массового анализа.

По аналогичной методике были проведены измерения при сжигании дизельного топлива с подачей в зону горения воздушной струи, вместо струи пара. Проходя через элементы конструкции горелочного устройства, воздух нагревался до ~ 330 °С. Расход топлива в этом режиме был равен расходу топлива в режиме с подачей струи пара. Ротаметром Dwyer RMA-21-SSV задавался расход воздуха 5 л/мин, при этом внешний факел визуально соответствовал режиму горения с паром.

Турбулентность не позволяет проводить локальные измерения дисперсного состава частиц сажи: за время измерения одного спектра (4 мин) происходит сильное

перемешивание, и можно получить лишь средние характеристики в той или иной части потока, в которой производится отбор пробы.

2.2 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

На рисунке 2.4 показаны полученные с помощью микроскопов снимки частиц сажи, образованных при сжигании дизельного топлива в режиме с подачей струи пара. Отбор проб производился в факеле на оси горелочного устройства на различных расстояниях от среза горелки (h) и в охлажденных до комнатной температуры продуктах сгорания. Морфология сажевых частиц в факеле представляет собой типичную структуру фрактало-подобных агрегатов. В основном эти агрегаты имеют цепочно-разветвленную структуру, состоящую из сферических первичных частиц размером 20–60 нм. Во внешнем факеле при изменении h сохраняются характерный размер первичных частиц и фрактальная размерность агрегатов, составляющая $1,8 \pm 0,1$. При этом характерный размер агрегатов растет с увеличением h . В зоне газификации размеры первичных частиц значительно меньше, чем во внешнем факеле (см. рисунок 2.5). При более высоком пространственном разрешении (рисунок 2.6) видно, что для первичных частиц характерна луковичная структура [111]. Концентрические слои имеют атомную толщину (рисунок 2.6-д, 2.6-е), обладают множественными дефектами и уложены беспорядочно друг относительно друга. Межплоскостное расстояние между слоями составляет менее 1 нм.

На рисунок 2.7 представлены изображения частиц сажи, образующиеся при сжигании дизельного топлива с подачей в зону горения струи воздуха, вместо пара. Анализ ПЭМ изображений показывает, что образующиеся агрегаты тоже имеют цепочно-разветвленную структуру, а первичные частицы имеют приблизительно те же размеры, что и в режиме с подачей струи пара. При этом в режиме с воздушной струей первичные частицы в агрегатах уложены более плотно. В охлажденных продуктах сгорания (при большом времени жизни) разветвленные агрегаты становятся более компактными, их форма приближается к сферической с характерным диаметром 400–500 нм (рисунок 2.7-г). В режиме с паровой струей формируются компактные агрегаты меньшего размера (см. спектры ДСА, представленные на рисунок 2.8, и таблицу 2.1). Это качественно согласуется с результатами ПЭМ (рисунок 2.4-д).

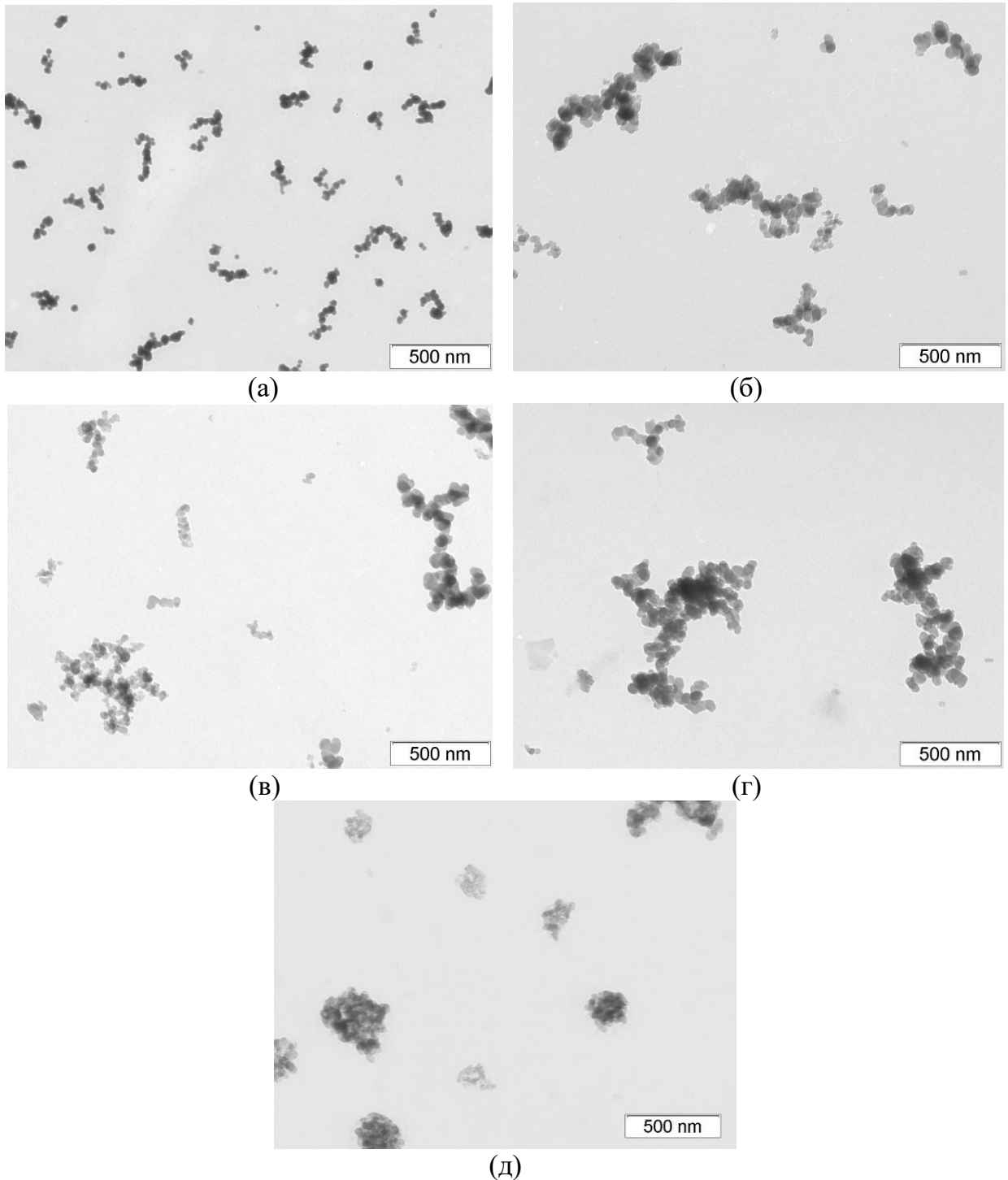


Рисунок 2.4 – Фотографии частиц сажи (режим с подачей струи пара) при отборе проб в разных точках (микроскоп JEM-100SX): $h = -20$ мм – внутри горелки, в зоне газификации (а); $h = 0$ мм – на срезе горелки у основания внешнего факела (б); $h = 80$ мм – на полувысоте видимого факела (в); $h = 120$ мм – в верхней части факела (г); в охлажденных продуктах сгорания (д)

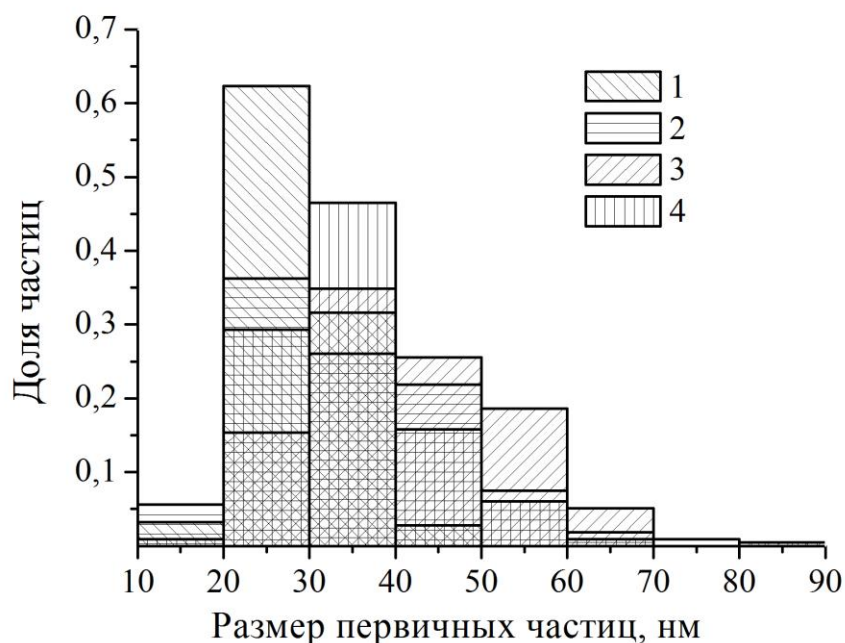
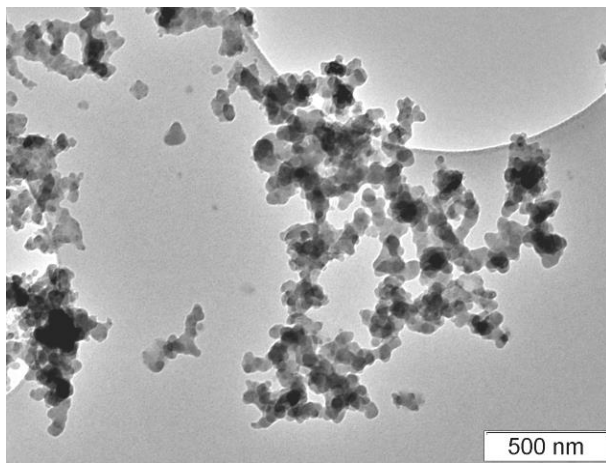
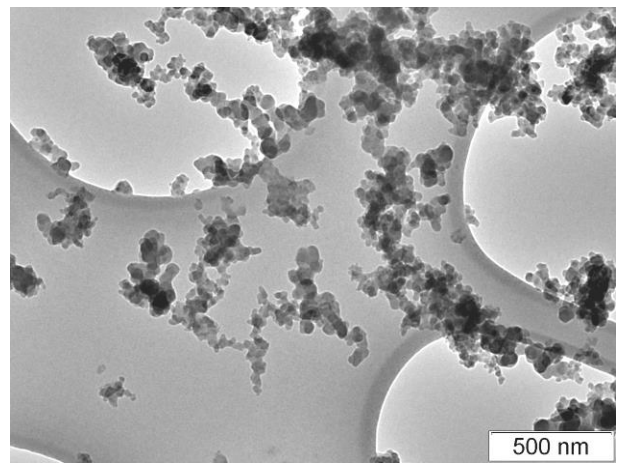


Рисунок 2.5 – Дисперсный состав первичных частиц сажи в составе агрегатов для режима с подачей струи пара: 1 – $h = -20$ мм (средний размер и стандартное отклонение: 28 ± 5 нм); 2 – $h = 0$ мм (34 ± 11 нм); 3 – $h = 120$ мм (42 ± 11 нм); 4 – в охлажденных продуктах сгорания (35 ± 9 нм)

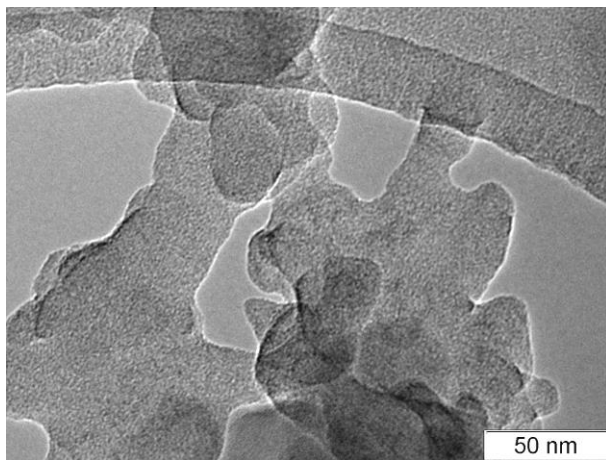
На рисунок 2.8 представлен дисперсный состав частиц, полученный при помощи ДСА. В режиме горения с подачей струи пара основное количество частиц на выходе из горелки ($h = 0$) имеет размер 40 ± 15 нм, который соответствует характерному размеру первичных частиц, определенному по фотографиям, представленным на рисунки 2.4, 2.6, 2.7. Это означает, что основную часть от общего количества частиц сажи в потоке составляют первичные, не агрегированные частицы. Вниз по потоку доля таких частиц уменьшается. Отсутствие отдельных первичных частиц на фотографиях (рисунки 2.4, 2.6, 2.7) объясняется отмеченной выше спецификой методики отбора проб для электронного микроскопа: малоинерционные первичные частицы уносятся потоком газа, и на поверхности пленки оседают лишь более массивные частицы (агрегаты). В режиме горения с подачей струи воздуха (рисунок 2.8) спектр распределения частиц по размерам существенно шире, и наиболее представительный размер частиц оказывается примерно вдвое выше.



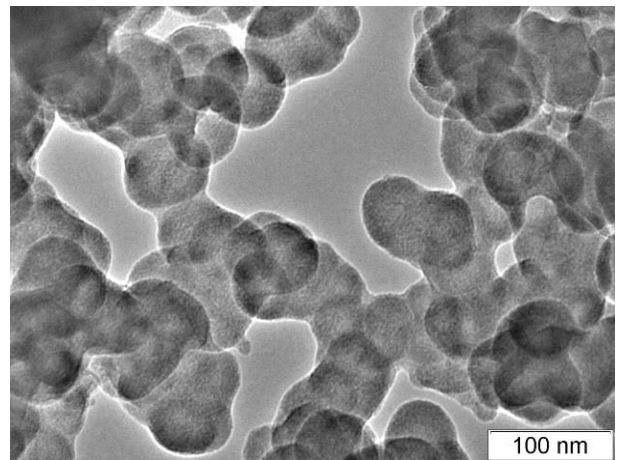
(а)



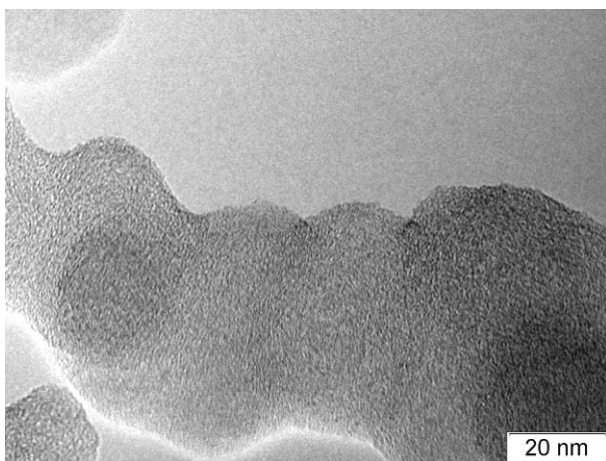
(б)



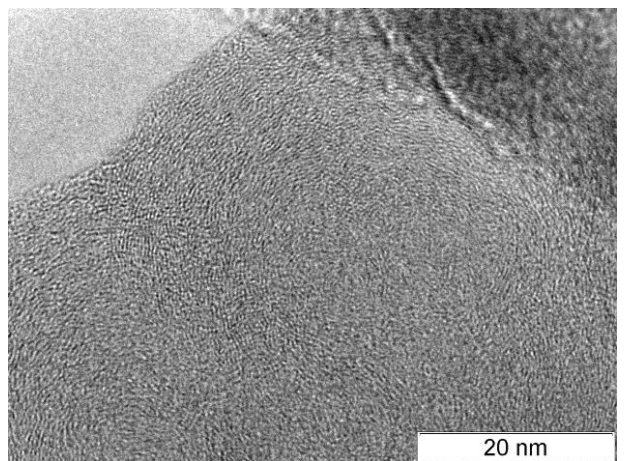
(в)



(г)



(д)



(е)

Рисунок 2.6 – Фотографии частиц сажи (режим с подачей струи пара) при отборе проб на вертикальной оси горелочного устройства в двух точках (микроскоп JEOL JEM-2010):
 $h = -20$ мм – внутри горелки (а), (в), (д); $h = 0$ мм – на срезе горелки (б), (г), (е)

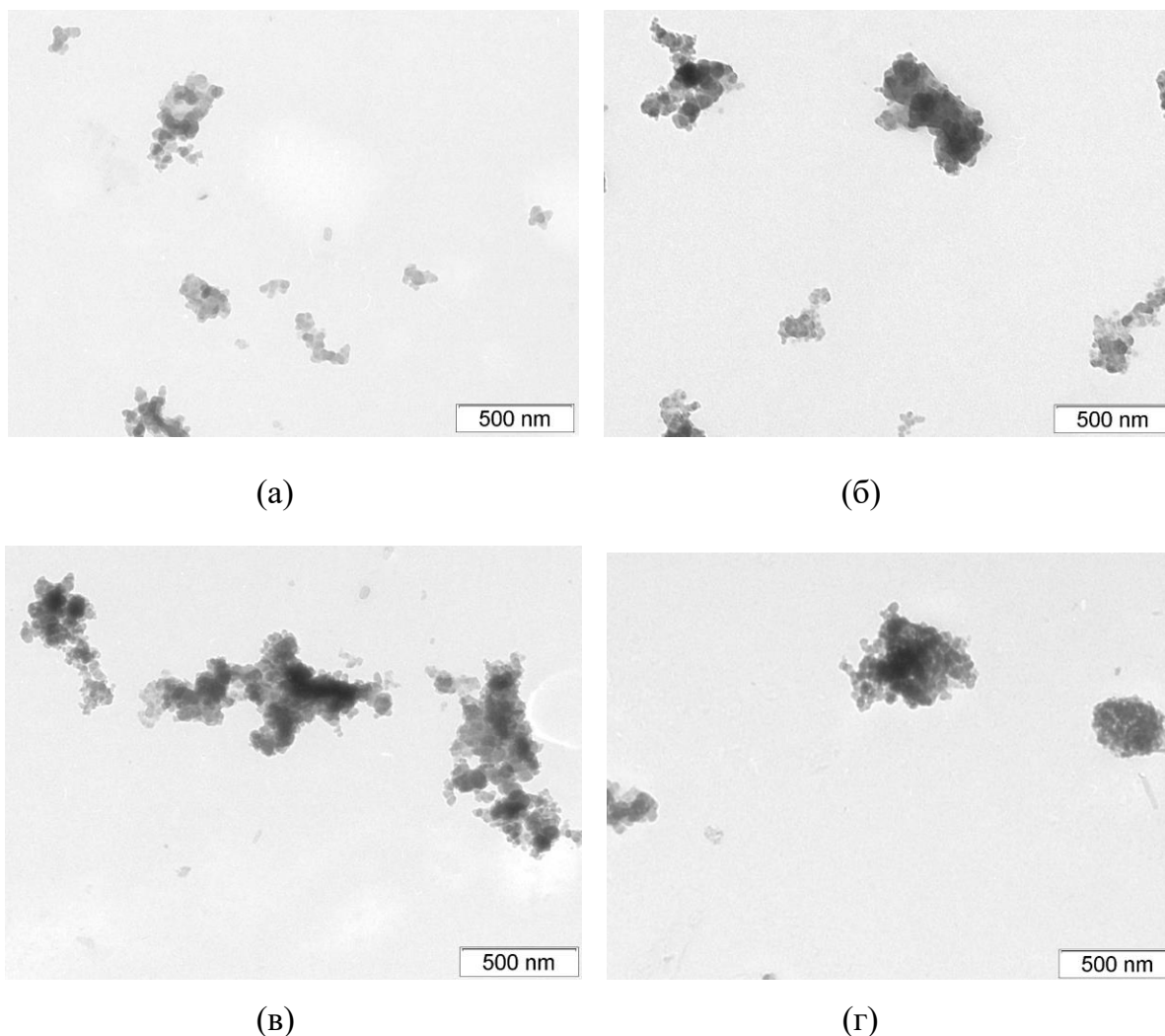


Рисунок 2.7 – Фотографии частиц сажи (режим с подачей струи воздуха) при отборе проб в разных точках (микроскоп JEM-100SX): $h = -20$ мм (а); $h = 80$ мм (б); $h = 120$ мм (в); в охлажденных продуктах сгорания (г)

С помощью ДСА измерены концентрации частиц сажи во внешнем факеле вдоль вертикальной оси горелки с пространственным шагом 10 мм (рисунок 2.9). Видно, что концентрация (N) частиц сажи в факеле быстро убывает от максимального значения $\sim 10^8 \text{ см}^{-3}$ по мере удаления от среза горелки и приближается к нижнему пределу $5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$. Аналогичная зависимость концентрации частиц сажи в продуктах сгорания характерна и для режима горения с подачей в зону реакции струи сжатого воздуха, вместо струи перегретого водяного пара (количественные данные представлены в таблице 2.1).

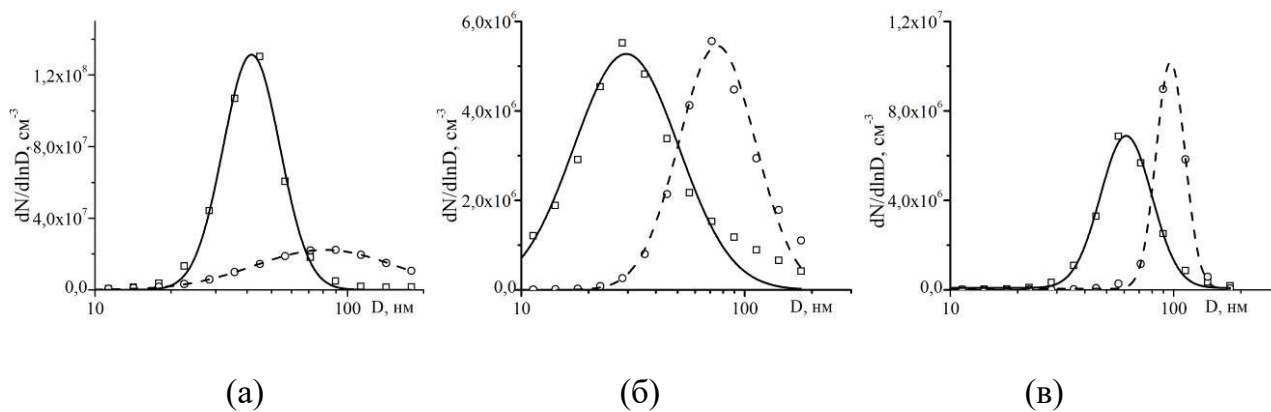


Рисунок 2.8 – Дисперсный состав сажевых частиц в режиме горения с подачей струи пара (квадраты, сплошная линия) и в режиме с подачей струи воздуха (круги, пунктирная линия) в разных точках: $h = 0$ мм (а); $h = 140$ мм (б); в охлажденных продуктах сгорания (в); линии – аппроксимация логнормальным распределением (N – концентрация частиц, D – размер частиц)

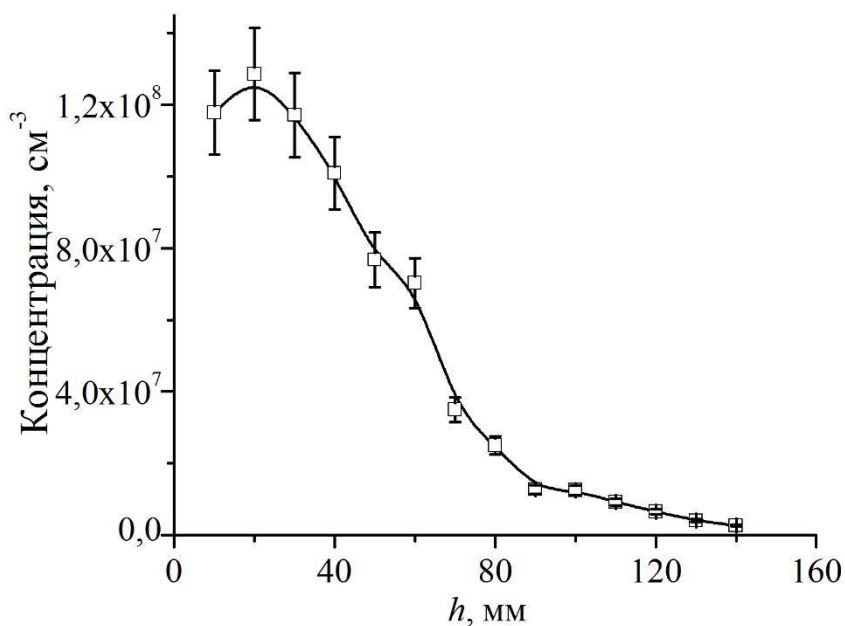


Рисунок 2.9 – Распределение концентрации частиц сажи вдоль вертикальной оси горелочного устройства (режим с подачей струи пара)

Таблица 2.1 – Параметры дисперсного состава сажевых частиц (рисунок 2.8)
для режимов горения с подачей струи пара (А) и струи воздуха (В)

Точка отбора пробы	Концентрация частиц (ДСА), см ⁻³		Средний размер частиц (ДСА), нм		Средний геометрический диаметр, нм		Стандартное геометрическое отклонение σ_g	
	А	В	А	В	А	В	А	В
на оси факела, $h = 0$ мм	$9 \cdot 10^7$	$4 \cdot 10^7$	39,4	78,0	44,5	122,9	1,3	1,9
на оси факела, $h = 140$ мм	$8 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^6$	35,1	77,1	39,5	87,9	1,9	1,5
в охлажденных продуктах сгорания	$5 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^6$	58,7	79,3	65,9	98,8	1,7	1,2

На основе обработки фотографий ПЭМ были получены распределения по размеру первичных частиц в агрегате и среднее арифметическое значение этой величины около 40 нм, которое в пределах погрешности не зависит от точки отбора пробы во внешнем факеле и от режима горения (рисунок 2.5).

Для массового анализа сажевых частиц в охлажденных продуктах сгорания с помощью насоса производился отбор проб на аэрозольный фильтр на выходе потока из проточного калориметра. При расходе $G = 6,0$ л/мин отбор проводился в течение $t = 17$ мин. За это время масса осевших частиц сажи составила $M = 3,5$ мг (0,2 мг/мин), т.е. содержание сажи в продуктах сгорания около 35 мг/м³.

Зная концентрацию частиц в охлажденных продуктах сгорания $N = 5 \cdot 10^6$ см⁻³ (определенную при помощи ДСА), по формуле $M = G \cdot m \cdot N \cdot t$ можно оценить среднюю массу частиц: $m \sim 7 \cdot 10^{-12}$ мг. При плотности сажи 2 г/см³ [107] среднемассовый размер (диаметр) частиц составит $\sim 0,2$ мкм.

Результаты опубликованы в трудах международной конференции [112] и журнале из перечня ВАК [113].

ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2

В результате проведенных экспериментальных исследований изучены характеристики частиц сажи, образующихся в процессе сжигания дизельного топлива в лабораторном образце автономного горелочного устройства испарительного типа с подачей струи перегретого водяного пара или струи воздуха. Исследовалось влияние водяного пара на концентрацию и дисперсный состав сажи.

С помощью диффузионного спектрометра аэрозолей (ДСА), разработанного в ИХКГ СО РАН, найдены преимущественные размеры частиц в потоке, получены распределения частиц по размерам и зависимость концентрации от координаты. В режиме горения с подачей струи пара основное количество частиц на выходе из горелки имеет размер 40 ± 15 нм. Т.е. основную часть от общего количества частиц сажи в потоке составляют первичные, не агрегированные частицы. В режиме горения с подачей струи воздуха спектр распределения частиц по размерам существенно шире, и наиболее представительный размер частиц оказывается примерно вдвое выше. Это означает, что при подаче пара в зону горения часть сажи вступает в реакцию с паром, повышая полноту сгорания топлива.

Концентрация частиц сажи в факеле горелочного устройства достигает 10^8 см⁻³. Вследствие перемешивания потока с воздухом из окружающей атмосферы концентрация быстро понижается с удалением от основания факела и в продуктах сгорания составляет $5 \cdot 10^6$ см⁻³.

С использованием просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) изучена морфология агрегатов, образующихся при коагуляции первичных частиц сажи. В факеле агрегаты имеют цепочно-разветвленную структуру, в продуктах сгорания они имеют более компактную форму с характерными размерами 200–500 нм. Первичные наночастицы в агрегатах характеризуются квази-сферической формой и луковичной структурой, с диаметром около 40 нм, который соответствует характерному размеру первичных частиц, определенному ДСА.

Массовый анализ показал, что 1 м³ продуктов сгорания содержит 35 мг сажи. В относительном выражении, при расходе дизельного топлива в эксперименте 600 г/ч (515 г углерода в час) и среднем объемном расходе уходящих газов 15 м³/ч масса сажи в режиме с подачей перегретого водного пара (расход пара 0,27 кг/ч, температура пара 400

°С) составляет ~0,1 %. Это свидетельствует о высокой степени сгорания топлива в режиме с паром.

Достоинством автономных горелочных устройств является создание потока перегретого водяного пара без использования внешних устройств и источников энергии. В то же время такая конструкция горелочного устройства не позволяет регулировать параметры пара для управления горением. Кроме этого, в испарительных горелочных устройствах сжигание «тяжелых» топлив не является эффективным по причине неустойчивости воспламенения, высокой нестабильности горения в топочной камере, относительно быстрого коксования поверхностей горелок и др. Поэтому для сжигания таких топлив в режиме с паровой газификацией необходима разработка специальных способов подачи топлива и смешения его с паром.

3 ДИСПЕРГИРОВАНИЕ ЖИДКОГО ТОПЛИВА СТРУЕЙ ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА

Распыление жидкого топлива является ключевым этапом при разработке эффективных горелочных устройств, исследование способов распыления и характеристик конкретных форсунок относится к актуальным научно-техническим задачам [114], [115], [116]. Увеличение удельной площади межфазной поверхности при диспергировании повышает скорость испарения топлива и интенсивность межфазного обмена энергией и импульсом. Качество диспергирования топлива определяет эффективность смесеобразования, стабильность воспламенения, скорость химической реакции и полноту выгорания топлива, тепловыделение и состав продуктов сгорания (в том числе – эмиссию токсичных компонентов). Для снижения выбросов оксидов азота и повышения полноты сгорания топлива важно обеспечить высокую однородность газочапельного потока, максимально мелкое дробление топлива, высокую стабильность факела. Теоретическое исследование такого процесса [117], [118], [119] даже в изотермическом случае представляется весьма проблематичным из-за неопределенности описания распада жидкости на капли при взаимодействии с неоднородным нестационарным потоком газа. Поэтому основным подходом к изучению газочапельных потоков в настоящее время являются экспериментальные исследования, позволяющие с использованием современных оптических методов получать исчерпывающую информацию о характеристиках двухфазных потоков. С целью поиска оптимальных режимных параметров для создания и последующего воспламенения газочапельного потока (скорость, расход и температура несущей фазы, соотношение расходов несущей фазы и топлива, преимущественный размер и концентрация капель топлива, характерное время релаксации дисперсной фазы) необходимо детальное экспериментальное исследование процессов диспергирования и горения топлива.

Для диспергирования жидкого топлива, как правило, применяют распылительные форсунки [114], [115], [116], [117], [120], [121]. Такие устройства эффективны для сжигания качественных видов топлива (керосин, бензин, дизель). Для сжигания некондиционных жидких топлив и отходов применение форсунок малопродуктивно. Возникают проблемы связанные очисткой топлива и засорением каналов форсунки, коксованием, вызванные налипанием топлива на внешние поверхности форсунки,

приводящие со временем к сбою в работе горелочных устройств [122]. Поэтому является актуальным создание специальных способов получения высокодисперсного устойчивого газочапельного потока для обеспечения эффективного смешения горючих компонентов и окислителя в объеме камеры сгорания.

В данном разделе исследуется перспективный способ распыла некондиционных жидких углеводородов, основанный на взаимодействии жидкости с высокоскоростным газовым потоком [95], [123], [124]. Отличительной особенностью данного способа является то, что топливо и распыляющая среда (несущая фаза) – перегретый водяной пар (или воздух), предварительно не смешаны друг с другом: пар подается из форсунки в виде струи, на которую натекает жидкое топливо, тем самым формируя мелкодисперсный газочапельный поток. Поскольку нет контакта топлива с форсункой, то не происходит коксование ее поверхностей, что предотвращает последующие сбои в работе горелочного устройства. Такая схема также позволяет сжигать загрязненное топливо и жидкие горючие отходы. Схема распыления жидкого топлива в результате взаимодействия со струей газа активно изучается в настоящее время [125], поскольку обладает перспективой широкого практического использования, в том числе при сжигании высоковязкого топлива.

3.1 ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ГАЗОВОГО ПОТОКА (НЕСУЩЕЙ ФАЗЫ), ИСТЕКАЮЩЕГО ИЗ ФОРСУНКИ ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА РАСПЫЛИТЕЛЬНОГО ТИПА

В жидкотопливных горелках, как правило, происходит горение предварительно перемешанной смеси, когда топливо и окислитель смешиваются внутри форсунки [114, 126, 127]. При этом основное влияние на образование и дробление капель оказывают параметры несущей фазы, которые также определяют и структуру газочапельного потока. В то же время, подача окислителя в камеру сгорания (например, вторичного воздуха), может быть организована в виде отдельных струй, в том числе с использованием пневматических форсунок [128]. Для управления процессом сжигания важно иметь информацию о структуре таких однофазных потоков.

Для обеспечения высоких теплотехнических и экологических показателей горелочных устройств необходимо управлять режимом сжигания. Импульс струи несущей фазы служит одним из ключевых параметров, определяющих интенсивность

межфазного обмена, скорость реакции, полноту выгорания топлива, состав продуктов сгорания. Тем самым, при обосновании выбора режимных параметров необходимо учитывать их влияние на динамические характеристики потока.

В данном подразделе приведены результаты экспериментального исследования аэродинамики при истечении высокоскоростной однофазной струи (несущей фазы) из пневматической форсунки перспективного жидкотопливного горелочного устройства, реализующего предложенный способ диспергирования и сжигания некондиционных жидких углеводородов.

Результаты исследований опубликованы в следующих работах [98, 129-138].

3.1.1 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

На рисунке 3.1-а показана схема исследуемого прямооточного жидкотопливного горелочного устройства [123]. Материал деталей горелки – нержавеющая сталь 1.4541, габаритные размеры: высота 100 мм, диаметр 50 мм, диаметр сопла 25 мм. Подробное описание горелочного устройства см. в Разделе 4.

Перегретый водяной пар (с температурой перегрева до 400 °С) истекает из форсунки в виде струи, в основание которой подается жидкое топливо, тем самым, формируя мелкодисперсный газочапельный поток. Помимо распыления топлива, перегретый водяной пар повышает температуру топливных капель, что интенсифицирует массообмен и смесеобразование, способствуя устойчивому воспламенению. Вместе с тем, в зоне горения происходит паровая газификация продуктов термического разложения топлива, что повышает показатели сжигания жидких углеводородов [99]. Образующаяся горючая смесь CO и H₂ догорает в факеле, смешиваясь с кислородом из внешней атмосферы (Рисунок 3.1-б). Конструкцией горелки предусмотрен естественный приток воздуха из атмосферы в зону реакции – через отверстия в нижней части корпуса (Рисунок 3.1-а). Атмосферный воздух необходим для воспламенения жидкого топлива. Количество окружающего воздуха, поступающего за счет эжекции в зону реакции и влияющего на показатели сжигания топлива, также зависит от скорости паровой струи.

При работе горелочного устройства для генерации пара используется лабораторный электрический парогенератор, позволяющий получать поток перегретого водяного пара с

температурой до 550 °С, давлением до 2,0 МПа при максимальной производительности 1,5 кг/ч (см. Раздел 4). Из парогенератора пар подается в горелочное устройство через форсунку, установленную в основании горелки. Форсунка изготавливается по техническим требованиям, предъявляемым к форсункам рулевых ракетных двигателей, ее параметры влияют на эффективность распыления топлива и устойчивость работы устройства (Рисунок 3.1-в). Вместо пара, через форсунку может подаваться сжатый воздух.

Массовый расход пара задается при помощи плунжерного дозирующего насоса. Объемный расход пара определяется конструкцией парогенератора и форсунки, и зависит от давления и температуры в парогенераторе. Именно термодинамические условия в парогенераторе определяют степень перегрева пара и скорость струи.

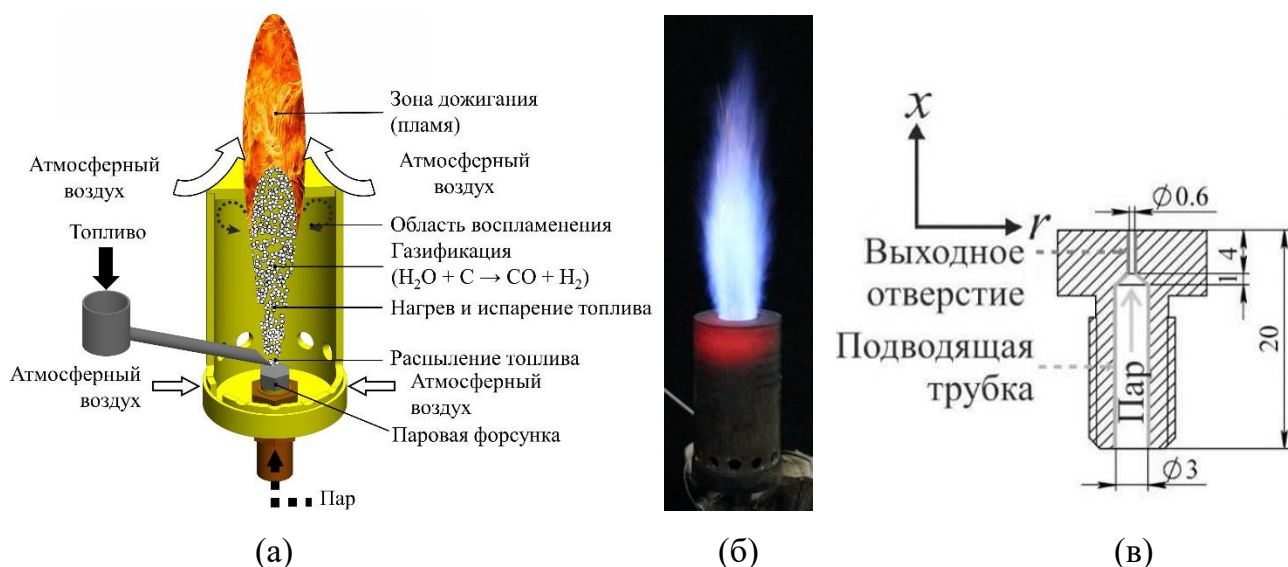


Рисунок 3.1 – Схема горелочного устройства с распылением жидкого топлива струей перегретого водяного пара (а); характерный вид факела горелки при горении дизельного топлива (б); схема паровой форсунки (в)

Течение, формируемое на выходе из паровой форсунки, можно охарактеризовать как сверхзвуковую струю перегретого водяного пара, истекающую в атмосферу (в горелке – камеру сгорания). Засеять такой поток трассерами (для оптических измерений), выдерживающими тепловую нагрузку, весьма проблематично. Использование твердых микрочастиц оксида алюминия, титана, магния, кремния и т.д. в данном случае не возможно, поскольку: во-первых, парогенератор имеет достаточно узкие

и длинные каналы, на стенках которых могут осаждаться частицы, тем самым засоряя их; во-вторых, выходное отверстие паровой форсунки имеет малый диаметр (0,6 мм) и может со временем засориться, что повлияет на скорость потока на выходе; в-третьих, для подачи и поддержания во взвешенном состоянии таких трассеров, обычно применяют специальные миксеры, при прохождении которых температура перегретого пара будет резко снижаться. Кроме этого, перегретый водяной пар не содержит капель, которые в случае насыщенного пара могут быть использованы в качестве трассеров.

С учетом описанных сложностей с засевом трассерами потока перегретого водяного пара в настоящей работе проведены исследования с подачей сжатого воздуха без нагрева.

3.1.2 ОЦЕНКА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПО ТЕОРИИ ОДНОМЕРНОГО ТЕЧЕНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Для расчета параметров высокоскоростного газового потока на выходе из форсунки через заданные (измеренные) в экспериментах значения параметров потока в подводящей трубке (\varnothing 3 мм – см. схему форсунки на рисунке 3.1-в) в настоящей работе применяется аппарат газодинамических функций, основанный на теории одномерного течения идеального газа в канале переменного сечения [139]. Расчеты проведены старшим научным сотрудником Института теплофизики СО РАН Д.В. Красинским, результаты опубликованы в совместной работе [129]. Принимается, что течение идеального совершенного газа по тракту форсунки является стационарным, баротропным, адиабатическим (без учета трения и теплообмена на стенках). Из этих допущений следует и постоянство энтропии вдоль линии тока, причем имеет место соотношение изэнтропической адиабаты [139]:

$$p \cdot \rho^{-k} = const, \quad (3.1)$$

где p – давление, ρ – плотность, k – показатель адиабаты. Закон сохранения полной механической энергии вдоль линии тока выражается уравнением Бернулли в форме для изэнтропического течения (см. [139]):

$$C_p T + \frac{1}{2} U^2 = const . \quad (3.2)$$

где C_p – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении; T – температура потока; U – скорость потока. Используем уравнение состояния идеального газа:

$$p = \rho R_g T . \quad (3.3)$$

где константа газа $R_g = R_c / m_g$, R_c – универсальная газовая постоянная, m_g – молярная масса газа. Также учитываем условие сохранения массового расхода F через сечение площадью A :

$$F = \rho U A = const , \quad (3.4)$$

причем $F = F_1$ – заданное значение. С использованием системы уравнений (3.1)–(3.4) по известному в некоторой точке потока (обозначаемой далее нижним индексом “1”) вектору параметров $\phi_1 = \{U_1, \rho_1, p_1, T_1\}$ могут быть определены значения ϕ в какой-либо другой точке (с известной площадью сечения A) одномерного изэнтропического потока, в т.ч. значения ϕ_0 адиабатически заторможенного потока (обозначаемые здесь и далее нижним индексом “0”). Однако, ввиду нелинейности этой системы, ее решение будет приближенным (вычисляемым, например, путем последовательных итераций). Для повышения точности решения удобнее привести систему (3.1)–(3.4) к одному нелинейному уравнению на число Маха $M \equiv U/a$ (где a – местная скорость звука). С этой целью рассмотрим функцию обратного удельного расхода $\theta \equiv (\rho U)^{-1}$ и будем использовать известные изэнтропические соотношения [139] для компонент вектора ϕ , выражаемые как функции числа Маха, например:

$$\tau(M) \equiv T_0 / T = 1 + M^2(k - 1) / 2 . \quad (3.5)$$

Проведем следующие преобразования величины θ :

$$\theta(M) = 1 / \rho U = \frac{1}{\rho a M} = \frac{1}{\rho_0 a_0 M} \frac{\rho_0}{\rho} \frac{a_0}{a} = \frac{1}{\rho_0 a_0 M} \tau^{\frac{1}{k-1}} \tau^{\frac{1}{2}} = \frac{\tau^\beta}{\rho_0 a_0 M}. \quad (3.6)$$

Здесь применяется функция $\tau(M)$ по формуле (3.5), которая является следствием уравнения Бернулли (3.2); показатель степени $\beta = \frac{k+1}{2(k-1)}$. Тогда, привлекая заданные (известные) в сечении “1” потока значения ϕ_1 , выражая отношение площадей A/A_1 через число Маха и учитывая уравнение неразрывности (3.4), получим (как и в [139]):

$$A/A_1 = \rho_1 U_1 / (\rho U) = \theta(M) / \theta_1 = [\tau(M) / \tau_1]^\beta M_1 / M \quad (3.7)$$

Преобразуя далее уравнение (3.7) и вводя функцию $\Psi(M)$, запишем:

$$\Psi(M) \equiv B_1 [\tau(M)]^\beta / M - A/A_1 = 0, \quad (3.8)$$

где значение коэффициента B_1 находится через известное значение M_1 : $B_1 = M_1 / \tau_1^\beta$. Таким образом, поиск решения системы (3.1)–(3.4) в некотором сечении “s” при $A = A_s$ сводится к вычислению корней уравнения (3.8): $\Psi(M) = 0$.

Далее принимается, что сечению A_1 соответствует входное сечение подводящей трубки $\varnothing 3$ мм, а сечению A – выходное сечение (срез) сопловой трубки $\varnothing 0,6$ мм форсунки (которое обозначим далее нижним индексом “n”, т.е. $A = A_n$), так что $A_n / A_1 = 0,04$. Типичный вид функции $\Psi(M)$ показан на рисунке 3.2 (для варианта расчета №3, см. Таблицу 3.2), ее минимум Ψ_{\min} достигается всегда при $M = 1$, что следует из анализа условия $d\Psi/dM = 0$. Если $\Psi_{\min}(M = 1) < 0$, то имеются два вещественных корня M_{n1} и M_{n2} , один из которых соответствует дозвуковому режиму течения ($M_{n1} < 1$), а другой – сверхзвуковому ($M_{n2} > 1$). Для вычисления корней уравнения (3.8) применялся метод Ньютона, при этом сходимость решения обычно достигалась за 7÷10 итераций (в зависимости от начального приближения) при заданной погрешности $\varepsilon_M = 10^{-14}$. Для выбора одного из двух корней принималось следующее правило, основанное на рассмотрении дополнительного сечения A_a (обозначаемого далее нижним индексом “a”),

расположенного после выхода из форсунки, в котором статическое давление в струе равно атмосферному давлению: $p_a = p_{atm}$. Используя изэнтропическое соотношение [139]

$$p_0 / p_a = \left[1 + M_a^2 (k - 1) / 2 \right]^{k / (k - 1)}, \quad (3.9)$$

определим из него значение M_a и остальные газодинамические величины, затем, полагая массовый расход F струйного потока вблизи выхода из форсунки неизменным, по уравнению неразрывности (3.4) найдем виртуальную площадь сечения A_a . Тогда при выполнении условия $A_a > A_n$ принималось, что струя, выходящая из форсунки, расширяется с переходом в сверхзвуковой режим и для расчета параметров на срезе форсунки (в сечении A_n) следует выбрать корень $M_{n2} > 1$, иначе же имеем дозвуковой режим истечения с выбором корня $M_{n1} < 1$.

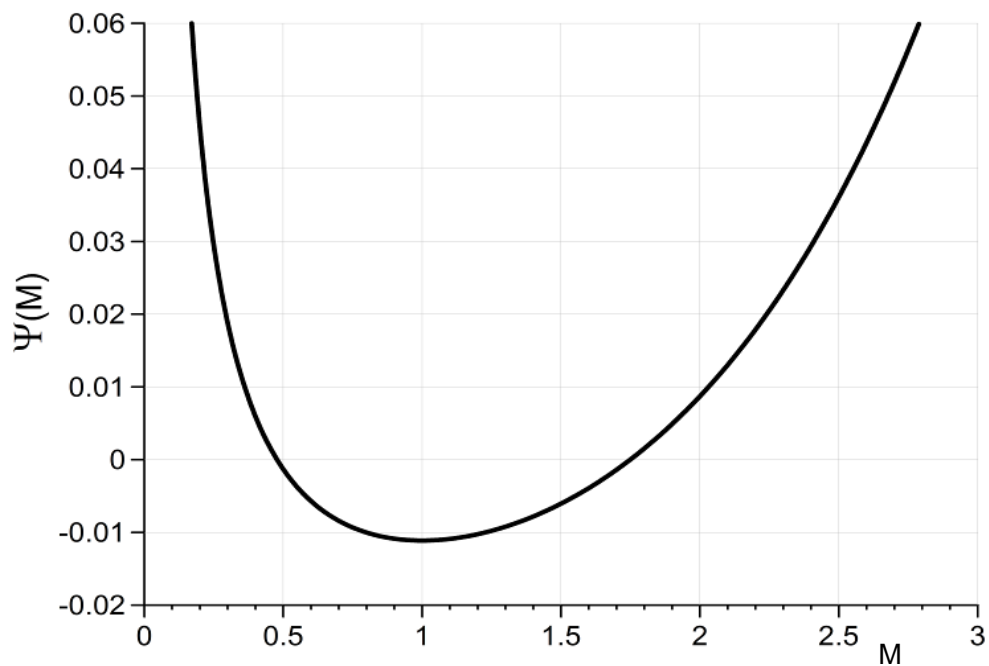


Рисунок 3.2 – Вид функции $\Psi(M)$ при $A/A_1=0.04$ (воздух, $k=1.4$, режим №3 в Таблице 3.2)

Результаты расчетов по вышеописанной модели одномерного изэнтропического потока в канале переменного сечения для режимов с подачей пара приведены в Таблице 3.1, а для режимов с подачей воздуха – в Таблице 3.2. Значения давления в сечении “1”

подводящей трубки p_1 приведены по показаниям манометра ($p_1 = p - p_{atm}$); также заданными в сечении “1” являются значения температуры T_1 и массового расхода F . При этом в режимах с подачей водяного пара значение расхода F задается при помощи плунжерного дозирующего насоса, а в режимах с подачей воздуха расход F рассчитывался через показание объемного расхода G_1 , наблюдаемое по ротаметру (см. рисунок 3.3). Представленные в Таблице 3.1 варианты входных параметров для пара F и p_1 соответствуют режимам устойчивой работы горелочного устройства (см. Раздел 4). Величина $\Upsilon \equiv \rho U^2 \cdot A = F \cdot U$, связанная с потоком импульса и имеющая размерность силы, может рассматриваться в качестве характеристики интенсивности динамического воздействия газовой струи на каплю распыляемой жидкости.

Поскольку невозможно реализовать режимы с паром и с воздухом, которые имели бы совпадающие значения газодинамических параметров, то существует методическая проблема корректного сопоставления показателей работы горелочных устройств, использующих в качестве несущей фазы пар или воздух. Для сопоставления приходится выбирать режимы, при которых тот или иной параметр имеет одинаковое значение, например, расход горючего или окислителя, или их отношение. Однако для двухфазных систем равенство «химических» параметров не всегда является определяющим. С учетом важности динамического взаимодействия фаз (влияющего на дисперсный состав и интенсивность процессов переноса), таким параметром может служить значение Υ . Можно заметить, что представленным в Таблицах 3.1 и 3.2 режимам № 3 (и режимам № 4) соответствуют близкие значения Υ_a (относительное различие составляет менее 10%). Соответственно, можно предположить, что характеристики режима № 3 при подаче пара следует сопоставлять с режимом № 3 при подаче воздуха (и аналогично – взаимно сопоставимыми являются режимы № 4).

Таблица 3.1 – Значения газодинамических параметров для водяного пара
(для всех режимов $T_1 = 260 \pm 10$ °С в подводящей трубке)

№ режима	F , кг/ч	p_1 , бар	G_1 , л/мин	p_n , бар	U_n , м/с	M_n	γ_a , Н	U_a , м/с
	в сечении подводящей трубки			на выходе из форсунки			после форсунки при $P = 1$ атм	
1	0,2	1,8	2,86	2,63	177	0,320	0,037	663
2	0,4	3,5	3,57	4,04	229	0,416	0,087	783
3	0,6	5,7	3,60	1,15	840	1,83	0,144	865
4	0,8	7,4	3,83	1,64	817	1,75	0,202	907
5	1,0	9,0	4,02	2,17	796	1,69	0,261	938
6	1,2	11,4	3,89	2,56	808	1,72	0,325	974
7	1,4	13,6	3,86	3,01	810	1,73	0,390	1002

Таблица 3.2 – Значения газодинамических параметров для воздуха
(для всех режимов $T_1 = 23$ °С в подводящей трубке)

№ режима	F , кг/ч	p_1 , бар	G_1 , л/мин	p_n , бар	U_n , м/с	M_n	γ_a , Н	U_a , м/с
	в сечении подводящей трубки			на выходе из форсунки			после форсунки при $P = 1$ атм	
1	0,4167	1,5	2,35	2,18	153	0,453	0,043	369
2	0,7909	3,4	2,54	3,71	169	0,503	0,099	452
3	1,1240	5,5	2,45	1,23	475	1,75	0,155	495
4	1,5218	7,6	2,50	1,70	470	1,72	0,221	522

Из Таблиц 3.1 и 3.2 видно, что с увеличением входного давления (и расхода) происходит переход течения на срезе форсунки от дозвукового к сверхзвуковому режиму (см. значения M_n), в результате чего существенно возрастает и «сила воздействия струи» γ_a . Поскольку выходной канал форсунки (трубка $\varnothing 0,6$ мм) не является профилированным соплом (соплом Лаваля), то с целью изучения особенностей структуры потока в режиме с подачей воздуха были проведены исследования на уровне физического эксперимента.

3.1.3 МЕТОД ЦИФРОВОЙ ТРАССЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ (PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY)

Для исследования структуры потоков в настоящее время широко используются панорамные методы, среди них – в том числе, метод цифровой трассерной визуализации (particle image velocimety, PIV) и его модификации, позволяющий с высокой производительностью получать информацию сразу во всей исследуемой области. Метод PIV – оптический метод измерения мгновенных полей скорости жидкости или газа в выбранном сечении потока. Принцип метода состоит в следующем. Импульсный лазер создает тонкий световой нож и освещает микроскопические частицы, взвешенные в исследуемом потоке. Положения частиц в момент двух последовательных вспышек лазера регистрируются на два кадра цифровой камеры. Скорость потока определяется расчетом перемещения, которое совершают частицы за время между вспышками лазера. Определение перемещения основано на применении корреляционных методов к трассерным картинкам, с использованием регулярного разбиения на элементарные области.

PIV-измерениям газовых струй, в том числе воздушных, посвящено огромное количество работ. Среди них можно выделить работы по исследованию структуры сверхзвуковых потоков [140]. В меньшей степени в литературе представлены работы, посвященные PIV-исследованиям паровых струй, генерируемых форсунками [140, 141]. Метод PIV основан на регистрации перемещений частиц (трассеров), добавляемых в исследуемый поток. Как правило, при измерениях потоков насыщенного пара в качестве трассеров используются микрокапли [142]. Для засева высокотемпературных потоков применяют частицы TiO_2 , Al_2O_3 , SiO_2 и другие трассеры, способные выдерживать тепловую нагрузку [98, 143]. Особую сложность представляет подача трассеров в поток, которая в конкретных задачах не может быть реализована с сохранением режима течения. Поэтому в таких случаях прибегают к некоторым допущениям и проводят исследования холодной аэродинамики, когда засев потока трассерами возможен, например, с использованием дыма или специальных масел [144].

Экспериментальные исследования проведены на установке, схема которой показана на рисунке 3.3-а. Измерения поля скорости течения осуществлялись методом PIV с использованием 2D PIV-системы «Полис» (Рисунок 3.3-б) [145], [146], [147].

Измерительный комплекс включает в себя: двойной импульсный Nd:YAG лазер QuantelEVG (энергия в импульсе 145 мДж, максимальная частота импульса 15 Гц, длительность импульса 10 нс); объектив для формирования лазерного ножа; CCD камеру ImperX B4820-M (разрешение 4904×3280 пикселей, частота съемки 3,2 Гц, минимальная межкадровая задержка 200 нс); макрообъектив Sigma AF 180mm f/2.8 Macro; синхронизирующий процессор; персональный компьютер с программным обеспечением ActualFlow и пакетом PIV Kit; крепежный комплект на основе элементов Newport.

Погрешность PIV-измерений с использованием 2D PIV-системы «POLIS» с учетом возможных источников погрешности (таких как: локальный градиент скорости; размер, концентрация и величина смещения трассеров; фоновая засветка; оптические эффекты и др.) не превышала 8 % [148].

С использованием указанного оптического оборудования, наряду с PIV-измерениями, на основе прямого теневого метода проведена визуализация характерной структуры сверхзвукового газового потока вблизи среза форсунки [146].

Сжатый воздух подается при помощи компрессора, давление регулируется редуктором, после редуктора установлен контролирующий ротаметр Dwyer RMA-21-SSV (диапазон объемного расхода до 10 л/мин, давление до 7 бар, погрешность $\pm 4\%$, для нормальных условий). Корректировка показаний ротаметра производилась для условий эксперимента. Для засева потока трассерами применялись микроскопические капли растительного масла, образующиеся в результате прохождения сжатого воздуха через сопло Ласкина. Давление контролировалось в сопле Ласкина, на выходе из которого была установлена исследуемая форсунка (Рисунок 3.1-в).

Измерения поля скорости проведены в вертикальном сечении, проходящем через ось симметрии форсунки. Для каждого режима проведена серия из 1000 пар кадров с частотой 1 Гц, временем экспозиции первого кадра 1 мс и временем задержки между первым и вторым кадром в паре кадров 0,5–2 мкс (в зависимости от режима). Для обработки данных использовался итерационный кросскорреляционный алгоритм расчёта полей скорости с разбиением расчетной области на ячейки размером 64×64 пикселей с пространственным перекрытием 50 %. Для подавления фоновой засветки использовался алгоритм цифровой фильтрации изображения («вычитание фона»). Максимальный пространственный шаг сетки около 0,25×0,25 мм.

Измерения проведены в различных областях струи, согласно рисунку 3.4.

Результаты обработки методики PIV-измерений на воздушных потоках, в том числе, сверхзвуковых, опубликованы в работах [129-138].

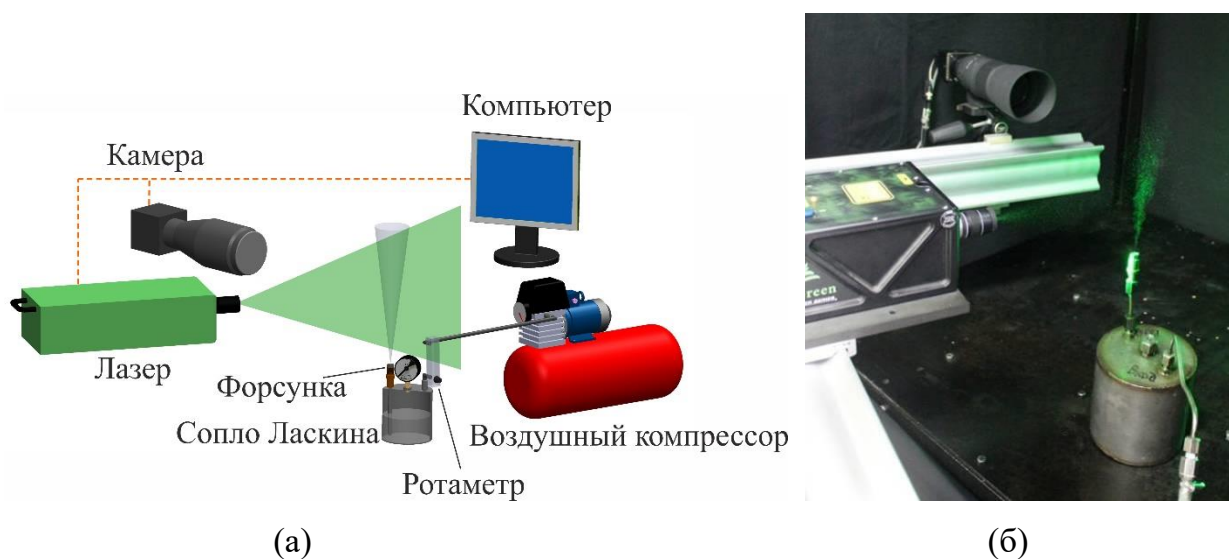


Рисунок 3.3 – Схема экспериментальной установки (а);
экспериментальная установка с PIV-системой «ПОЛИС» (б)

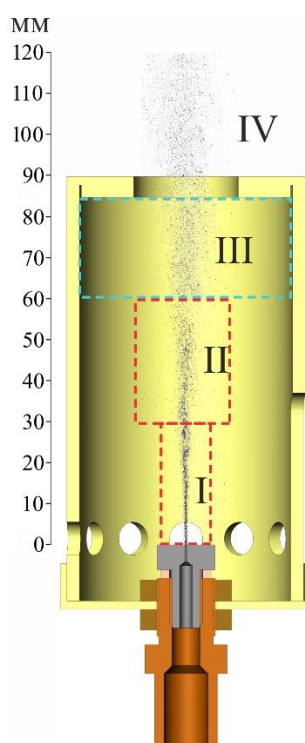


Рисунок 3.4 – Характерные области струи с привязкой к горелочному устройству (показаны изображения трассеров и масштаб, мм): I – ближняя область струи, соответствует зоне диспергирования и смешения; II – область интенсивного межфазного теплообмена; III – область рециркуляции, соответствующая зоне воспламенения; IV – внешняя струя, соответствующая зоне догорания во внешнем факеле

3.1.4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Для исследования поля скорости использовался метод PIV. В результате PIV-измерений получены поля скорости при истечении струи воздуха из форсунки для различных режимов, согласно Таблице 3.2. При максимальном пространственном увеличении используемого в экспериментах объектива (1:1) размер измерительной области составлял около 35×24 мм. Минимальная межкадровая задержка камеры ImregX B4820-M составляет 200 нс, что позволяет измерять скорости до 500 м/с. В соответствии с указанными техническими ограничениями в настоящих экспериментах для исследования были выбраны режимы, согласно Таблице 3.2. На рисунке 3.5 показана структура однофазного потока вблизи форсунки (область I на рисунке 3.4), где в горелочном устройстве происходит диспергирование топлива и смешение с паром. Для исследуемых режимов № 2-4 (см. Таблицу 3.2) течение имеет характерный вид сверхзвуковой затопленной струи.

Полный угол раскрытия струи слабо зависит от давления воздуха в форсунке и для рассматриваемых режимов изменяется от 16 до 20° с увеличением давления. Картины течения (Рисунок 3.5) демонстрируют увлечение струёй окружающего воздуха, что является важным в случае потока химически активной смеси. Провести количественную оценку притока атмосферного воздуха можно лишь при его принудительной контролируемой подаче. Максимальная скорость струи при PIV-измерениях достигает 458 м/с на расстоянии около 3 мм от среза сопла, по мере удаления от среза форсунки скорость струи монотонно уменьшается (Рисунок 3.6). Такой угол струи и ее скорость позволяют организовать сконцентрированный газокапельный поток с дальнейшим формированием компактного и устойчивого факела.

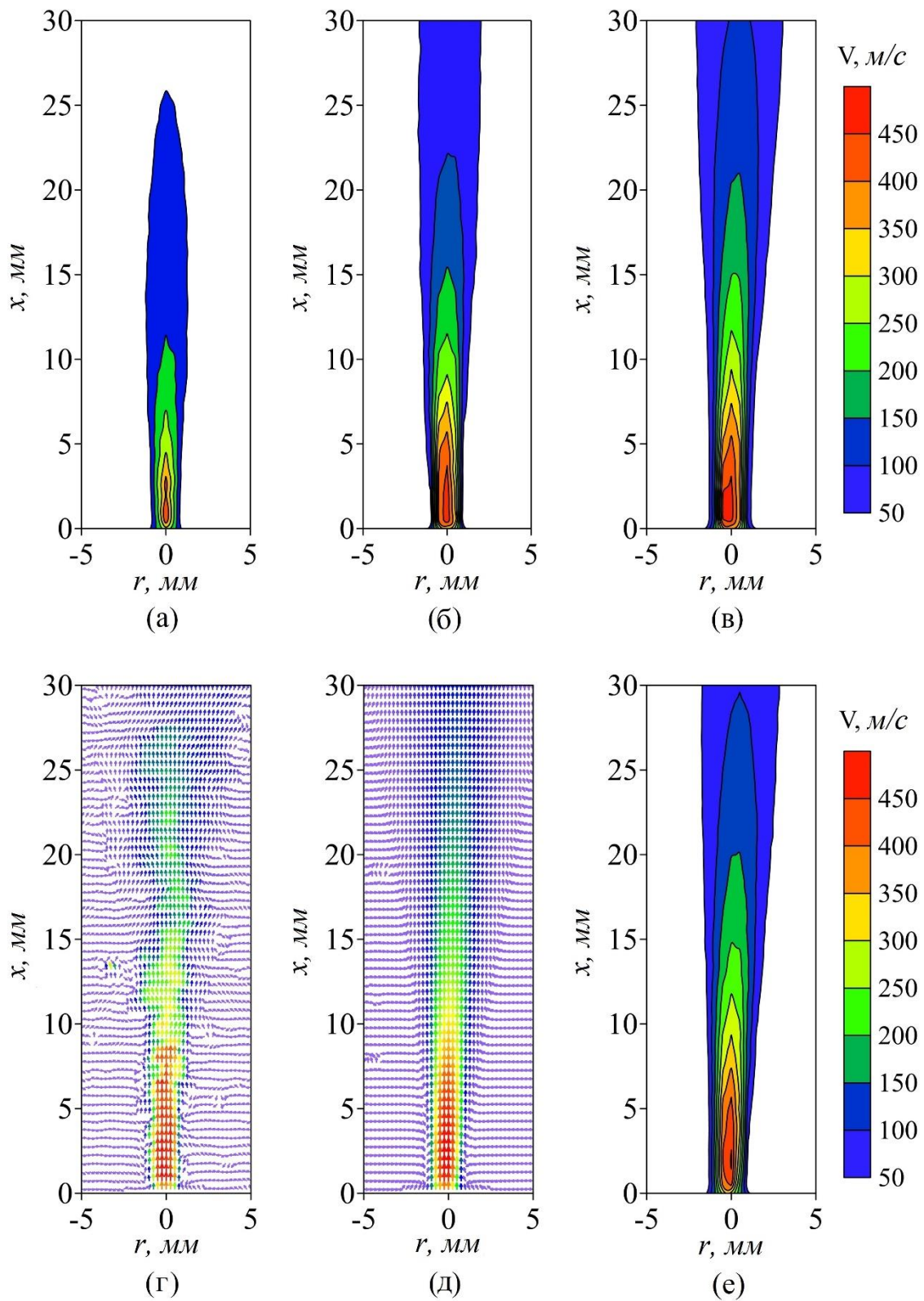


Рисунок 3.5 – Поля скорости воздушной струи (м/с) для различных давлений в форсунке p_1 (по манометру, бар): (а) 1,5; (б) 3,4; (в) 7,6; (г) характерное векторное поле мгновенной скорости при $p_1 = 5,5$ бар; (д) векторное поле средней скорости при $p_1 = 5,5$ бар; (е) изолинии модуля средней скорости при $p_1 = 5,5$ бар

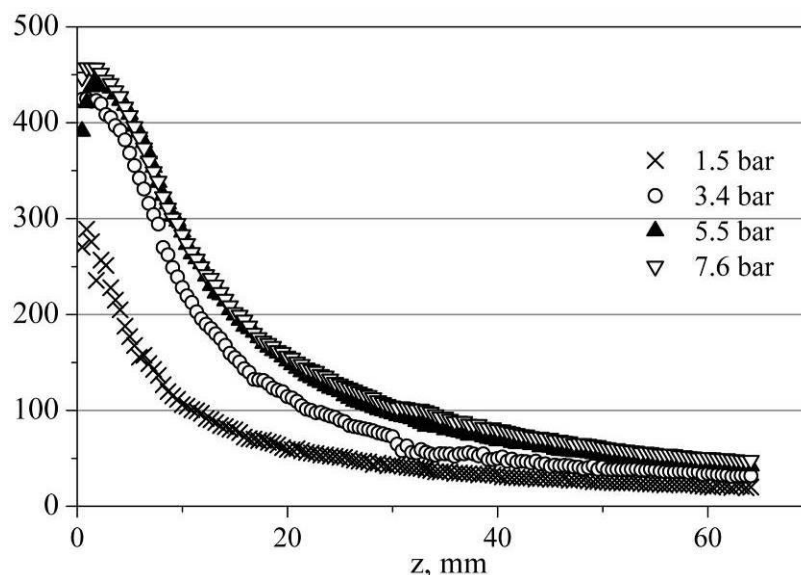


Рисунок 3.6 – Профили аксиальной компоненты средней скорости (м/с) вдоль вертикальной оси форсунки для различных значений давления p_1 в форсунке

Результаты экспериментов показывают, что скорость струи в ближней области существенно зависит от давления в форсунке (Рисунок 3.7-а), изменяется от 288 до 458 м/с при изменении давления p_1 от 1,5 до 7,6 бар. Можно предположить, что в этой области скорость струи существенно влияет на размер капель топлива при диспергировании (см. область I на рисунке 3.4), определяя интенсивность процессов переноса и горения в двухфазном потоке. По мере удаления от форсунки скорость струи понижается с переходом в дозвуковой режим, так что вблизи области рециркуляции (на расстоянии ниже 60 мм по потоку, см. рисунок 3.7-в и область III на рисунке 3.4) величина скорости струи определяется заданным расходом, а режим горения в основном определяется соотношением «топливо-окислитель».

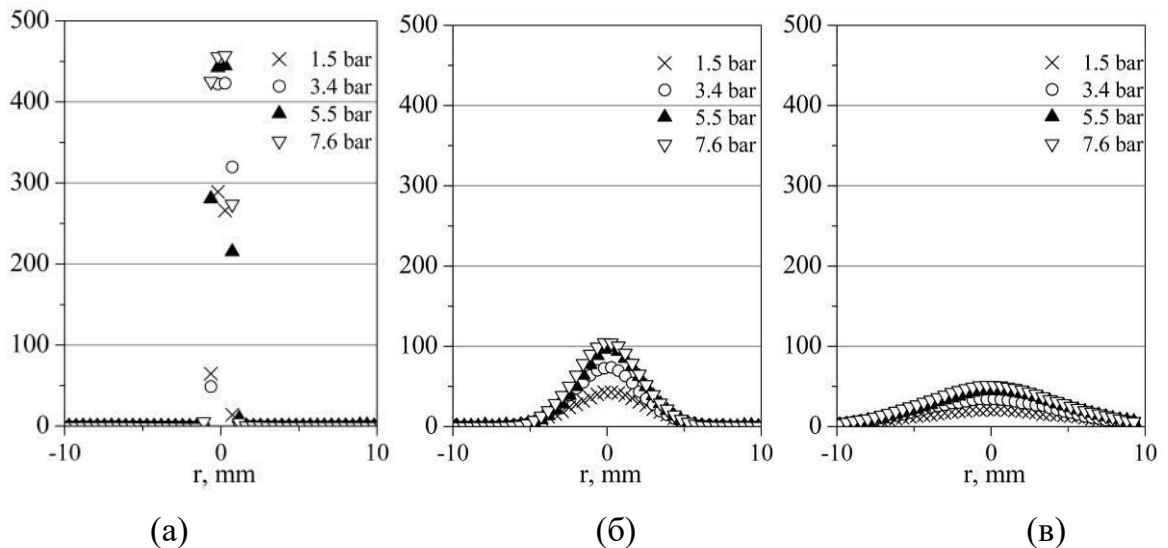


Рисунок 3.7 – Профили аксиальной компоненты средней скорости (м/с) на разном расстоянии от среза форсунки при различных значениях p_1' : (а) 1,8 мм; (б) 30 мм; (в) 60 мм

На рисунке 3.8 представлен результат визуализации ударно-волновой структуры потока воздуха вблизи форсунки (режим № 3), полученный с помощью прямого теневого метода. Время экспозиции составляло 10 мс. Картина является характерной для сверхзвуковой затопленной струи. Фронт падающей ударной волны начинается на стенке сопла форсунки, наклонно к ней, как коническая поверхность. Ударный фронт пересекается с диском Маха, перпендикулярным к оси. Позади маховского и падающего ударного фронта развивается отраженный фронт и поверхность контактного разрыва.

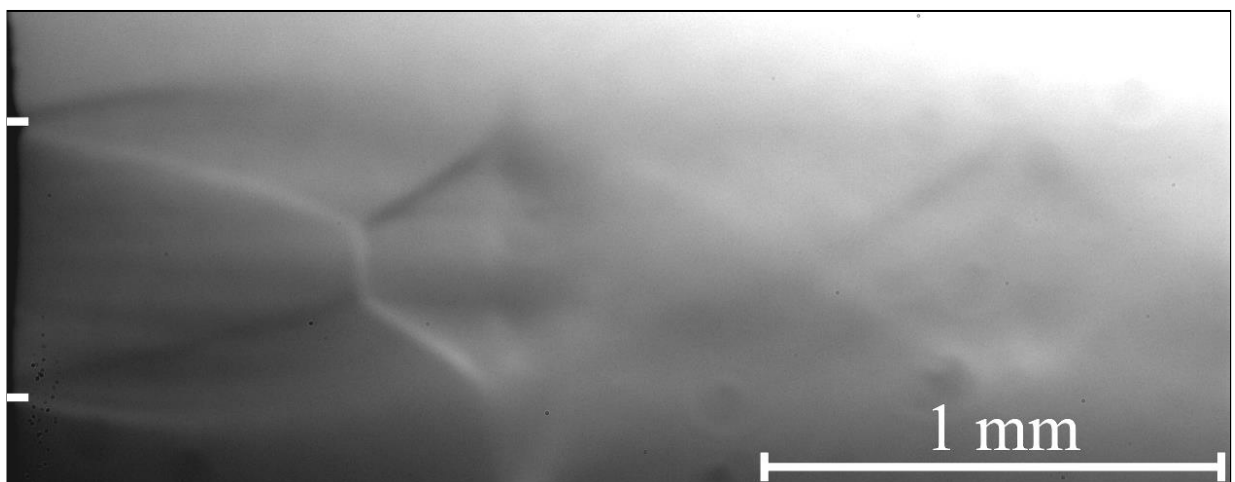


Рисунок 3.8 – Теневая фотография потока вблизи форсунки ($p_1' = 5,5$ бар)

3.2 ДИСПЕРГИРОВАНИЕ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ СТРУЕЙ ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА ИЛИ ВОЗДУХА

В данном подразделе приведены результаты измерений основных характеристик газокапельного потока при распылении жидких углеводородов струёй перегретого водяного пара или струёй воздуха применительно к условиям работы перспективного горелочного устройства для различных режимных параметров. В качестве жидкого топлива в экспериментах использовалось 2 типа топлива: стандартное дизельное топливо, как наиболее типичное качественное жидкое топливо для горелочных устройств, и смесь отработанных моторных и трансмиссионных машинных масел (далее – масло), как наиболее распространенный вид жидких горючих отходов, для эффективного сжигания которого требуется использование специальных способов распыления. Это позволяет изучить предложенный перспективный способ диспергирования жидких углеводородов, имеющих разные физические и химические свойства (см. Приложение Б).

3.2.1 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

Изучение характеристик газокапельного потока при распылении жидких углеводородов струей перегретого водяного пара (или воздуха) проводилось на примере перспективной конструкции горелки (см. Рисунок 3.1). Горелка реализует предложенный способ диспергирования и сжигания [123], при котором происходит паровая газификация продуктов термического разложения и неполного сгорания жидкого топлива.

В горелочном устройстве реализована следующая схема диспергирования и сжигания жидкого топлива (Рисунок 3.9-а). Перегретый водяной пар (или воздух) подается в горелочное устройство из парогенератора через форсунку, установленную в основании горелки. Высокоскоростная струя пара истекает из форсунки в камеру газогенерации и нагревает элементы горелочного устройства. Через топливоподающую трубку в основание паровой струи естественным способом в виде тонкой струи натекает жидкое топливо с заданным расходом, в результате чего формируется однородный мелкодисперсный газокапельный поток (Рисунок 3.9-б). Отличительной особенностью

данного способа является то, что топливо и распыляющая среда (несущая фаза) – водяной пар (или воздух) предварительно не смешаны друг с другом, что на практике является важным преимуществом, поскольку нет контакта топлива с форсункой, не происходит коксование ее поверхностей и засорение каналов подачи топлива, с последующими сбоями в работе горелочного устройства.

Для снижения эмиссии токсичных продуктов и повышения полноты сгорания топлива важно обеспечить высокую однородность газочапельного потока, максимально мелкое дробление топлива, высокую стабильность факела. Предложенная конструкция горелочного устройства обеспечивает возможность распыления загрязненных, в том числе, механическими примесями и водой, некондиционных жидких углеводородов, таких как, отработанное масло, отходы нефтедобычи и нефтепереработки, с высокой энергоэффективностью и низкими показателями токсичных выбросов в атмосферу.

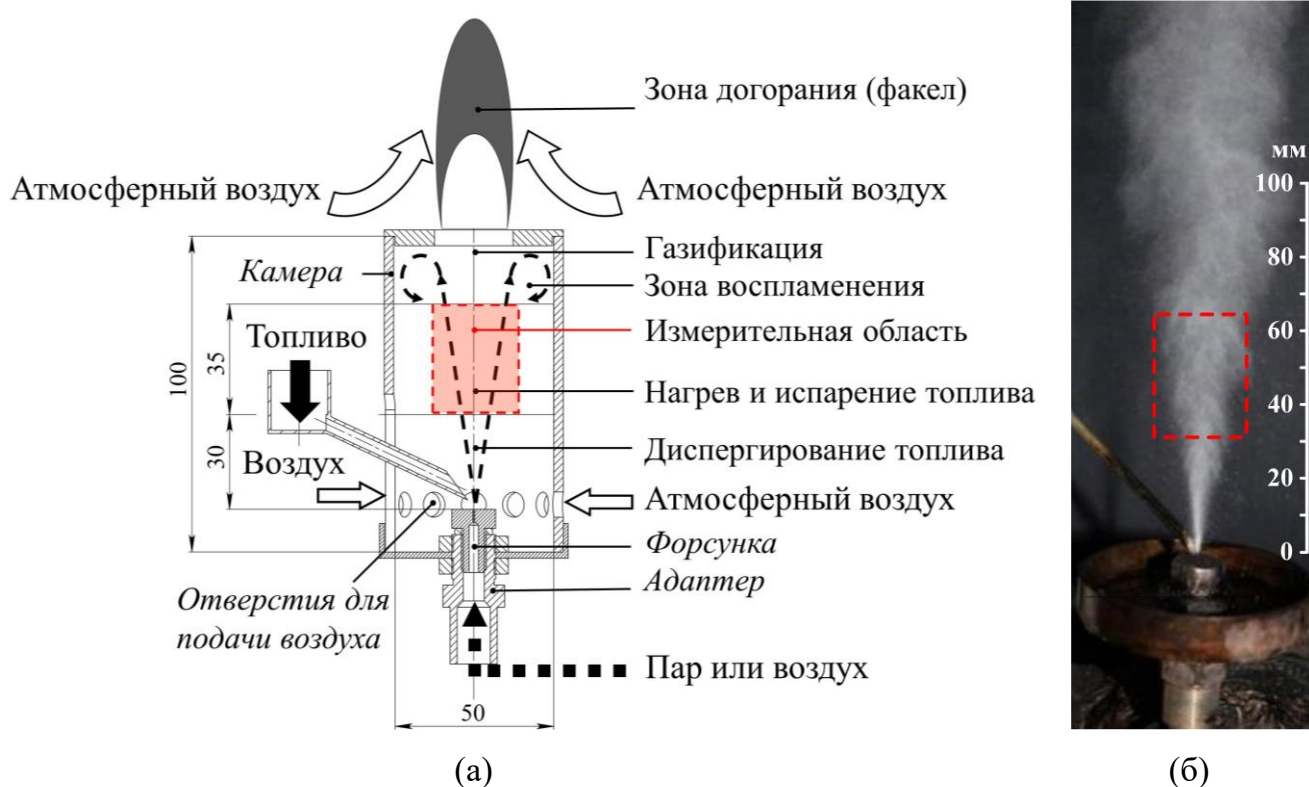


Рисунок 3.9 – (а) Схема горелочного устройства с распылением жидкого топлива струей перегретого водяного пара (или воздуха), мм; (б) распыление жидкого топлива струей перегретого водяного пара (красной рамкой показана измерительная область)

Помимо распыления топлива, перегретый водяной пар повышает температуру капель, что интенсифицирует массообмен и смесеобразование, способствуя устойчивому воспламенению. В результате натекания струи на внутреннюю плоскость сопла горелки в периферийной зоне формируется область рециркуляции (Рисунок 3.9-а). Измерения дисперсного состава газочапельного потока проводились в открытом пространстве (Рисунок 3.9-б). Измерительная область выбрана с учетом того, что при диспергировании топлива в горелочном устройстве однородный газочапельный поток формируется на расстоянии около 30 мм от форсунки, а на расстоянии 60-70 мм топливо воспламеняется (см. Раздел 4). Поэтому измерительная область охватывала пространство на расстоянии от 35 до 65 мм от форсунки (красная рамка на Рисунке 3.9).

Схема экспериментальной установки показана на рисунке 3.10. Установка состоит из систем подачи воды, электрического парогенератора, системы подачи топлива, системы подогрева топлива, паровой форсунки и измерительных систем. Стабильный массовый расход топлива (до 2 кг/ч) задается топливной форсункой и насосом, и контролируется при помощи измерения массы на электронных весах Acom PC-100W-10H (предел допускаемой погрешности 1 г) за время эксперимента. Для высоковязкого топлива используется система подогрева (до 110 °С) и грубой очистки для регулирующей расход топливной форсунки при лабораторных измерениях.

Следует отметить, что в случае горения топлива в горелочном устройстве, повышенная температура в камере газогенерации будет способствовать интенсивному испарению капель за счет излучения. То есть размеры капель в горелочном устройстве будут меньше, чем размеры капель, измеренные в отсутствие горения (на одинаковом расстоянии от форсунки).

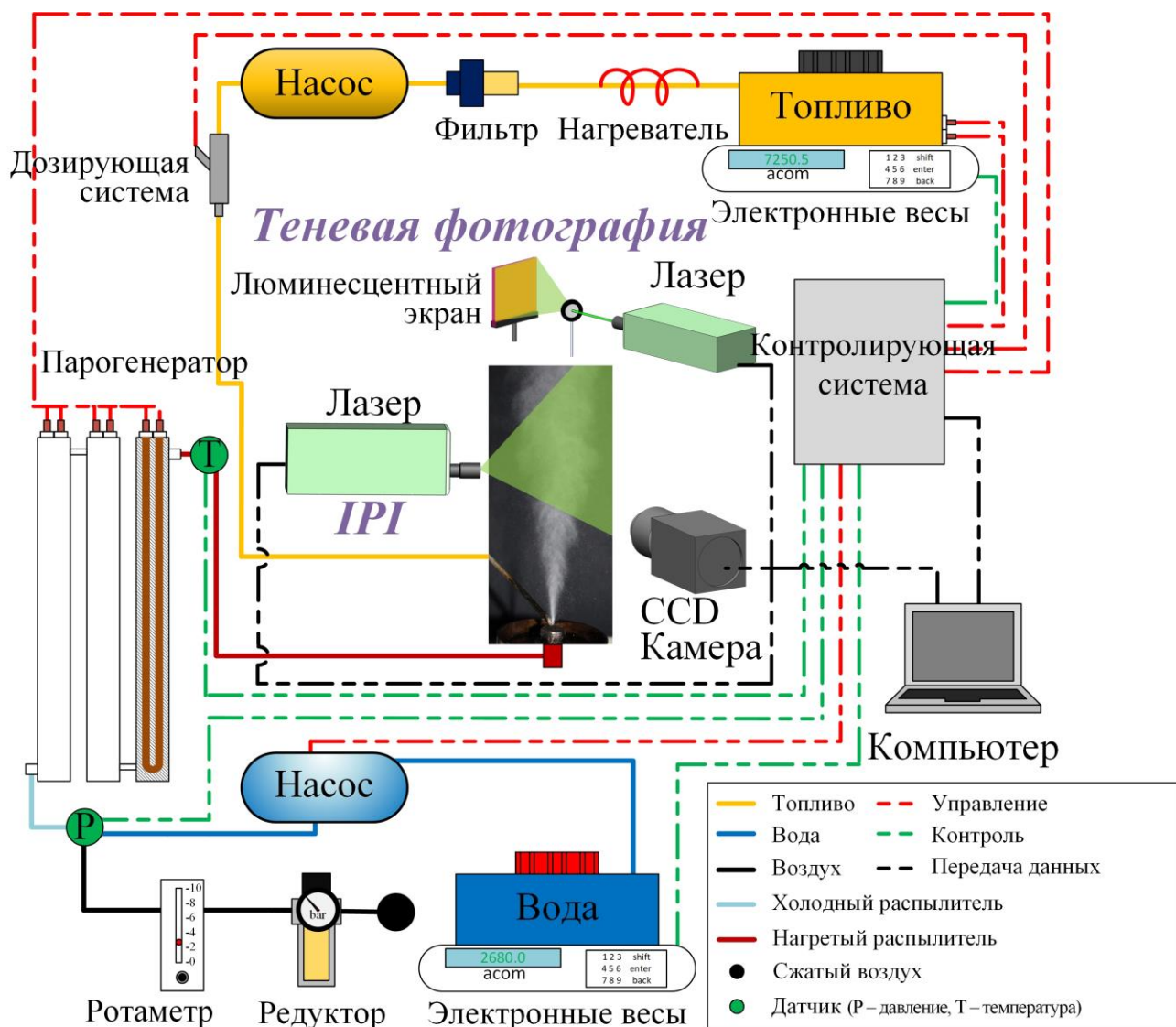


Рисунок 3.10 – Схема экспериментальной установки

3.2.2 МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

Одним из самых распространенных подходов к изучению газокapельных потоков является оптическая диагностика. Использование современных методов обеспечивает получение детальной информации о структуре потока, как на макро, так и на микро масштабах [149]. Так, например, для определения размеров капель в потоке, используются методы, основанные на дифракции лазерного излучения (Laser Diffraction Spray Analyzer, LDSA) [127], или на эффекте Доплера (Phase Doppler Particle Analyzer, PDPA) [150], [151], [152]. Эти методы обладают высокой точностью, позволяют идентифицировать капли размером от сотен нанометров до миллиметра с высокой скоростью (тысячи частиц в секунду). В то же время, основным недостатком является

то, что они являются точечными, тем самым позволяя определить только локальные характеристики.

Наряду с точечными методами LDSA и PDPA, широкое распространение получили панорамные методы. Одним из самых распространенных методов является цифровая съемка с фоновой подсветкой (Backlight Imaging или Shadow Photography, SP). Например, в работе [153] исследована структура и динамика газочапельной струи дизельного топлива с использованием данного метода. Для более детального исследования характеристик газочапельных потоков применяется высокоскоростная визуализация с фоновой подсветкой (High-speed Backlight Imaging) [154], [155], [156].

Другой техникой измерений в панорамных методах является подсветка потока лазерным «ножом». Широко распространенный метод Particle Image Velocimetry (PIV) применяется для исследования структуры и скорости газочапельных потоков, истекающих из форсунок различной конфигурации [1], [157], [158].

При исследовании характеристик распыла важно получать информацию не только о структуре потока в общем, но и о дисперсном составе исследуемого спрея в разных областях потока. Метод SP применяется, в том числе, для исследования микроскопических характеристик, таких как диаметр капель, содержащихся в потоке [159], [160], [161]. Использование макрообъективов для получения необходимого оптического увеличения позволяет определять частицы размером от единиц до тысяч микрометров. При этом, в отличие от метода PDPA, исследование происходит не в точке, а в некоторой области, размеры которой определяются характеристиками камеры и объектива.

Еще одним распространенным методом изучения дисперсного состава в потоке является Interferometric Particle Imaging (IPI), позволяющий определять диаметр капель [159], [160], [162]. В работе [162] представлен анализ применимости метода IPI для различных задач, указаны преимущества и недостатки метода.

Таким образом, имеющиеся на сегодняшний день экспериментальные методы позволяют получить детальную информацию об основных характеристиках газочапельного потока. В настоящей работе используются методы SP и IPI, PIV, PTV.

3.2.2.1 МЕТОД ТЕНЕВОЙ ФОТОГРАФИИ (SHADOW PHOTOGRAPHY)

Для измерения дисперсного состава и структуры газокапельного потока применялся метод Shadow Photography (SP). Этот метод основан на регистрации объекта, имеющего коэффициент преломления, отличный от окружающей среды [146]. За исследуемым объектом (относительно камеры) располагается диффузный источник света с равномерным пространственным распределением интенсивности (Рисунок 3.11). Плоскость фокусировки объектива камеры находится в непосредственной близости к объекту исследования – для получения наибольшей четкости теневой фотографии. Цифровой анализ теневого изображения позволяет определить положение и границу объекта. Данный метод позволяет измерять размеры частиц в диапазоне 10–1000 мкм.

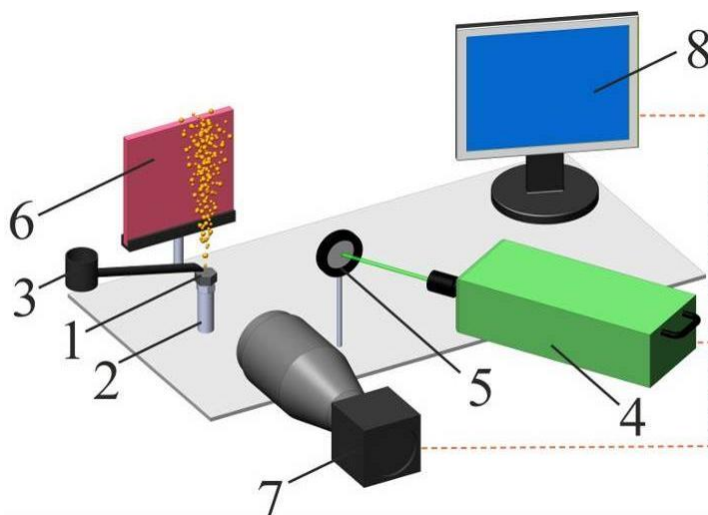


Рисунок 3.11 – Схема измерительного участка при измерениях тeneвым методом:
1 – форсунка; 2 – канал для подачи перегретого водяного пара (или воздуха); 3 – канал для подачи топлива; 4 – импульсный лазер; 5 – диффузное стекло; 6 – фоновый экран с люминесцентным покрытием; 7 – цифровая камера; 8 – компьютер

Для проведения экспериментов использовался измерительный комплекс «Полис» [163], включающий в себя: CCD камеру ImperX B4820-M (разрешение 4904×3280 пикс, частота съемки 3,2 Гц) и макрообъектив Tamron SP AF с фокусным расстоянием 180 мм, что позволяло проводить измерения с хорошим пространственным разрешением (увеличение 1:1). В качестве источника света использовался фоновый экран с люминесцентным покрытием на основе родамина, предварительно освещаемый

расфокусированным лучом импульсного лазера Nd:YAG QuanteLEVG (длина волны – 532 нм, энергия в импульсе – до 145 мДж, длительность импульса – 10 нс). Для повышения контрастности теневой фотографии использовался пороговый светофильтр (560 нм), полоса пропускания которого соответствует длине волны света, переизлучаемого родамином. Основным источником ошибки измерения диаметра капель методом SP является погрешность определения границы образа капли при цифровой обработке, которая оценивается на уровне 0,5 пикс, что соответствует 3,6 мкм при имеющемся оптическом увеличении.

Для цифровой обработки полученных теневых изображений использовался алгоритм «Bubbles Identification», реализованный в программном обеспечении ActualFlow [148, 164], включающий в себя: алгоритм высокочастотной (high-pass) фильтрации с целью выделения границ образов зарегистрированных на изображении объектов; алгоритм бинаризации по пороговому значению; алгоритм определения положения и диаметра сферических капель. Для каждого исследованного режима была проведена серия по 200 измерений. При обработке учитывалось суммарное распределение частиц по всем изображениям, нормированное на общее количество идентифицированных частиц.

3.2.2.2 ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ РАЗМЕРОВ КАПЕЛЬ (INTERFEROMETRIC PARTICLE IMAGING)

Метод IPi позволяет регистрировать мгновенные распределения диаметра частиц в плоском сечении потока [159], [165], [166]. Размер сферической частицы (капли или пузыря) вычисляется по интерференционной картине, наблюдаемой на расфокусированном изображении частицы, освещенной лазерным ножом. Согласно теории рассеяния Ми [167], свет, отраженный и однократно преломленный сферической поверхностью капли, создает на образах капель интерференционные полосы, частота которых пропорциональна диаметру капли. Цифровой анализ полученных изображений позволяет определить положение и размер капель. Данный метод позволяет регистрировать частицы с размерами от 10 мкм. В настоящей работе IPi-метод применялся в качестве дополнительного независимого метода для измерения дисперсного состава капель топлива.

В экспериментах в качестве источника света использовался импульсный лазер Nd:YAG QuantelEVG145 с объективом для формирования лазерного ножа (Рисунок 3.12). Для регистрации образов капель в момент лазерного импульса также применялась CCD камера ImperX B4820-M, на которую был установлен макро-объектив SIGMA 105mm F2.8 DG MACRO и блок оптического сжатия, используемый для уменьшения образов капель по одной координате с целью увеличения максимальной плотности частиц в исследуемом потоке. Для проведения калибровки камеры и расфокусировки объектива использовался длинноходовый транслятор Edmund 59-336, позволяющий изменять расстояние между объективом и регистрирующей матрицей цифровой камеры.

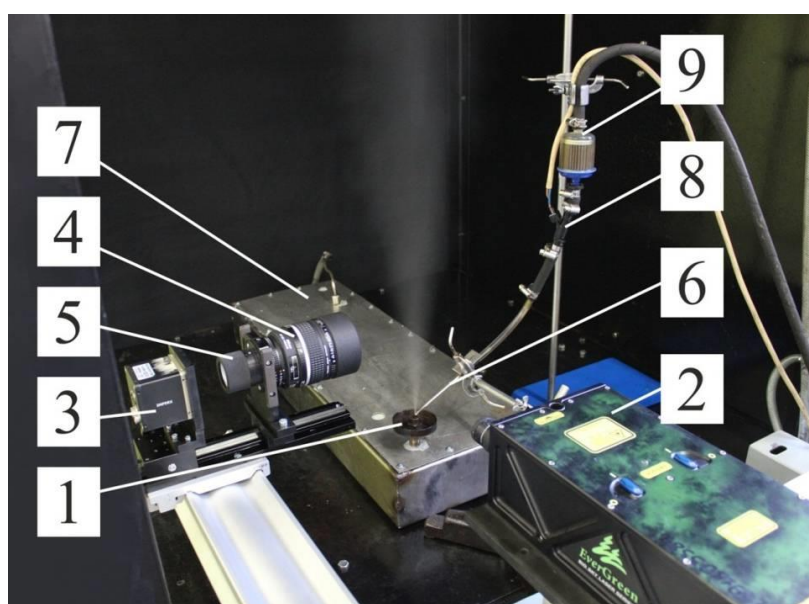


Рисунок 3.12 – Экспериментальный стенд для IPI-измерений: 1 – форсунка; 2 – лазер; 3 – камера; 4 – объектив; 5 – блок оптического сжатия; 6 – топливная трубка; 7 – парогенератор; 8 – топливная форсунка; 9 – топливный фильтр

Для цифровой обработки полученных изображений использовался алгоритм «IPI Reconstruction», реализованный в программном обеспечении ActualFlow, включающий в себя: алгоритм поиска расфокусированных образов капель; алгоритм выделения частоты интерференционных полос с использованием Фурье преобразования; алгоритм отсева ложных образов; алгоритм преобразования вычисленной частоты в диаметр капель. Для каждого исследованного режима была проведена серия по 100 измерений. При обработке учитывалось суммарное распределение частиц по всем изображениям, нормированное на общее количество идентифицированных частиц.

3.2.2.3 МЕТОД PARTICLE TRACKING VELOCIMETRY

Результатом измерений с помощью метода PTV являются мгновенные двухкомпонентные поля скорости [168]. В отличие от метода PIV, вектор скорости измеряется по перемещениям отдельных трассеров в потоке. Измеренное векторное поле, как правило, имеет разрешение выше, чем в методе PIV, а векторная сетка является нерегулярной, с узлами в точках положения трассеров.

Метод PTV в настоящей работе применялся для измерения скорости дисперсной фазы. Для вычисления скорости использовались изображения, полученные при теневых измерениях газокапельного потока в двухкадровом режиме (т.е. трассерами являлись сами капли топлива).

3.2.3 УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В качестве жидкого топлива в экспериментах использовалось 2 типа топлива: стандартное дизельное топливо (кинематическая вязкость при 23,7 °C составляет 4,1 cSt; плотность 839,89 кг/м³) и смесь отработанных моторных и трансмиссионных машинных масел. Эксперименты с использованием масла (плотность 863,25 кг/м³) проведены для двух режимов с различной температурой топлива, при которых вязкость достаточна для эффективного диспергирования: 40 °C (кинематическая вязкость 69 cSt) и 60 °C (кинематическая вязкость 41,8 cSt).

Массовый расход топлива F_f изменялся в диапазоне 0,4–2,2 кг/ч, в котором обеспечивается устойчивая работа горелочного устройства (см. Раздел 4), необходимая для изучения процесса сжигания в лабораторных условиях [169].

Для исследования дисперсного состава газокапельного потока при распылении дизельного топлива использовались методы SP и IPI. При распылении отработанного масла применялся только метод SP, поскольку масло является оптически малопрозрачной средой, и применение метода IPI невозможно.

Расход перегретого водяного пара выбирался из соображений соответствия наиболее характерным режимам работы горелочного устройства [169]. Для заданного диапазона расхода топлива, массовый расход пара F_v варьировался от 0,2 до 1,4 кг/ч (отклонения при регулировке от заданных средних значений расходов в пределах $\pm 5\%$).

При этом относительный массовый расход пара $\gamma = F_v/F_f$ изменялся от 0,25 до 1,0, а массовая доля пара в смеси с топливом $\omega_v = F_v/(F_f+F_v) \cdot 100\%$ варьировалась от 17 до 48%.

Установлено [169], что температура перегретого водяного пара оказывает слабое влияние на основные характеристики сжигания жидкого топлива. Однако, чтобы изучить влияние температуры пара на размер капель распыляемого топлива, для отдельных расходов пара и топлива в настоящей работе были проведены измерения дисперсного состава распыляемого топлива при разной температуре перегретого водяного пара, которая варьировалась в диапазоне 150-550 °С с шагом около 100 °С, при этом максимальный перегрев пара достигал 400 градусов.

Основная часть результатов получена для режимов с одинаковой температурой пара $T_s = (260 \pm 10)$ °С. Исследования характеристик при сжигании дизельного топлива [169] и масла [171] (см. Раздел 4) позволили получить карты режимов горения для данной конструкции горелочного устройства при $T_s = (260 \pm 10)$ °С (Рисунок 3.13): установлена граница срыва пламени (сплошная линия); найдена область с концентрацией монооксида углерода $[CO] < 500$ ppm в продуктах сгорания (синяя область на рисунке 3.13-а; желтая область на рисунке 3.13-б); красным цветом показана область с концентрацией $[CO] > 500$ ppm. Для исследования дисперсного состава в данной работе были выбраны характерные режимы, отмеченные на картах режимов символами «+» (Рисунок 3.13). Режимные параметры пара приведены в Таблице 3.3. Давление пара в зависимости от значений F_v и T_s составляло от 0,25 до 1,20 МПа, перегрев пара $T_s - T_b$ достигал 135 °С (T_b – температура насыщенного пара).

Для анализа эффективности диспергирования жидкого топлива струей перегретого водяного пара, в настоящей работе были проведены измерения дисперсного состава капель топлива, распыляемого струей нагретого воздуха ($T_a = T_s = 260 \pm 10$ °С) методом ПИ. Для этого из магистрали через парогенератор и форсунку подавался сжатый воздух. Давление регулируется редуктором, после редуктора установлен контролирующий ротаметр Dwyer RMA-21-SSV (диапазон объемного расхода до 10 л/мин, давление до 7 бар, погрешность ± 4 %, для нормальных условий). Корректировка показаний ротаметра производилась для условий эксперимента, после чего рассчитывался массовый расход воздуха. Эксперименты проведены для двух характерных значений массового расхода воздуха $F_a = 0,9, 1,2$ кг/ч. При этом расход топлива и температура воздуха регулировались в том же диапазоне, что и в экспериментах с паром (см. Рисунок

3.13).

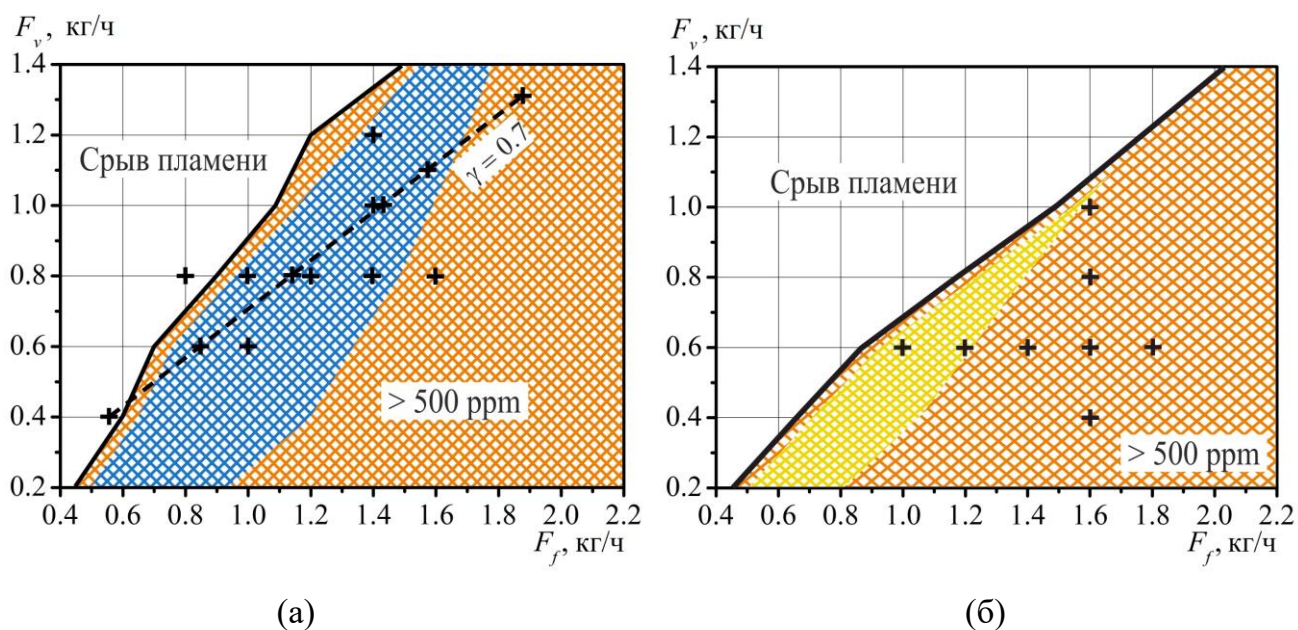


Рисунок 3.13 – Карта режимов горения топлива: (а) дизельное топливо; (б) масло.

Символы «+» обозначают режимы, исследованные в настоящей работе

Таблица 3.3 – Значения параметров пара при $T_s = (260 \pm 10) ^\circ\text{C}$

№	F_v , кг/ч	p , кПа	$T_s - T_b$, $^\circ\text{C}$
1	0,211	255	135
2	0,305	335	116
3	0,408	420	114
4	0,498	509	107
5	0,588	582	108
6	0,701	660	101
7	0,798	782	95
8	0,910	812	84
9	1,001	894	74
10	1,128	967	72
11	1,205	1024	70
12	1,293	1129	59
13	1,370	1203	55

3.2.4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ГАЗОКАПЕЛЬНОГО ПОТОКА

В результате экспериментальных исследований получены данные об основных параметрах газокапельного потока (дисперсный состав, скорость несущей и дисперсной фазы, угол раскрытия струи) при различных режимных параметрах (расход и температура пара/воздуха и расход топлива) при распылении жидкого топлива струей газа.

Следует отметить основные особенности исследуемого способа диспергирования жидкого топлива струей газа, выявленные при измерениях оптическими методами. При распылении маловязкого топлива (дизель) даже при небольших расходах топлива (в исследуемом диапазоне режимных параметров) формируется мелкодисперсный газокапельный поток, содержащий значительное количество мелких капель диаметром менее 10 мкм, которые невозможно идентифицировать набором используемой измерительной аппаратуры. При этом наличие таких капель в потоке снижает контрастность всего изображения. Методы SP и IPI идентифицируют ту часть капель потока, размеры которых больше 10 мкм. При этом измерить точно объем (расход) таких капель невозможно. В случае вязкого топлива (масло) в измерительной области (см. Рисунок 3.9) присутствуют нитевидные структуры, которые не учитываются алгоритмом обработки изображений. На рисунке 3.14 приведены последовательные изображения начальной стадии дробления капли масла высокоскоростным потоком перегретого водяного пара. Наряду с каплями, в потоке присутствуют вытянутые нитевидные структуры и пленки жидкости (Рисунок 3.14). Ниже по течению они расщепляются на капли, в том числе, за счет нагрева паром, и поток становится более однородным. При распылении дизельного топлива уже на начальном участке формируется густой однородный туман, состоящий из микрокапель топлива, сконцентрированных преимущественно в пределах угла раскрытия паровой струи (Рисунок 3.15). Таким образом, вязкость топлива сильно влияет на структуру потока в ближней области газокапельной струи.

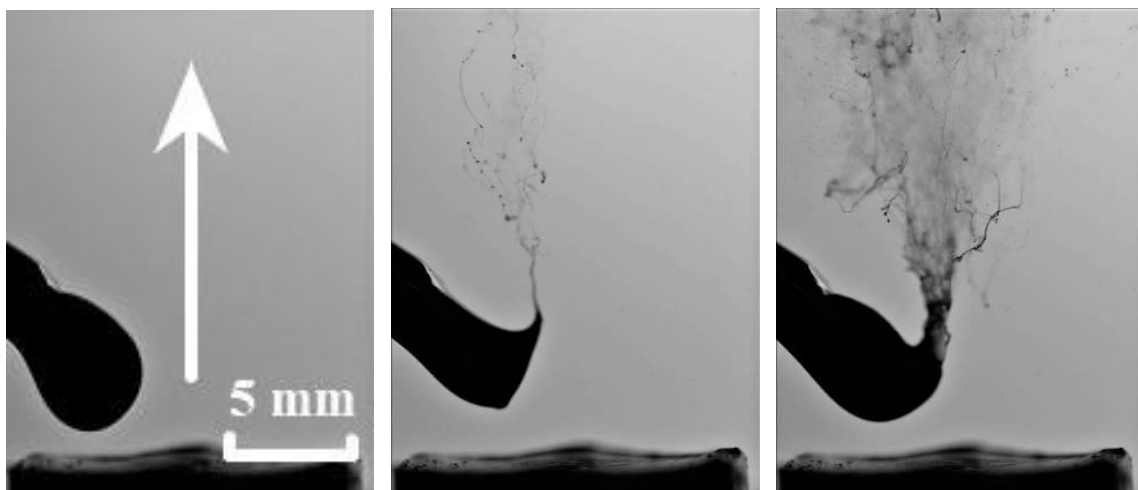


Рисунок 3.14 – Характерные теньевые фотографии начальной стадии дробления капли масла при распылении паровой струей

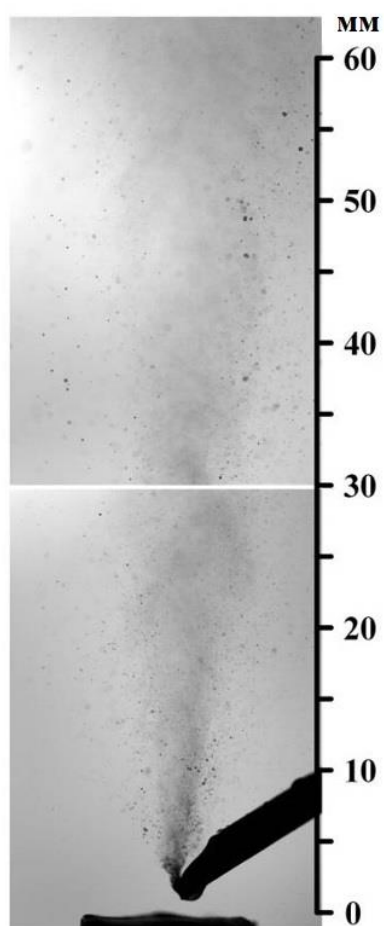


Рисунок 3.15 – Теньевые фотографии газокпельного потока при распылении дизельного топлива паровой струей в исследуемой области струи (показаны 2 измерительные зоны)

Чтобы провести корреляцию между скоростью несущей фазы и скоростью капель, согласно [129], были выбраны такие расходы воздуха (для однофазного потока) и пара (для газок капельного потока), при которых интенсивность динамического воздействия (произведение массового расхода на скорость), является одинаковой. За счет инерции капель на начальном участке струи скорости фаз отличаются. На большем расстоянии вниз по потоку, в измерительной области струи (см. Рисунок 3.9), наблюдается равновесие фаз (Рисунки 3.16, 3.17). В этой зоне скорость капель имеет максимальное значение около 100 м/с (Рисунок 3.17). На расстоянии 60 мм от форсунки, где в горелочном устройстве происходит воспламенение, скорость потока падает до 50 м/с (Рисунок 3.17).

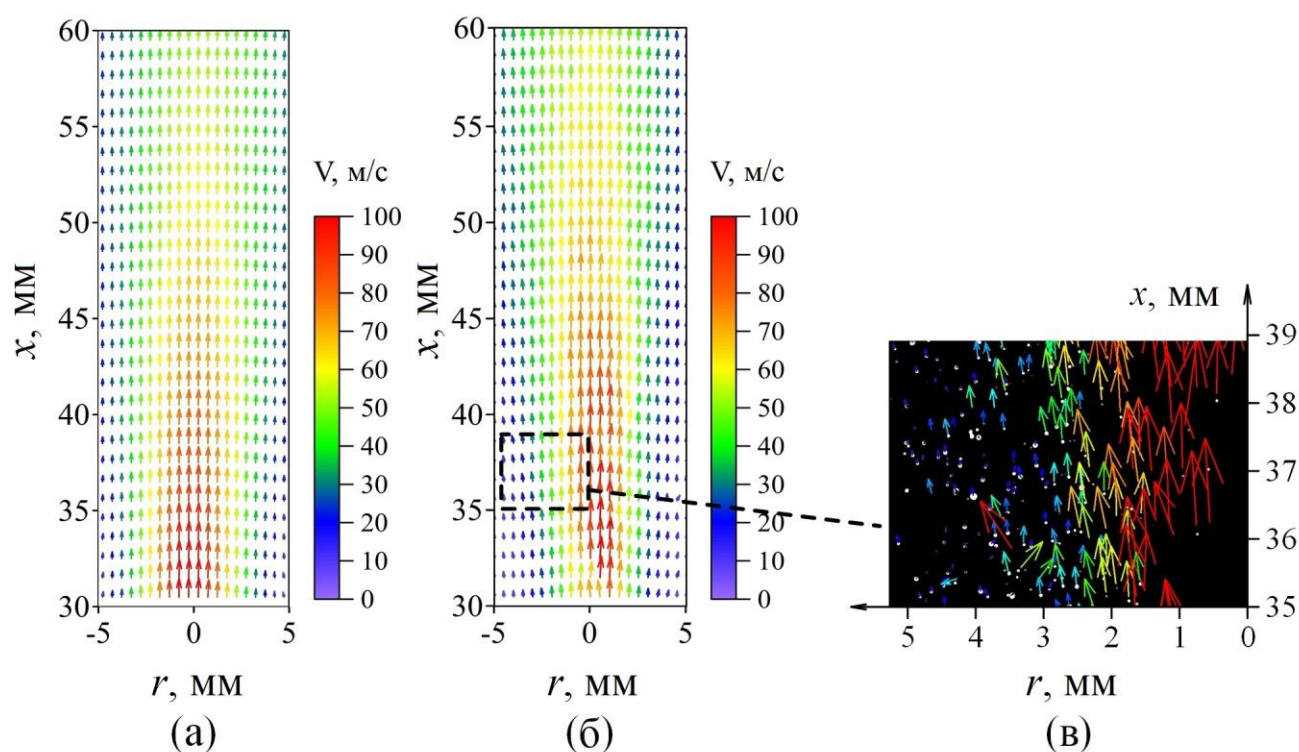


Рисунок 3.16 – (а) Поле средней скорости несущей фазы (массовый расход 1,52 кг/ч, $T_a = 23$ °С) – PIV-измерения; поле средней скорости (б) и поле мгновенной скорости (в) дисперсной фазы при распылении дизельного топлива струей пара ($F_v = 0,8$ кг/ч, $F_f = 1,2$ кг/ч, $T_s = (260 \pm 10)$ °С) – PTV-измерения; ($F_v V_v = F_{air} V_{air} = 0,2$ Ньютон, где V – скорость потока на выходе из форсунки).

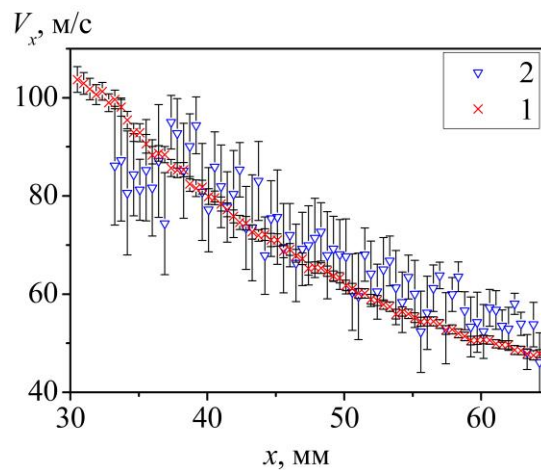


Рисунок 3.17 – Распределение вертикальной компоненты средней скорости вдоль оси форсунки ($F_v V_v = F_{air} V_{air} = 0,2$ Ньютон, где V – скорость потока на выходе из форсунки): 1 – однофазный воздушный поток (PIV), массовый расход 1,52 кг/ч, $T_a = 23$ °С [129]; 2 – газокпельный поток (PTV), расход пара $F_v = 0,8$ кг/ч, расход дизельного топлива $F_f = 1,2$ кг/ч, $T_s = (260 \pm 10)$ °С

В результате обработки изображений, полученных SP- и IPI-методами, получена детальная информация о дисперсном составе газокпельного потока при распылении жидкого топлива (дизель, масло) высокоскоростным потоком газовой фазы (пар, воздух) в зависимости от режимных параметров (расход и температура топлива, расход и температура газа). Характерный диаметр капель во всех исследованных режимах в зоне воспламенения составляет 10-20 мкм (Рисунки 3.18-3.21), что является достаточным условием для эффективного сжигания таких типов топлива [5] и говорит о преимуществах предложенного способа диспергирования жидкого топлива. (Здесь n_i – количество капель с размерами из i -го диапазона на j -ом изображении, N – общее число идентифицированных алгоритмом капель на j -ом изображении, $j = 1 \dots 200$). Однако выявлены некоторые особенности диспергирования.

На рисунке 3.18 показаны результаты измерений при распылении дизельного топлива струей перегретого водяного пара. Характерный диаметр капель (10-20 мкм) с увеличением расхода топлива остается неизменным (Рисунок 3.18-а), в том числе и для режима при $F_v = 0,8$ кг/ч и $F_f = 0,8$ кг/ч, когда происходит срыв пламени (см. Рисунок 3.13-а). Т.е. срыв пламени в данном случае не связан с размерами капель (Рисунок 3.18-а). Высокое содержание CO в продуктах сгорания для режима при $F_v = 0,8$ кг/ч и $F_f = 1,6$ кг/ч (см. Рисунок 3.13-а) тоже не связано с размерами капель. Изменение T_s в

рассматриваемом диапазоне не оказывает заметного влияния на дисперсный состав распыляемого дизельного топлива (Рисунок 3.18-б). Причина может быть связана с тем, что при адиабатическом расширении паровой струи истекающей из форсунки ее температура резко снижается и слабо зависит от температуры пара в парогенераторе (T_s). Это соответствует работе [169], согласно которой, температура перегретого водяного пара не влияет на показатели сжигания топлива в горелочном устройстве (см. Раздел 4). С увеличением расхода пара при постоянном расходе топлива (Рисунок 3.18-в) наблюдается некоторое уменьшение характерный диаметр идентифицированных капель (10-20 мкм), в пределах погрешности измерений. При постоянном относительном расходе пара дисперсный состав слабо зависит от расхода пара и топлива (Рисунок 3.18-г).

Результаты измерений при распылении масла струей перегретого водяного пара показаны на рисунке 3.19. Качественно они аналогичны результатам, представленным на рисунке 3.18: с изменением расхода топлива дисперсный состав остается неизменным (Рисунок 3.19-а,б); с увеличением расхода пара дисперсный состав не меняется (Рисунок 3.18-в); вниз по потоку количество мелких капель увеличивается (Рисунок 3.19-г), что связано с испарением топлива. При этом температура масла в диапазоне 40-60 °С не влияет на дисперсный состав (Рисунок 3.19-а,б), поскольку при этой температуре вязкость и поверхностное натяжение масла имеют достаточно низкие значения. Характерное для отдельных режимов высокое содержание СО в продуктах сгорания (см. Рисунок 3.13-б), согласно [171], тоже не связано с размерами капель (Рисунок 3.19-а,б).

Измерение дисперсного состава капель топлива было также проведено при распылении дизельного топлива струей воздуха. Расход топлива не влияет на изменение дисперсного состава потока в исследуемом диапазоне параметров (Рисунок 3.20-а,б), так же, как и температура воздушной струи (Рисунок 3.20-в). С увеличением расхода воздуха (и скорости струи) количество мелких капель увеличивается (Рисунок 3.20-г), т.е. увеличение интенсивности воздействия струи воздуха на каплю распыляемого топлива повышает эффективность дробления.

При распылении нагретого до 40 °С масла струей воздуха в атмосфере полученные результаты (Рисунок 3.21) показывают, что расход топлива (Рисунок 3.21-а), температура воздуха (Рисунок 3.21-а,б) и расход воздуха (Рисунок 3.21-в,г) слабо влияют на дисперсный состав потока в исследуемом диапазоне параметров.

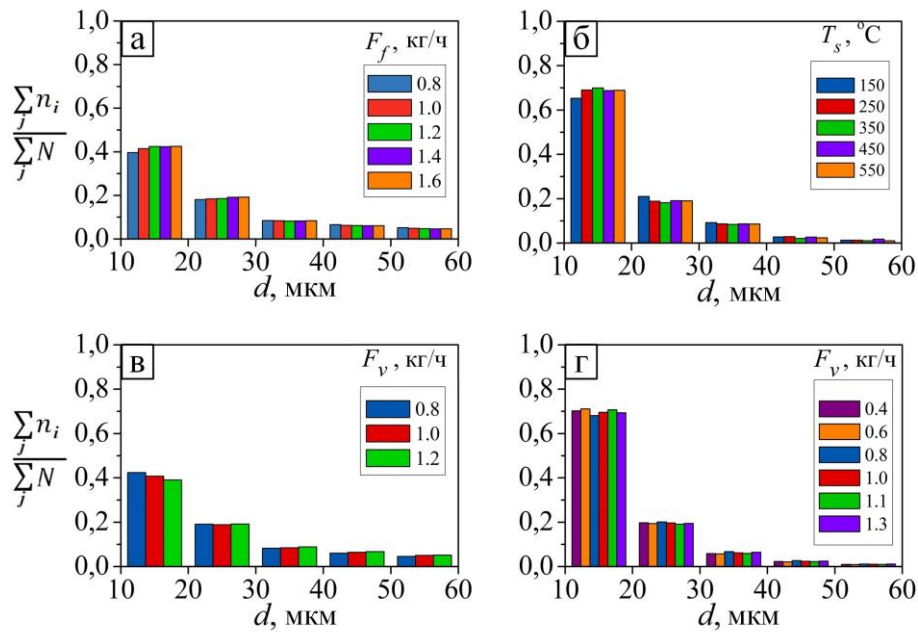


Рисунок 3.18 – Дисперсный состав капель топлива, образующихся при распылении дизельного топлива струей перегретого водяного пара в атмосфере: (а) $F_v = 0,8$ кг/ч, $T_s = (260 \pm 10)$ °C; (б) $F_v = 0,6$ кг/ч, $F_f = 1,0$ кг/ч; (в) $F_f = 1,4$ кг/ч, $T_s = (260 \pm 10)$ °C; (г) $\gamma = 0,7$, $T_s = (260 \pm 10)$ °C

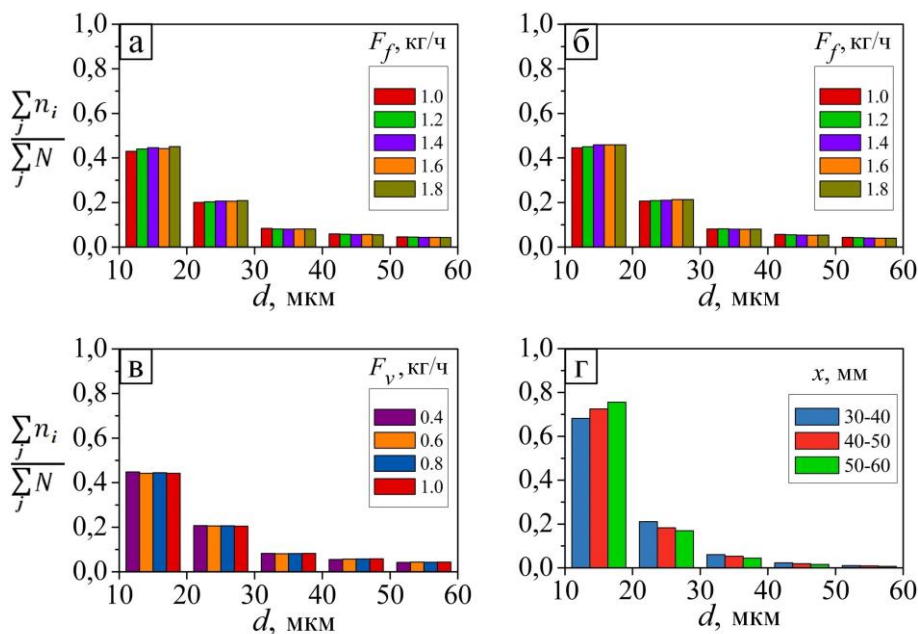


Рисунок 3.19 – Дисперсный состав капель топлива, образующихся при распылении масла струей перегретого водяного пара в атмосфере ($T_s = (260 \pm 10)$ °C): (а) $F_v = 0,6$ кг/ч, температура масла 40 °C; (б) $F_v = 0,6$ кг/ч, температура масла 60 °C; (в) $F_f = 1,6$ кг/ч, температура масла 60 °C; (г) $F_v = 0,6$ кг/ч, $F_f = 1,0$ кг/ч, температура масла 40 °C, x – расстояние от форсунки

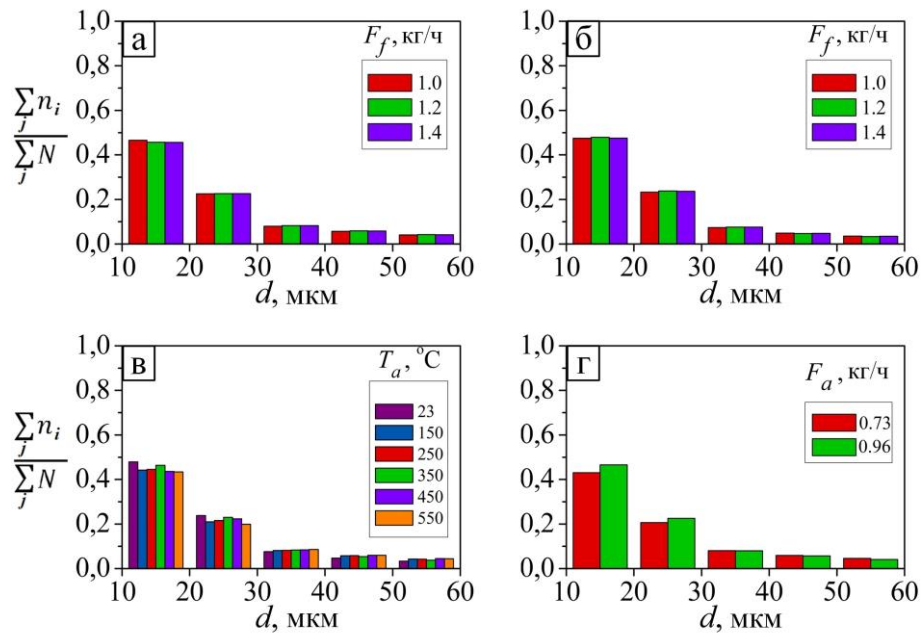


Рисунок 3.20 – Дисперсный состав капель топлива, образующихся при распылении дизельного топлива струей воздуха в атмосфере: (а) $F_a = 0,96$ кг/ч ($T_a = 250$ °C); (б) $F_a = 1,12$ кг/ч ($T_a = 23$ °C); (в) $F_f = 1,2$ кг/ч, $p_a = 5,5$ бар; (г) $F_f = 1,0$ кг/ч ($T_a = 250$ °C)

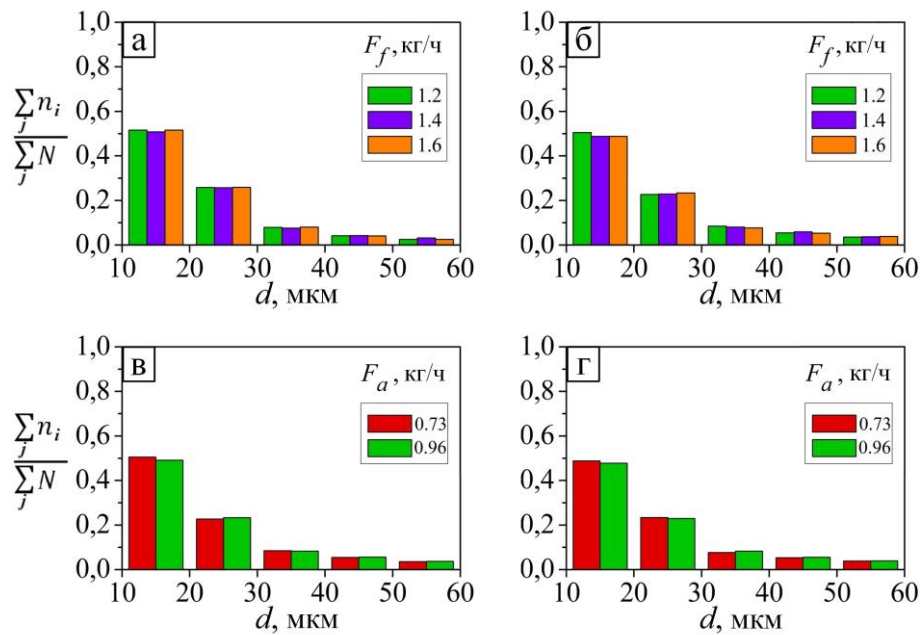


Рисунок 3.21 – Дисперсный состав капель топлива, образующихся при распылении масла струей воздуха в атмосфере при температуре масла 40 °C: (а) $F_a = 1,12$ кг/ч ($T_a = 23$ °C); (б) $F_a = 0,73$ кг/ч ($T_a = 250$ °C); (в) $F_f = 1,2$ кг/ч ($T_a = 250$ °C); (г) $F_f = 1,6$ кг/ч ($T_a = 250$ °C)

Таким образом, режимные параметры (расход и температура газа, соотношение расходов газа и топлива) в исследуемом диапазоне не оказывают заметного влияния на дисперсный состав. Выбор несущей фазы (пар или воздух) тоже не приводит к изменению характерный диаметр капель (10-20 мкм) в области измерений, который во всех исследованных режимах является достаточным для эффективного сжигания топлива.

Для определения режима распада капли можно использовать число Вебера, если значение числа Онезорге $Oh < 0,1$ [7]. Oh характеризует отношение силы вязкого трения к корню квадратному из произведения сил поверхностного натяжения и сил инерции [8]: $Oh = \mu / \sqrt{\rho d \sigma}$, где μ – динамическая вязкость, ρ – плотность, σ – поверхностное натяжение жидкости, d – характерный диаметр капли. Для дизельного топлива $Oh \approx 2 \cdot 10^{-2}$. Согласно [9], начальный распад струи жидкости происходит аналогично распаду капли, внезапно попадающей в высокоскоростную газовую струю, и определяется числом Вебера: $We = \rho_g U_g^2 D / \sigma$, где ρ_g – плотность распыляющего газа, U_g – характерная скорость газа, D – характерный размер топливной струи. В условиях эксперимента: $\rho_g = 0,96 \text{ кг/м}^3$; $U_g = 400 \text{ м/с}$; $D = 1 \text{ мм}$; $\sigma = 30,8 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$; $We \sim 5000$. Это значение We соответствует «катастрофическому» режиму распада, который характеризуется спонтанным и непредсказуемым образованием капель [9] (механизм данного режима распада в настоящее время плохо изучен).

Результаты измерений дисперсного состава при распылении жидких углеводородов струей перегретого водяного пара или воздуха приведены в работах [172], [173].

ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 3

С использованием современных оптических методов диагностики потоков (SP, IPI, PIV, PTV) проведены исследования основных параметров газочапельного потока (размеры капель, дисперсный состав, скорость несущей и дисперсной фазы, угол раскрытия струи) при распылении жидкого топлива струей газа при различных режимных параметрах (расход и температура пара и воздуха, расход и температура топлива) применительно к условиям перспективного прямооточного горелочного устройства, реализующего разработанный эффективный способ диспергирования и сжигания некондиционного жидкого топлива. Специфика предложенного способа заключается в том, что диспергирование жидкого топлива осуществляется непосредственно высокоскоростной струей перегретого водяного пара (или воздуха) без распыления топлива форсункой. На практике это является важным преимуществом, поскольку нет контакта топлива с форсункой, не происходит коксование ее поверхностей с последующими сбоями в работе горелочного устройства, а также позволяет сжигать загрязненное топливо и жидкие горючие отходы.

С помощью метода PIV экспериментально исследована структура течения в высокоскоростной струе газа (несущей фазе), истекающей из форсунки перспективного жидкотопливного горелочного устройства. На примере сжатого воздуха получены характерные поля скорости в однофазном потоке при различных режимных параметрах. Для ряда режимов работы горелочного устройства с подачей перегретого водяного пара, а также с подачей воздуха поведено сопоставление с оценками газодинамических параметров, полученными в приближении одномерного изэнтропического течения. Показано, что течение несущей фазы на выходе из форсунки имеет вид, характерный для сверхзвуковой затопленной струи (максимальная скорость в потоке достигает 458 м/с) с ударно-волновой структурой в окрестности форсунки и наличием «дисков Маха». Угол раскрытия воздушной струи составляет около 20°. Такой угол струи и скорость потока позволяют организовать сконцентрированный газочапельный поток с дальнейшим формированием компактного и устойчивого факела.

Измерения основных характеристик газочапельного потока при распылении жидких углеводородов струей перегретого водяного пара или струей воздуха проведены в открытом пространстве на примере дизельного топлива и отработанного машинного

масла при распылении струей перегретого водяного пара или воздуха. В качестве измерительной области выбрана область на оси симметрии форсунки, соответствующая зоне воспламенения в горелочном устройстве. Показано, что в этой области скорость капель достигает 50 м/с и соответствует скорости несущей фазы, т.е. на расстоянии до 60 мм от форсунки происходит диспергирование топлива и скоростная релаксация фаз.

В результате обработки изображений, полученных SP- и IPI-методами получена детальная информация о дисперсном составе газочапельного потока при распылении жидкого топлива высокоскоростным потоком газовой фазы в зависимости от режимных параметров. Характерный диаметр капель во всех исследованных режимах составляет в зоне воспламенения 10-20 мкм, что является достаточным условием для эффективного сжигания таких типов топлива с использованием предложенного способа диспергирования жидкого топлива. Режимные параметры (расход и температура газа, соотношение расходов газа и топлива) в исследуемом диапазоне не оказывают заметного влияния на дисперсный состав. Также размер капель в зоне воспламенения не зависит от типа используемых жидких углеводородов. Выбор несущей фазы (пар или воздух) тоже не приводит к изменению характерного диаметра капель (10-20 мкм) в области измерений. Но в то же время, перегретый водяной пар помимо распыления оказывает дополнительное положительное воздействие в случае с горением жидкого топлива – понижает производство оксидов азота, вместе с уменьшением количества воздуха, необходимого для горения. Кроме этого, можно сделать вывод, что характерные для некоторых режимов особенности, такие как срыв пламени и высокое содержание СО в продуктах сгорания не связаны с размерами капель.

4 ПОКАЗАТЕЛИ СЖИГАНИЯ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ ПРИ РАСПЫЛЕНИИ СТРУЕЙ ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА В ПЕРСПЕКТИВНОМ ГОРЕЛОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ

В данном разделе приведены результаты измерений тепловыделения, температуры внешнего факела горелочного устройства и газового состава продуктов сгорания при сжигании жидкого топлива в струе перегретого водяного пара или воздуха. Результаты этих исследований опубликованы в ряде журнальных статей [99], [169], [170], [171], [174], [175], [176].

4.1 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

Лабораторный образец атмосферного прямооточного горелочного устройства распылительного типа, исследуемый в работе, показан на рисунке 4.1. Горелка реализует предложенный способ диспергирования и сжигания, при котором происходит паровая газификация продуктов термического разложения и неполного сгорания жидкого топлива, защищенные патентами РФ на изобретения [95], [123], [124]. Конструкция лабораторного образца прямооточной горелки выбрана из соображений устойчивого воспламенения распыленного топлива в камере сгорания с последующей газификацией и дожиганием во внешнем факеле. Вертикальная ориентация горелки обеспечивает возможность измерений тепловыделения и газового состава с использованием проточного калориметра [99].

В основу новых технических решений положена задача создания паромасляного горелочного устройства с вертикальным факелом, горящим в открытом пространстве, имеющего короткое время запуска с выходом на рабочий режим и обеспечивающего устойчивое воспламенение паромасляной струи во время работы устройства без использования дополнительных устройств.

Поставленная задача решается тем [123], что горелочное устройство (Рисунок 4.2), содержащее цилиндрический корпус в виде стакана, паровую форсунку для подачи перегретого водяного пара, направленную вертикально вверх и смонтированную в дно корпуса, воздухоподводящие отверстия, выполненные на цилиндрическом корпусе вблизи дна, паропровод и топливоподающую трубку, конец которой расположен в

непосредственной близости от выходного отверстия паровой форсунки. Отличительной особенностью данного горелочного устройства является то, что топливоподающая трубка установлена под острым углом к горизонту и не касается стенки корпуса для уменьшения тепловых потерь при пуске устройства, а на верхнем торце корпуса установлено сопло в виде крышки с отверстием по центру для образования зоны рециркуляции, формируемой парами легкоиспаряющихся фракций жидкого топлива, способных легко воспламенятся при пуске и стабилизировать воспламенение паромасляной струи при работе устройства.



Рисунок 4.1 – Вид горелочного устройства

Лабораторный образец изготовлен из стали 12Х18Н10Т. Основные составные части горелочного устройства (Рисунок 4.2): корпус, образующий вместе с выходным соплом камеру газогенерации; основание; паровая форсунка с держателем и паропроводом; топливопровод с топливоприемником. Внешний диаметр горелки 60 мм, высота 140 мм, диаметр выходного отверстия горелки 25 мм (Рисунок 4.3). Размеры обеспечивают мощность горелочного устройства, необходимую и достаточную для проведения исследований в лабораторных условиях. Сопло выполнено в виде крышки с отверстием.

Диаметр сопла подобран таким образом, чтобы для заданного угла раскрытия струи создать необходимый аэродинамический пережим, обеспечивающий образование зоны рециркуляции вблизи выхода из горелки, которая является стабилизатором пламени. Такая простая форма сопла выбрана для исследования фундаментальных закономерностей влияния перегретого водяного пара на характеристики процессов диспергирования и сжигания жидкого топлива. Общий вес горелочного устройства 560 г: корпуса (камеры газогенерации) – 380 г, выходного сопла – 65 г, установочной поверхности, паровой форсунки, крепежных гаек и переходника – 115 г. Корпус горелочного устройства изготовлен из трубы со стенкой толщиной 3 мм, выходное сопло – из листа 5 мм. Установочная поверхность выточена из цельной заготовки. Форсунка паровая, крепежные гайки и переходник парогенератора выточена из проката шестигранника. Уплотнительные прокладки выполнены из медного листа толщиной 2 мм. Топливоприемник изготовлен из трубки 4 мм и заготовки. Отдельные элементы горелочного устройства скреплены между собой при помощи резьбового соединения. Вертикальное исполнение лабораторного образца горелочного устройства позволяет установить корпус (камеру газогенерации) и выходное сопло без креплений, в соответствующие пазы стыкуемых элементов. Это обеспечивает простоту сборки и удобство при наладке подачи пара и топлива.

Эскизная конструкторская документация на лабораторный образец горелочного устройства приведена в Приложении В.

Отверстие в паровой форсунке выполнено с соблюдением требования прямого угла кромки отверстия, торцевая поверхность форсунки удовлетворяет требованиям по перпендикулярности 0,01 и чистоты обработки 0,32. Диаметр (0,6 мм) и длина парового сопла (6 мм) являются определяющими параметрами для устойчивой работы устройства и сохранения теплового баланса, в том числе – обеспечения нужного угла раскрытия струи и необходимой скорости несущей фазы для эффективного диспергирования жидкости. Топливоподающая трубка установлена под острым углом к горизонту, конец трубки расположен в непосредственной близости у основания паровой струи и имеет скос (Рисунок 4.2). Конструкция горелочного устройства обеспечивает устойчивую подачу топлива и дальнейшее формирование однородного газокапельного потока. Конструкцией предусмотрен естественный приток воздуха из атмосферы в зону реакции – через отверстия в нижней части корпуса. Атмосферный воздух необходим для

воспламенения жидкого топлива. Топливо подается в горелочное устройство через топливопровод. Соединенная с внешним парогенератором паровая форсунка установлена соосно у основания камеры газогенерации и ориентирована вертикально вверх.

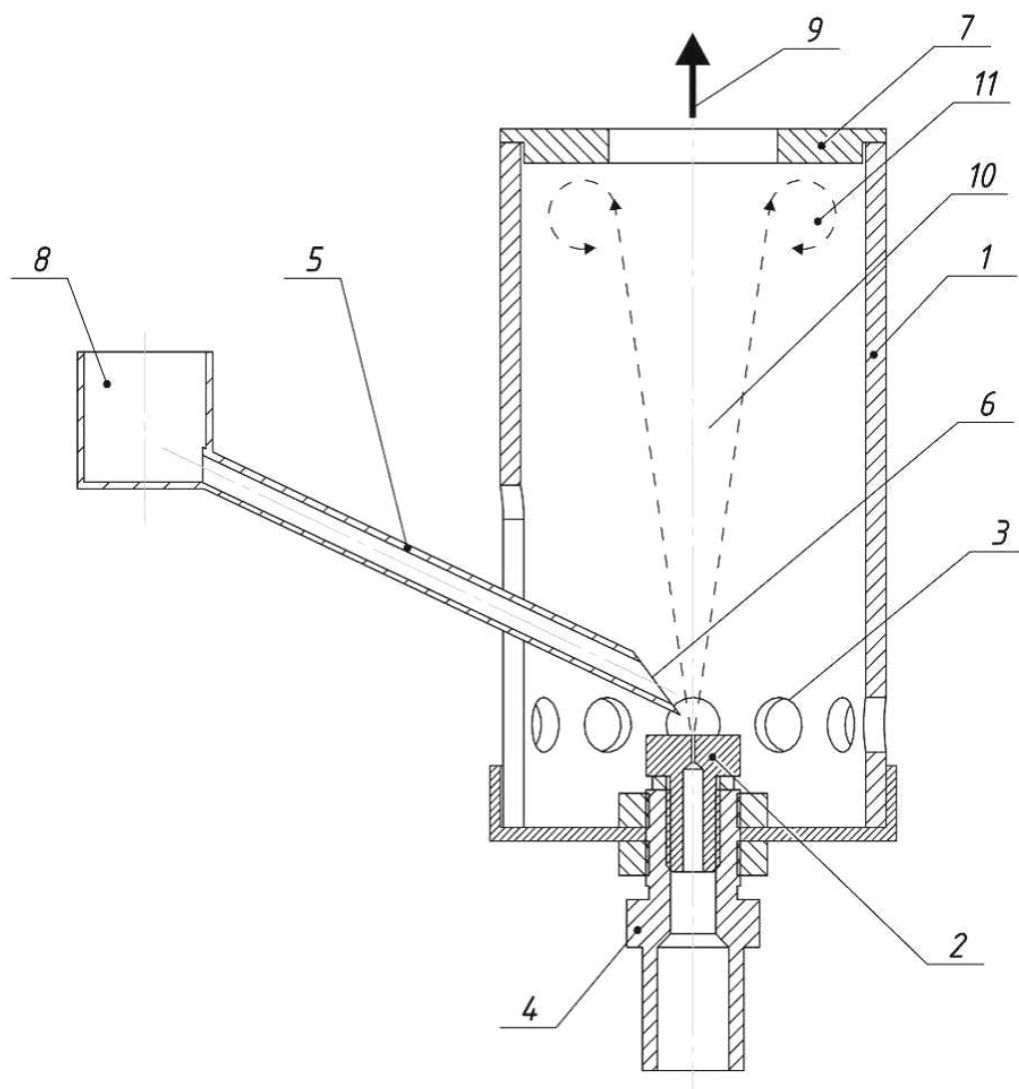


Рисунок 4.2 – Схема горелочного устройства: цилиндрический корпус – 1, паровая форсунка – 2, воздухоподводящие отверстия – 3, паропровод – 4, топливоподающая трубка – 5, скос – 6, сопло – 7, топливopриемник – 8, факел – 9, паромасляная струя – 10, зона рециркуляции – 11

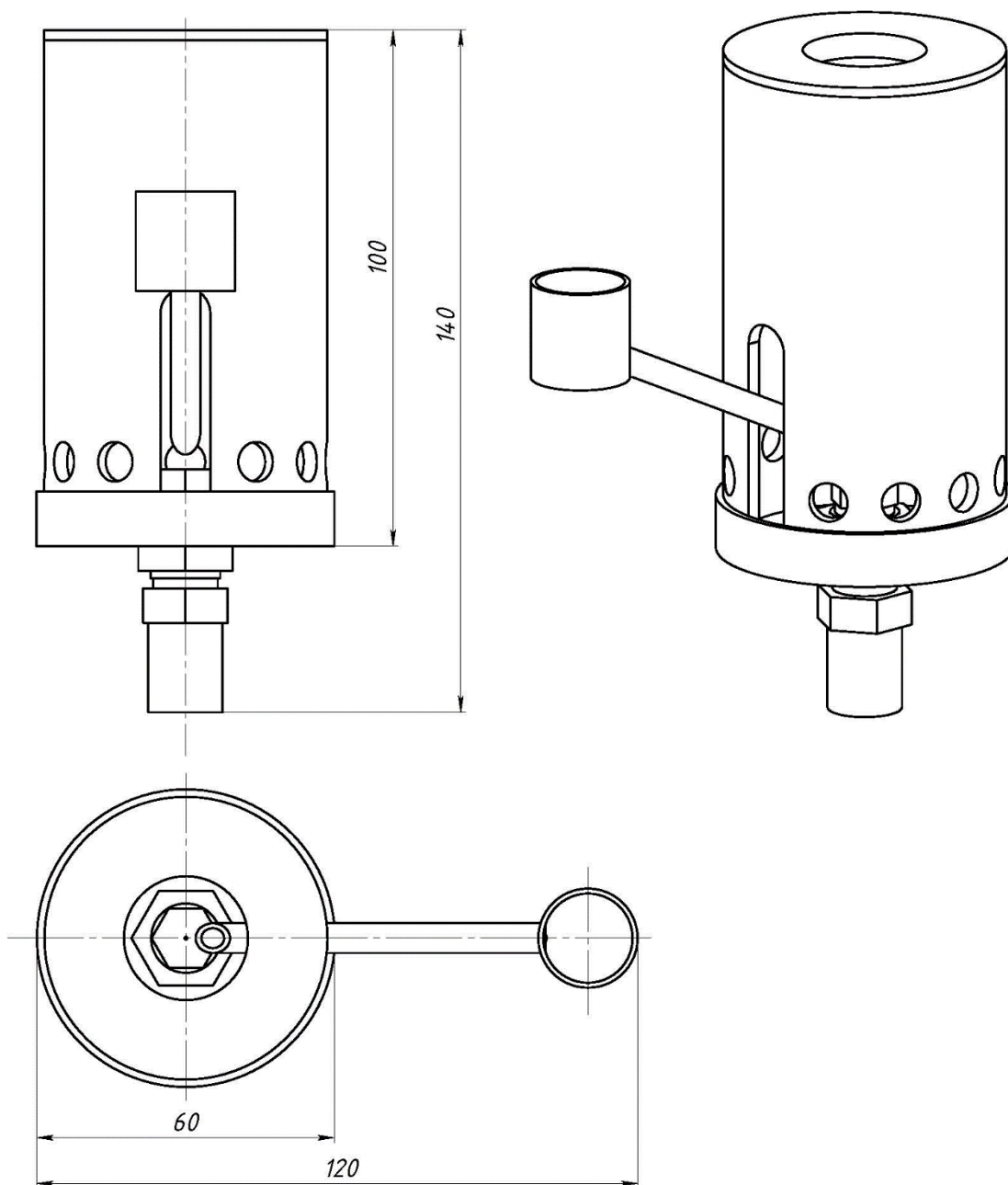


Рисунок 4.3 – Чертеж общего вида на горелочное устройство

Схема экспериментальной установки показана на рисунке 4.4. Она состоит из системы подачи воды, электрического парогенератора, системы подачи и подогрева топлива, горелочного устройства, калориметра и газоаналитического оборудования. Стабильный массовый расход топлива (до 2 кг/ч) задается топливной форсункой и насосом, масса контролируется при помощи электронных весов Acom PC-100W-10H (предел допускаемой погрешности 1 г). Для высоковязкого топлива используется система

подогрева (до 110 °С) и грубой очистки. Электрический парогенератор (средняя потребляемая мощность 1,5 кВт) позволяет на выходе получать перегретый водяной пар с параметрами [177]: температура до 550 °С, давление до 2 МПа, массовый расход до 1,4 кг/ч. Парогенератор состоит из трех последовательно соединенных между собой металлических труб (внешний диаметр 0,04 м) длиной 0,5 м каждая, внутри которых установлены трубчатые U-образные ТЭНы. В стенке каждой трубы по всей длине, выполнены по спирали закрытые паровые каналы прямоугольного поперечного сечения (4×2 мм) общей длиной 18 м. Температура пара измеряется на стенках парогенератора при помощи хромель-алюмелевых термопар типа К. Давление контролируется с использованием цифрового датчика давления ОВЕН ПД-100 (погрешность 1 кПа). Стабильная подача воды в парогенератор обеспечивается плунжерным дозировочным насосом НД 0,5Р 1,6/100 К14А (класс точности – 0.5), расход до 1,6 л/ч. Масса воды контролируется при помощи электронных весов Асом РС-100W-5 (предел допускаемой погрешности 0,5 г).

Экспериментальный стенд для исследования сажепарового режима горения жидких углеводородов, на котором адаптирован разработанный лабораторный образец горелочного устройства, входит в состав принадлежащей ИТ СО РАН Уникальной научной установки УСУ «Крупномасштабный термогидродинамический стенд для исследования тепловых и газодинамических характеристик энергоустановок» (ТГД комплекс ИТ СО РАН) <http://ckp-rf.ru/usu/73570/>.

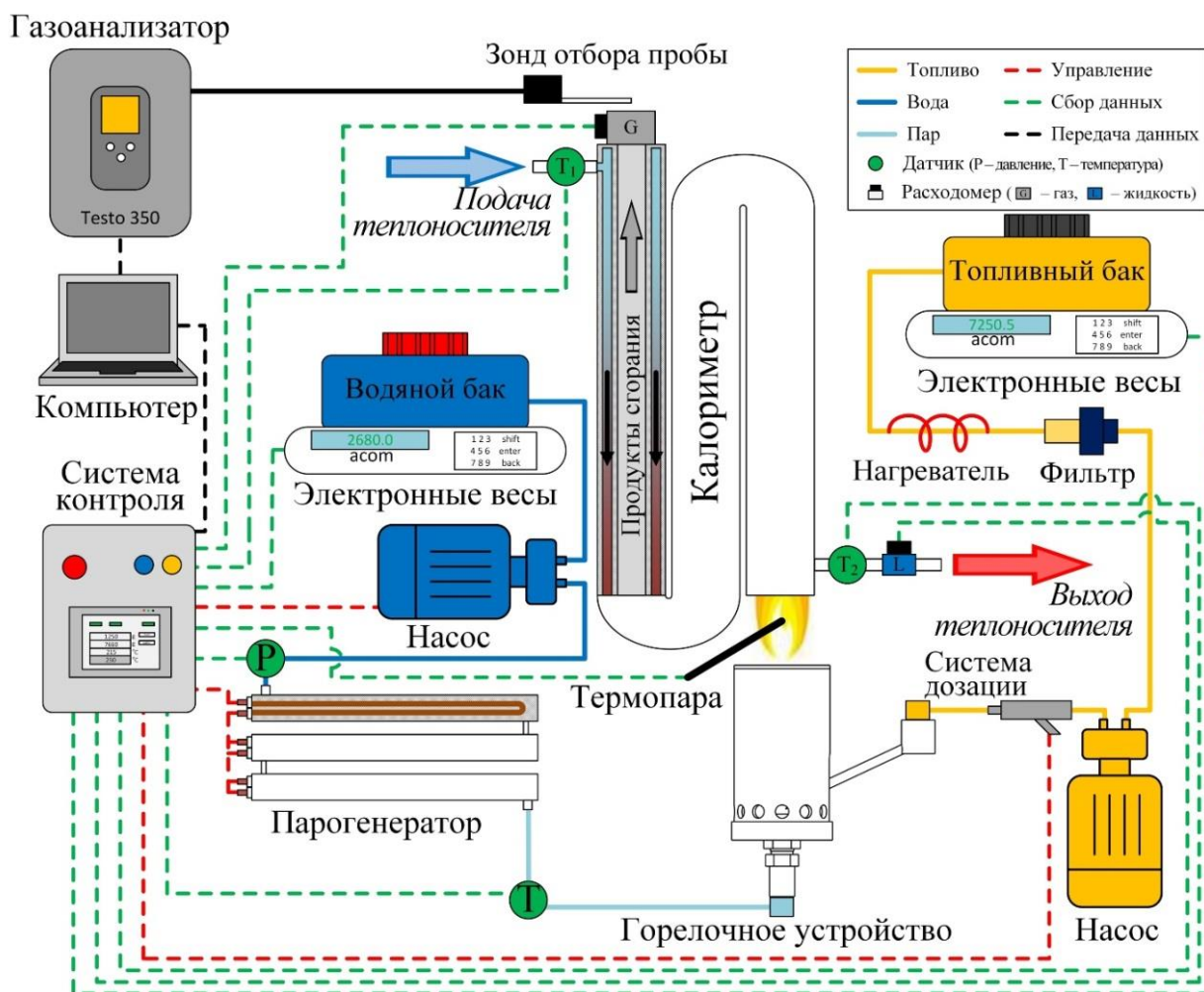


Рисунок 4.4 – Схема экспериментального стенда для исследования сажепарового режима горения жидких углеводородов

В горелочном устройстве реализована следующая схема диспергирования и сжигания жидкого топлива (Рисунок 4.5). Насос подает воду с заданным расходом в предварительно нагретый парогенератор (Рисунок 4.4), из которого пар поступает в горелочное устройство и нагревает его элементы. Автоматическое управление мощностью парогенератора обеспечивает достижение заданной температуры перегретого пара. Высокоскоростная струя перегретого водяного пара истекает из паровой форсунки в камеру газогенерации. Через топливоподающую трубку в основание паровой струи, согласно [123], [124], натекает жидкое топливо с заданным расходом, в результате чего формируется однородный мелкодисперсный газок капельный поток. Помимо распыления топлива, перегретый водяной пар повышает температуру топливных капель, что интенсифицирует массообмен и смесеобразование, способствуя устойчивому воспламенению. Поджигание диспергированного топлива в начале процесса

осуществляется внешней газовой горелкой через воздухоподводящие отверстия в нижней части корпуса. В результате натекания струи на внутреннюю плоскость сопла в периферийной зоне формируется область рециркуляции (Рисунок 4.5-а), в которой инициируется воспламенение при пуске и стабилизируется воспламенение паромасляной струи при работе устройства Рисунок 4.5-б). Вместе с тем, в зоне горения происходит паровая газификация продуктов термического разложения топлива [10]:



что также повышает показатели сжигания жидких углеводородов. Образующаяся горючая смесь CO и H₂ догорает в факеле, смешиваясь с кислородом из внешней атмосферы.

Предложенная конструкция горелочного устройства обеспечивает возможность сжигания загрязненных, в том числе, механическими примесями и водой, некондиционных жидких углеводородов, таких как, отработанное масло, отходы нефтедобычи и нефтепереработки, с высокой энергоэффективностью.

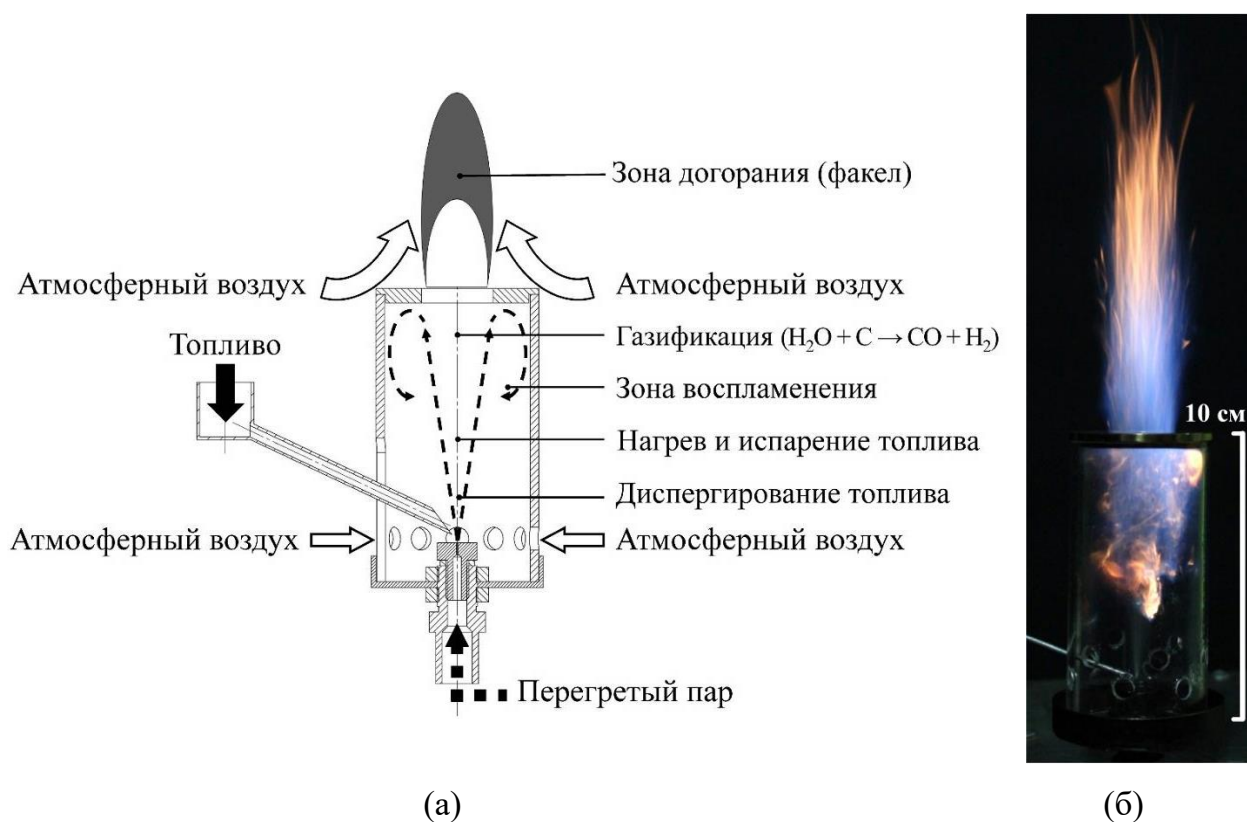


Рисунок 4.5 – Схема процесса горения в горелочном устройстве (а); визуализация процесса горения в горелке со стеклянным корпусом (б)

4.2 МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

Создание новых энергоресурсоэффективных экологически безопасных технологий сжигания жидкого топлива основывается на результатах научных исследований ряда сложных взаимосвязанных процессов, таких как межфазный тепло- и массообмен, диспергирование топлива и формирование пространственно неоднородного дисперсного потока, термическое разложение, смесеобразование, воспламенение, образование сажистых частиц, газификация, определяющих скорость и полноту выгорания топлива, тепловыделение, состав продуктов сгорания (в том числе – эмиссию токсичных компонентов). Каждый из этих процессов в отдельности является предметом многочисленных исследований и научных публикаций. Для анализа эффективности исследуемого способа диспергирования и сжигания жидкого топлива в данной работе проведены измерения основных показателей процесса сжигания: тепловыделение и состав продуктов сгорания, температура факела.

4.2.1 КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Тепловыделение (q) при сжигании жидкого топлива с распылением струей перегретого водяного пара определялось по измерениям на проточном калориметре (Рисунок 4.6), состоящем из пяти последовательно соединенных секций (общая длина 12 м). Каждая секция состоит из двух коаксиальных стальных труб (толщина стенок 4 мм). Внутренний канал (с диаметром 68 мм) предназначен для потока воздуха и продуктов сгорания, а кольцевой канал (с шириной 10 мм) – для подачи теплоносителя (воды). Потoki воды и продуктов сгорания имеют противоположные направления. В верхних коленах предусмотрены автоматические клапаны для удаления воздушных пробок из кольцевого канала, а также патрубки к внутреннему каналу для установки датчиков измерительных приборов. В нижних коленах установлены краны для слива теплоносителя и для удаления конденсата, образующегося во внутреннем канале при охлаждении продуктов сгорания. Внешняя поверхность секций калориметра теплоизолирована.

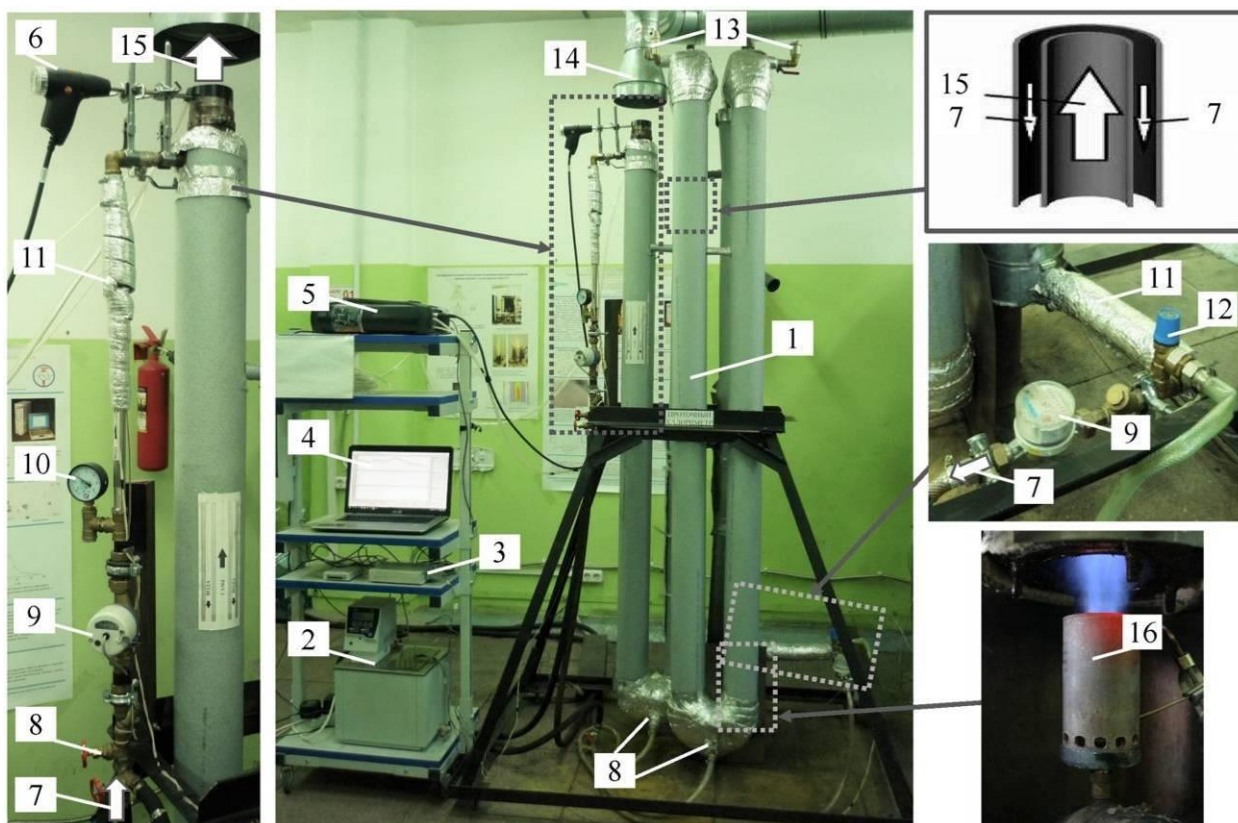


Рисунок 4.6 – Проточный калориметр с установленным газоанализатором TESTO 350:

1 – проточный калориметр, 2 – термостат, 3 – АЦП, 4 – ноутбук, 5 – блок газоанализатора, 6 – зонд газоанализатора, 7 – направление движения теплоносителя, 8 – запорный кран, 9 – расходомер, 10 – датчик давления, 11 – термопара хромель-алюмелевая, 12 – предохранительный клапан, 13 – воздухоотводчик автоматический, 14 – вентиляция, 15 – направление потоков

Полезная тепловая мощность W определялась в установившемся режиме работы устройства как разность между тепловой энергией, полученной рабочим телом от продуктов реакции, и энергией, затрачиваемой на поддержание процесса (в единицу времени). Потери энергии в окружающую среду, очевидно, снижают полезную мощность горелочного устройства. Факел горелочного устройства вводился во внутренний канал (\varnothing 100 мм) калориметра после установления постоянной разности температуры воды на входе и на выходе. Температура теплоносителя (воды) измерялась на входе и на выходе калориметра при установившемся стационарном тепловом режиме с помощью хромель-алюмелевых термопар. Характерное время тепловой релаксации калориметра составляло 6,25 мин. Объемный расход воды регулировался краном и

регистрировался с использованием расходомера (пределы относительной погрешности 2 %). В экспериментах объемный расход теплоносителя составлял около 370 л/ч, это обеспечивало разность температуры воды на входе и выходе не более 50°C. Объемный расход и температура газов, выходящих из калориметра, определялись с помощью термоанемометра Testo 4251, (погрешность измерения скорости $\pm(0,03 \text{ м/с} + 5\%$ от измеренного значения), температуры $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$) и электронного термометра (погрешность 0,05 °C). Температура газового потока на выходе из калориметра близка к температуре окружающей среды.

Количество тепла Q (Дж), полученного от продуктов сгорания в калориметре за время проведения опыта, определялось как разность тепловой энергии воды на выходе (Q_2) и на входе (Q_1) калориметра (за нулевой уровень принята тепловая энергия при $T = T_a$):

$$Q = \sum_1^N (Q_2)_n - \sum_1^N (Q_1)_n, \quad (4.2)$$

где $Q_i = \tau G_i \rho_i (C_i T_i - C_a T_a)$, индекс $i = 1, 2$ указывает параметры на входе и на выходе калориметра, соответственно; индекс a указывает на параметры при температуре окружающей среды $T_a = 22,7 \text{ }^\circ\text{C}$; $G, \rho(T), C(T)$ – объемный расход ($\text{м}^3/\text{с}$), плотность ($\text{кг}/\text{м}^3$) и удельная теплоемкость воды ($\text{Дж}/(\text{кг } ^\circ\text{C})$); T – температура ($^\circ\text{C}$); индекс n означает порядковый номер измерения температуры и расхода теплоносителя; N – количество измерений; τ – интервал времени между последовательными измерениями, $\tau = 0,2 \text{ с}$; время определения Q составляет $\tau N = 1500 \text{ с}$.

При расчете полезной мощности из Q вычиталась энергия пара Q_0 , полученная в парогенераторе и выделяемая затем при охлаждении и конденсации в калориметре:

$$Q_0 = \tau N F_v (C_b T_b - C_a T_a + \lambda + C_s T_s - C_v T_b), \quad (4.3)$$

где индекс b указывает параметры при температуре кипения воды в парогенераторе, индекс s – параметры перегретого пара при давлении p (Па), индекс v – параметры насыщенного пара; F_v – массовый расход пара ($\text{кг}/\text{с}$); $\lambda(T_b)$ – удельная теплота

парообразования (Дж/кг). Отношение Q_0 / Q при различных режимах составляло от 3,5 до 6,7 %.

Поскольку $T_a > T_1 = 14$ °С, то теплоноситель в калориметре получает от окружающей среды дополнительное тепло Q_+ , не связанное с тепловыделением реакции:

$$Q_+ = G_2 C_2 T_2 - G_1 C_1 T_1, \quad (4.4)$$

Эту величину, как и Q_0 , следует отнять из значения Q , полученного по формуле (4.2). В отсутствие факела разность температур $T_2 - T_1 \approx 0,2$ °С, что позволяет оценить $Q_+ / Q \approx 0,005$.

Основные потери тепла в описанной методике измерений связаны с теплоотводом в окружающую среду от поверхности горелочного устройства и парогенератора, а также с теплом выходящих из калориметра газов.

Потери тепла излучением с поверхности горелочного устройства определялись по закону Стефана-Больцмана:

$$Q_r = S \varepsilon \sigma T^4 \tau N, \quad (4.5)$$

где S – площадь поверхности горелки; ε – коэффициент излучения поверхности ($\varepsilon=0,2$); σ – постоянная Стефана–Больцмана; T – температура поверхности горелки, измеренная тепловизором Fluke Ti32.

Поскольку температура уходящих из калориметра газов T_g превышает комнатную (в среднем на 6 градусов), то теряется часть тепла. Измеренный в экспериментах состав уходящих газов не полный, поэтому теплотери оценивались на основе данных по кислороду и углекислому газу:

$$Q_g = (C_{O_2} G_{O_2} + C_{CO_2} G_{CO_2}) (T_g - T_a) \tau N, \quad (4.6)$$

где C_{O_2} , C_{CO_2} – удельная теплоемкость кислорода и углекислого газа, соответственно; G_{O_2} , G_{CO_2} – массовый расход кислорода и углекислого газа, соответственно, рассчитанные из уравнения состояния идеального газа. Оценка потерь Q_r и Q_g суммарно

составляет до 1,2 % от высшей теплоты сгорания топлива q_f .

Определялись полезная тепловая мощность (Вт):

$$W = \frac{Q - Q_0 - Q_+ + Q_r + Q_g}{\pi N} \quad (4.7)$$

и удельное количество тепла (Дж/кг), получаемого теплоносителем в калориметре при сгорании 1 кг топлива:

$$q = \frac{W}{F_f}, \quad (4.8)$$

где F_f – массовый расход топлива (кг/с). Используемая методика обеспечивает определение значений q и W с относительной погрешностью в пределах $\pm 2,5$ %, основной вклад в которую вносит дискретность импульсов прибора, регистрирующего расход теплоносителя в калориметре [99].

В ходе работы во внутренних каналах калориметра скапливается конденсат, объем которого контролируется. Его расход в пределах погрешности соответствует суммарно расходу воды и топлива.

4.2.2 ГАЗОВЫЙ АНАЛИЗ

Для контроля состава газообразных продуктов горения использовался газоанализатор TESTO 350²⁸, параметры которого приведены в Таблице 4.1. Прибор состоит из управляющего модуля и блок анализатора (Рисунок 4.7). Съёмный управляющий модуль с графическим дисплеем предназначен для управления блоком анализатора и отображения значений измерений. В блоке анализатора расположены сенсоры газа, насосы для продувки, блок пробоподготовки Пелатье, газовые тракты, фильтры, электронные схемы, отвечающие за анализ и хранение данных, а также блок питания и литиево-ионный аккумулятор. Считывание, обработка, архивирование и управление данными измерений осуществлялись с помощью программного обеспечения

²⁸ URL: <https://www.testo.ru/ru-RU/>

Testo EasyEmission.



Рисунок 4.7 – Газоанализатор TESTO 350: А – управляющий модуль;
В – блок анализатора; 1 – графический дисплей; 2 – система автоматического мониторинга конденсатосборника; 3 – корпус; 4 – индикатор статуса;
5 – пылевые фильтры; 6 – соединительные разъемы

Забор проб продуктов реакции производился на выходе калориметра, где температура газового потока примерно соответствует температуре наружного воздуха T_a . Измерения проведены при установившемся тепловом режиме в течение 10 минут с частотой 1 Гц для каждого режима; быстродействие прибора составляет 20–40 с.

Таблица 4.1. Характеристики газоанализатора TESTO 350

Компонент	Диапазон измерений	Погрешность
O ₂	0...25 об. %	±0,2 об. %
CO	0...500 ppm	±2 ppm (0...39,9 ppm CO), ±5% от показания (ост. диап.)
NO	0...300 ppm	±2 ppm (0...39,9 ppm), ±5% от показания (ост. диап.)
NO ₂	0...500 ppm	±5 ppm (0...99,9 ppm), ±5% от показания (ост. диап.)
SO ₂	0...5000 ppm	±5 ppm (0...99 ppm), ±5% от показания (100...1999 ppm), ±10% от показания (ост. диап.)
CO ₂	0...50 об. %	±0,3 об. % ±1% от показания (0...25 об. %), ±0,5 об. % ±1,5% от показания (ост. диап.)

4.2.3 ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ПЛАМЕНИ

Важной характеристикой процесса горения является распределение температуры в камере сгорания и во внешнем факеле. Информация о температуре пламени позволяет провести более глубоко интерпретацию результатов газового анализа и калориметрических измерений, сопоставить данные при одинаковых режимах. Измерение температуры в высокотемпературном факеле горелочного устройства при сжигании жидкого топлива с распылением струей перегретого водяного пара проводилось на основе инфракрасного (ИК) метода диагностики пламени. Данный метод является бесконтактным и обладает рядом преимуществ по сравнению с контактными методами: во-первых, не вносит возмущений в структуру пламени (характерных для термопар); во-вторых, дает возможность одновременной регистрации сразу всего поля температуры, что особенно важно при исследованиях нестационарных процессов; в-третьих, позволяет проводить измерения с высоким временным разрешением, что обеспечивает возможность регистрации пульсаций температуры в

турбулентном факеле.

Следует отметить, что ИК-камера регистрирует излучение от объекта. В зависимости от типа камеры полученные показания преобразовываются в значения температуры, при этом для преобразования сигнала используется либо известный коэффициент излучения, либо измеряется экспериментально [178]. Для получения значения этого параметра можно использовать различные процедуры, при этом само значение, в дальнейшем, обычно принимают за постоянное по всей поверхности пламени [179]. Одним из таких методов является измерение температуры в точке пламени любым контактным методом, например, при помощи термопары [178]. Измеряя температуру в этой же точке при помощи тепловизора, подбираются такие значения коэффициента излучения, чтобы значения температуры выдаваемые тепловизором совпадало с измерением термопары. Кроме того, для правильного расчета температуры необходимо учитывать следующие параметры: расстояние между камерой и измеряемым объектом, температуру окружающей среды, относительную влажность, так как все они связаны с передачей излучения через окружающую среду, которая разделяет излучающий объект и измерительное оборудование (ИК-камеру) [180], [181].

Для измерения температуры использовалась тепловизионная камера фирмы FLIR специальной серии JADE J530SB [182], [183]. Данный прибор имеет высокое временное разрешение: частота кадров до 177 Гц при максимальном разрешении 320x240 пикселей и до 18 кГц при разрешении 320x4 пикселей. Минимальное время экспозиции кадра 6 мкс. Рабочий диапазон тепловизора находится в среднем ИК-диапазоне 2,5-5,0 мкм. В этом же спектральном диапазоне находятся мощные линии излучения пламени, обусловленные излучением горячих продуктов горения (в том числе – паров воды, CO₂, CO). Для работы был выбран узкополосный дисперсионный оптический фильтр F0616 с полосой пропускания 2,5-2,7 мкм. Выбор фильтра обусловлен наличием мощных линий излучения продуктов горения в этом спектральном интервале [184]. Диапазон измерения температур тепловизора определяется калибровками и составляет 583-1773 К для выбранного фильтра. Для получения среднего значения температуры в данной работе измерения проводились с частотой 60 Гц в течение 20 с. Сбор данных и первичная обработка термограмм осуществлялись в специализированной программе Altair.

Следует отметить, что факел представляет собой полупрозрачную трехмерную оптическую среду, поэтому тепловизор регистрирует интегральное излучение от всех

внутренних слоев среды, по значению которого, с использованием калибровок и эффективного коэффициента излучения, определяется температура в плоскости наблюдений (в плоскости симметрии горелочного устройства.).

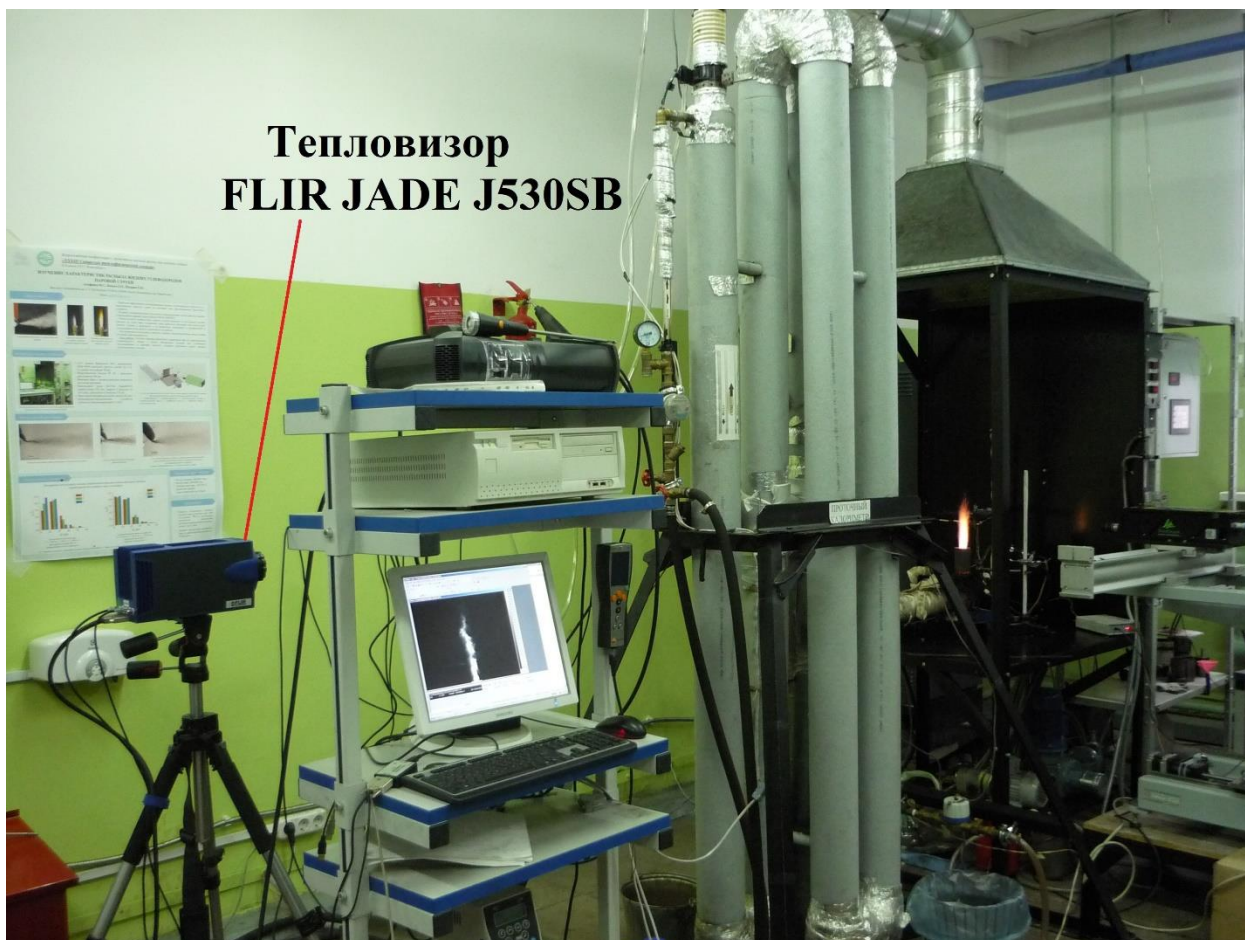


Рисунок 4.7 – Тепловизионная камера FLIR JADE J530SB на огневом стенде

Для определения эффективного коэффициента излучения, одновременно с измерениями тепловизором в контрольных точках (на оси горелочного устройства $r = 0$, на высоте $x = 100$ мм от среза горелки) регистрировалась температура с помощью платинородий-платинородиевой термопары типа В (Pt-30%, Rh / Pt-6%, Rh), диапазон измеряемых температур 600-1600 °С (кратковременно до 1800 °С), диаметр проволоки 300 мкм, длина термоэлектродов 70 см. Характерное время релаксации 5 с. Термоэлектроды защищены газонепроницаемым керамическим чехлом TRA-116316 (Al₂O₃ 99%, до 1900 °С) с диаметром 5 мм. Пределы допускаемых отклонений ТЭДС от номинальных статических характеристик преобразователя 0,5% от значения измеряемой

температуры. По полученным данным на средней по времени термограмме определялась среднее значение температуры в области расположения спая.

Для оценки достоверности полученных тепловизионных данных были проведены измерения средней температуры в высокотемпературном факеле горелочного устройства при помощи термопары, используемой для определения эффективного коэффициента излучения. Рабочий конец термопары помещался в различные точки внутри факела при помощи координатно-перемещающего устройства (время измерения в точке не менее 10 с, время задержки перед измерениями в точке 7 с). Известно, что при термопарных измерениях в пламени присутствуют потери излучением спая, которые учитывались согласно рекомендациям [185].

4.2.4 ИЗМЕРЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ В ФАКЕЛЕ

Внешний факел исследуемого горелочного устройства существенно нестационарный: наблюдаются пульсации скорости [98] и температуры [100]. Кроме того, при работе горелочного устройства наблюдается характерный шум, который может быть связан с режимами подачи пара и топлива. С целью исследования возникновения возможных автоколебаний факела в акустическом спектре в работе проведены измерения пульсаций давления. Для этого был использован анализатор шума Bruel&Kjaer (давление до 103,5 кПа, частота измерений 4 Гц – 20 кГц, чувствительность 54,9 мВ/Па) аналогично [186]. Датчик помещался в измерительный объем при помощи отборника – тонкостенной металлической трубки диаметром 2,2 мм и длиной 160 мм. Передаточная функция отборника представлена в работе [186], где показана его применимость.

4.3 УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты по измерению тепловыделения, состава продуктов сгорания и температуры пламени проводились при различных режимах работы горелочного устройства: при расходе пара F_v в диапазоне 0,2-1,4 кг/ч и расходе топлива F_f в диапазоне 0,4-2,2 кг/ч (отклонения при регулировке от заданных средних значений расходов – в пределах $\pm 5\%$ для пара и $\pm 2,5\%$ для топлива). Диапазон значений F_v соответствует рабочему диапазону дозирующего водяного насоса, а также производительности лабораторного парогенератора, необходимой для перегрева пара до заданной температуры. Значения расхода топлива F_f определены с учетом параметров горелочного устройства и мощности тепловыделения, приемлемой при проведении исследований в лабораторных условиях. Задаваемая температура пара варьировалась в диапазоне от незначительного перегрева (состояние, близкое к насыщенному пару) до уровня, характерного для промышленных условий: 150–550 °С с шагом около 100 °С. Максимальный перегрев пара достигал 400 градусов.

В качестве жидкого топлива в экспериментах использовалось 2 типа топлива: стандартное дизельное топливо (Таблица 4.2) и смесь отработанных моторных и трансмиссионных машинных масел (далее – масло), см. Таблица 4.3.

Таблица 4.2 – Свойства дизельного топлива

Свойства	Значения
Плотность при 20 °С (кг/м ³)	839,89
Вязкость (мм ² /с)	4,1
Низшая теплота сгорания (МДж/кг)	42,259
Высшая теплота сгорания q_f (МДж/кг)	44,947
Элементный массовый анализ	
С (%)	84,6
Н (%)	13,6
S (%)	0,436
N (%)	0,64
O (%)	0,7
H ₂ O (%)	-

Таблица 4.3 – Свойства отработанного машинного масла

Свойства	Значения
Плотность при 20 °С (кг/м ³)	863,25
Вязкость при 40 °С (мм ² /с)	69
Вязкость при 60 °С (мм ² /с)	41,8
Низшая теплота сгорания (МДж/кг)	42,556
Высшая теплота сгорания q_f (МДж/кг)	45,318
Элементный массовый анализ	
С (%)	85,6
Н (%)	13,2
S (%)	0,602
N (%)	0,2
O (%)	нет данных
H ₂ O (%)	0,06

Чтобы оценить эффективность использования перегретого водяного пара при сжигании жидких углеводородов были проведены эксперименты по измерению тепловыделения, состава продуктов сгорания и температуры пламени с распылением дизельного топлива струей сжатого воздуха при условиях, соответствующих режимам с подачей пара. А именно, температура воздуха задавалась постоянной $T_{air}=T_s=260\pm 10$ °С, расход воздуха $F_{air}=0,26\div 1,04$ кг/ч, расход топлива $F_f=0,4\div 2,2$ кг/ч. Для этого в зону горения через парогенератор и паровую форсунку подавался сжатый воздух. Регулировка расхода воздуха осуществлялась с использованием редуктора по показаниям цифрового датчика давления на входе в парогенератор. Объемный расход воздуха определялся по показаниям ротаметра Dwyer RMA-21-SSV (погрешность 4%), установленного между редуктором и парогенератором. Значения режимных параметров приведены в таблице 4.4. Значения, снятые со шкалы расходомера (столбец 2), корректировались для нестандартных условий. Видно, что объемный расход в исследуемом диапазоне давления и при заданной температуре ограничен пропускной

способностью форсунки (столбец 3). По уравнению состояния идеального газа определялся массовый расход воздуха (столбец 4).

При расчете полезной мощности из Q вычиталась энергия нагретого воздуха Q_a , полученная в парогенераторе:

$$Q_a = \tau N F_{air} (C_{air} T_{air} - C_{air_a} T_a), \quad (9)$$

где C_{air} , C_{air_a} – удельная теплоемкость нагретого воздуха и при комнатной температуре. Остальные потери тепла и дополнительно полученная энергия в формуле (4.7), определялись по аналогии с паром по формулам (4.4)–(4.6).

Таблица 4.4 – Значения параметров сжатого воздуха при $T_{air}=(260\pm 10)$ °С.

№.	p_{air} , кПа	V_{rot} , л/мин	V_{air} , л/мин	F_{air} , кг/ч
	1	2	3	4
1	200	2,6	1,85	0,26
2	300	3,2	1,86	0,40
3	400	3,2	1,86	0,53
4	500	3,2	1,86	0,66
5	600	3,7	1,86	0,79
6	700	3,7	1,86	0,91
7	800	3,7	1,86	1,04

4.4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

4.4.1 ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПАРА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СЖИГАНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА

В первую очередь, изучалось влияние температуры перегретого водяного пара на характеристики горения дизельного топлива при распылении струей перегретого водяного пара. На рисунке 4.8 показаны зависимости теплотехнических и экологических показателей горелки от температуры пара при характерном режиме горения (по расходу пара и топлива). В качестве экологических показателей используется масса CO и NO_x (суммарно NO и NO₂), содержащихся в продуктах сгорания, в расчете на 1 кВт ч выделяемой тепловой энергии, обозначаемая {CO} и {NO_x}, соответственно. Анализ результатов показывает, что температура перегретого водяного пара слабо влияет (в пределах погрешности измерений) на основные показатели сжигания топлива: удельное количество тепла, тепловую мощность, температуру факела, {NO_x}. Основная причина связана с тем, что при адиабатическом расширении паровой струи истекающей из форсунки ее температура в камере газогенерации сначала резко снижается и при прохождении расстояния от среза паровой форсунки до зоны воспламенения (~60 мм) достигает примерно одного значения для разной начальной температуры пара. Другим объяснением этого может быть то, что температура в камере газогенерации намного больше температуры пара. Поэтому за счет конвективного и лучистого теплопереноса температура паровой струи в зоне воспламенения зависит уже от граничных условий. Еще одной причиной того, что температура пара не влияет на характеристики процесса горения может быть то, что пар взаимодействует с жидким топливом комнатной температуры, за счет межфазного теплообмена температура пара понижается и не существенно зависит от ее начального значения.

В то же время, с увеличением температуры пара увеличивается давление в парогенераторе (при постоянном массовом расходе пара), что приводит к увеличению скорости паровой струи. В результате этого увлекается больше атмосферного воздуха, о чем свидетельствует повышение концентрации кислорода в продуктах сгорания (рисунок 4.8-г). При этом {NO_x} остается неизменным (около 60 мг/кВт ч), что может быть связано с размерами высокотемпературной области факела, соответственно,

временем необходимым для образования термических оксидов азота. Об этом свидетельствует профиль температуры факела, который имеет одинаковый вид при разной температуре пара. Концентрация $\{CO\}$ в продуктах сгорания снижается с увеличением температуры пара.

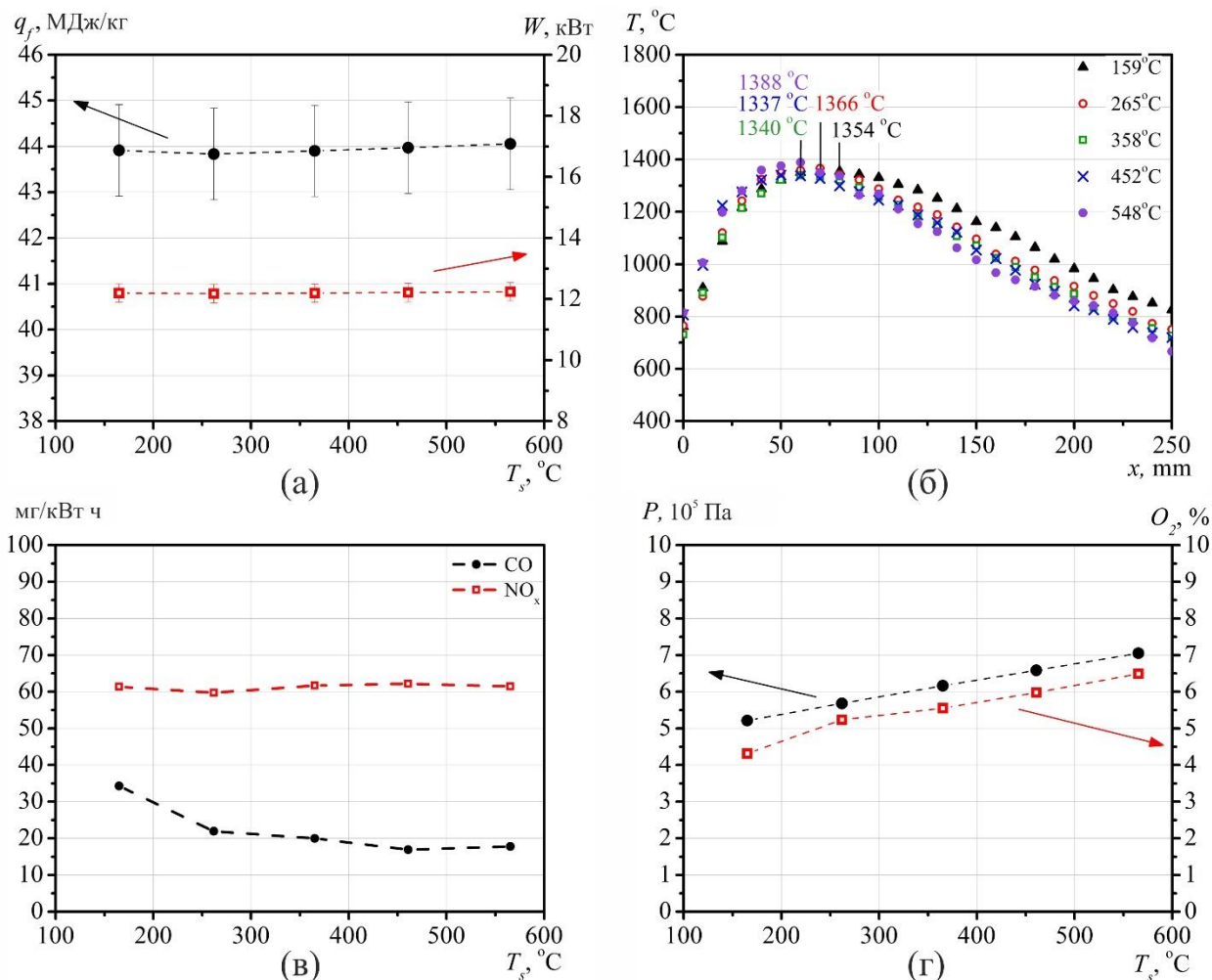


Рисунок 4.8 – Зависимость теплотехнических и экологических показателей горелки от температуры пара T_s ($F_v = 0,6$ кг/ч; $F_f = 1,0$ кг/ч): (а) удельное количество тепла, полученное от продуктов сгорания в калориметре q и тепловая мощность горелочного устройства W ; (б) средняя во времени температура T во внешнем факеле вдоль вертикальной оси горелки; (в) $\{CO\}$ и $\{NO_x\}$; (г) абсолютное давление пара в парогенераторе p и объемная концентрация O_2 в продуктах сгорания

Дальнейшие измерения проведены при постоянной температуре пара $T_s = (260 \pm 10)$ °C, обеспечивающей достаточный перегрев пара для протекания реакции и в то же время – минимальные затраты энергии на нагрев пара.

4.4.2 ВЛИЯНИЕ РАСХОДА ПАРА НА ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЕ И СОСТАВ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ПРИ ГОРЕНИИ ДИСПЕРГИРОВАННОГО ПАРОМ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА

На рисунке 4.9 показана карта режимов с характерными фотографиями внешнего факела. Границы области I построены по результатам визуальных наблюдений срыва пламени, который зависит от отношения окислитель/горючее. Факел в области устойчивого горения II имеет преимущественно синий и желто-синий цвет, что характерно для горения более легкого жидкого топлива, например, такого как керосин, а также газообразных углеводородов. Такое свечение обеспечивается при сгорании водяного газа ($\text{CO} + \text{H}_2$). Цвет факела зависит от расхода пара, причем наиболее выраженный синий оттенок имеет пламя при большем расходе пара (при постоянном расходе топлива). Границы области III построены на основе результатов газового анализа, в ней концентрации $[\text{CO}] > 500$ ppm. В области III внешний факел приобретает ярко-желтый цвет иногда с голубыми и фиолетовыми оттенками, в пламени присутствуют «языки» оранжевого цвета, что обусловлено свечением раскаленных частиц сажи и указывает на неполное сгорание топлива при большом расходе топлива (при условии постоянного расхода пара получается переобогащенная топливом смесь). Данная особенность связана с геометрическими характеристиками горелочного устройства (его габаритами, формой камеры сгорания и др.) и, следовательно, ограничениями максимальной мощности при лабораторных исследованиях.

Для дальнейших исследований была выбрана область II (Рисунок 4.9), при этом относительный массовый расход пара $\gamma = F_v/F_f$ изменялся от 0,2 до 1,0, а массовая доля пара в смеси с топливом $\omega_v = F_v/(F_f + F_v) \cdot 100\%$ варьировалась от 17 до 48% (Рисунок 4.10).

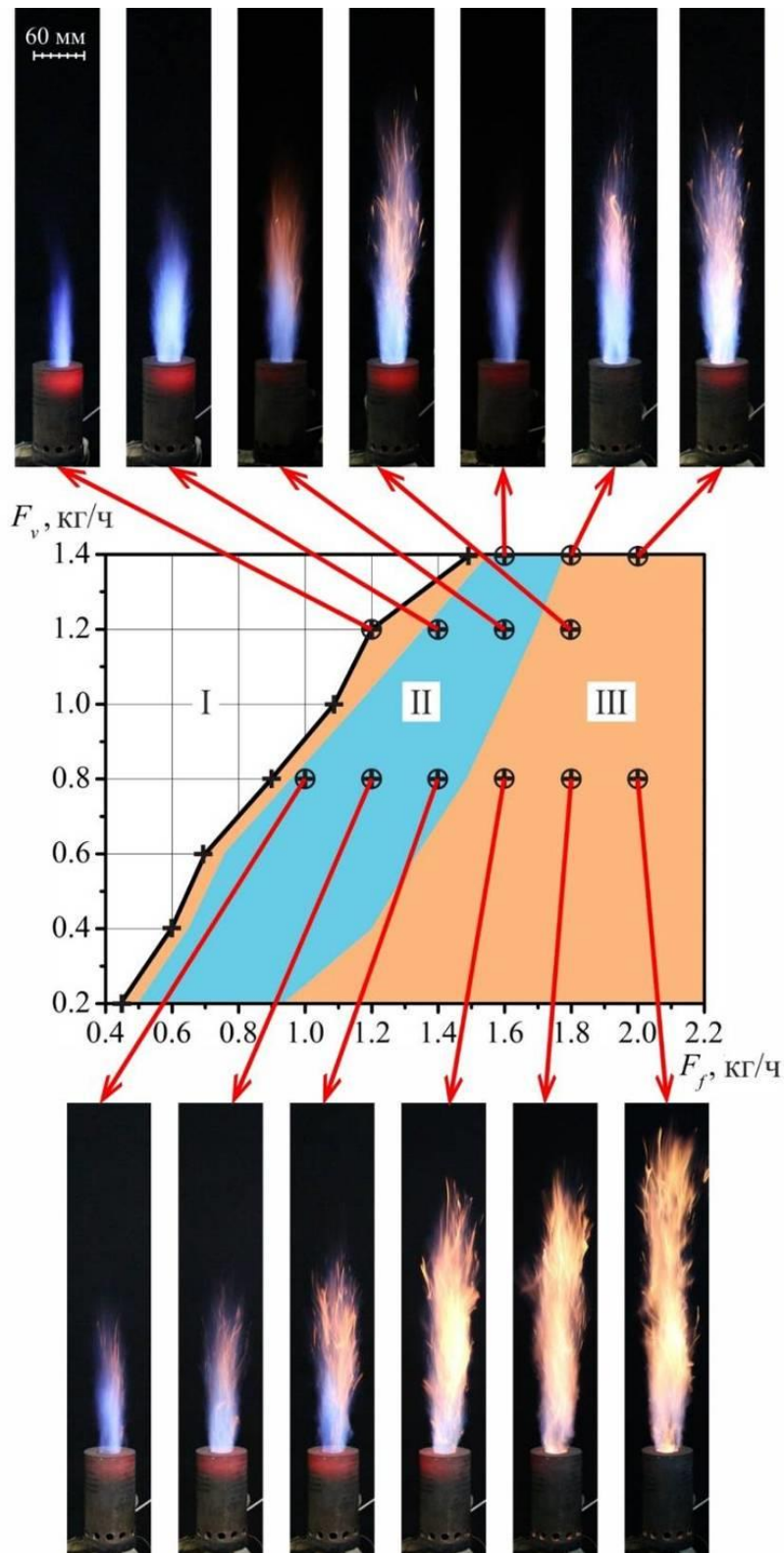


Рисунок 4.9– Карта режимов горения при сжигании дизельного топлива в струе перегретого водяного пара и характерный вид внешнего факела при $T_s = (260 \pm 10)^\circ\text{C}$:
 I – срыв пламени (символами «+» обозначены режимы, при которых зафиксирован срыв пламени); II – область устойчивого горения (измерительная область);
 III – пламя с высоким содержанием CO в продуктах сгорания ($[\text{CO}] > 500 \text{ ppm}$)

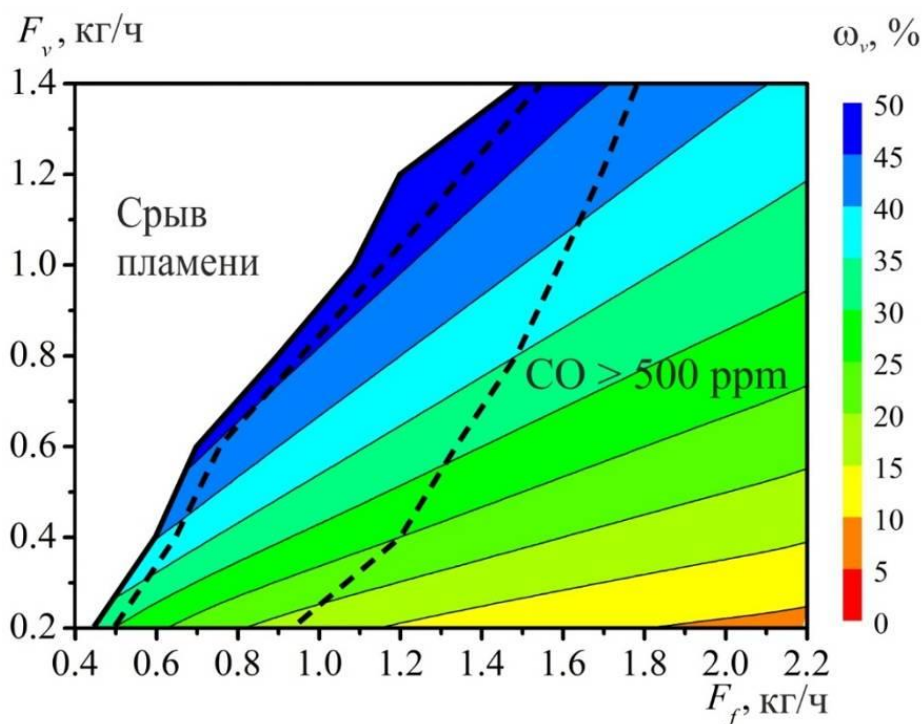


Рисунок 4.10 – Массовая доля пара в смеси с топливом

Получены данные о тепловыделении, составе охлажденных продуктов сгорания и температуре внешнего факела при сжигании дизельного топлива с распылением струей перегретого водяного пара в прямоточном горелочном устройстве. Измерения проведены при различном расходе пара и топлива и постоянной температуре пара $T_s=(260\pm 10)$ °С. Режимные параметры пара приведены в Таблице 3.3. Давление пара в зависимости от значений F_v и T_s составляло от 0,25 до 1,20 МПа, перегрев пара $T_s - T_b$ достигал 135 °С.

Длина факела (характерный продольный размер светящейся зоны) в каждом режиме измерялась визуально по серии фотографий в последовательные моменты времени. Средняя по времени длина факела изменяется от 0,1 до 0,5 м при увеличении F_f от 0,4 до 2,2 кг/ч (Рисунок 4.11-а). С ростом расхода пара (при постоянном расходе топлива) размер факела уменьшается. С увеличением расхода топлива (при постоянном расходе пара), наоборот, размер факела увеличивается. При равном относительном расходе пара γ в разных режимах размеры (и внешний вид) факела одинаковые.

На рисунке 4.11-б приведены значения удельного количества тепла, полученного от продуктов сгорания в калориметре с учетом описанных выше в измерительной методике тепловых потерь. Максимальное значение $q=44,3$ МДж/кг достигается при $F_f=1,4$ кг/ч и $F_v=0,8$ кг/ч ($\gamma=0,57$, $\omega_v=36\%$), мощность $W=17,2$ кВт; при этом количество CO и NO_x в

расчете на 1 кВт ч выделяемой тепловой энергии составляет $\{CO\}=37$ мг/кВтч, $\{NO_x\}=60$ мг/кВтч.

Получена карта концентраций CO и $\{CO\}$ во всем исследуемом диапазоне расхода пара и топлива (Рисунок 4.11-в,д). Выявлена область с предельно низким содержанием оксида углерода в продуктах сгорания $[CO]<50$ ppm (Рисунок 4.11-в), в которой факел имеет преимущественно синий цвет (см. Рисунок 4.9). Наклон изолиний $\{CO\}$ совпадает с наклоном линии срыва факела на F_v-F_f диаграмме, а также с наклоном изолиний высоты факела (Рисунок 4.11-а). Причем зависимость $\{CO\}$ от расхода пара и расхода топлива немонотонная. В области близкой к срыву горения наблюдается нестабильность воспламенения топлива (левая граница), что сопровождается увеличением $\{CO\}$ в продуктах сгорания. Повышение $\{CO\}$ на правой границе связано с ограничениями размеров горелочного устройства, и соответственно, ее мощности, что приводит к недожогу топлива. Это вызвано тем, что атмосферного воздуха, который поступает в горелочное устройство за счет эжекции паровой струи через воздухоподводящие отверстия естественным способом (Рисунок 4.5-а), не достаточно для полного окисления заданного количества топлива. Это – особенность атмосферной горелки, в отличие от горелок с наддувом воздуха. Минимальные значения $\{CO\}$ наблюдаются вдоль правой границы области II и достигают $\{CO\} = 5$ мг/кВт ч.

Карты концентраций $[NO_x]$ и $\{NO_x\}$ (суммарно NO и NO₂) показаны на рисунке 4.11-г,е. Наклон изолиний для NO_x совпадает с данными для CO. Для всех исследованных режимов в области II (Рисунок 4.9) $[NO_x]$ не превышает 80 ppm (Рисунок 4.11-г), что соответствует уровню $\{NO_x\}=90$ мг/кВт ч (Рисунок 4.11-е). Минимальные значения $\{NO_x\}$ наблюдаются у левой границы области II, вблизи срыва пламени, и составляют около 40 мг/кВт ч (Рисунок 4.11-е). Область минимальных значений $\{NO_x\}$ соответствует области максимальной массовой доли пара в соотношении с топливом ω_v , близкой к 50 % (Рисунок 4.10). Вдоль линии минимальных значений $\{CO\}$ (у правой границы) (Рисунок 4.11-в), уровень $\{NO_x\}$ является максимальным, но не превышает 90 мг/кВт ч (Рисунок 4.11-г).

На рисунке 4.12 показаны зависимости q , W , $\{CO\}$, $\{NO_x\}$ и температуры внешнего факела T от расхода пара и топлива при характерных режимах в области II (Рисунок 4.9). Небольшой рост q (Рисунок 4.12-а) наблюдается с ростом расхода топлива в диапазоне от 1,0 до 1,4 кг/ч (при этом массовая доля пара ω_v понижается с 44 до 36%), в этом же

диапазоне F_f наблюдается значительное снижение уровня $\{CO\}$ (Рисунок 4.12-в), а измеренная тепловая мощность горелки увеличивается линейно (Рисунок 4.12-а). Дальнейшее увеличение расхода топлива $F_f > 1,4$ кг/ч приводит к резкому росту $\{CO\} > 110$ мг/кВт ч (Рисунок 4.12-в) и снижению q на 12%, при этом увеличение тепловой мощности горелки прекращается (Рисунок 4.12-а). Это вызвано недожогом топлива и зависит, как отмечалось выше, от конструктивных особенностей горелочного устройства, связанных с недостатком окислителя (кислород воздуха), поступающего из атмосферы, при высоких расходах топлива (для постоянного расхода пара). Значение $\{NO_x\}$ увеличивается с ростом расхода топлива (при постоянном расходе пара), рисунок 4.12-в. Это связано с тем, что за счет увеличения мощности горелки увеличивается размер факела (Рисунок 4.11-а) и, соответственно, увеличиваются размеры высокотемпературной области внутри факела (профиль температуры становится шире, см. рисунок 4.12-д), способствующей производству термических оксидов азота. Максимальная температура в этих режимах достигает 1355 °С (Рисунок 4.12-д).

С увеличением расхода пара (при постоянном расходе топлива) в области низких значений $\{CO\}$ удельное количество тепла изменяется в пределах погрешности измерений и близко к максимальному измеренному значению (Рисунок 4.12-б). В то же время, увеличение массовой доли пара ω_v на 10% (при постоянном расходе топлива) в рассматриваемом диапазоне расхода пара (0,8÷1,2 кг/ч) приводит к значительному снижению $\{NO_x\}$ (до 40 мг/кВт ч) и еще более значительному снижению $\{CO\}$ (до 8 мг/кВт ч) (Рисунок 4.12-г). Основная причина подавления производства NO_x может быть связана со снижением температуры пламени (Рисунок 4.12-е) благодаря увеличению теплоемкости горючей смеси при наличии водяного пара [10]. Максимальная температура в факеле при этом понижается на 180 градусов (рисунок 4.12-е). А снижение содержания CO в этом диапазоне режимных параметров можно объяснить тем, что при увеличении расхода пара увеличивается давление в парогенераторе и, соответственно, повышается скорость паровой струи. В результате этого увеличивается сила реакции струи, что обеспечивает приток большего количества атмосферного воздуха (окислителя) (см. Раздел 3), т.е. увеличивается коэффициент избытка воздуха.

На рисунке 4.13-а показаны зависимости $\{CO\}$, $\{NO_x\}$ и распределения температуры внешнего факела T от расхода пара при постоянном относительном расходе

пара $\gamma = 0,7$ ($\omega_v = 41\%$). Зависимость $\{CO\}$ от расхода пара оказывается немонотонной. Зависимость $\{NO_x\}$ от расхода пара является более плавной, поскольку линия $\gamma = 0,7$ почти параллельна изолинии $\{NO_x\}$. При этом в случае постоянного относительного расхода пара $\gamma = 0,7$ с изменением расхода пара изменяются и размеры факела (Рисунок 4.11-а), и профиль температуры, максимальная температура факела (Рисунок 4.13-б).

Чтобы найти оптимальные режимные параметры (расход пара и топлива), обеспечивающие эффективное сжигание топлива для разной мощности горелки, построим аппроксимирующую зависимость для минимальных значений $\{CO\}$ на F_v-F_f диаграмме (Рисунок 4.14-а), которая принимает следующий вид линейной функции:

$$F_v = 1.5F_f - 1.1. \quad (10)$$

Наклон этой линии совпадает с изолиниями $\{CO\}$, $\{NO_x\}$, высоты факела (в т.ч. линии срыва пламени). Установлено, что вдоль этой линии профиль температуры внешнего факела имеет одинаковый вид для разных режимов (Рисунок 4.14-б).

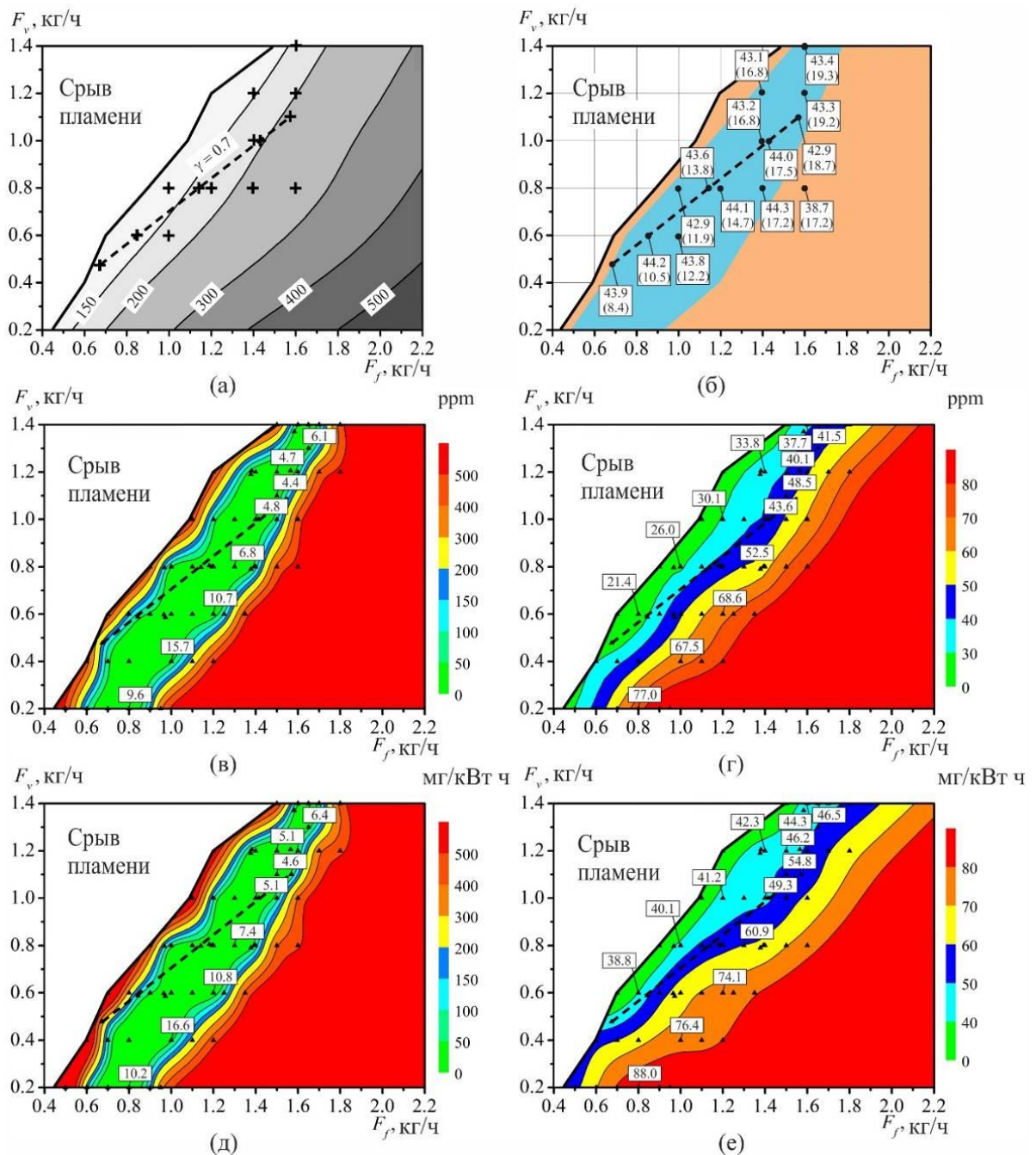


Рисунок 4.11 – Распределения основных характеристик режимов сжигания дизельного топлива на F_v - F_f диаграмме ($T_s = (260 \pm 10)^\circ\text{C}$): (а) высота внешнего факела горелки (мм), символами «+» обозначены исследуемые режимы при calorиметрических и термопарных измерениях; (б) удельное количество тепла, полученное от продуктов сгорания в calorиметре q (МДж/кг) – верхнее значение, и тепловая мощность горелочного устройства W (кВт) – нижнее значение; (в) концентрация CO в продуктах сгорания (ppm); (г) концентрация NO_x в продуктах сгорания (ppm); (д) {CO} (мг/кВт ч); (е) { NO_x } (мг/кВт ч). Символами ▲ обозначены исследуемые режимы, изолинии – сплайн-интерполяция экспериментальных данных

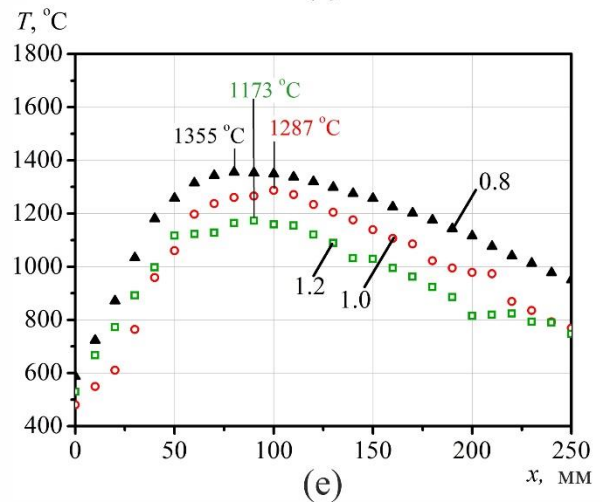
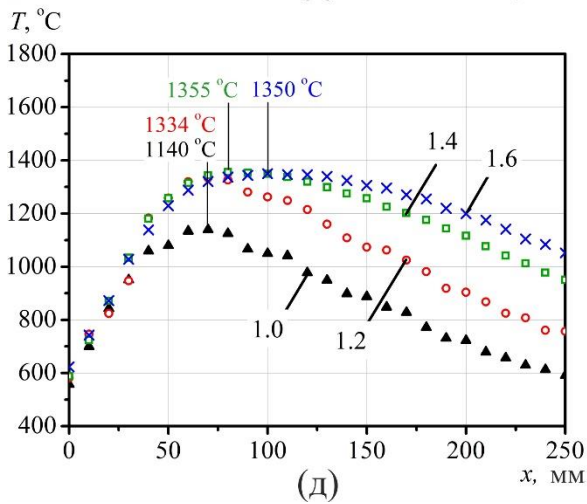
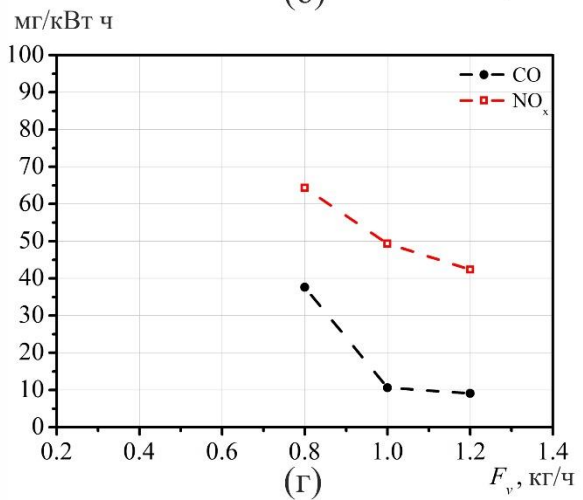
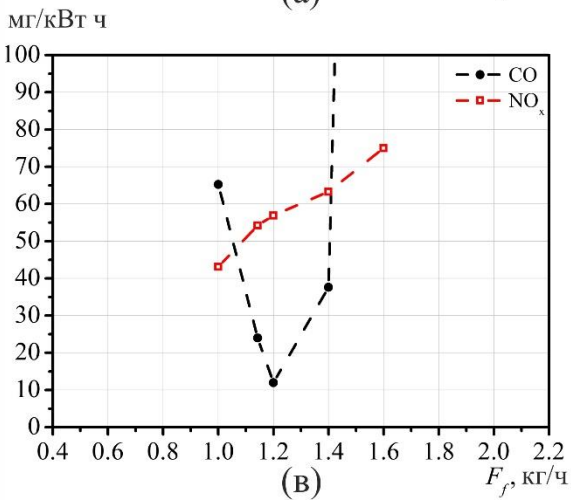
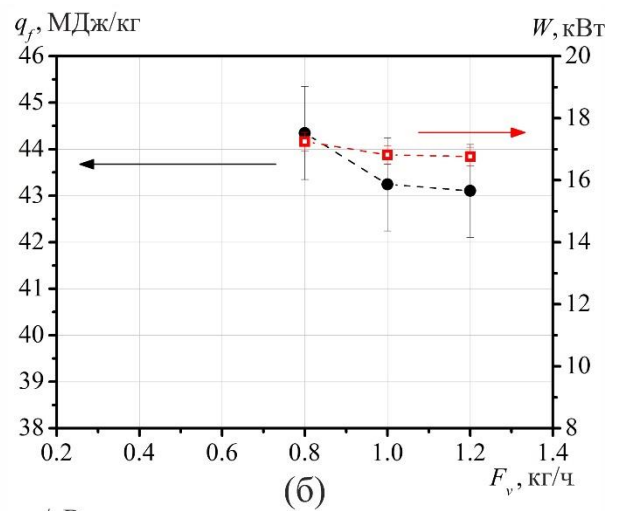
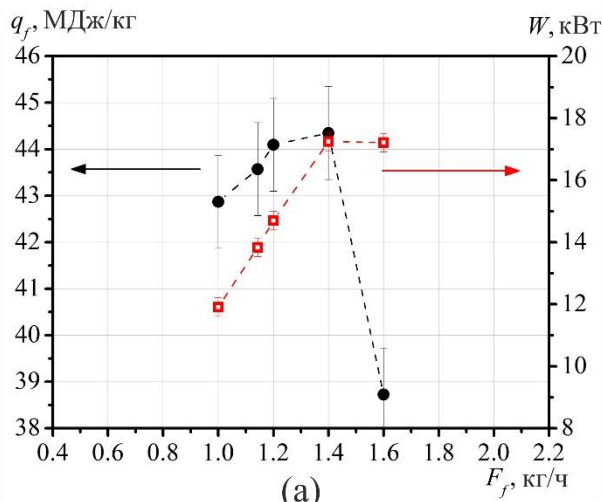


Рисунок 4.12 – Зависимости q , W , $\{CO\}$, $\{NO_x\}$ и распределения температуры внешнего факела T ($T_s = (260 \pm 10)^\circ C$): от расхода топлива F_f (кг/ч) при постоянном расходе пара ($F_v = 0,8$ кг/ч) – (а), (в), (д) соответственно; от расхода пара F_v (кг/ч) при постоянном расходе топлива ($F_f = 1,4$ кг/ч) – (б), (г), (е), соответственно

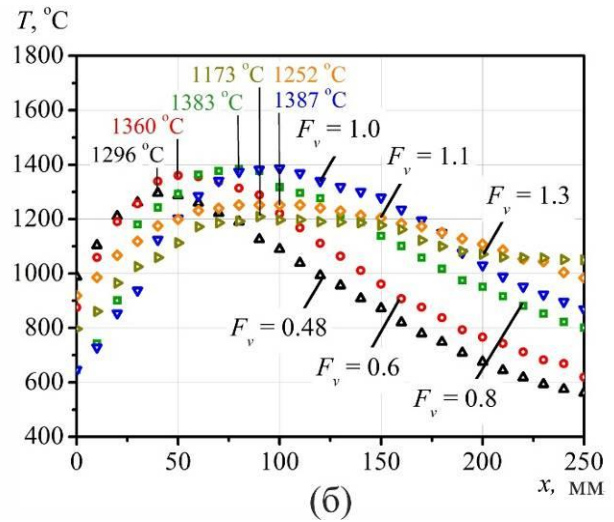
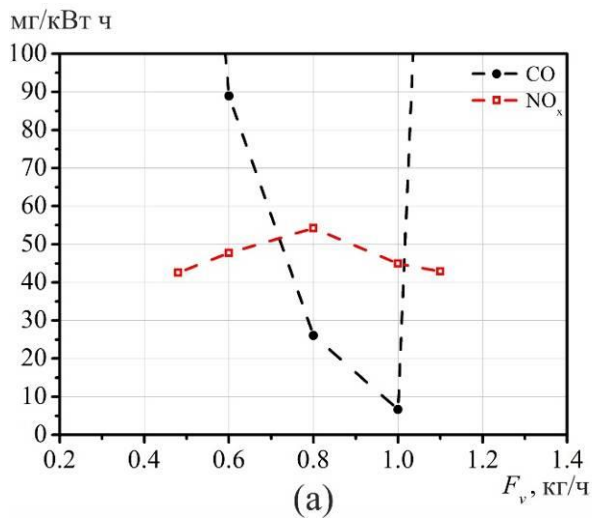
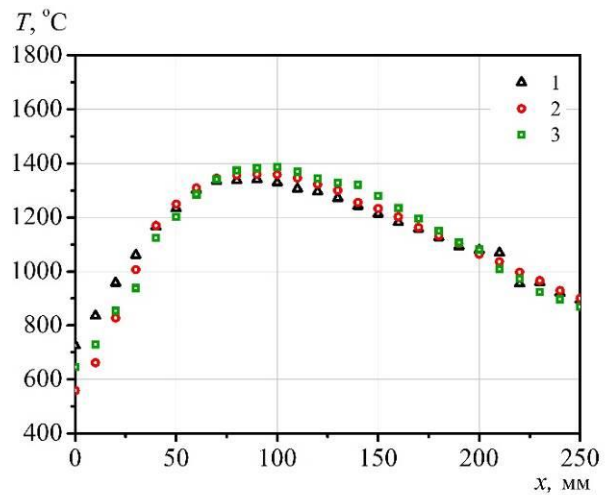
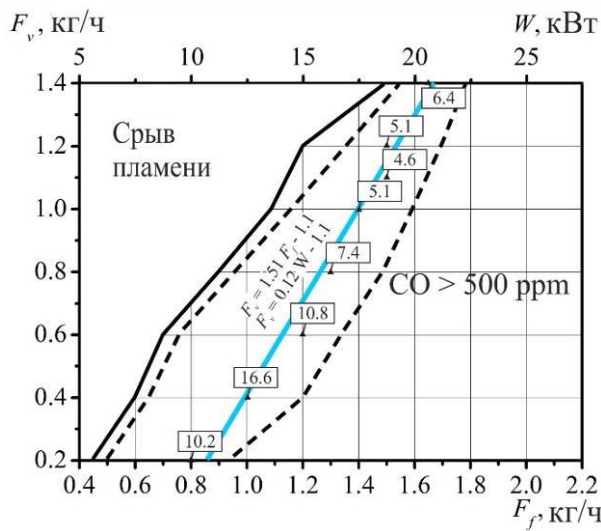


Рисунок 4.13 – Зависимости $\{CO\}$, $\{NO_x\}$ (а) и температуры внешнего факела T (б) от расхода пара при постоянном параметре $\gamma = 0,7$ ($T_s = (260 \pm 10)^\circ C$)



(а)

(б)

Рисунок 4.14 – Зависимость между расходом пара и расходом топлива, обеспечивающая минимальные значения $\{CO\}$ (мг/кВт ч) (а); распределение средней во времени температуры T во внешнем факеле вдоль вертикальной оси горелки при режимах вдоль линии $F_v = 1.5F_f - 1.1$ на F_v-F_f диаграмме ($T_s = (260 \pm 10)^\circ C$): 1 – $F_v = 0,8$ кг/ч, $F_f = 1,33$ кг/ч; 2 – $F_v = 1,0$ кг/ч, $F_f = 1,43$ кг/ч; 3 – $F_v = 1,2$ кг/ч, $F_f = 1,6$ кг/ч (б)

4.4.3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ СЖИГАНИИ ОТРАБОТАННОГО МАШИННОГО МАСЛА

Аналогичные исследования по определению тепловыделения, состава продуктов сгорания и температуры пламени проводились при сжигании отработанного трансмиссионного автомобильного масла (Таблица 4.3) в струе пара. Измерения проведены при температуре пара $T_s = (260 \pm 10)$ для характерных режимов в области устойчивого горения вдоль линий $\gamma = 0,5$ и $\gamma = 0,6$ (Рисунок 4.14). Масло предварительно нагревалось до температуры 60°C , что позволяло понизить его вязкость.

Результаты экспериментов показаны на рисунках 4.14, 4.15. На рисунке 4.14 показана карта режимов с характерными фотографиями внешнего факела. Границы области I построены по результатам визуальных наблюдений срыва пламени, который зависит от отношения окислитель/горючее. Факел горелочного устройства при сжигании отработанного масла во всех исследуемых режимах имеет ярко желтый цвет, что вызвано свечением несгоревших частиц углерода (сажи). Границы области III построены на основе результатов газового анализа, в ней концентрации $[\text{CO}] > 500$ ppm. При этом размер области II на $F_v - F_f$ диаграмме гораздо меньше, чем при сжигании дизельного топлива (см. Рисунок 4.9).

На рисунке 4.15 показаны зависимости q , W , $\{\text{CO}\}$, $\{\text{NO}_x\}$ и температуры внешнего факела T от расхода пара при постоянном параметре $\gamma = 0,5$ и $\gamma = 0,6$. Максимальное значение $q \sim 44$ МДж/кг достигается при мощности горелки $W = 14$ кВт и массовой доли пара $\omega_v = 37,8\%$ (Рисунок 4.15-б); коэффициент полноты сгорания топлива $\eta = 97\%$ (см. определение далее по тексту). При этом выделяется одновременно минимальное количество CO и NO_x ($\{\text{CO}\} = 20$ мг/кВт ч, $\{\text{NO}_x\} = 60$ мг/кВт ч), рисунок 4.15-г. В области III (см. Рисунок 4.14) значения q резко снижаются (Рисунок 4.15-а; при $F_v = 0,8$ кг/ч, $F_f = 1,6$ кг/ч), а значения $\{\text{CO}\}$ увеличиваются (Рисунок 4.15-в), что говорит о неполном сгорании топлива. Также, как и в случае горения дизельного топлива, $\{\text{NO}_x\}$ снижается с увеличением расхода пара (Рисунки 4.15-в,г). Максимальная температура в факеле на 40 градусов ниже, чем при сжигании дизельного топлива, в среднем составляет 1315°C .

Таким образом, показана возможность сжигания некондиционных жидких углеводородов при малой мощности горелки с соблюдением экологических нормативов.

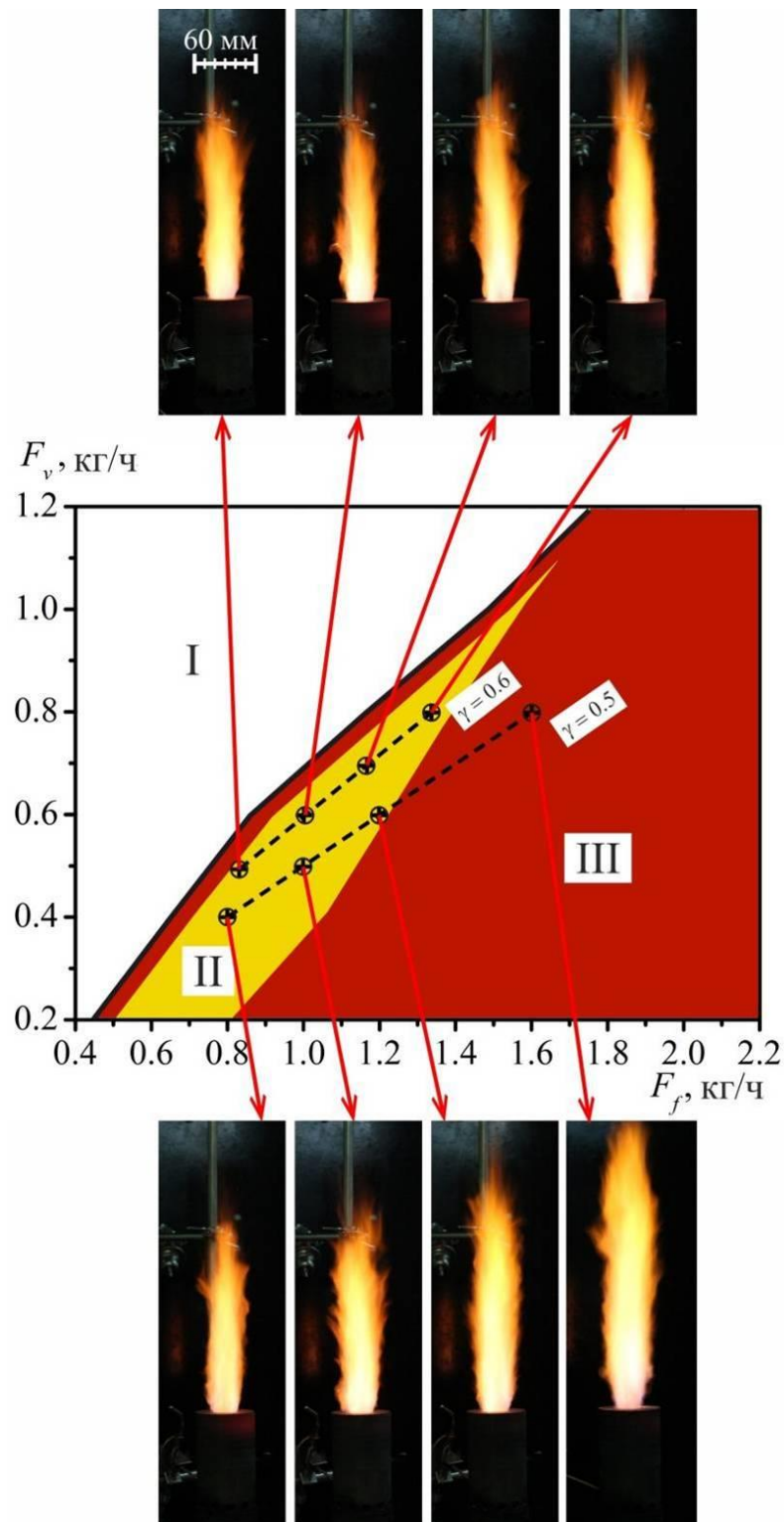


Рисунок 4.14 – Карта режимов горения при сжигании отработанного машинного масла в струе перегретого водяного пара с характерными фотографиями внешнего факела при $T_s = (260 \pm 10)^\circ\text{C}$: I – срыв пламени; II – область устойчивого горения (измерительная область); III – пламя с высокой концентрацией CO в продуктах сгорания ($[\text{CO}] > 500 \text{ ppm}$)

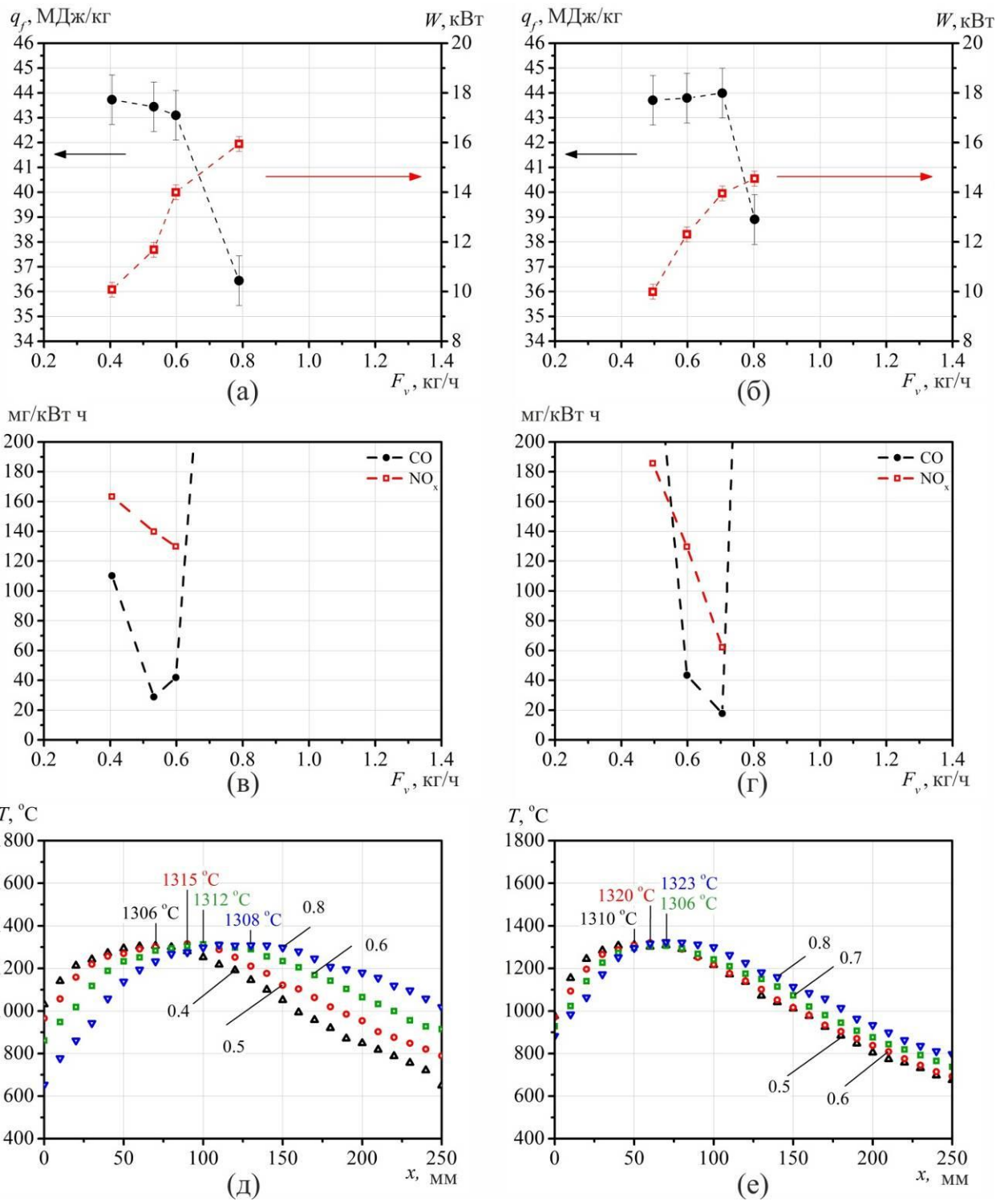


Рисунок 4.15 – Зависимости q , W , содержания $\{CO\}$, $\{NO_x\}$ и температуры внешнего факела T ($T_s = (260 \pm 10)^\circ C$) от расхода пара при постоянном параметре $\gamma = 0,5$ (а) и $\gamma = 0,6$ (б) при сжигании отработанного машинного масла в струе перегретого водяного пара

4.4.4 РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В ФАКЕЛЕ ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА

Результаты, представленные в данном подразделе, получены при сжигании дизельного топлива в струе перегретого водяного пара. Для характерного режима горения при постоянных расходах пара $F_v=0,6$ кг/ч и топлива $F_f=1,0$ кг/ч (см. Рисунок 4.9) изучено влияние температуры пара на распределение температуры в факеле (Рисунок 4.16). Анализ результатов тепловизионных измерений (Рисунок 4.16) показывает, что температура перегретого водяного пара слабо влияет на распределение средней температуры в факеле. Наблюдается хорошее соответствие полученных результатов при помощи тепловизора (Рисунок 4.16) и термопары (Рисунок 4.8), что указывает на правильный выбор коэффициента излучения для тепловизионных исследований. Максимальная температура в факеле в представленных режимах достигает 1400 °С.

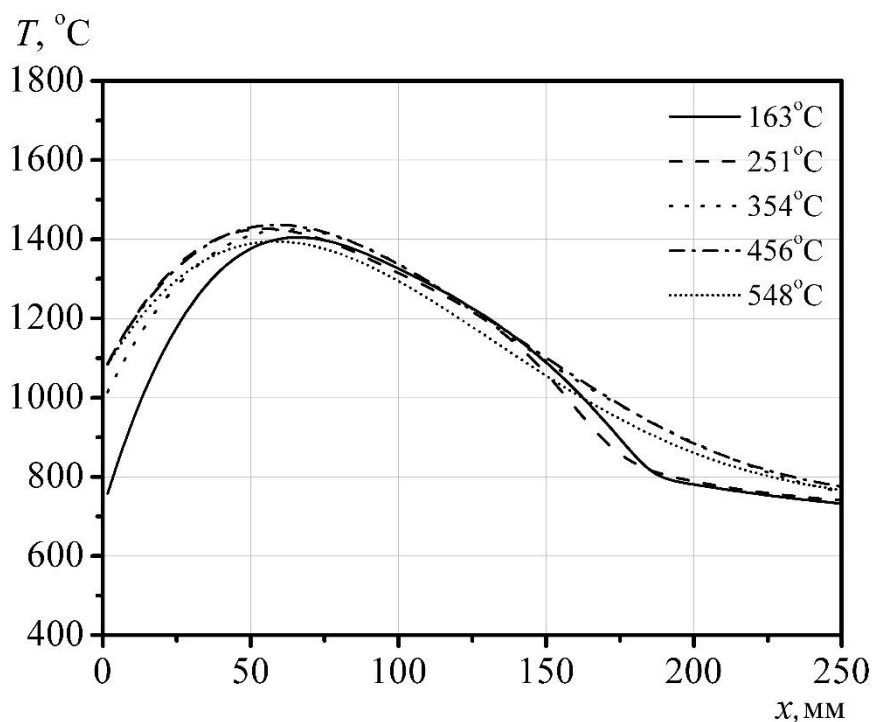


Рисунок 4.16 – Распределение средней во времени температуры T в факеле вдоль вертикальной оси горелки при различной температуре пара T_s (°С) и постоянных расходах пара $F_v=0,6$ кг/ч и топлива $F_f=1,0$ кг/ч (измерения тепловизором)

Дальнейшие исследования проведены при постоянной температуре пара $T_s=(260\pm 10)$ °С, обеспечивающей достаточный перегрев пара для протекания реакции и в то же время с минимальными затратами энергии на перегрев. На рисунке 4.17 показаны зависимости давления пара и мощности горелки от режимных параметров. С увеличением расхода пара наблюдается увеличение давления в парогенераторе при одновременном снижении степени перегрева пара $T_s - T_b$ (Рисунок 4.17-а). Рассчитанная мощность горелочного устройства (по формуле (7)) зависит только от расхода топлива, за исключением отдельных режимов, связанных с неполным сгоранием топлива (Рисунок 4.17-б).

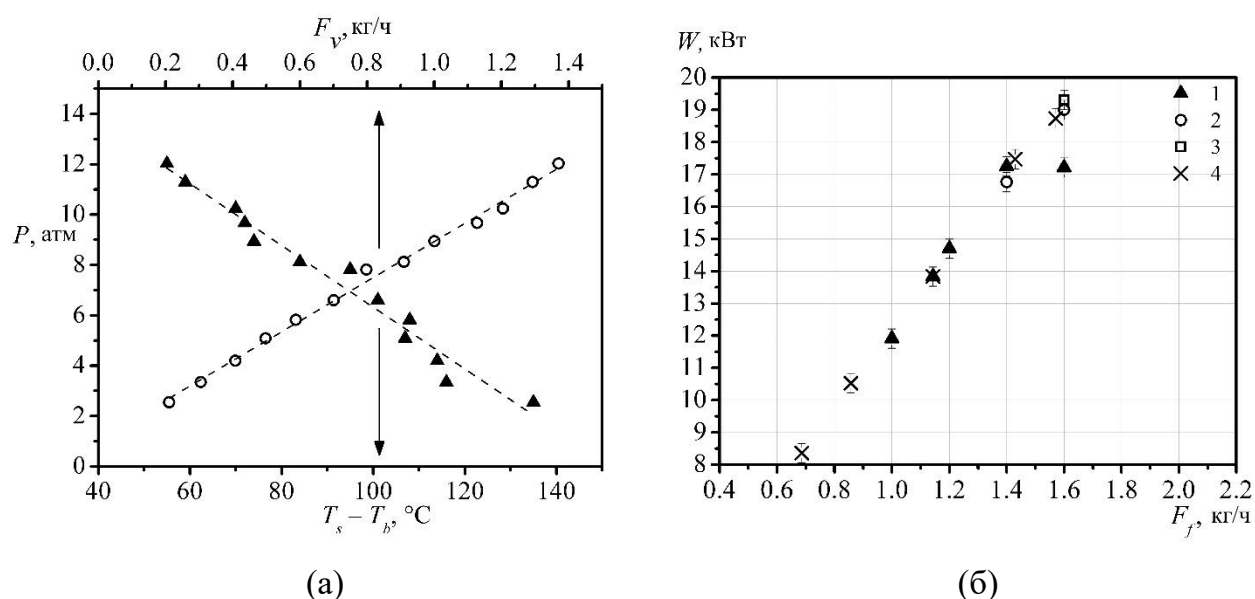


Рисунок 4.17 – (а) Зависимость давления в парогенераторе P от степени перегрева пара ($T_s - T_b$) и от расхода воды (пара) F_v ; (б) измеренная тепловая мощность горелочного устройства для разных расходов топлива (1 – $F_v = 0,8$ кг/ч, 2 – $F_v = 1,2$ кг/ч, 3 – $F_v = 1,4$ кг/ч, 4 – $\gamma = 0,7$). ($T_s=(260\pm 10)$ °С)

На рисунке 4.18-а на карте высот факела отмечены режимы, при которых проведены тепловизионные измерения. На рисунке 4.18-б показаны зависимости коэффициента излучения пламени ε от режимных параметров горелки в диапазоне $\varepsilon=0,3\div 0,4$. Видно, что при увеличении расхода пара (для постоянного расхода топлива) значение ε снижается, в то же время с увеличением расхода топлива (при постоянном расходе пара) коэффициент излучения увеличивается. С одной стороны, это может быть связано с режимами работы горелки и зависит от концентрации перегретого водяного

пара в смеси с топливом – при большем содержании пара, коэффициент излучения ниже. С другой стороны, незначительное изменение коэффициента излучения ($\varepsilon=0,3\div 0,4$) связано с тем, что в рабочем спектральном интервале 2,5-2,7 мкм помимо газообразных продуктов горения присутствуют частицы сажи, концентрация которых напрямую зависит от полноты сгорания топлива. Влияние концентрации частиц сажи на коэффициент излучения пламени рассматривается в работах [187, [188], а в предельных случаях, когда для измерений используется широкий спектральный интервал или ИК-камеры длинноволнового спектрального диапазона, для пламен с большим содержанием твердых углеродных частиц, коэффициент излучения приближается к 1 [189]. При постоянном относительном расходе пара γ коэффициент излучения ε почти не зависит от расхода пара и топлива ($\Delta\varepsilon\sim 0,03$).

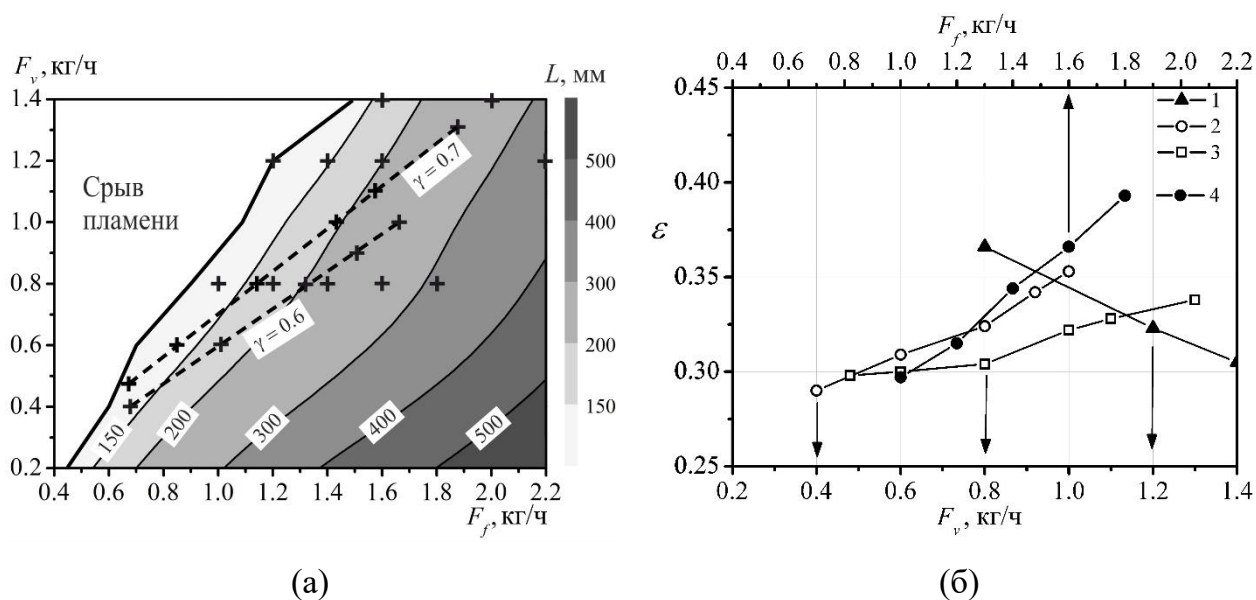


Рисунок 4.18 – (а) Зависимость высоты (мм) факела горелки от режимов подачи топлива и перегретого пара при сжигании дизельного топлива; символами «+» отмечены режимы при тепловизионных измерениях; (б) коэффициент излучения пламени ε (1 – $F_f=1,6$ кг/ч, 2 – $\gamma=0,6$, 3 – $\gamma=0,7$, 4 – $F_v=0,8$ кг/ч) ($T_s=(260\pm 10)$ °С)

На рисунке 4.19 представлены результаты экспериментов в факеле горелочного устройства для характерного режима при $F_v = 0,8$ кг/ч и $F_f = 1,2$ кг/ч (см. рисунок 4.9). Фотография факела (Рисунок 4.19-а) и поле мгновенной температуры (Рисунок 4.19-б) демонстрируют существенно турбулентную структуру факела. Осредненное по 1200 мгновенным термограммам поле температуры показано на рисунок 4.19-в. Видно, что

изотермы имеют коническую форму характерную для диффузионного режима горения. Это означает, что выходящий из горелки поток содержит не прореагировавшие компоненты, которые догорают по мере поступления окислителя из окружающей атмосферы. На рисунок 4.19-г показаны профили температуры в поперечном сечении факела на разной высоте.

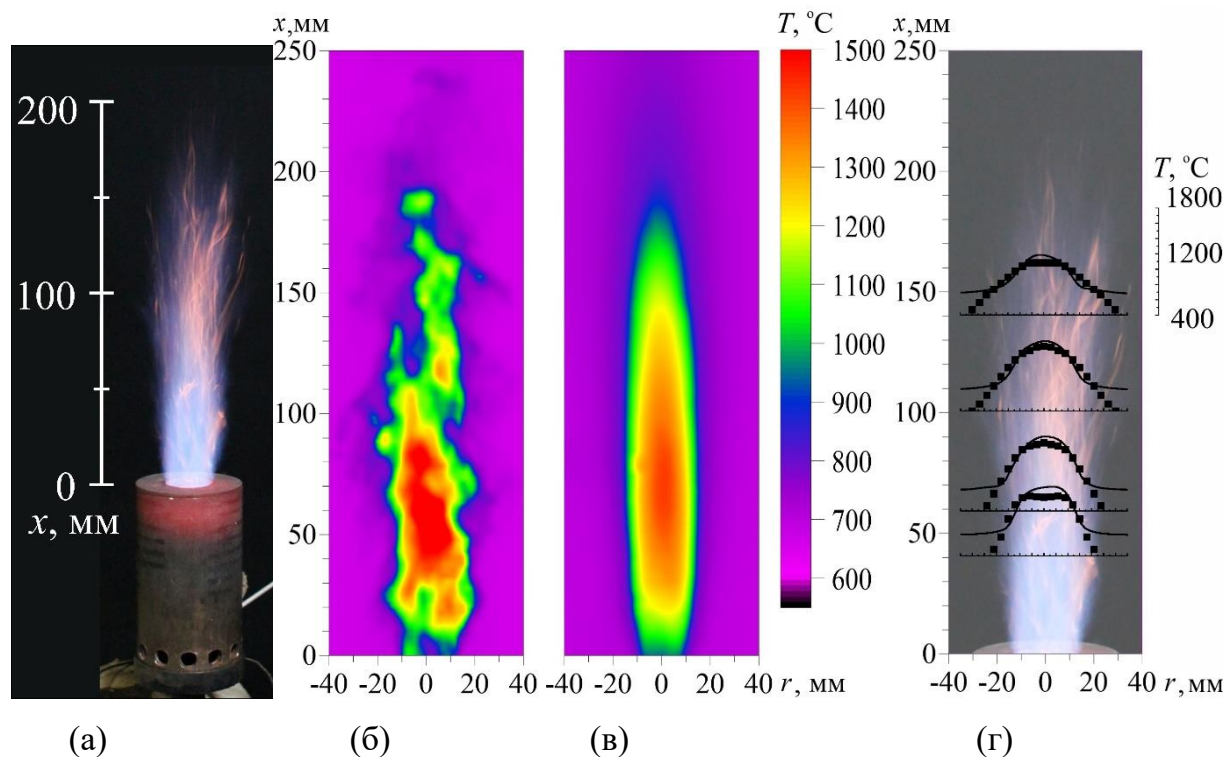


Рисунок 4.19 – Результаты экспериментов при $F_v = 0,8$ кг/ч, $F_f = 1,2$ кг/ч, $T_s = (260 \pm 10)$ °C: (а) фотография внешнего факела, (б) поле мгновенной температуры, (в) поле средней температуры, (г) профили средней температуры на различной высоте факела («сплошная линия» – измерения тепловизором, «символы» – измерения термопарой)

На рисунках 4.20-4.22 приведено сопоставление результатов тепловизионных и термопарных измерений, наблюдается хорошее согласование. Анализ результатов показывает, что увеличение расхода пара (при постоянном расходе топлива) приводит к снижению температуры пламени, максимальная температура снижается более, чем на 200 градусов (Рисунок 4.20). Данный эффект является по мнению авторов основной из причин подавления производства NO_x в присутствии перегретого водяного пара благодаря увеличению теплоемкости горючей смеси. С увеличением расхода топлива (при постоянном расходе пара) область максимальной температуры сдвигается от среза

горелки (Рисунок 4.21), что связано с увеличением мощности и, следовательно, размеров факела (Рисунок 4.18-а). Помимо этого увеличиваются и размеры высокотемпературной области внутри факела (профиль температуры становится шире), способствующей производству термических оксидов азота.

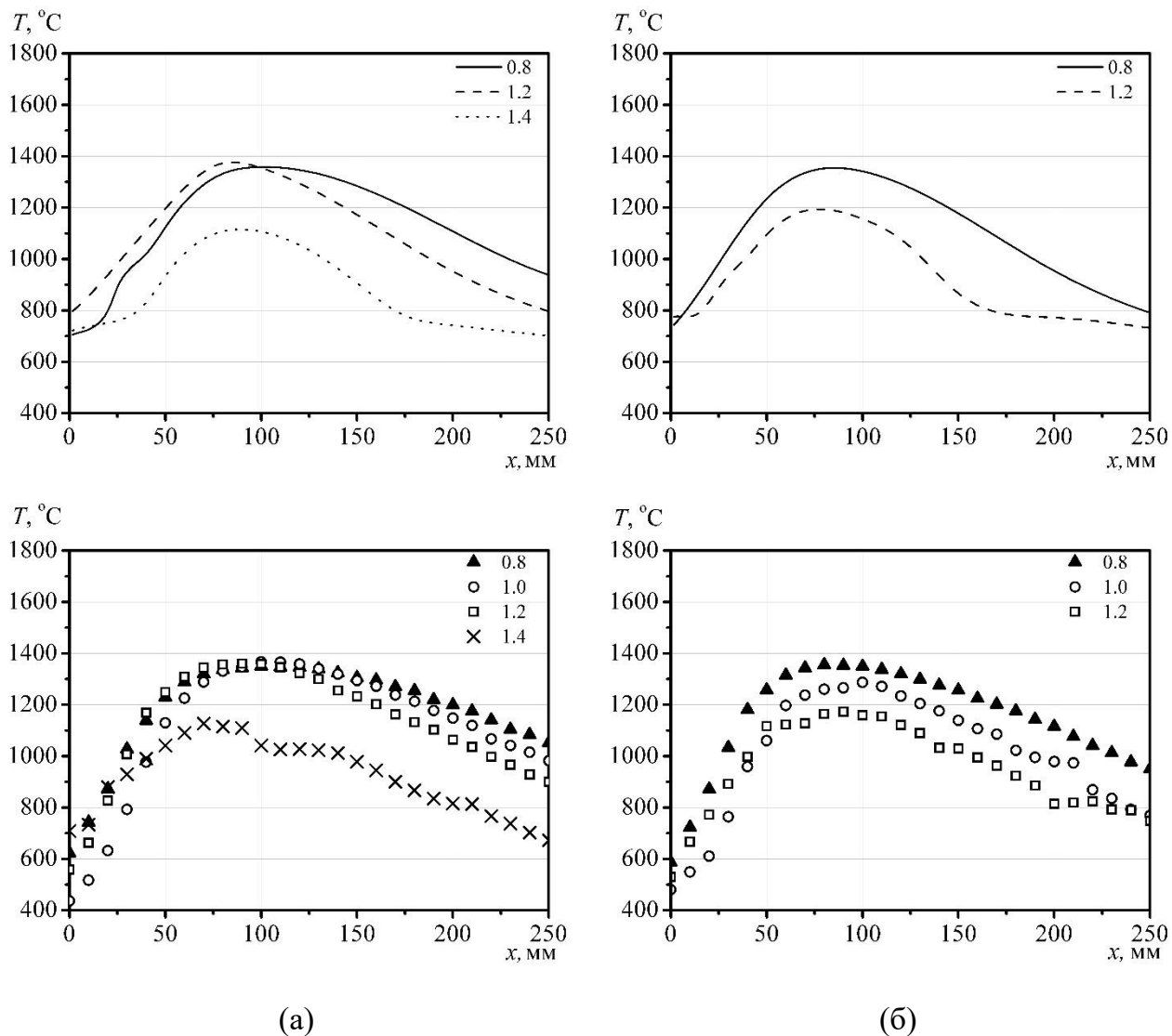


Рисунок 4.20 – Распределение средней во времени температуры T в факеле вдоль вертикальной оси горелки ($T_s=(260\pm 10)$ °C) для различных расходов пара F_v (кг/ч) при постоянном расходе топлива $F_f=1,6$ кг/ч (а) и $F_f=1,4$ кг/ч (б), сверху – тепловизионные измерения, снизу – термопарные

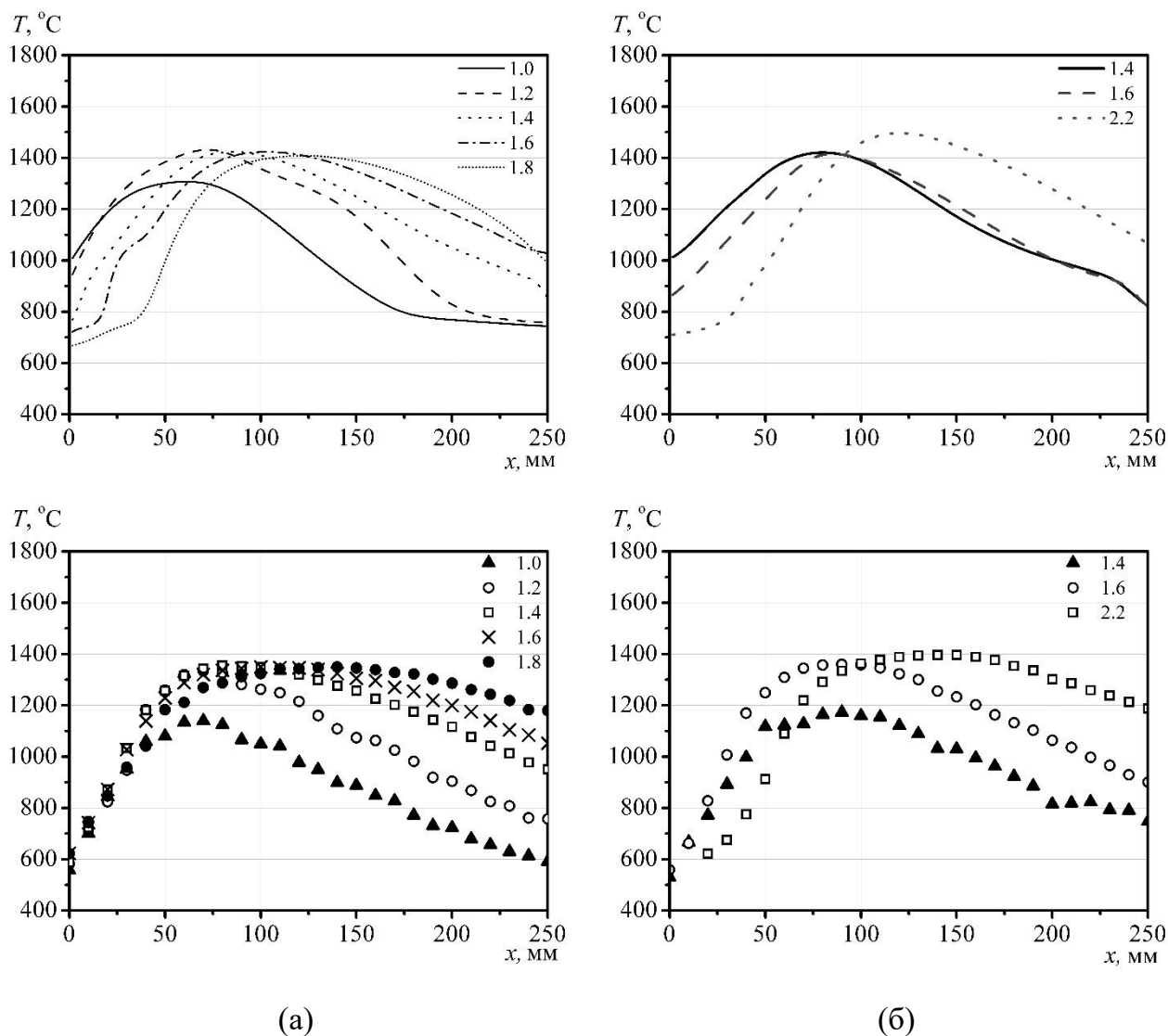


Рисунок 4.21 – Распределение средней во времени температуры T в факеле вдоль вертикальной оси горелки ($T_s=(260\pm 10)$ °C) для различных расходов топлива F_f (кг/ч) при постоянном расходе пара $F_v=0,8$ кг/ч (а) и $F_v=1,2$ кг/ч (б), сверху – тепловизионные измерения, снизу – термопарные.

Похожие зависимости температуры внешнего факела наблюдаются при постоянном параметре γ : с изменением расхода пара изменяются и размеры факела (Рисунок 4.18-а), и профиль температуры, максимальная температура факела, достигающая 1420 °C (Рисунок 4.22).

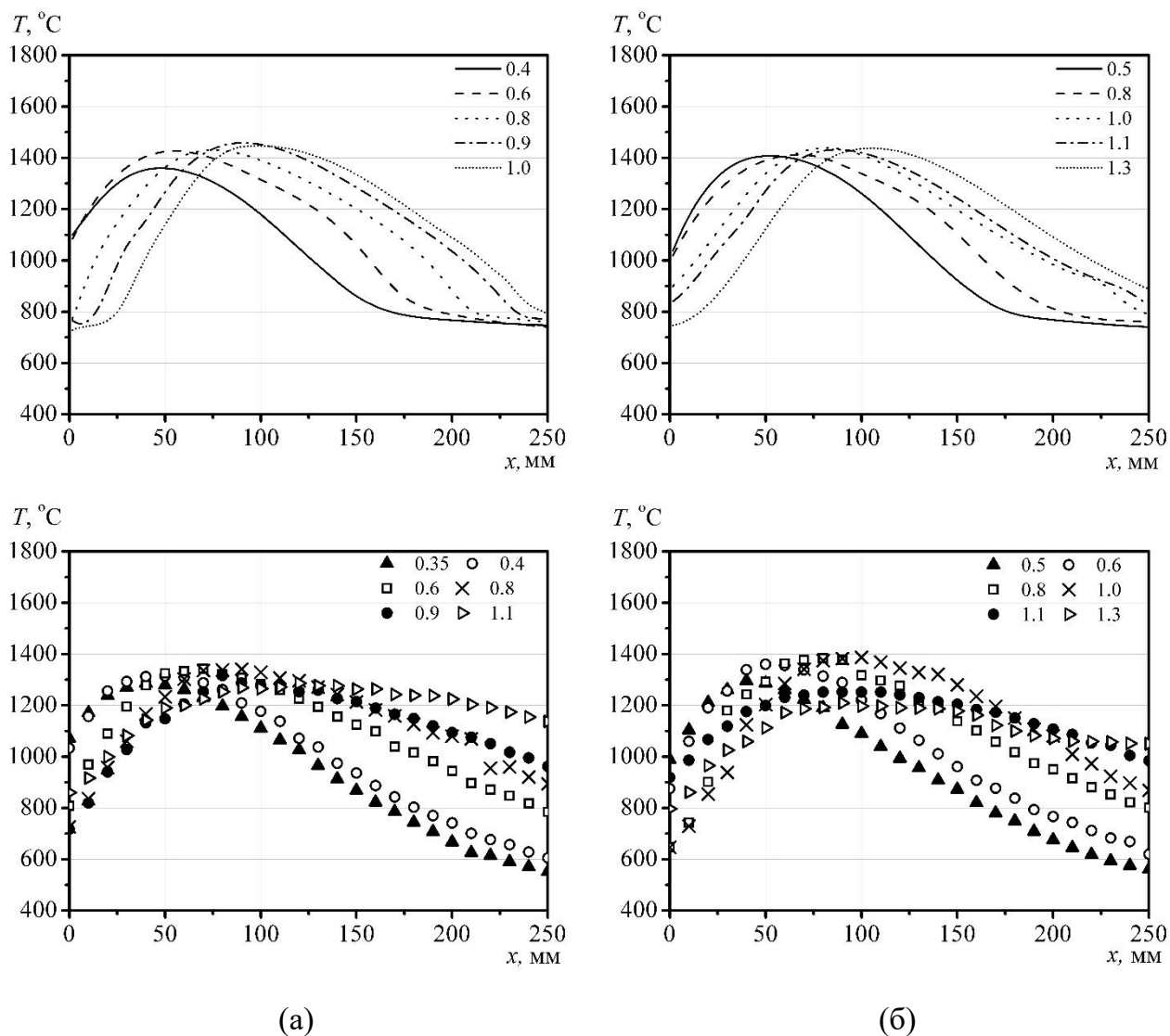


Рисунок 4.22 – Распределение средней во времени температуры T в факеле вдоль вертикальной оси горелки ($T_s=(260\pm 10)$ °C) для различных расходов пара F_v (кг/ч) при постоянном относительном расходе пара $\gamma=0,6$ (а) и $\gamma=0,7$ (б), сверху – тепловизионные измерения, снизу – термопарные.

На рисунке 4.23 представлен характерный для исследованных режимов горелки спектр температуры внешнего факела. Выраженных пиков в температурном спектре не наблюдается, что указывает на отсутствие периодических колебаний в исследуемом факеле.

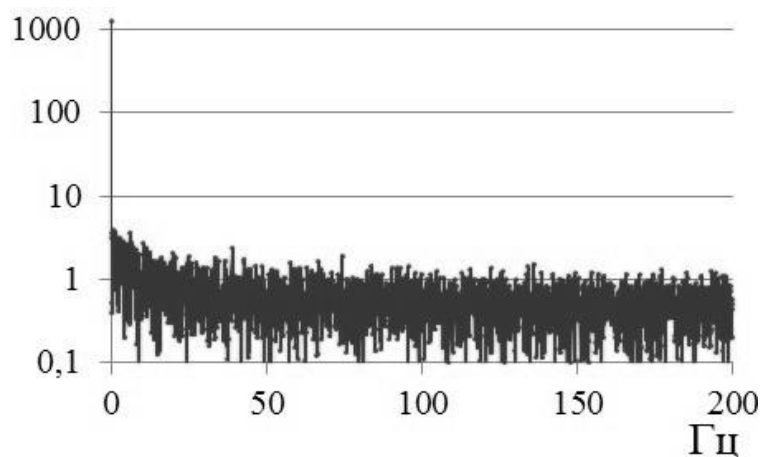


Рисунок 4.23 – Спектр пульсаций температуры внешнего факела горелки
(в точке $r=0$, $x=100$ mm), $F_v = 0,8$ кг/ч, $F_f = 1,2$ кг/ч, $T_s=(260\pm 10)$ °С
(тепловизионные измерения с частотой 400 Гц)

4.4.5 ИЗУЧЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ПРИ РАБОТЕ ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА

Исследования пульсаций давления проведены при распылении и сжигании дизельного топлива струей перегретого водяного пара. Исследовалось влияние возможных факторов на изменение акустического спектра: приточная вентиляция, паровая форсунка, корпус горелочного устройства, частота подачи топлива, расход пара и расход топлива, с горением и без. Для проведения преобразования Фурье в каждом режиме было сделано 140000 измерений с частотой 10 кГц (на рисунках не представлена часть области, в которой отсутствуют выраженные пульсации).

Вытяжная вентиляция огневого стенда не оказывает влияние на пульсации давления в факеле (Рисунок 4.24), в спектре давления нет пиков. На рисунках 4.25-4.27 показаны спектры давления с основным пиком на частоте около 120 Гц. Видно, что данный пик появляется при работе паровой форсунки, даже без подачи топлива и горения (Рисунок 4.25-а). При этом корпус горелочного устройства также не влияет на изменение акустического спектра (Рисунок 4.25-б,г). Основная частота, представленная в спектре, не изменяется в широком диапазоне расхода пара и топлива (Рисунок 4.26-4.27), т.е. соответствует собственным колебаниям паровой форсунки. Амплитуда регистрируемых пиков на оси факела в среднем в 2 раза больше, чем на периферии. При этом амплитуды очень малы, что характерно для слабых случайных шумов, но не для

организованной динамики. В спектре присутствуют и менее выраженные частотные пики при подаче топлива (Рисунок 4.25-д,е; Рисунки 4.26-4.27). Их частота кратна частоте работы топливной форсунки: 25 Гц для рисунка 4.25-д и 40 Гц для рисунков 4.25-е, 4.26, 4.27. Таким образом, выраженных автоколебаний факела в акустическом спектре не выявлено. Можно сделать вывод, что наблюдаемый шум связан с работой паровой форсунки, скорость потока при истечении из которой превышает сверхзвуковую.

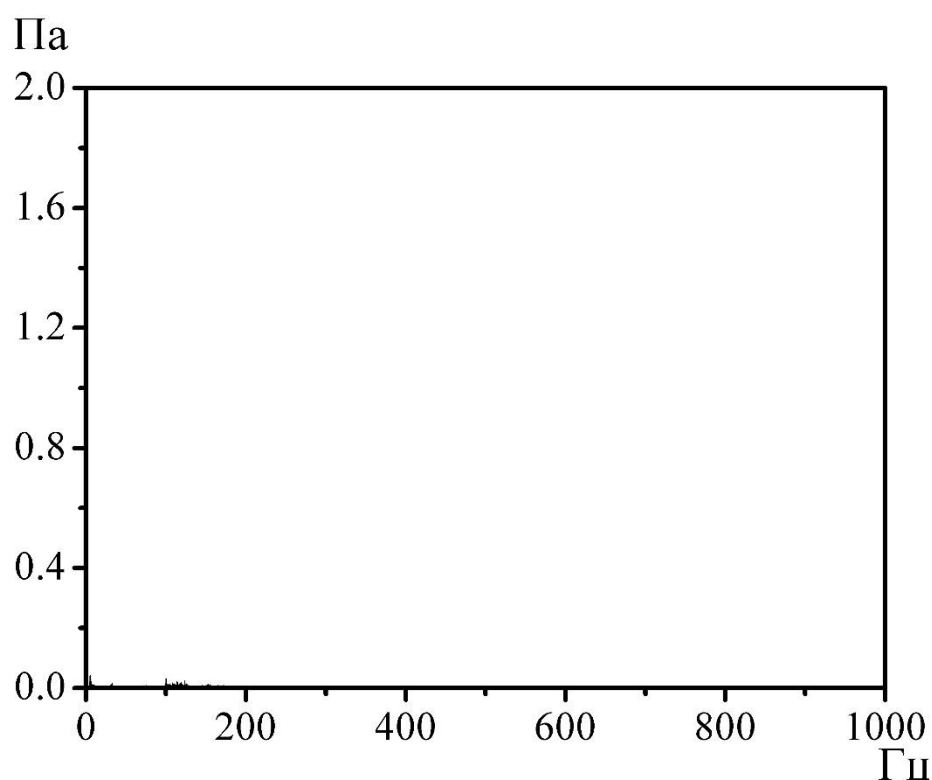


Рисунок 4.24 – Спектр давления при работе вентиляции на огневом стенде, точка ($x=20$; $r=0$), $F_v=0$ кг/ч, $F_f=0$ кг/ч

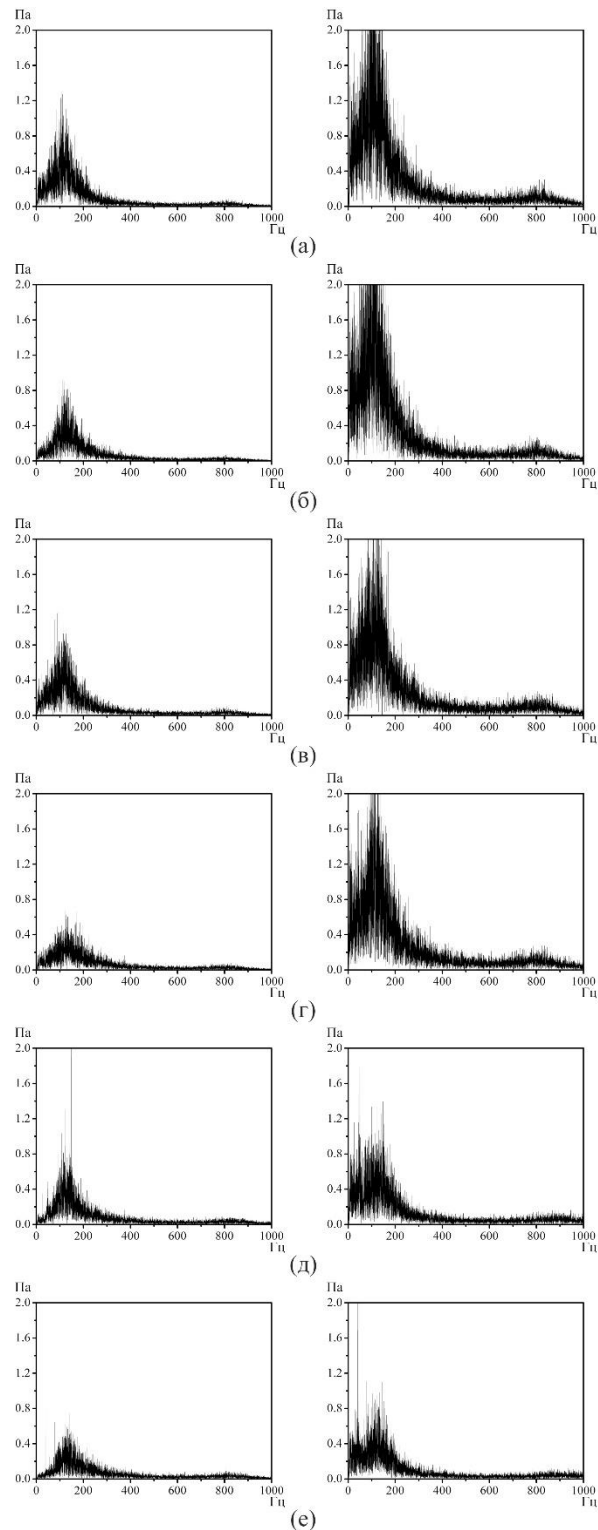


Рисунок 4.25 – Спектр давления (слева точка $(x=10; r=15)$, справа – $(x=20; r=0)$):
 (а) $F_v=0,4$ кг/ч, $F_f=0$ кг/ч, без корпуса; (б) $F_v=0,4$ кг/ч, $F_f=0$ кг/ч, с корпусом;
 (в) $F_v=0,4$ кг/ч, $F_f=0,8$ кг/ч, без корпуса, без горения; (г) $F_v=0,4$ кг/ч, $F_f=0,8$ кг/ч,
 с корпусом, без горения; (д) $F_v=0,4$ кг/ч, $F_f=0,8$ кг/ч, частота топливной форсунки 25 Гц,
 с горением; (е) $F_v=0,4$ кг/ч, $F_f=0,8$ кг/ч, частота топливной форсунки 40 Гц, с горением

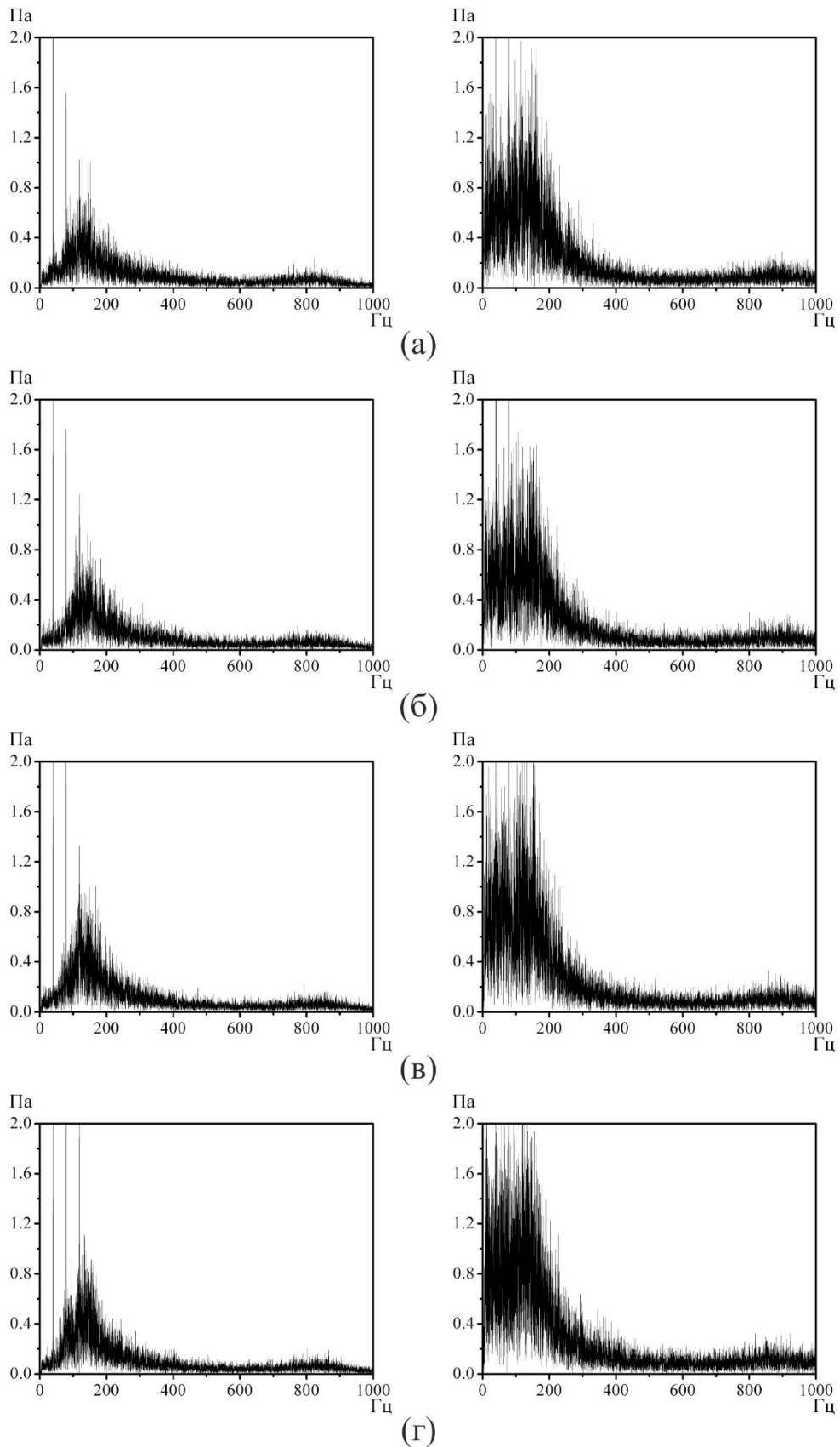


Рисунок 4.26 – Спектр давления в факеле горелки при постоянном расходе пара $F_v=0,8$ кг/ч (слева точка $(x=10; r=15)$ – периферия факела, справа – $(x=20; r=0)$ – ось факела): (а) $F_f=1,0$ кг/ч; (б) $F_f=1,2$ кг/ч; (в) $F_f=1,4$ кг/ч; (г) $F_f=1,6$ кг/ч

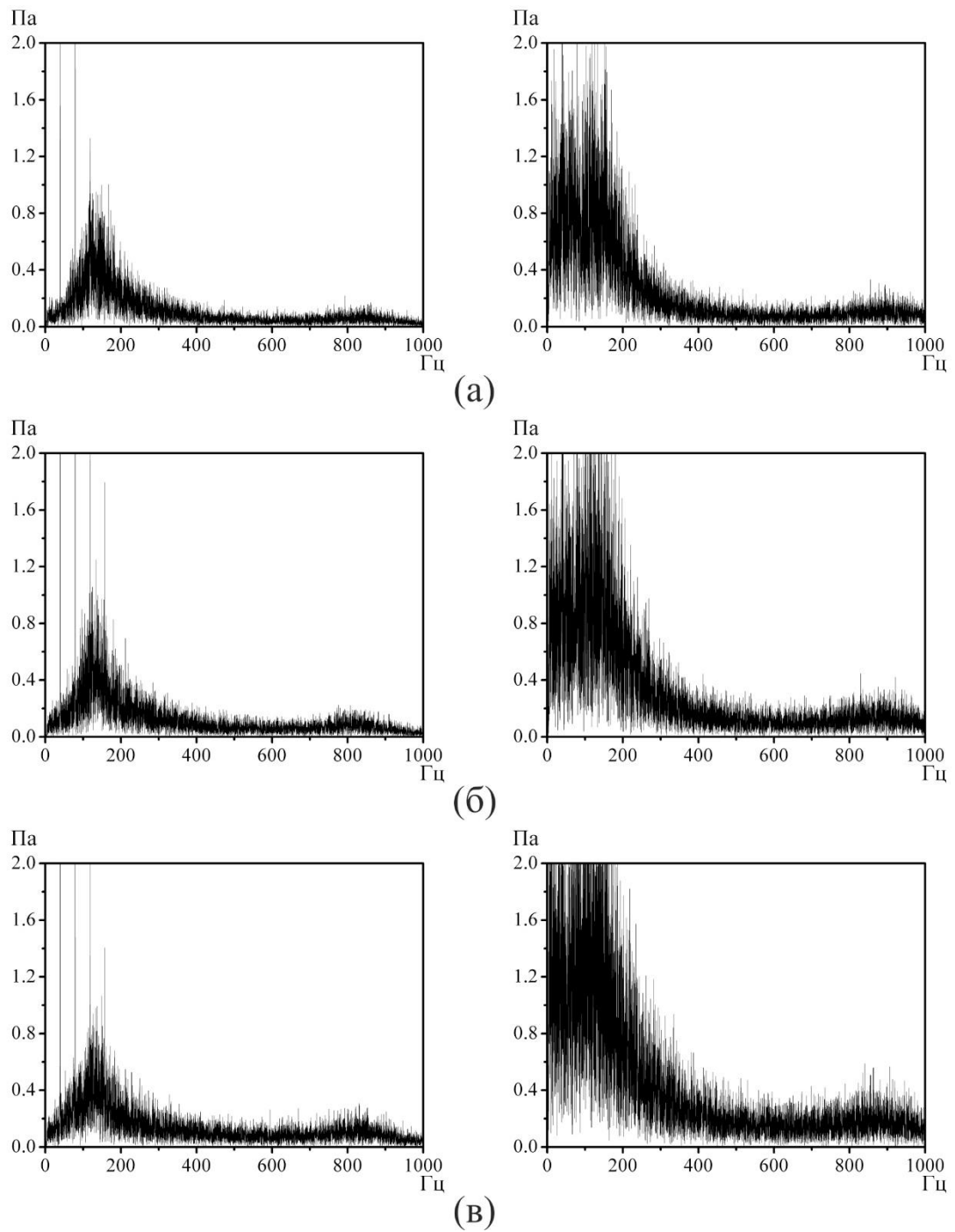


Рисунок 4.27 – Спектр давления в факеле горелки при постоянном расходе топлива $F_f=1,4$ кг/ч (слева точка $(x=10; r=15)$ – периферия факела, справа – $(x=20; r=0)$ – ось факела): (а) $F_v=0,8$ кг/ч; (б) $F_v=1,0$ кг/ч; (в) $F_v=1,2$ кг/ч

4.5 АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЖИГАНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА С ПОДАЧЕЙ ПАРА

Жидкотопливные горелки известных мировых брендов (Vissmann, Weishaupt, Elco, Oilon и др.) по вредным выбросам соответствуют стандарту DIN EN 267 (Таблица 4.5) [190]. Согласно российским ГОСТам [191-200], нормативы по выбросам CO и NO приведены в Таблице 4.6. Для сравнение приведены характеристики популярных моделей дизельных горелок известной мировой фирмы Weishaupt, некоторые из которых удовлетворяют лишь 2 классу норматива. Исследуемая горелка по концентрациям CO и NO_x удовлетворяет самому жесткому 3 классу (см. Рисунок 4.11), а в некоторых режимах имеет более улучшенные показатели по CO в 12 раз, а по NO_x в 3 раза (Таблица 4.5), что говорит о преимуществах технологии сжигания с использованием пара. В таблице 4.7 для сравнения приведены соотношения между единицами измерений концентраций NO_x.

Таблица 4.5 – Нормативы по выбросам {CO} и {NO_x} [190].

Характеристики горелок Weishaupt²⁹ и исследуемой горелки

DIN EN 267:2011-11 EN 267:2009+A1:2011 (E)			Горелочное устройство		
Класс	{NO _x }, мг/кВт ч	{CO}, мг/кВт ч	Модель	Топливо	Мощность, кВт
1	≤ 250	≤ 110			
2	≤ 185	≤ 110	Weishaupt WL5/1-B, WL5-A-H	дизель дизель	21.5...40 16.5...40
3	≤ 120	≤ 60	Weishaupt WL5-A-H 1LN (Blue flame)	дизель	16.5...37
	≤ 90 (минимум 40)	≤ 50 (минимум 5)	Паровая горелка	дизель	10...20

²⁹ URL: <https://www.weishaupt.ru/>

Таблица 4.6 – Объемное содержание оксида углерода и оксидов азота (в пересчете на NO₂) в сухих неразбавленных продуктах горения в пересчете на нормальные физические условия (температура 0 °С, давление – 760 мм.рт.ст.) и коэффициент избытка воздуха, равный, 1 [197]

Вид топлива	Содержание, мг/м ³	
	оксид углерода, СО	оксидов азота в пересчете на NO ₂
Легкое жидкое	115	229
Природный газ сжигаемый:	119	240
в атмосферных горелках		144
в горелках с принудительной подачей воздуха для горения		
Антрацит	10000	-
Каменный уголь с выходом летучих до 17 %	24000	-
Каменный уголь с выходом летучих с 17 % до 50 %	48000	-

Таблица 4.7 – Соотношения между единицами измерений концентраций NO_x * [201]

Единица измерения	мг/м ³	% об.	ppm	мг/кВт ч	кг/ГДж **
1 мг/м ³	1	$0,487 \cdot 10^{-4}$	0,487	0,862	$2,394 \cdot 10^{-4}$
1 % об.	$2,054 \cdot 10^4$	1	$1 \cdot 10^4$	$1,77 \cdot 10^{-4}$	4,916
1 ppm	2,054	$1 \cdot 10^{-4}$	1	1,77	$4,916 \cdot 10^{-4}$
1 мг/кВт ч	1,16	$0,565 \cdot 10^{-4}$	0,565	1	$2,777 \cdot 10^{-4}$
1 кг/ГДж	4177	0,203	2030	3601	1

* В пересчете на NO_x.

** Газ – природный, теплота сгорания Q_H=35,6 МДж/м³, α=1

Важным показателем, используемым при оценке качества сжигания топлива в горелочных устройствах является коэффициент избытка воздуха α, который можно вычислить в соответствии с ГОСТ 28091-89 по следующим формулам [191]:

$$\alpha = V_{ad}/V_0, \quad (11)$$

$$V_{ad} = V_{aw} \left(1 - \frac{0.01\phi \cdot p_{ass}}{p_a} \right), \quad (12)$$

$$V_{aw} = G_{aw}/F_f, \quad (13)$$

где V_{ad} – фактический объем сухого воздуха для горения ($\text{м}^3/\text{кг}$); V_0 – стехиометрический объем воздуха для горения ($\text{м}^3/\text{кг}$); V_{aw} – фактический объем влажного воздуха для горения ($\text{м}^3/\text{кг}$); ϕ – относительная влажность воздуха для горения (%); p_{ass} – давление насыщенного водяного пара в воздухе (Па); p_a – атмосферное давление (Па); G_{aw} – расхода воздуха G_{aw} .

Следует отметить, что приток (подача) воздуха в горелку – естественный, из атмосферы, т.е. в исследуемой конструкции горелочного устройства расход воздуха не контролируется. Однако на основе результатов газового анализа можно провести оценку расхода воздуха G_{aw} , зная содержание CO_2 и O_2 . Поскольку газоанализатор не позволяет измерять количество воды, уходящее с продуктами сгорания, то считаем, что компоненты топлива были окислены полностью. Таким образом:

$$G_{aw} = V_0 F_f + \frac{[\text{O}_2] \cdot G_g}{0.21}, \quad (14)$$

$$V_0 = 0.0476(1.86C_f + 5.6H_f + 0.7S_f + 0.8N_f - 0.7O_f), \quad (15)$$

где G_g – расход продуктов сгорания (уходящих газов) ($\text{м}^3/\text{ч}$); $[\text{O}_2]$ – концентрация кислорода в продуктах сгорания (%); C_f , H_f , S_f , N_f , O_f – массовое содержание в топливе углерода, водорода, серы, азота, кислорода, соответственно (%). Для используемого дизельного топлива (см. Таблицу 4.2) стехиометрический объем воздуха для горения $V_0 = 11,13 \text{ м}^3/\text{кг}$.

В Таблице 4.8 приведены значения расхода атмосферного воздуха и коэффициента избытка воздуха α , а также результаты газового анализа $[\text{O}_2]$, $[\text{CO}_2]$ и $[\text{SO}_2]$, для

характерных режимов. Расход атмосферного воздуха составляет в среднем 16-18 м³/ч, что в среднем на 3,5 % выше расхода продуктов сгорания в калориметре. Коэффициент α для всех исследуемых режимов больше 1. С увеличением расхода пара α немного увеличивается, что может быть связано с тем, что при увеличении расхода пара увеличивается импульс струи, и за счет эжекции увлекается большее количество атмосферного воздуха. Следует отметить, что в реакции участвует также водяной пар, который не учитывался при расчете α . Для более эффективного управления процессом сжигания в горелочном устройстве необходимо принудительно подавать воздух в зону реакции.

Коэффициент полноты сгорания топлива определялся как отношение количества теплоты, фактически выделившегося при сгорании 1 кг топлива, к высшей теплоте сгорания:

$$\eta = (q/q_f) \cdot 100\% . \quad (16)$$

Для «эффективных» режимов коэффициент η не ниже 98 % (Таблица 4.8), что говорит о высокой полноте сгорания топлива в присутствии пара.

Таблица 4.8 – Значения режимных параметров и концентрации компонентов продуктов сгорания

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
F_f , кг/ч	F_v , кг/ч	W , кВт	$G_{ср}$, м ³ /ч	O ₂ , об%	CO ₂ , об.%	SO ₂ , ppm	G_{aw} , м ³ /ч	V_{aw} , м ³ /кг	α	η
1,4	0,8	17,25	15,6	0,7	15,8	157,4	16,1	11,5	1,02	98,56
	1,0	16,82	16,2	1,9	15,2	153,8	17,1	12,2	1,08	96,11
	1,2	16,76	17,7	3,4	13,7	133,5	18,3	13,2	1,16	95,89
1,0	0,8	11,91	16,6	7,8	10,2	95,4	17,0	17,6	1,55	95,45
1,1		13,83	16,0	4,9	12,5	117,0	16,5	14,5	1,28	97,0
1,2		14,70	15,8	4,0	13,2	125,3	16,3	13,7	1,21	98,12
1,4		17,25	15,6	0,7	15,8	157,4	16,1	11,5	1,02	98,56

Для оценки эффективности использования перегретого водяного пара при сжигании жидких углеводородов проведены сопоставления результатов с данными при распылении дизельного топлива струей сжатого воздуха. На рисунке 4.28 показана карта режимов при сжигании дизельного топлива в струе нагретого воздуха с характерными фотографиями внешнего факела горелочного устройства. Внешний вид карты на $F_{air}-F_f$ диаграмме схож с картой при подаче паровой струи (Рисунок 4.9). Факел имеет ярко-желтый цвет с голубыми оттенками, более бледный в сравнении с «паром». Цвет факела почти не зависит от режимных параметров. С увеличением расхода воздуха (при фиксированном расходе топлива) размеры факела уменьшаются.

Карты $\{CO\}$, $\{NO_x\}$ (Рисунок 4.29) также имеют схожий вид с результатами при подаче пара. Минимальные значения $\{CO\}$ наблюдаются вдоль правой границы области II и достигают 6 мг/кВт ч (Рисунок 4.29-а). Область минимальных значений $\{NO_x\} = 60$ мг/кВт ч соответствует области максимальной массовой доли воздуха в соотношении с топливом, близкой к 50% (Рисунок 4.29-б). Вдоль линии минимальных значений $\{CO\}$ (у правой границы) (Рисунок 4.29-а) $\{NO_x\}$ имеет высокие значения, превышающие 120 мг/кВт ч (Рисунок 4.29-б), что соответствует 2 классу по EN 267 (Таблица 4.5). При этом максимальное тепловыделение в режиме с воздухом составляет $q = 43.9$ МДж/кг при мощности $W = 14.6$ кВт (рисунок 4.30-б), а коэффициент полноты сгорания топлива составляет 97%. В этом режиме $\{CO\} = 10$ мг/кВт ч, а $\{NO_x\} = 112$ мг/кВт ч, что вдвое превышает уровень для режима горения с паром.

На рисунке 4.30 показаны зависимости q , W , $\{CO\}$, $\{NO_x\}$ и температуры внешнего факела T от расхода воздуха и топлива при характерных режимах в области II (Рисунок 4.28). С увеличением расхода топлива (при постоянном расходе воздуха) увеличиваются размеры высокотемпературной зона факела (профиль температуры становится шире, см. рисунок 4.30-д), что приводит к увеличению $\{NO_x\}$, при этом в продуктах сгорания снижается $\{CO\}$ (Рисунок 4.30-в) и увеличивается q (Рисунок 4.30-а). Максимальная температура в факеле достигает 1450 °С (Рисунок 4.30-д), что в среднем на 100 градусов выше, чем в режимах с подачей пара. Это является основной причиной высокого уровня $\{NO_x\}$ в режимах с подачей воздуха, и еще раз подтверждает эффективность использования пара.

Таким образом, при сжигании дизельного топлива в струе с воздухом минимальные значения $\{NO_x\}$ в 1,5 раза превышают значения в режиме с паром, но при этом в обоих

случаях наблюдаются высокие значения $\{CO\}$. А в области минимальных $\{CO\}$ значения $\{NO_x\}$ на 30 % выше в режиме с воздухом, при этом коэффициент полноты сгорания топлива в режиме с воздухом на 2,5% ниже, чем с паром, что подтверждает преимущества технологии сжигания с использованием пара.

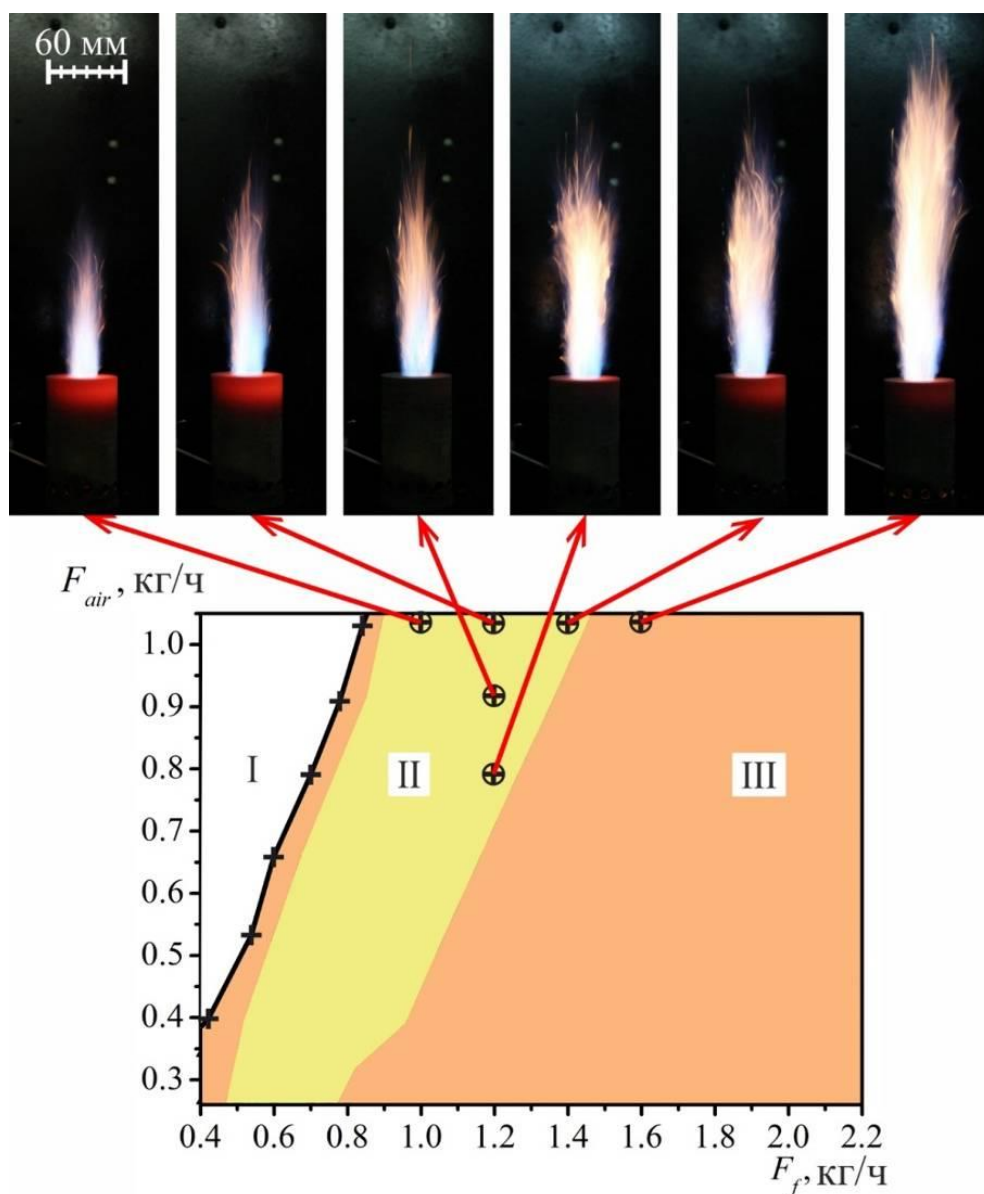


Рисунок 4.28 – Карта режимов горения при сжигании дизельного топлива в струе воздуха с характерным видом внешнего факела при $T_a = (260 \pm 10)^\circ C$:
 I – срыв пламени (символами «+» обозначены режимы, при которых зафиксирован срыв пламени); II – область устойчивого горения (измерительная область);
 III – пламя с высоким содержанием CO в продуктах горения ($[CO] > 500$ ppm)

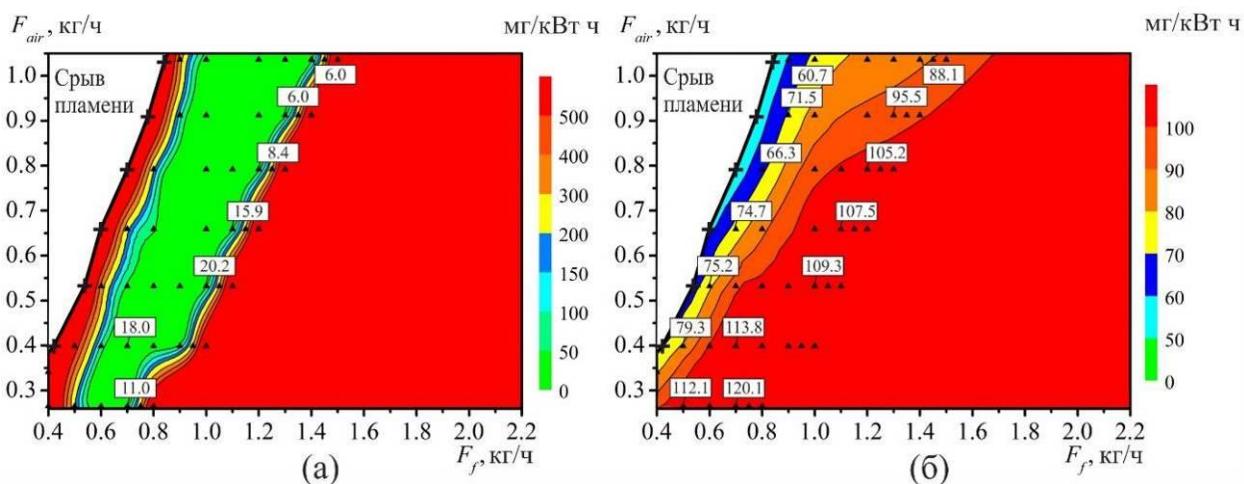


Рисунок 4.29 – Карта $\{CO\}$ (а) и $\{NO_x\}$ (б) в продуктах сгорания ($T_a = (260 \pm 10)^\circ C$), символами \blacktriangle обозначены исследуемые режимы, изолинии построены на основе сплайн-интерполяции экспериментальных данных

Предложенная конструкция горелочного устройства обеспечивает возможность сжигания загрязненных, в том числе, механическими примесями и водой, некондиционных жидких углеводородов, таких как, отработанное масло, отходы нефтедобычи и нефтепереработки, с высокой энергоэффективностью.

Полученные результаты востребованы для создания энергоэффективных и экологически безопасных технологий утилизации некондиционных жидких углеводородов с получением тепловой энергии, а также верификации математической модели и численного моделирования процесса.

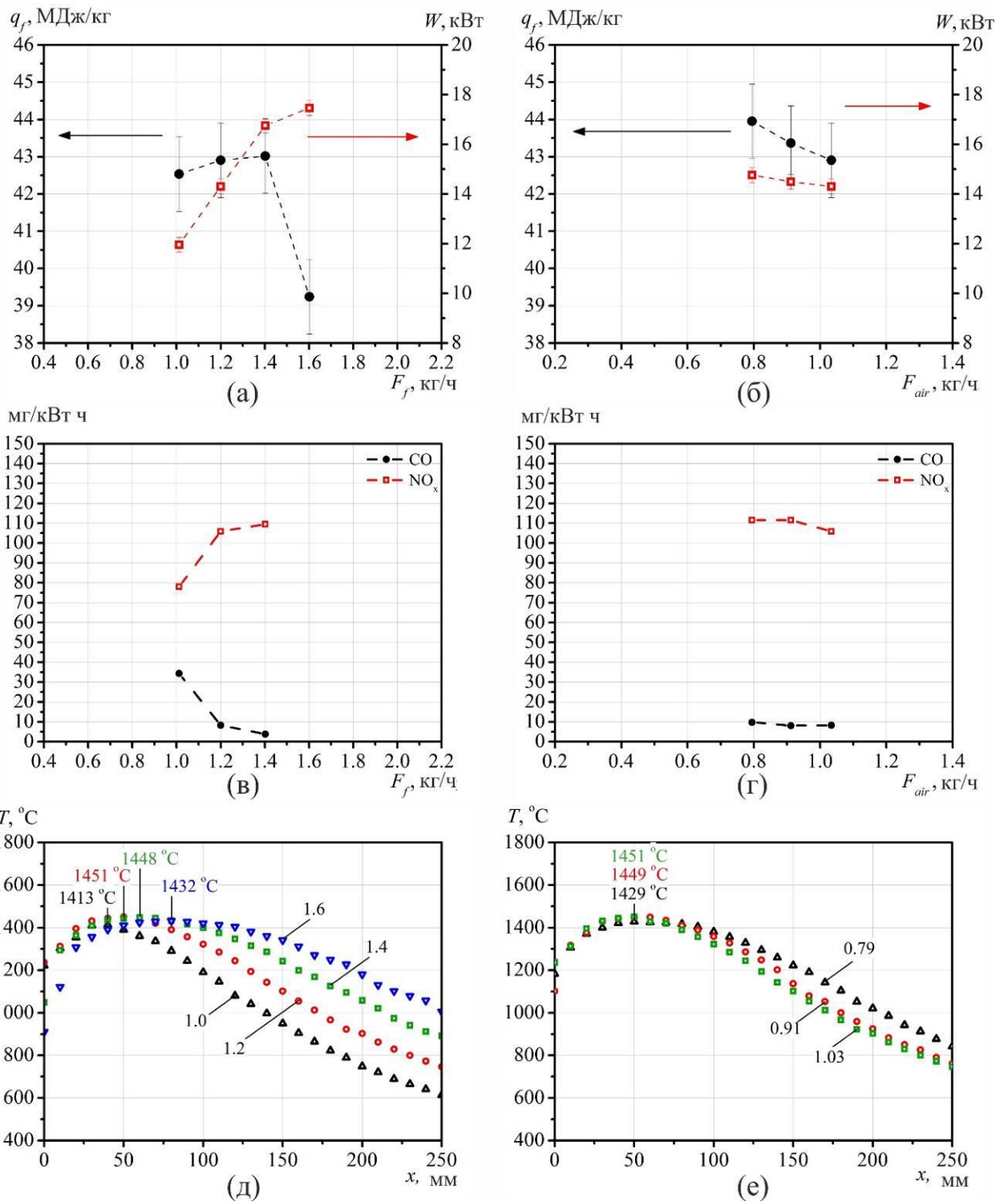


Рисунок 4.30 – Зависимости q , W , $\{CO\}$, $\{NO_x\}$ и температуры внешнего факела T ($T_a = (260 \pm 10)^\circ C$): от расхода топлива F_f (кг/ч) при постоянном расходе воздуха ($F_{air} = 0,8$ кг/ч) – (а), (в), (д) соответственно; от расхода воздуха F_{air} (кг/ч) при постоянном расходе топлива ($F_f = 1,4$ кг/ч) – (б), (г), (е), соответственно

ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 4

Впервые экспериментально исследованы характеристики сжигания жидких углеводородов при распылении струей перегретого водяного пара в перспективном горелочном устройстве в зависимости от режимных параметров, получены следующие основные результаты:

- проведена опытная оптимизация режимных параметров горелочного устройства и достигнуто устойчивое воспламенение жидких углеводородов при распылении струей перегретого водяного пара или воздуха;
- впервые найдены зависимости основных теплотехнических и экологических показателей горелки от температуры и расхода перегретого водяного пара и расхода жидкого топлива;
- установлено, что температура перегретого водяного пара в исследуемом диапазоне значений 150-550 °С оказывает слабое влияние на процесс сжигания дизельного топлива;
- получены распределения температуры в факеле, проанализировано влияние режимных параметров на уровень температуры; установлено, что увеличение расхода пара приводит к значительному снижению температуры пламени благодаря увеличению теплоемкости горючей смеси при наличии водяного пара, что способствует снижению производства оксидов азота;
- построены карты режимов горения дизельного топлива и отработанного машинного масла в струе перегретого водяного пара и воздуха; установлены границы режимов срыва горения и режимов с высоким содержанием монооксида углерода в продуктах сгорания;
- найдена эмпирическая зависимость, позволяющая для заданной мощности горелки определить значения расхода пара и топлива, обеспечивающие минимальные выбросы СО;
- на примере дизельного топлива и отработанного машинного масла определены режимные параметры (массовая доля пара в смеси с топливом 36-38%), при которых обеспечивается высокая полнота сгорания топлива (более 97%), а показатели по содержанию в продуктах сгорания монооксида углерода и оксидов азота соответствуют

по нормативу EN 267 третьему классу: по CO – 50 мг/кВт ч и ниже (до 20 мг/кВт ч), по NO_x – менее 90 мг/кВт ч;

– показано, что по сравнению с технологией сжигания с подачей струи нагретого воздуха технология паровой газификации обладает существенными экологическими преимуществами: в режиме с производством CO на уровне 20 мг/кВт ч она позволяет на 30% снизить производство оксидов азота при высокой энергоэффективности;

– проведена правовая защита РИД – получен патент РФ № 2684300 (2019) на исследуемое горелочное устройство.

– обеспечена возможность эффективного и экологичного сжигания некондиционных жидких углеводородов при малой мощности горелки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен и реализован перспективный способ сжигания некондиционных жидких углеводородов в горелочном устройстве с распылением струей перегретого водяного пара.

Разработано и создано оригинальное жидкотопливное горелочное устройство распылительного типа, практическим преимуществом которого служит отсутствие контакта жидкого топлива с форсункой и непосредственное распыление топлива высокоскоростной струёй пара, что позволяет использовать загрязненное топливо и отходы. На ряд новых технических решений получены патенты РФ.

Применительно к созданному горелочному устройству выполнено экспериментальное исследование характеристик газочапельного потока при распылении жидких углеводородов струей перегретого водяного пара или воздуха. С использованием современных бесконтактных методов в широком диапазоне режимных параметров получены данные о структуре двухфазного потока, дисперсном составе, пространственном распределении скоростей фаз. Определен преимущественный размер идентифицированных капель топлива, составляющий 10-20 мкм для дизельного топлива и отработанного машинного масла. Установлено, что изменения расхода несущей фазы, её температуры до прохождения форсунки, отношения расходов газа и топлива оказывают слабое влияние на дисперсный состав. Визуализирована структура течения несущей фазы, имеющая на выходе из форсунки вид, характерный для сверхзвуковой затопленной струи (скорость на выходе из форсунки достигает 458 м/с). Показано, что угол раскрытия высокоскоростной струи несущей фазы, составляющий около 20°, позволяет организовать сконцентрированный газочапельный поток с дальнейшим формированием компактного и устойчивого факела.

Впервые экспериментально исследованы тепловые и экологические характеристики горения жидких углеводородов в высокоскоростной струе перегретого водяного пара или воздуха в широком диапазоне режимов работы созданного горелочного устройства.

Получены распределения температуры в факеле, проанализировано влияние режимных параметров на уровень температуры. Установлено, что увеличение расхода пара приводит к значительному снижению температуры пламени благодаря увеличению теплоемкости горючей смеси при наличии водяного пара, что способствует снижению

производства оксидов азота.

Изучены основные характеристики сажевых частиц, образующихся при сжигании дизельного топлива в горелочном устройстве с подачей в зону горения струи перегретого водяного пара или струи воздуха. Их преимущественный размер на выходе из горелочного устройства составляет 40 ± 15 нм, а концентрация достигает 10^8 см⁻³ и понижается до $5 \cdot 10^6$ см⁻³ в продуктах сгорания при массовом содержании 35 мг/м³ (что эквивалентно 0,1% массы углерода топлива и свидетельствует о высокой полноте сгорания).

В широком диапазоне режимных параметров измерены тепловая мощность горелочного устройства и концентрации СО и NO_x в продуктах реакции. Полнота сгорания топлива в режимах с подачей пара достигает 98%. Показано, что исследуемый способ сжигания жидкого топлива с запасом удовлетворяет наиболее жестким существующим нормативам (третий класс EN 267): по количеству NO_x на единицу тепловой энергии показатели в полтора раза ниже нормативного уровня для режимов с низким производством СО.

Найдена эмпирическая зависимость, позволяющая для заданной мощности горелки определить значения расхода пара и топлива, обеспечивающие минимальные выбросы СО.

Проведено сравнение теплотехнических и экологических показателей сжигания дизельного топлива в режимах горения в струе перегретого водяного пара и в струе нагретого воздуха. Показаны существенные преимущества сжигания с использованием пара: в области минимальных {СО} < 20 мг/кВт ч значения {NO_x} оказываются на 30 % выше в режиме с воздухом.

Построены карты режимов горения дизельного топлива и отработанного машинного масла в струе перегретого водяного пара и воздуха. Установлены границы режимов срыва горения и режимов с высоким содержанием монооксида углерода в продуктах сгорания.

Установлено, что температура перегретого водяного пара (или воздуха) оказывает слабое влияние на показатели горения исследуемых видов горючего в горелочном устройстве.

В результате выполненного комплексного экспериментального исследования научно обоснован перспективный способ энергоэффективного сжигания

некондиционных видов жидкого углеводородного топлива и производственных отходов в струе перегретого водяного пара, обеспечивающий низкое содержание монооксида углерода, оксидов азота и сажи в продуктах сгорания, удовлетворяющее самым жестким экологическим нормативам.

Полученные экспериментальные результаты имеют перспективы дальнейшего использования при создании инновационных экологически безопасных теплоэнергетических технологий утилизации горючих отходов, а также при численном моделировании.

Результаты работы внедрены в учебный процесс на базе Новосибирского государственного технического университета для проведения практических занятий по курсу «Физика горения» на кафедре тепловых электрических станций факультета энергетики. Результаты работы внедрены и используются инжиниринговым предприятием ООО «ЗиО-КОТЭС» при CFD-моделировании процессов горения жидких топлив для оценки экологических характеристик и эффективности сжигания жидких углеводородов, усовершенствования способов их сжигания и повышения технико-экономических и экологических показателей (см. Приложение Г).

Высокая оценка полученных результатов подтверждается рядом премий и наград (см. Приложение Д).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хзмаян, Д. М. Теория горения и топочные устройства / Д. М. Хзмаян, Я. А. Каган. – Москва: Энергия, 1976. – 484 с.
2. Карабин, А. И. Сжигание жидкого топлива в промышленных установках / А. И. Карабин. – Москва: Metallurgizdat, 1957. – 260 с.
3. Кнорре, Г. Ф. Теория топочных процессов / Г. Ф. Кнорре, К. М. Арефьев, А. Г. Блох [и др.] – Москва: Энергия, 1966. – 491 с.
4. Терехов, В. И. Тепломассоперенос и гидродинамика в газочапельных потоках / В. И. Терехов, М. А. Пахомов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2008. – 284 с.
5. Danis, A. M. Droplet size and equivalence ratio effects on spark ignition of monodisperse N-heptane and methanol sprays / A. M. Danis, I. Namer, N. P. Cernansky // Combustion and Flame. – 1988. – Vol. 74, № 3. – P. 285–294. DOI: [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(88\)90074-0](https://doi.org/10.1016/0010-2180(88)90074-0).
6. Лебедев, О. Н. Водотопливные эмульсии в судовых дизелях / О. Н. Лебедев, В. А. Сомов, В. Д. Сисин. – Ленинград : Судостроение, 1988. – 108 с.
7. Piltch, M. Use of breakup time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration-induced breakup of a liquid drop / M. Piltch, C. A. Erdman // Intern. J. of Multiphase Flow. – 1987. – Vol. 13, № 6. – P. 741–757. DOI: [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(87\)90063-2](https://doi.org/10.1016/0301-9322(87)90063-2).
8. Ghahremani, A. R. Experimental investigation of spray characteristics of a modified biodiesel in a direct injection combustion chamber / A. R. Ghahremani, M. H. Saidi, A. Hajinezhad, A. A. Mozafari // Experimental and Thermal Fluid Science. – 2017. – Vol. 81. – P. 445–453. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.09.010>
9. Varga, C. M. Initial breakup of a small-diameter liquid jet by a high-speed gas stream / C. M. Varga, J. C. Lasheras, E. J. Hopfinger // J. of Fluid Mechanics. – 2003. – Vol. 479. – P. 405–434. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112003006724>.
10. Dryer, F. L. Water addition to practical combustion systems – concepts and applications / F. L. Dryer // Symp. (Intern.) on Combustion. – 1977. – Vol. 16, № 1. – P. 279–295. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(77\)80332-9](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(77)80332-9).

11. Skalska, K. Trends in NO_x abatement: a review / K. Skalska, J. S. Miller, S. Ledakowicz // *Science of Total Environment*. – 2010. – Vol. 408, № 19. – P. 3976–3989. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2010.06.001](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.06.001).
12. Зельдович, Я. Б. Окисление азота при горении / Я. Б. Зельдович, П. Я. Садовников, Д. А. Франк-Каменецкий. – Москва; Ленинград: АН СССР, 1947. – 150 с.
13. Ефремов, П. К. К вопросу о дополнительном питании тепловых двигателей водой / П. К. Ефремов // *Защита воздушного бассейна от загрязнения токсичными выбросами транспортных средств : докл. Всерос. науч. конф.* – Харьков, 1977. – Ч. 1. – С. 221–261.
14. Чудаков, Е. А. Пути повышения экономичности автомобиля / Е. А. Чудаков. – Москва: Изд-во Акад. наук СССР, 1948. – 168 с.
15. Ballester, J. M. Combustion characteristics of heavy oil-water emulsions / J. M. Ballester, N. Fueyo, C. Dopazo // *Fuel*. – 1996. – Vol. 75, № 6. – P. 695–705. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(95\)00309-6](https://doi.org/10.1016/0016-2361(95)00309-6).
16. Иванов, В. М. Топливные эмульсии / В. М. Иванов. – Москва: Изд-во Акад. наук СССР, 1962. – 216 с.
17. Nadeem, M. Diesel engine performance and emission evaluation using emulsified fuels stabilized by conventional and gemini surfactants / M. Nadeem, C. Rangkuti, K. Anuar [et al.] // *Fuel*. – 2006. – Vol. 85, № 14/15. – P. 2111–2119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.03.013>.
18. Wang, L. P. An analysis of the combustion characters and the mechanism of oil-consumption economy for diesel engines using water-blended oil / L. P. Wang, W. B. Fu // *Fuel Processing Technology*. – 2001. – Vol. 72, № 1. – P. 47–61. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(01\)00183-7](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(01)00183-7).
19. Samec, N. Numerical and experimental study of water/oil emulsified fuel combustion in a diesel engine / N. Samec, B. Kegl, R. W. Dibble // *Fuel*. – 2002. – Vol. 81, № 16. – P. 2035–2044. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(02\)00135-7](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(02)00135-7).
20. Armas, O. Characterization of light duty Diesel engine pollutant emissions using water-emulsified fuel / O. Armas, R. Ballesteros, F. J. Martos, J. R. Agudelo // *Fuel*. – 2005. – Vol. 84, № 7. – P. 1011–1018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.11.015>.
21. Бабкин, В. С. Влияние паров воды на нормальную скорость пламени метановоздушной смеси при высоких давлениях / В. С. Бабкин, А. В. Вьюн // *Физика горения и взрыва*. – 1971. – № 3. – С. 392–395.

22. Энциклопедический словарь Ф. А Брокгауза и И. А. Ефрона [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://gatchina3000.ru/brockhaus-and-efron-encyclopedic-dictionary/> (дата обращения: 08.05.2019).
23. Pereira, E. G. Sustainable energy: a review of gasification technologies / E. G. Pereira, J. N. Silva, J. L. Oliveira, C. S. Machado // Renewable a. Sustainable Energy Reviews. – 2012. – Vol. 16, № 7. – P. 4753–4762. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.04.023>.
24. Higman, C. Gasification / C. Higman, M. Van der Burgt. – Oxford: Gulf Prof. Publ., 2008. – 456 p.
25. Jones, J. C. Hydrocarbon process safety / J. C. Jones. – Caithness: Whittles Publ., 2003. – 304 p.
26. Liu, K. Hydrogen and syngas production and purification technologies / K. Liu, Ch. Song, V. Subramani. – New York: J. Wley & Sons, 2010. – 564 p.
27. Rezaiyan, J. Gasification technologies: a primer for engineers and scientists / J. Rezaiyan, N. Cheremisinoff. – Boca Raton: CRC Press, 2005. – 360 p.
28. Berkowitz, N. Fossil hydrocarbons: chemistry and technology / N. Berkowitz. – San Diego: Acad. Press, 1997. – 351 p.
29. Попов, С. К. Процессы и установки газификации топлива : учеб. пособие / С. К. Попов, В. А. Ипполитов. – Москва: Изд-во МЭИ, 2016. – 47 с.
30. Лавров, Н. В. Введение в теорию горения и газификации топлива / Н. В. Лавров, А. П. Шурыгин. – Москва: Изд-во Акад. наук СССР, 1962. – 215 с.
31. Рябцев, И. И. Производство газа из жидких топлив для синтеза аммиака и спиртов / И. И. Рябцев, А. Е. Волков. – Москва : Химия, 1968. – 208 с.
32. Андреев, Ф. А. Технология связанного азота / Ф. А. Андреев, С. И. Каргин, Л. И. Козлов, В. Ф. Приставко. – Москва: Химия, 1974. – 464 с.
33. Флоров, С. Ф. Газогенераторы и газификация топлива / С. Ф. Флоров. – Москва; Ленинград: Гос. изд-во, 1927. – 178 с.
34. Копытов, В. В. Газификация конденсированных топлив: ретроспективный обзор, современное состояние дел и перспективы развития / В. В. Копытов. – Москва: Инфра-Инженерия, 2012. – 504 с.
35. Копытов, В. В. Газификация твердых топлив: ретроспективный обзор, современное состояние дел и перспективы развития / В. В. Копытов // Альтернативная энергетика и экология. – 2011. – № 6. – С. 29–78.

36. Soo, S. L. A steam process for coal gasification / S. L. Soo, R. T. Gibbs // Energy. – 1979. – Vol. 4, № 2. – P. 357–364. DOI: [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(79\)90135-X](https://doi.org/10.1016/0360-5442(79)90135-X).
37. [Murthy, B. N.](#) Petroleum coke gasification: a review / B. N. [Murthy](#), A. N. [Sawarkar](#), N. A. [Deshmukh](#) [et al.] // Canad. J. of Chem. Engineering. – 2014. – Vol. 92, № 3. – P. 441–468. DOI: <https://doi.org/10.1002/cjce.21908>.
38. [Okajima, I.](#) Gasification and hydrogen production from waste biomass with high pressure superheated steam / I. [Okajima](#), T. [Sako](#) // Advanced Materials Research. – 2011. – Vol. 222. – P. 305–308. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.222.305>.
39. Ahmed, T. Y. Mathematical and computational approaches for design of biomass gasification for hydrogen production: a review / T. Y. Ahmed, M. M. Ahmad, S. Yusup [et al.] // Renewable a. Sustainable Energy Rev. – 2012. – Vol. 16, № 4. – P. 2304–2315. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.035>.
40. Kang, M. S. Effect of staged combustion on low NO_x emission from an industrial-scale fuel oil combustor in South Korea / M. S. Kang, H. J. Jeong, M. M. Farid, J. Hwang // Fuel. – 2017. – Vol. 210. – P. 282–289. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.08.065>.
41. Tan, P. Effect of burner tilt angel on the combustion and NO_x emission characteristics of a 700 MWe deep-air-staged tangentially pulverized-coal-fired boiler / P. Tan, D. Tian, Q. Fang [et al.] // Fuel. – 2017. – Vol. 196. – P. 314–324. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.02.009>.
42. Zhao, R. Comparative study on different water/steam injection layouts for fuel reduction in a turbocompound diesel engine / R. Zhao, Zh. Zhang, W. Zhuge [et al.] // Energy Conversion a. Management. – 2018. – Vol. 171. – P. 1487–1501. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.084>.
43. Parlak, F. New method to reduce NO_x emissions of diesel engines: electronically controlled steam injection system / A. Parlak, V. Ayhan, Y. Üst [et al.] // J. of Energy Inst. – 2012. – Vol. 85, № 3. – P. 135–139.
44. Kökkülünk, G. Theoretical and experimental investigation of steam injected diesel engine with EGR / G. Kökkülünk, A. Parlak, V. Ayhan [et al.] // Energy. – 2014. – Vol. 74. – P. 331–339. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.06.091>.
45. Kökkülünk, G. The effects of design parameters on performance and NO emissions of steam-injected diesel engine with exhaust gas recirculation / G. Kökkülünk, G. Gonca, A. Parlak // Arab. J. of Science a. Engineering. – 2014. – Vol. 39, № 5. – P. 4119–4129. DOI:

10.1007/s13369-014-0984-z.

46. Kökkülünk, G. Theoretical and experimental investigation of diesel engine with steam injection system on performance and emission parameters / G. Kökkülünk, G. Gonca, V. Ayhan [et al.] // *Appl. Thermal Engineering*. – 2013. – Vol. 54, № 1. – P. 161–170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.01.034>.
47. Gonca, G. Comparison of steam injected diesel engine and Miller cycled diesel engine by using two zone combustion model / G. Gonca, B. Sahin, Y. Ust [et al.] // *J. of Energy Inst.* – 2015. – Vol. 88, № 1. – P. 43–52. DOI: [10.1016/j.joei.2014.04.007](https://doi.org/10.1016/j.joei.2014.04.007).
48. Gonca, G. The effects of steam injection on the performance and emission parameters of a Miller cycle diesel engine / G. Gonca, B. Sahin, A. Parlak [et al.] // *Energy*. – 2014. – Vol. 78. – P. 266–275. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.10.002>.
49. Gonca, G. Investigation of the effects of steam injection on performance and NO emissions of a diesel engine running with ethanol–diesel blend / G. Gonca // *Energy Conversion a. Management*. – 2014. – Vol. 77. – P. 450–457. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.09.031>.
50. Zhu, S. Thermodynamic and experimental researches on matching strategies of the pre-turbine steam injection and the Miller cycle applied on a turbocharged diesel engine / S. Zhu, Sh. Liu, Sh. Qu, K. Deng // *Energy*. – 2017. – Vol. 140, № 1. – P. 488–505. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.094>.
51. Parlak, A. Investigation of the effects of steam injection on performance and emissions of a diesel engine fuelled with tobacco seed oil methyl ester / A. Parlak, V. Ayhan, İ. Cesur, G. Kökkülünk // *Fuel Processing Technology*. – 2013. – Vol. 116. – P. 101–109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.05.006>.
52. Mohapatra, D. Effect of steam injection and FeCl₃ as fuel additive on performance of thermal barrier coated diesel engine / D. Mohapatra, R. K. Swain, Sh. P. Jena [et al.] // *Sustainable Environment Research*. – 2018. – Vol. 28, № 5. – P. 247–255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.serj.2018.03.004>.
53. Patnaik, P. P. Experimental investigation on CI engine performance using steam injection and ferric chloride as catalyst / P. P. Patnaik, S. K. Acharya, D. Padhi, U. K. Mohanty // *Engineering Science a. Technology*. – 2016. – Vol. 19, № 4. – P. 2073–2080. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2016.07.006>.
54. Williams, A. *Combustion of liquid fuel sprays* / A. Williams. – Oxford: Butterworth-

Heinemann, 1990. – 300 p.

55. Farokhipour, A. A numerical study of NO_x reduction by water spray injection in a gas turbine combustion chambers / A. Farokhipour, E. Hamidpour, E. Amani // *Fuel*. – 2018. – Vol. 212. – P. 173–176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.033>.
56. Le Cong, T. Experimental and detailed modeling study of the effect of steam on the kinetics of combustion of hydrogen and natural gas, impact on NO_x / T. Le Cong, P. Dagaut // *Energy a. Fuels*. 2009. – Vol. 23, № 2. – P. 725–734. DOI: 10.1021/ef800832q.
57. Lee, M. C. Experimental study on the effect of N₂, CO₂, and steam dilution on the combustion performance of H₂ and CO synthetic gas in an industrial gas turbine / M. C. Lee, S. B. Seo, J. Yoon [et al.] // *Fuel*. – 2012. – Vol. 102. – P. 431–438. DOI: [10.1016/j.fuel.2012.05.028](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.05.028).
58. Pugh, D. G. Dissociative influence of H₂O vapour/spray on lean blowoff and NO_x reduction for heavily carbonaceous syngas swirling flames / D. G. Pugh, P. J. Bowen, R. March [et al.] // *Combustion a. Flame*. – 2017. – Vol. 177. – P. 37–38. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2016.11.010>.
59. Kilani, N. Performance analysis of two combined cycle power plants with different steam injection system design / N. Kilani, T. Khir, A. B. Brahim // *Intern. J. of Hydrogen Energy*. – 2017. – Vol. 42, № 17. – P. 12856–12864. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.233>.
60. Renzi, M. Influence of the syngas feed on the combustion process and performance of a micro gas turbine with steam injection / M. Renzi, C. Riolfi, M. Baratieri // *Energy Procedia*. – 2017. – Vol. 105. – P. 1665–1670. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.543>
61. Renzi, M. Syngas feed of micro gas turbines with steam injection: effects on performance, combustion and pollutants formation / M. Renzi, F. Patuzzi, M. Baratieri // *Appl. Energy*. – 2017. – Vol. 206. – P. 697–707. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.08.214.
62. Furuhashi, T. [Effect of steam addition pathways on NO reduction characteristics in a can-type spray combustor](#) / T. Furuhashi, T. Kawata, N. Mizukoshi, M. Arai // *Fuel*. – 2010. – Vol. 89, № 10. – P. 3119–3126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.05.018>.
63. Jozsa, V. Flame emission spectroscopy measurement of a steam blast and air blast burner / V. Jozsa, K. Sztanko // *Thermal Science*. – 2017. – Vol. 21, № 2. – P. 1021–1030. DOI: 10.2298/TSCI150616062J.

64. Алексеенко, С. В. Нанокластерное инициирование горения некондиционных углеводородных топлив / С. В. Алексеенко, С. Э. Пащенко, В. В. Саломатов // Инженерно-физический журнал. – 2010. – Т. 83, № 4. – С. 682–693.
65. Пат. CN102052669, МПК F23D11/00 ; F23D11/36 ; F23D11/44. Liquid fuel burner / Zhanggeng S.; Shengji L. ; заявитель Su C.-G. – № CN20091212312 20091104 ; опубл. 11.05.2011.
66. Пат. DE102009043681, МПК F23D11/44. Exchanger and provided upstream to evaporation and mixing chamber for heating air, where heat exchanger is formed as exhaust air heat exchanger / Ritter K., Klausmann W. ; заявитель Viessmann Werke Kg. – № DE20091043681 20091001 ; опубл. 07.04.2011.
67. Пат. CN201836886, МПК F23D11/00 ; F23D11/44. Liquid fuel burner / Qingbai S. ; заявитель Shanghai Yinghuifei New Energy Technology Co., Ltd. – № CN20102260291U 20100715 ; опубл. 18.05.2011.
68. Пат. CN101968218, МПК F23D11/00 ; F23D11/44. Liquid fuel burner / Yongan L. ; заявитель Yongan L. – № CN20101540436 20101031 ; опубл. 09.02.2011.
69. Пат. DE102011006370, МПК F23D3/40; F23D5/00. Burner for burning liquid fuel e.g. petrol, has vaporizer element for vaporizing liquid fuel, and grid holding flame core of combustion flame from vaporizer element, where flame is generated during combustion of vaporized fuel / Pannwitz T., Schwanecke M., Smigiel B. ; заявитель Webasto Ag. – № DE20111006370 20110329 ; опубл. 04.10.2012.
70. Пат. CN202195479, МПК F23D11/00 ; F23D11/44. Liquid fuel gasification burner / Mingqing J. ; заявитель Mingqing J. – № CN20112183526U 20110531 ; опубл. 18.04.2012.
71. Пат. RU139611, МПК F23D5/04. Горелочное устройство теплогенератора / Ковтун П. П. ; заявитель и патентообладатель Ковтун П. П. – № 2013112377/06 ; заявл. 19.03.2013 ; опубл. 20.04.2014, Бюл. № 11.
72. Пат. TW201116779, МПК F23D5/18 ; F24C5/02. Burner of liquid fuel / Su C.-G., Lin S.-J. ; заявитель Su C.-G. – № TW20090137368 20091104 ; опубл. 16.05.2011.
73. Пат. CN104075315, МПК F23D11/00; F23D11/36; F23D11/44. Liquid fuel gasification burner / Zou X., Lu Y., Xie M. ; заявитель Zou X. – № CN20141292827 20140625 ; опубл. 01.10.2014.
74. Пат. CN103256635, F23D11/00; F23D11/44 ; F24C5/12. Liquid fuel vaporization burner / Zhou Y. ; заявитель Zhou Y. – № CN20131166576 20130423 ; опубл. 21.08.2013.

75. Пат. KR101498093, МПК F23D11/44 ; F24C5/12 ; F24C5/16 ; F24C5/18. Liquid outflowing type burner having control part for supplying fuel / Kim S.H. ; заявитель Kovea Co., Ltd. – № KR20140014676 20140210 ; опубл. 03.03.2015.
76. Пат. CN102966947, МПК F23D11/00; F23D11/44. Liquid fuel gasification burner / Li Y., Li X. ; заявитель Li X. – № CN20111288571 20110831 ; опубл. 13.03.2013.
77. Пат. CN204574031, МПК F23D11/00 ; F23D11/44. Liquid fuel burner / Tian W., Tang X.G., Tian Y., Tian F. ; заявитель Tian W. – № CN20152114837U 20150211 ; опубл. 19.08.2015.
78. Пат. CN203203079, F23D11/00 ; F23D11/44; F24C5/12. Liquid fuel vaporization burner / Zhou Y. ; заявитель Zhou Y. – № CN20132245121U 20130423 ; опубл. 18.09.2013.
79. Пат. CN106104157, МПК F23D5/00; F23D5/04; F23D5/12. Evaporator burner for a mobile heating device operated with liquid fuel / Dell V., Mosl K., Sommerer S. ; заявитель Webasto Se. – № CN2015815006 20150311 ; опубл. 09.11.2016.
80. Пат. RU2523517, МПК F23D17/00 ; F23R3/28. Устройство горелки для текучего топлива и способ изготовления устройства горелки / Бётчер А., Кано В.М., Клуге А., Кригер Т., Старинг С., Вёрц У. ; заявитель и патентообладатель Сименс Акциенгезелльшафт. – № 2011141844/06 ; заявл. 11.03.2010 ; опубл. 20.07.2014, Бюл. № 20.
81. Пат. CN202581308, МПК F23D11/24 ; F23D11/36. Environment-friendly liquid fuel burner / Yang L.; Wang A. ; заявитель Qingyuan Jingwang Environmental Prot. Equipment Co., Ltd. – № CN20122273824U 20120604 ; опубл. 05.12.2012.
82. Пат. KR101498095, МПК F23D11/44 ; F24C5/12 ; F24C5/16 ; F24C5/18. Liquid outflowing type burner having control part for supplying fuel / Kim S. H. ; заявитель Kovea Co., Ltd. – № KR20140014677 20140210 ; опубл. 03.03.2015.
83. Пат. CN205825016, МПК F23D11/00 ; F23D11/44. Liquid fuel high temperature gasification burner / заявитель Gao S., Liu G. – № CN20162774701U 20160722 ; опубл. 21.12.2016.
84. Пат. CN102966948, МПК F23D11/00 ; F23D11/44. Liquid fuel gasification device and liquid fuel burner / Feng M., Liu J., Xing D., Ren J., Yang Y. ; заявитель Chongqing Dawei Energy Chemical Co., Ltd. – № CN20121541801 20121214 ; опубл. 13.03.2013.
85. Пат. CN205119156, МПК F23D5/18 ; F24C5/02. Liquid fuel burner that vaporizes / Chen X. ; заявитель Chen X. – № CN20152632838U 20150820 ; опубл. 30.03.2016.

86. Пат. KR20170052186, МПК F23D11/02; F23D11/36; F23D11/42. Liquid fuel burner / Oh B.K. ; заявитель Oh B.K. – № KR20150154343 20151104 ; опубл. 12.05.2017.
87. Пат. RU2432530, МПК F23D17/00. Горелка для сжигания газообразного и/или жидкого топлива с пониженным выбросом окислов азота / Королев П. В., Валувев Ю. А., Соколов С. Ю., Цветков Е. Н. ; заявитель и патентообладатель Науч.-производств. центр энергет. оборудования. – № 2010116583/06; заявл. 27.04.2010 ; опубл. 27.10.2011, Бюл. № 30.
88. Pat. WO9301449. A method and apparatus for burning liquid fuel in the presence of water / Anderson J. H., Hedstroem I. O., F23L7/00; F23L7/00; 21.01.1993.
89. Щукин, А. А. Промышленные печи и газовое хозяйство заводов / А. А. Щукин. – Москва : Энергия. 1973. – 224 с.
90. Пат. RU2040731, F23C5/06. Горелочное устройство для газификации топлива / Ваганов Е. П., Челебий А. Н., Асонов Б. Н., Попов Б. П., Харламов А. А., Голубев В. П., Петрова Л. К. ; заявитель и патентообладатель Науч.-производств. фирма "ЭТОС". – № 94015728/06 ; заявл. 16.05.1994 ; опубл. 25.07.1995.
91. Pat. US3804579. Fluid fuel burner / Wilhelm G., F23D 11/18, F23D 11/20; 16.04.1974.
92. Смирнов, В. П. Котельные установки : учебник / В. П. Смирнов. – Москва; Ленинград: Госэнергоиздат, 1959. – 304 с.
93. Пат. RU2219435, F23L7/00. Способ бесплажного сжигания топлива / Вигриянов М. С., Саломатов В. В., Алексеенко С. В.; заявитель и патентообладатель Ин-т теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сиб. отд-ния Рос. акад. наук (ИТ СО РАН). – № 2002103813 ; заявл. 11.02.2002 ; опубл. 20.12.2003.
94. Пат. RU2523591, F23D11/44 ; F23C99/00. Горелочное устройство / Вигриянов М. С., Алексеенко С. В., Ануфриев И. С., Шарыпов О. В.; заявитель и патентообладатель Ин-т теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сиб. отд-ния Рос. акад. наук (ИТ СО РАН). – № 2013116229/06 ; заявл. 09.04.2013 ; опубл. 20.07.2014, Бюл. № 20.
95. Пат. РФ № 2450207, F23C99/00; F23G7/05 ; F23D11/20; F23L7/00. Горелочное устройство / Вигриянов М. С. ; заявитель и патентообладатель Ин-т теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сиб. отд-ния Рос. акад. наук (ИТ СО РАН). – № 2010144214/06 ; заявл. 28.10.2010 ; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 13.
96. Мухаметкулов, В. А. Тенденции развития рынка котлов малой мощности в России / В. А. Мухаметкулов, А. Л. Наумов // Новости теплоснабжения. – 2001. – № 9. – С. 30–

39.

97. Теплоэнергетика и централизованное теплоснабжение России в 2015-2016 годы : информ.-аналит. докл. / Рос. энергет. агентство Минэнерго России. – Москва, 2018. – 137 с.

98. Алексеенко, С. В. Сажепаровый режим горения жидких углеводородов: распределение скорости в факеле горелки / С. В. Алексеенко, И. С. Ануфриев, М. С. Вигриянов [и др.] // Теплофизика и аэромеханика. – 2014. – Т. 21, № 3. – С. 411–414.

99. Алексеенко, С. В. Характеристики процесса сжигания дизельного топлива в горелочном устройстве с подачей струи перегретого водяного пара / С. В. Алексеенко, И. С. Ануфриев, М. С. Вигриянов, Е. П. Копьев, О. В. Шарыпов // Физика горения и взрыва. – 2016. – Т. 52, № 3. – С. 37–44.

100. Anufriev, I. S. Study of flame characteristics during liquid hydrocarbons combustion with steam gasification / I. S. Anufriev, E. P. Kopyev, E. L. Loboda // Proc. of SPIE. – 2014. – Vol. 9292, art. 929226. – P. 1–6. DOI:10.1117/12.2086623.

101. Anufriev, I. S. Thermography of flame during diesel fuel combustion with steam gasification / I. S. Anufriev, S. S. Arsenyev, M. V. Agafontsev [et al.] // J. of Physics. Conf. Ser. – 2017. – Vol. 925, art. 012014. – P. 1–6.

102. Пат. RU2579298, F23D5/04 ; F23C99/00. Горелочное устройство / Вигриянов М. С., Алексеенко С. В., Ануфриев И. С., Шарыпов О. В. ; заявитель и патентообладатель Ин-т теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сиб. отд-ния Рос. акад. наук (ИТ СО РАН). – № 2015105632/06 ; заявл. 18.02.2015 ; опубл. 10.04.2016, Бюл. № 10.

103. Пат. РФ 2678150. Горелочное устройство / Вигриянов М. С., Алексеенко С. В., Шарыпов О. В., Ануфриев И. ; патентообладатель Ин-т теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сиб. отд-ния Рос. акад. наук (ИТ СО РАН). - № 2018104942, приоритет от 08.02.2018 ; зарег. 23.01.2019.

104. Пат. РФ 182520. Горелочное устройство / Вигриянов М. С., Алексеенко С. В., Шарыпов О. В., Ануфриев И. ; патентообладатель Ин-т теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сиб. отд-ния Рос. акад. наук (ИТ СО РАН). – № 2018105033 ; приоритет от 09.02.2018 ; зарег. 22.08.2018.

105. Krasinsky, D. V. Numerical simulation of hydrocarbon fuel combustion processes in a burner with axial injection of steam jet / D. V. Krasinsky // J. of Physics. Conf. Ser. – 2018. –

Vol. 1105, art. 012035. – P. 1–6. DOI: 10.1088/1742-6596/1105/1/012035.

106. Ankilov, A. N. Comparison of the Novosibirsk automated diffusion battery with the Vienna electro mobility spectrometer / A. N. Ankilov, A. M. Baklanov, R. Mavliev [et al.] // *J. of Aerosol Science*. – 1991. – Vol. 22, suppl. 1. – P. S325–S328. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(05\)80103-X](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(05)80103-X).

107. Onischuk, A. A. Evolution of structure and charge of soot aggregates during and after formation in a propane/air diffusion flame / A. A. Onischuk, S. Di Stasio, V. V. Karasev [et al.] // *J. of Aerosol Science*. – 2003. – Vol. 34, № 4. – P. 383–403. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(02\)00215-X](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(02)00215-X).

108. Спектрометр аэрозолей диффузионный ДСА : руководство по эксплуатации / ООО «Аэрозол. приборы». – Новосибирск, 2013. – 22 с.

109. Knutson, E. O. History of diffusion batteries in aerosol measurements / E. O. Knutson // *Aerosol Science a. Technology*. – 1999. – Vol. 31, № 2/3. – P. 83–128. DOI: <https://doi.org/10.1080/027868299304192>.

110. Friedlander, S. K. Smoke, dust and haze: fundamental of aerosol dynamics / S. K. Friedlander. – New York : Oxford Univ. Press, 2000. – 407 p.

111. Ishiguro, T. Microstructure of diesel soot particles probed by electron microscopy: first observation of inner core and outer shell / T. Ishiguro, Y. Takatori, K. Akihama // *Combustion a. Flame*. – 1997. – Vol. 108, № 1/2. – P. 231–234. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(96\)00206-4](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(96)00206-4).

112. Ануфриев, И. С. Исследование наночастиц сажи при сжигании дизельного топлива в присутствии перегретого водяного пара / И. С. Ануфриев, А. М. Бакланов, О. В. Боровкова [и др.] // XV Минский международный форум по тепло- и массообмену (ММФ-XV) (Минск, Беларусь, 23-26 мая 2016 г.). – Минск, 2016. – Т. 2. – С. 18–22.

113. Ануфриев, И. С. Исследование наночастиц сажи при горении жидких углеводородов с подачей в зону горения струи перегретого водяного пара / И. С. Ануфриев, А. М. Бакланов, О. В. Боровкова [и др.] // *Физика горения и взрыва*. – 2017. – Т. 53, № 2. – С. 22–30. DOI: 10.15372/FGV20170203

114. Gad, H. M. Experimental study of diesel fuel atomization performance of air blast atomizer / H. M. Gad, I. A. Ibrahim, M. E. Abdel-baky [et al.] // *Experimental Thermal a. Fluid Science*. – 2018. – Vol. 99. – P. 211–218. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.07.006>.

115. Kalinci, Y. Waste energy management / Y. Kalinci, C. Dincer // *Comprehensive Energy Systems*. – Amsterdam, 2018. – Vol. 5. – P. 91–133.
116. Jedelský, J., Jícha, M., Spray characteristics and liquid distribution of multi-hole effervescent atomisers for industrial burners / J. Jedelský, M. Jícha // *Appl. Thermal Engineering*. – 2016. – Vol. 96. – P. 286–296. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.11.079>.
117. Yang, W. Influence of density ratio on the secondary atomization of liquid droplets under highly unstable conditions / W. Yang, M. Jia, K. Sun, T. Wang // *Fuel*. – 2016. – Vol. 174. – P. 25–35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.01.078>.
118. Pakhomov, M. A. Effect of vaporizing droplets on the structure of a submerged spray / M. A. Pakhomov, V. I. Terekhov // *Fluid Dynamics*. – 2009. – Vol. 44, № 3. – P. 419–429. DOI: 10.1134/S0015462809030090.
119. Pakhomov, M. A. The effect of droplets evaporation on turbulence modification and heat transfer enhancement in a two-phase mist flow downstream of a pipe sudden expansion / M. A. Pakhomov, V. I. Terekhov // *Flow Turbulence a. Combustion*. – 2017. – Vol. 98, № 1. – P. 341–354. DOI: [10.1007/s10494-016-9732-7](https://doi.org/10.1007/s10494-016-9732-7).
120. Yao, C. Impacts of nozzle geometry on spray combustion of high pressure common rail injectors in a constant volume combustion chamber / C. Yao, P. Geng, Z. Yin [et al.] // *Fuel*. – 2016. – Vol. 179. – P. 235–245. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.03.097>.
121. Tainaka, K. Effects of blending crude Jatropha oil and heavy fuel oil on the soot behavior of a steam atomizing burner / K. Tainaka, Y. Fan, N. Hashimoto, H. Nishida // *Renewable Energy*. – 2019. – Vol. 136. – P. 358–364. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.12.113>.
122. Badawy, T. Investigation of injector coking effects on spray characteristic and engine performance in gasoline direct injection engines / T. Badawy, M. A. Attar, P. Hutchins [et al.] // *Appl. Energy*. – 2018. – Vol. 220. – P. 375–394. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.03.133.
123. Пат. РФ 2684300. Паромасляное горелочное устройство / Ануфриев И. С., Вигриянов М. С., Алексеенко С. В., Шарыпов О. В., Копьев Е. П. ; патентообладатель Ин-т теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сиб. отд-ния Рос. акад. наук (ИТ СО РАН). – № 2018105056 ; приоритет от 09.02.2018 ; зарег. 05.04.2019.
124. Пат. РФ 2647172. Горелочное устройство / Вигриянов М. С., Ануфриев И. С., Копьев Е. П., Шарыпов О. В., Шадрин Е. Ю. ; патентообладатель Ин-т теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сиб. отд-ния Рос. акад. наук (ИТ СО РАН). – № 2017118714 ;

приоритет от 29.05.2017 ; зарег. 14.03.2018.

125. Xia, Y. Atomization of impinging opposed water jets interacting with an air jet / Y. Xia, L. Khezzer, M. Alshehhi, Y. Hardalupas // *Experimental Thermal a. Fluid Science*. – 2018. – Vol. 93. – P. 11–22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.12.010>.

126. Garai, A. Experimental investigation of spray formation in a hybrid atomizer using diesel, ethanol and ethanol blended diesel / A. Garai, S. Mondal, S. Pal [et al.] // *Experimental Thermal a. Fluid Science*. – 2019. – Vol. 100. – P. 158–170. DOI: [10.1016/j.fuel.2019.01.027](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.01.027).

127. Fan, Y. Spray characterization of an air-assist pressure-swirl atomizer injecting high-viscosity Jatropha oils / Y. Fan, N. Hashimoto, H. Nishida, Y. Ozawa Y. // *Fuel*. – 2014. – Vol. 121. – P. 271–283. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.12.036>.

128. Yang, S. I. Spray combustion characteristics of kerosene/bio-oil. Pt. 1. Experimental study / S. I. Yang, M. S. Wu., T. C. Hsu // *Energy*. – 2017. – Vol. 119. – P. 26–36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.12.062>.

129. Ануфриев, И. С. Исследование структуры газового потока, истекающего из форсунки горелочного устройства распылительного типа / И. С. Ануфриев, Д. В. Красинский, Е. Ю. Шадрин [и др.] // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2019. – Т. 26, № 4. – С. 520–527.

130. Ануфриев, И. С. Моделирование процессов переноса в пылеугольных топках с горизонтальной осью вихревого потока / И. С. Ануфриев, Д. В. Красинский, Е. Ю. Шадрин, О. В. Шарыпов // *Вихревые явления и их влияние на процессы переноса*. – Новосибирск, 2018. – С. 221–265.

131. Alekseenko, S. V. Experimental and numerical investigation of aerodynamics of a pneumatic nozzle for suspension fuel / S. V. Alekseenko, I. S. Anufriev, A. A. Dekterev [et al.] // *Intern. J. of Heat a. Fluid Flow*. – 2019. – Vol. 77. – P. 288–298. DOI: [10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.04.013](https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.04.013).

132. Агафонцев, М. В. Исследование характеристик турбулентного пламени при воздействии малых энергетических возмущений / М. В. Агафонцев, И. С. Ануфриев, Е. П. Копьев [и др.] // *Вестн. Том. гос. ун-та. Механика и математика*. – 2018. – № 55. – С. 57–71. DOI: [10.17223/19988621/55/6](https://doi.org/10.17223/19988621/55/6).

133. Ануфриев, И. С. Исследование структуры потока в модели четырехвихревой топки / И. С. Ануфриев, О. В. Шарыпов, А. А. Дектерев [и др.] // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2017. – Т. 24, № 6. – С. 873–879.

134. Ануфриев, И. С. Изучение аэродинамической структуры потока в модели вихревой топки стереоскопическим методом цифровой трассерной визуализации / И. С. Ануфриев, П. А. Куйбин, Е. Ю. Шадрин [и др.] // Теплофизика и аэромеханика. – 2016. – Т. 23, № 4. – С. 645–648.
135. Alekseenko, S. V. Study of 3D flow structure and heat transfer in a vortex furnace / S. V. Alekseenko, I. S. Anufriev, V. G. Glavniy [et al.] // Heat Transfer Research. – 2016. – Vol. 47, No. 7. – P. 653-667. DOI: 10.1615/HeatTransRes.2016015721.
136. Красинский, Д. В. Моделирование топочных процессов при сжигании распыленного угля в вихревой топке усовершенствованной конструкции. Ч. 1. Аэродинамика течения в вихревой топке / Д. В. Красинский, В. В. Саломатов, И. С. Ануфриев [и др.] // Теплоэнергетика. – 2015. – № 2. – С. 41–46.
137. Ануфриев, И. С. Диагностика течения в вихревой топке нового типа методом цифровой трассерной визуализации / И. С. Ануфриев, О. В. Шарыпов, Е. Ю. Шадрин // Письма в журн. техн. физики. – 2013. – Т. 39, вып. 10. – С. 36–43.
138. Ануфриев, И. С. Исследование структуры течения в новой конструкции вихревой топки методом цифровой трассерной визуализации / Ануфриев, И. С., Кузнецов Г.В., Шадрин Е.Ю. [и др.] // Изв. Том. политехн. ун-та. Энергетика. – 2013. – Т. 322, № 4. – С. 31–35.
139. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – Москва: Дрофа, 2003. – 840 с.
140. Scarano, F. Overview of PIV in supersonic flows / F. Scarano // Particle Image Velocimetry. – Berlin; Heidelberg, 2008. – P. 445–463. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-73528-1>.
141. Wu, X. Experimental investigation of over-expanded supersonic steam jet submerged in quiescent water / X. Wu, J. Yan, W. Li [et al.] // Experimental Thermal a. Fluid Science. – 2010. – Vol. 34, № 1. – P. 10–19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.exptthermflusci.2009.08.006>.
142. Sanada, T. Flow structure of steam–water mixed spray / T. Sanada, Y. Mitsuhashi, H. Mizutani, T. Saito // Nuclear Engineering a. Design. – 2010. – Vol. 240, № 12. – P. 3974–3983. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2010.03.020>.
143. Takahashi, S. Evaluation of jet impact region and fluid force generated from ruptured pipes: 1 – numerical and experimental evaluation of affected region by steam jet / S. Takahashi, Q. Xu, N. Takamura, R. Morita // Proceedings of the 24th International

- Conference on Nuclear Engineering. – [S. l.], 2016. – Vol. 3, pap. ICONE24-60341. – P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1115/ICONE24-60341>.
144. Melling A. Tracer particles and seeding for particle image velocimetry / A. Melling // Measurement Science a. Technology. – 1997. – Vol. 8, № 12. – P. 1406–1416. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/8/12/005>.
145. Litvinov, I. V. Finding of parameters of helical symmetry for unsteady vortex flow based on phase-averaged PIV measurement data / I. V. Litvinov, D. K. Sharaborin, S. I. Shtork // Thermophysics a. Aeromechanics. – 2015. – Vol. 22, № 5. – P. 647–650. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0869864315050133>.
146. Gobyzov, O. Experimental study of submillimeter droplets dynamics and breakup in continuous supersonic flow terminated by shock wave / O. Gobyzov, Yu. Lozhkin, M. Ryabov, D. Markovich // EPJ Web of Conferences. – 2016. – Vol. 114, art. 02031. – P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/201611402031>.
147. Volkov, R. S. Research of temperature fields and convection velocities in evaporating water droplets using planar laser-induced fluorescence and particle image velocimetry / R. S. Volkov, P. A. Strizhak // Experimental Thermal a. Fluid Science. – 2018. – Vol. 97. – P. 392–407. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.05.007>.
148. Alekseenko, S. V. Experimental study of an impinging jet with different swirl rates / S. V. Alekseenko, A. V. Bilsky, V. M. Dulin, D. M. Markovich // Intern. J. of Heat a. Fluid Flow. – 2007. – Vol. 28, № 6. – P. 1340–1359. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2007.05.011>.
149. Soid, S. N. Spray and combustion characterization for internal combustion engines using optical measuring techniques – a review / S. N. Soid, Z. A. Zainal // Energy. – 2011. – Vol. 36, № 2. – P. 724–741. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.11.022>.
150. Breitenbach, J. Characterization of secondary droplets during thermal atomization regime / J. Breitenbach, J. Kissing, I. V. Roisman, C. Tropea // Experimental Thermal a. Fluid Science. – 2018. – Vol. 98. – P. 516–522. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.06.030>.
151. Wang, Z. Experimental study on microscopic and macroscopic characteristics of diesel spray with split injection / Z. Wang, H. Xu, C. Jiang, M. L. Wyszynski // Fuel. – 2016. – Vol. 174. – P. 140–152. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.01.083>.
152. Chen, B. Experimental investigation of atomization and droplet turbulence characteristics of a twin-fluid nozzle with different self-excited vibrating cavity structures / B. Chen, D. Gao,

- Y. Liang [et al.] // *Experimental Thermal a. Fluid Science.* – 2018. – Vol. 99. – P. 525–536. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.08.017>.
153. Ghiji, M. Effect of residual air bubbles on diesel spray structure at the start of injection / M. Ghiji, L. Goldsworthy, V. Garaniya [et al.] // *Fuel.* – 2019. – Vol. 241 – P. 25-32. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.12.013>.
154. Wu, S. Experimental study of the spray collapse process of multi-hole gasoline fuel injection at flash boiling conditions / S. Wu, S. Yang, M. Wooldridge, M. Xu. // *Fuel.* – 2019. – Vol. 242. – P. 109–123. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.01.027>.
155. Liu, F. Microscopic study on diesel spray under cavitating conditions by injecting fuel into water / F. Liu, Z. Li, Z. Wang [et al.] // *Appl. Energy.* – 2018. – Vol. 230. – P. 1172–1181. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.038>.
156. Ochoterena, R. Optical studies of spray development and combustion of water-in-diesel emulsion and microemulsion fuels / R. Ochoterena, A. Lif, M. Nydén [et al.] // *Fuel.* – 2010. – Vol. 89. – P. 122–123. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.06.039>.
157. Payri, R. Velocity field analysis of the high density, high pressure diesel spray / R. Payri, J. P. Viera, H. Wang, L. Malbec // *Intern. J. of Multiphase Flow.* – 2016. – Vol. 80. – P. 69–78. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.10.012>.
158. Si, Z. Effect of cross-flow on spray structure, droplet diameter and velocity of impinging spray / Z. Si, Y. Ashida, N. Shimasaki [et al.] // *Fuel.* – 2018. – Vol. 234. – P. 592–603. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.07.061>.
159. Kuznetsov, G. V. Integral characteristics of water droplet evaporation in high-temperature combustion products of typical flammable liquids using SP and IPI methods / G.V. Kuznetsov, P. A. Strizhak, R. S. Volkov, O. V. Vysokomornaya // *Intern. J. Thermal Science.* – 2016. – Vol. 108. – P. 218–234. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.05.019>.
160. Watanabe, H. Secondary atomization and spray flame characteristics of carbonated W/O emulsified fuel/ H. Watanabe, Y. Shoji, T. Yamagaki [et al.] // *Fuel.* – 2016. – Vol. 182. – P. 259–265. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.05.121>.
161. Watanabe, H. Visualization of secondary atomization in emulsified-fuel spray flow by shadow imaging / H. Watanabe, K. Okazaki // *Proc. of Combustion Inst.* – 2013. – Vol. 34, № 1. – P. 1651–1658. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2012.07.005>.
162. Sukhanovskii, A. Drawbacks of GPT and IPI measurements in dense sprays / A. Sukhanovskii, V. Batalov, R. Stepanov // *Experimental Thermal a. Fluid Science.* – 2019. –

- Vol. 103. – P. 29–36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2019.01.005>.
163. Akhmetbekov, Y. K. Application of "POLIS" PIV system for measurement of velocity fields in a supersonic flow of the wind tunnels / Y. K. Akhmetbekov, A. V. Bilsky, D. M. Markovich [et al.] // *Thermophysics a. Aeromechanics*. – 2009. – Vol. 16, № 3. – P. 325–333. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0869864309030019>.
164. Lobanov, P. D. Hydrodynamic structure of a bubbly flow in an annular channel: experimental study by means of PIV/PFBI/PTV / P. D. Lobanov, M. V. Timoshevskiy // *J. of Physics. Conf. Ser.* – 2016. – Vol. 754, art. 032013. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/754/3/032013>.
165. Bilskiy, A. V. Interferometric technique for measurement of droplet diameter / A. V. Bilskiy, Yu. A. Lozhkin, D. M. Markovich // *Thermophysics a. Aeromechanics*. – 2011. – Vol. 18, № 1. – P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1134/S086986431101001X>.
166. Lozhkin, Yu. A. Investigation of the structure of a polydisperse gas-droplet jet in the initial region. Experimental and numerical simulation / Yu. A. Lozhkin, D. M. Markovich, M. A. Pakhomov, V. I. Terekhov // *Thermophysics a. Aeromechanics*. – 2014. – Vol. 21, № 3. – P. 294–307. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0869864314030044>.
167. Van de Hulst, H. C. Light scattering by small particles / H. C. Van de Hulst. - New York: Wiley, 1957. 470 p.
168. Voulgaropoulos, V. Optical measurements in evolving dispersed pipe flows / V. Voulgaropoulos, P. Angeli // *Experiments in Fluids*. – 2017. – Vol. 58, № 12, art. 170. – P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00348-017-2445-4>.
169. Anufriev, I. S. Diesel fuel combustion by spraying in a superheated steam jet / I. S. Anufriev, E. P. Kopyev // *Fuel Processing Technology*. – 2019. – Vol. 192. – P. 154–169. DOI: [10.1016/j.fuproc.2019.04.027](https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.04.027).
170. Anufriev, I. S. Diesel fuel combustion under steam gasification conditions / I. S. Anufriev, E. P. Kopyev, O. V. Sharypov [et al.] // *Journal of Physics : Conf. Series*. – 2018. – Vol. 1105, art. 012036. – P. 1-5. doi :10.1088/1742-6596/1105/1/012036.
171. Anufriev, I. S. Combustion of substandard liquid hydrocarbons in an atmosphere burner during steam gasification / I. S. Anufriev, S. V. Alekseenko, O. V. Sharypov, E. P. Kopyev // *J. of Engineering Thermophysics*. – 2019. – Vol. 28, № 3. – P. 344–351.
172. Anufriev, I. S. Investigation of a promising method for spraying liquid hydrocarbons using the shadow photography method / I. S. Anufriev, E. Yu. Shadrin, E. P. Kopyev // *EPJ*

Web of conferences. – 2019. – Vol. 196, art. 00010. – P. 1–6. DOI: 10.1051/epjconf/201919600010.

173. Anufriev, I. Investigating characteristics of liquid hydrocarbon spraying by a steam jet / I. Anufriev, E. Копыев, E. Shadrin // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 115, art. 05010. – P. 1–4. DOI: 10.1051/matecconf/201711505010.

174. Ануфриев, И. С. Исследование процессов горения жидких углеводородов при распылении струей перегретого водяного пара // Тепловые процессы в технике. – 2019. – Т. 11, № 4. – С. 146–156.

175. Ануфриев, И. С. Горение жидких углеводородов в струе перегретого водяного пара // Новое в российской электроэнергетике. – 2019. – № 4. – С. 13–24.

176. Алексеенко, С. В. Влияние параметров перегретого водяного пара на процесс горения жидких углеводородов / С. В. Алексеенко, И. С. Ануфриев, С. С. Арсентьев [и др.] // Теплофизика и аэромеханика. – 2019. – Т. 26, № 1. – С. 109–113.

177. Anufriev, I. Burning of substandard liquid hydrocarbons with steam gasification / I. Anufriev, S. Arsentyev, M. Vigriyanov [et al.] // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 115, art. 03013. – P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201711503013>.

178. Planas-Cuchi, E. Determination of flame emissivity in hydrocarbon pool fires using infrared thermography / E. Planas-Cuchi, J. M. Chatris, C. Lopez, J. Arnaldos // Fire Technology. – 2003. Vol. 39, № 3. – P. 261–273. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1024193515227>.

179. Fells, I. Burning velocity of methane-air flames / I. Fells, A. G. Rutherford // Combustion a. Flame. – 1969. – Vol. 13. – P. 130–138.

180. Rinieri, F. On the use of an infra-red camera for the measurement of temperature in fires of vegetative fuels / F. Rinieri, J.-H. Balbi, P-A. Santoni [Электронный ресурс] // Quantitative InfraRed Thermography. – 2006. – P. 1–10. – Режим доступа: <http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2006/papers/011.pdf> (дата обращения: 10.05.2019).

181. Singh, P. Heat transfer and fluid flow characteristics of a pair of interacting dual swirling flame jets impinging on a flat surface / P. Singh, S. Chander // Intern. J. of Heat a. Mass Transfer. – 2018. – Vol. 124. – P. 90–108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.03.034>.

182. Лобода, Е. Л. Физическое и математическое моделирование природных пожаров и применение методов инфракрасной диагностики для их исследования : дис. ... д-ра физ.-

мат. наук : 01.02.05 / Е. Л. Лобода. – Томск, 2012. – 286 с.

183. Loboda, E. L. The use of infrared thermography to study the optical characteristics of flame from burning vegetation / E. L. Loboda, V. V. Reyno, V. P. Vavilov // *Infrared Physics a. Technology.* – 2014. – Vol. 67. – P. 566-573. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2014.09.041>.

184. Loboda, E. L. Choice of a spectral range for measuring temperature fields in a flame and recording high-temperature objects screened by the flame using IR diagnostic methods / E. L. Loboda, V. V. Reyno, M. V. Agafontsev // *Russ. Phys. J.* – 2015. – Vol. 58, № 2. – P. 278–282. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11182-015-0493-x>.

185. Kaskan, W. E. The dependence of flame temperature on mass burning velocity / W. E. Kaskan // *Symp. (Intern.) of Combustion.* – 1957. – Vol. 6, № 1. – P. 134–143. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(57\)80021-6](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(57)80021-6).

186. Litvinov, I. V. Experimental study and analytical reconstruction of precessing vortex in a tangential swirler / I. V. Litvinov, S. I. Shtork, P. A. Kuibin [et al.] // *Intern. J. of Heat a. Fluid Flow.* – 2013. – Vol. 42. – P. 251–264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2013.02.009>.

187. Wang, P. An experimental study on thermal radiation of fire whirl / P. Wang, N. Liu, Y. Bai [et al.] // *Intern. J. of Wildland Fire.* – 2017. – Vol. 26, № 8. – P. 693–705. DOI: <https://doi.org/10.1071/WF17010>.

188. Pastor, E. Experimental methodology for characterizing flame emissivity of small scale forest fires using infrared thermography techniques / E. Pastor, A. Rigueiro, L. Zárata [et al.] // *Proc. of IV Intern. Conf. on Forest Fire Research.* – Coimbra, 2002. – P. 1–11.

189. Blankenhagela, P. Thermal radiation assessment of fireballs using infrared camera / P. Blankenhagela, K.-D. Wehrstedta, K. B. Mishrab, J. Steinbachc // *J. of Loss Prevention in Process Industry.* – 2018. – Vol. 54. – P. 246–253. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.04.008>.

190. DIN EN 267:2011-11. Automatic forced draught burners for liquid fuels. – Brussels, 2011. – 91 p.

191. ГОСТ 28091-89. Горелки промышленные на жидком топливе. Методы испытаний. – Москва: Изд-во стандартов, 1989. – 25 с.

192. ГОСТ Р ИСО 10396-2012. Выбросы стационарных источников. Отбор проб при автоматическом определении содержания газов с помощью постоянно установленных

- систем мониторинга. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 26 с.
193. ГОСТ Р ИСО 12039-2011. Выбросы стационарных источников. Определение содержания монооксида углерода, диоксида углерода и кислорода. Характеристики и калибровка автоматических измерительных систем в условиях применения. – Москва: Стандартинформ, 2012. – 15 с.
194. ГОСТ Р ИСО 10849-2006. Выбросы стационарных источников. Определение массовой концентрации оксидов азота. Характеристики автоматических измерительных систем в условиях применения. – Москва: Стандартинформ, 2006. – 19 с.
195. ГОСТ Р ИСО 7935-2007. Выбросы стационарных источников. Определение массовой концентрации диоксида серы. Характеристики автоматических методов измерений в условиях применения. – Москва: Стандартинформ, 2007. – 11 с.
196. ГОСТ 27824-2000. Горелки промышленные на жидком топливе. Общие технические требования. – Москва: Изд-во стандартов, 2002. – 12 с.
197. ГОСТ 20548-87. Котлы отопительные водогрейные теплопроизводительностью до 100 кВт. Общие технические условия. – Москва: Изд-во стандартов, 1987. – 10 с.
198. ГОСТ 305-2013. Топливо дизельное. Технические условия. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 11 с.
199. ГОСТ 10585-2013. Топливо нефтяное. Мазут. Технические условия. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 8 с.
200. ГОСТ 21261-91. Нефтепродукты. Метод определения высшей теплоты сгорания и вычисление низшей теплоты сгорания [Электронный ресурс]. – Москва, 1991. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-21261-91> (дата обращения: 07.05.2019).
201. ГОСТ Р 50591-2013. Агрегаты тепловые газопотребляющие. Горелки газовые промышленные. Предельные нормы концентраций NOx в продуктах сгорания. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 6 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А: КОПИИ ПАТЕНТОВ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2684300

ПАРОМАСЛЯНОЕ ГОРЕЛОЧНОЕ УСТРОЙСТВО

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) (RU)*

Авторы: *Ануфриев Игорь Сергеевич (RU), Вигриянов Михаил Степанович (RU), Алексеенко Сергей Владимирович (RU), Шарыпов Олег Владимирович (RU), Копьев Евгений Павлович (RU)*

Заявка № 2018105056


Приоритет изобретения 09 февраля 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 05 апреля 2019 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 09 февраля 2038 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2678150

ГОРЕЛОЧНОЕ УСТРОЙСТВО

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) (RU)*

Авторы: *Вигриянов Михаил Степанович (RU), Алексеенко Сергей Владимирович (RU), Шарынов Олег Владимирович (RU), Ануфриев Игорь Сергеевич (RU)*


Заявка № 2018104942

Приоритет изобретения 08 февраля 2018 г.

Дата государственной регистрации в
Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 23 января 2019 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 08 февраля 2038 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Излиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 182520

ГОРЕЛОЧНОЕ УСТРОЙСТВО

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) (RU)*

Авторы: *Вигриянов Михаил Степанович (RU), Алексеенко Сергей Владимирович (RU), Шарынов Олег Владимирович (RU), Ануфриев Игорь Сергеевич (RU)*

Заявка № 2018105033

Приоритет полезной модели 09 февраля 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 22 августа 2018 г.

Срок действия исключительного права

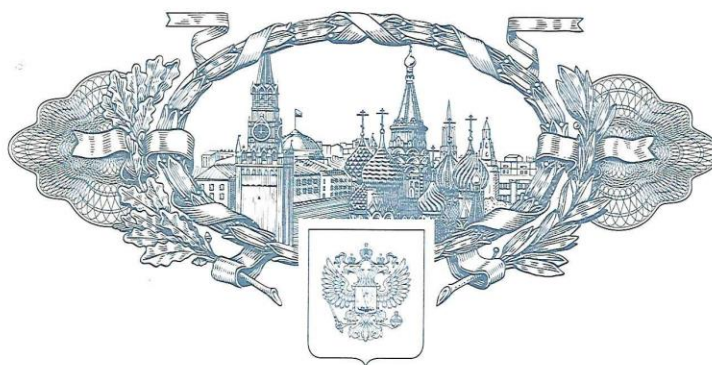
на полезную модель истекает 09 февраля 2028 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2647172

ГОРЕЛОЧНОЕ УСТРОЙСТВО

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) (RU)*

Авторы: *Вигриянов Михаил Степанович (RU), Ануфриев Игорь Сергеевич (RU), Копьев Евгений Павлович (RU), Шарынов Олег Владимирович (RU), Шадрин Евгений Юрьевич (RU)*

Заявка № 2017118714

Приоритет изобретения 29 мая 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 14 марта 2018 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 29 мая 2037 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Извиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2579298

ГОРЕЛОЧНОЕ УСТРОЙСТВО

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2015105632

Приоритет изобретения **18 февраля 2015 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **03 марта 2016 г.**

Срок действия патента истекает **18 февраля 2035 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

 *Г.П. Ивлиев*



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2523591

ГОРЕЛОЧНОЕ УСТРОЙСТВО

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2013116229

Приоритет изобретения 09 апреля 2013 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 27 мая 2014 г.

Срок действия патента истекает 09 апреля 2033 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



ПРИЛОЖЕНИЕ Б: РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕХНИЧЕСКОГО И ХИМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ТОПЛИВА



**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«СИБТЕХЭНЕРГО»**
ИНЖЕНЕРНАЯ ФИРМА ПО НАЛАДКЕ, СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИЙ И ЭКСПЛУАТАЦИИ
ЭЛЕКТРО-ЭНЕРГООБОРУДОВАНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ И СИСТЕМ

Россия 630032, г. Новосибирск, ул. Планировочная, д. 18/1, офис 314. www.sibte.ru
Тел: (383) 351-75-95. Факс: (383) 351-79-87. E-mail: sibte@sibte.ru
ОКПО 00113626, ИНН 5404105135, КПП 540401001

15.11.2018 № 616-2836

На № _____

Химическая лаборатория АО «Сибтехэнерго»
Заключение № 0079/2018 о состоянии измерений в лаборатории
Действительно до 05 июля 2021 г.

ПРОТОКОЛ № 213
От 14 ноября 2018 г.

Наименование пробы: проба заявлена как дизельное топливо
Заказчик: Ануфриев Игорь Сергеевич
Дата поступления пробы: 09.11.2018 г.

Описание технического задания: выполнение технического анализа нефтепродуктов.

№ п./п.	Наименование и обозначение показателя, состояние топлива	Единица измерения	Метод испытания для данного показателя, обозначение номера НД	Результаты испытаний пробы
1.	Определение условной вязкости и пересчет в кинематическую: 23,7 ⁰ С	⁰ ВУ/ мм ² с(сSt)	ГОСТ 6258-85	1,33/4,1
2.	Массовая доля воды	%	ГОСТ 2477-2014	отсутствие
3.	Массовая доля серы	%	ГОСТ 3877-88	0,436
4.	Плотность при 20 ⁰ С Плотность при 15 ⁰ С	кг/м ³	ГОСТ 3900-85	839,89 843,03
5.	Теплота сгорания по бомбе Q ^a _{вс} ; Теплота сгорания высшая Q ^a _с ; Теплота сгорания низшая Q ^a _н ; Теплота сгорания низшая в пересчете на сухое топливо Q ^d _н	кДж/кг ккал/кг	ГОСТ 21261-91	10731/44929 10735/44947 42259/10093 42259/10093

Результаты анализа распространяются только на представленный для испытания образец.

Начальник лаборатории _____
Ответственный исполнитель _____
ведущий инженер _____



_____ Т.М. Ядрышникова

_____ Ю.С. Билинец

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова
Сибирского отделения Российской академии наук
(НИОХ СО РАН)

просп. Академика Лаврентьева, д. 9, г. Новосибирск, 630090, Российская Федерация
 Тел. (383) 330-88-50, Факс: (383) 330-97-52 E-mail: benzol@nioch.nsc.ru
 ОКПО 03533903, ОГРН 1025403651921, ИНН/КПП 5408100191/540801001
 Лаборатория микроанализа

УТВЕРЖДАЮ
 Зам. директора НИОХ СО РАН

 к.х.н. Сулов Е.В.

ПРОТОКОЛ

РЕЗУЛЬТАТЫ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ХИМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

№ 175

“19” ноября 2018 г.

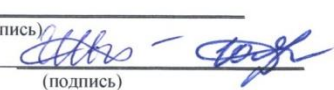
Заказчик: Институт теплофизики СО РАН
 Объект аналитического контроля дизельное топливо
 Характеристика пробы: светлая жидкость в пластиковых пробирках
 Дата, время отбора, место отбора: проба предоставлена заказчиком
 Пробу отобрал: проба предоставлена заказчиком

Дата поступления пробы: 13 ноября 2018 г. Дата анализа: 14-15 ноября 2018 г.
 Метод анализа: С.Н – гравиметрический; N – с использованием автоматического элементного CHNS-анализатора фирмы EURO EA3000

Результаты анализа: *)

Шифр пробы	Регистрационный номер пробы	Наименование определяемой характеристики	Результат анализа, %	Приписанная погрешность измерений по методике измерений, отн. %	Обозначение методики измерений
дизельное топливо	1806	Массовая доля углерода	84,6	6	ФР.1.31.2011.11166
		Массовая доля водорода	13,6	9	
		Массовая доля азота	0,64	8	
отработанное масло	1807	Массовая доля углерода	85,6	6	
		Массовая доля водорода	13,2	9	
		Массовая доля азота	менее 0.2	8	

Зав. лабораторией микроанализа, кхн В.Д.Тихова  (подпись)

Ответственный исполнитель КХА Ю.М.Дерябина, Е.Е.Иванова  (подпись)
 (Ф.И.О.) (подпись)

*) частичная перепечатка или копирование протокола КХА запрещается без разрешения центра



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«СИБТЕХЭНЕРГО»
ИНЖЕНЕРНАЯ ФИРМА ПО НАЛАДКЕ, СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИЙ И ЭКСПЛУАТАЦИИ
ЭЛЕКТРО-ЭНЕРГООБОРУДОВАНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ И СИСТЕМ

Россия 630032, г.Новосибирск, ул. Планировочная, д. 18/1, офис 314. www.sibte.ru
Тел: (383) 351-75-95. Факс: (383) 351-79-87. E-mail: sibte@sibte.ru
ОКПО 00113626, ИНН 5404105135, КПП 540401001

15.11.2018 № 616-2834
На № _____

Химическая лаборатория АО «Сибтехэнерго»
Заключение № 0079/2018 о состоянии измерений в лаборатории
Действительно до 05 июля 2021 г.

ПРОТОКОЛ № 214

От 14 ноября 2018 г.

Наименование пробы: проба заявлена как отработанное масло

Заказчик: Ануфриев Игорь Сергеевич

Дата поступления пробы: 09.11.2018 г.

Описание технического задания: выполнение технического анализа нефтепродуктов.

№ п.п.	Наименование и обозначение показателя, состояние топлива	Единица измерения	Метод испытания для данного показателя, обозначение номера НД	Результаты испытаний пробы
1.	Определение условной вязкости и пересчет в кинематическую: 23,7 ⁰ С при 40 ⁰ С при 60 ⁰ С	⁰ ВУ/ мм ² с(сSt) - -	ГОСТ 6258-85	Не течет 9,12/69 5,60/41,8
2.	Массовая доля воды	%	ГОСТ 2477-2014	0,06
3.	Массовая доля серы	%	ГОСТ 3877-88	0,602
4.	Массовая доля механических примесей	%	ГОСТ 6370-83	Отсутствие
5.	Плотность при 20 ⁰ С Плотность при 15 ⁰ С	кг/м ³	ГОСТ 3900-85	863,25 866,39
6.	Теплота сгорания по бомбе Q ^a _в ; Теплота сгорания высшая Q ^a _с ; Теплота сгорания низшая Q ^a _н ; Теплота сгорания низшая в пересчете на сухое топливо Q ^d _н	кДж/кг ккал/кг	ГОСТ 21261-91	10823/45316 10824/45318 42529/10158 42556/10164

Результаты анализа распространяются только на представленный для испытания образец.

Начальник лаборатории
Ответственный исполнитель
ведущий инженер



С. Ядрешникова
Ю.С. Билинец

Т.М. Ядрешникова

Ю.С. Билинец

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ТЕПЛОФИЗИКИ ИМ. С.С. КУТАТЕЛАДЗЕ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Пояснительная записка к эскизной конструкторской документации
на лабораторный образец горелочного устройства

100.000.000 ПЗ

Выполнил: старший научный сотрудник



Ануфриев И.С.

Проверил: заведующий лабораторией



Шарыпов О.В.

11 марта 2019

Лабораторный образец оригинального горелочного устройства (мощностью не менее 10 кВт) предназначен для сжигания некондиционных жидких углеводородных топлив в условиях паровой газификации и необходим для экспериментальных исследований процессов горения жидких углеводородов. Исследования комплекса тепловых и экологических характеристик горения на горелочном устройстве включают в себя: термопарные измерения распределения температуры в факеле, PIV-диагностика структуры потока в факеле, контроль тепловыделения и состава продуктов сгорания при заданных параметрах паровой струи.

Главными элементами конструкции лабораторного образца горелочного устройства являются цилиндрический корпус в виде стакана, паровая форсунка для подачи перегретого водяного пара, направленная вертикально вверх, вмонтированная в дно корпуса, воздухоподводящие отверстия, выполненные на цилиндрическом корпусе вблизи дна, паропровод и топливоподающая трубка, конец которой расположен в непосредственной близости от выходного отверстия паровой форсунки. Отличительной особенностью горелочного устройства является то, что топливоподающая трубка установлена под острым углом к горизонту и не касается стенки корпуса для уменьшения тепловых потерь при пуске устройства, а на верхнем торце корпуса установлено сопло в виде крышки с отверстием по центру для образования зоны рециркуляции, формируемой парами легкоиспаряющихся фракций жидкого топлива, способных легко воспламенятся при пуске и стабилизировать воспламенение паромасляной струи при работе устройства.

Лабораторный образец горелочного устройства изготавливается из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т, габаритные размеры 140×120×60.




					<i>100.000.000 ПЗ</i>		
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>			
<i>Разраб.</i>		<i>Ануфриев</i>		<i>11.03.19</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Пров.</i>		<i>Вигриянов</i>		<i>11.03.19</i>		<i>2</i>	<i>3</i>
<i>Н. контр.</i>					<i>Лабораторный образец горелочного устройства</i>		
<i>Утв.</i>		<i>Шарыпов</i>		<i>11.03.19</i>			

Схема соединений элементов горелочного устройства представлена в документе 100.000.000 С4. Устройство крепится к специальному фланцу парогенератора, обеспечивающему герметичную подачу перегретого водяного пара (при давлении до 20 атм.) через паровую форсунку в горелочное устройство. Топливо подается в горелочное устройство через топливоподатчик и топливопровод (показано в документе 100.000.000 С5).

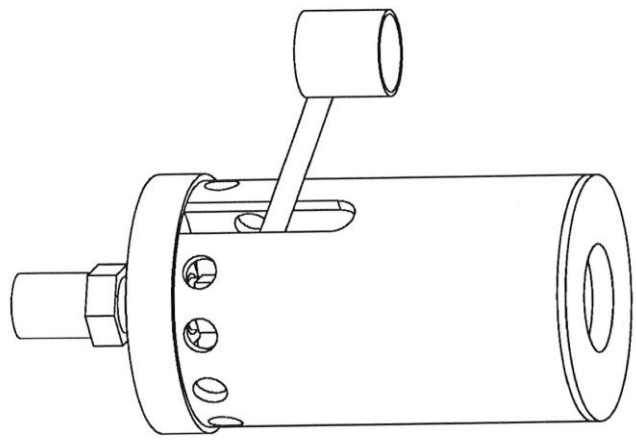
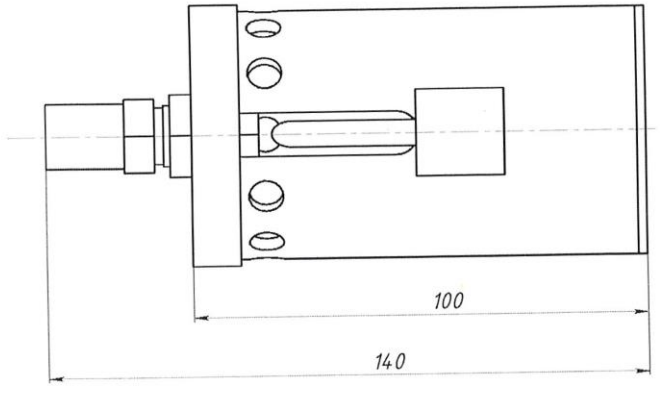
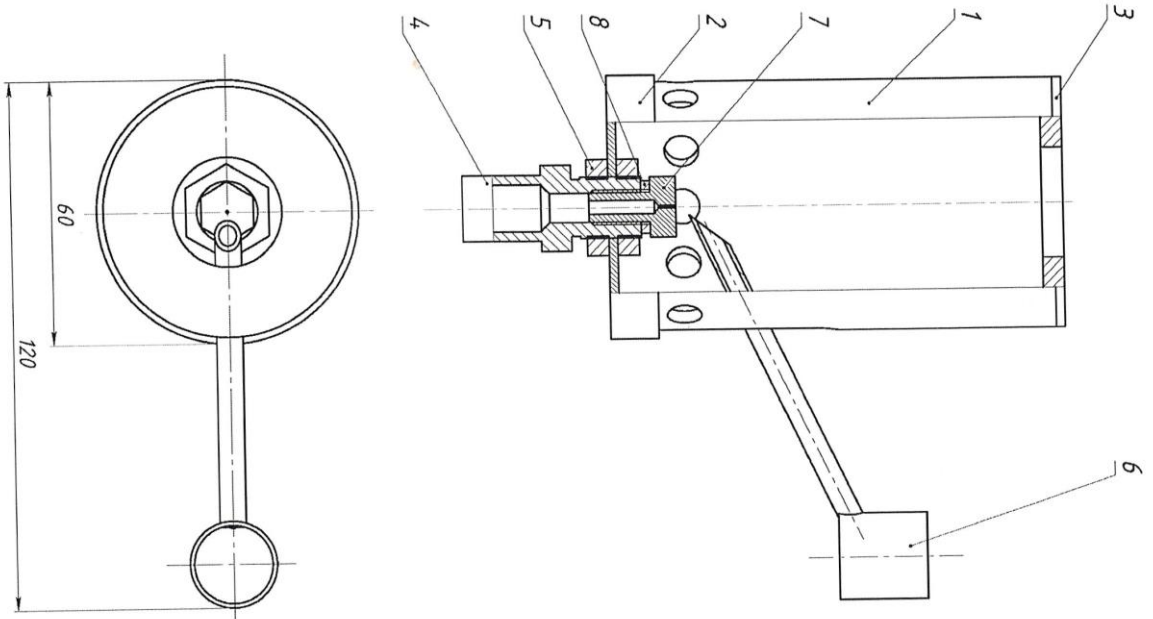
Принцип работы лабораторного образца горелочного устройства представлен в документе 100.000.000 С2.

В горелочное устройство (1) подается перегретый водяной пар заданных параметров из парогенератора (2). Питающая вода для генерации пара подается в парогенератор из бака для воды (3) при помощи плунжерного дозирующего насоса (4). Параметры по давлению и температуре получаемого пара фиксируются манометром (5) и датчиком температуры (6), установленными на входе и выходе парогенератора соответственно. Для дополнительного контроля расхода питающей воды, бак с водой устанавливается на электронные весы (7). После подачи пара в устройство и создания паровой струи, из топливного бака (8) через нагреватель (9), для обеспечения необходимых параметров по вязкости, и топливный фильтр (10) при помощи шестеренного насоса (11) в горелочное устройство подается жидкое топливо. Необходимый расход топлива обеспечивается путем дозирования электромагнитным клапаном (12). При этом топливный бак установлен на электронных весах (13) – для дополнительного контроля расхода топлива. Показания со всех приборов, а также управление питанием насосов, парогенератора и дозировкой топлива осуществляется шкафом управления (14).

					100.000.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		3

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	Справ. №
--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	----------

100.000.000.000 В0



Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.	Андриеев			11.03.19
Проб.	Виерушина			11.03.19
Т. конпр.				
Н. конпр.				
Умб.	Шарыпов			11.03.19

Лабораторный образец
горелочного устройства
Чертеж общего вида

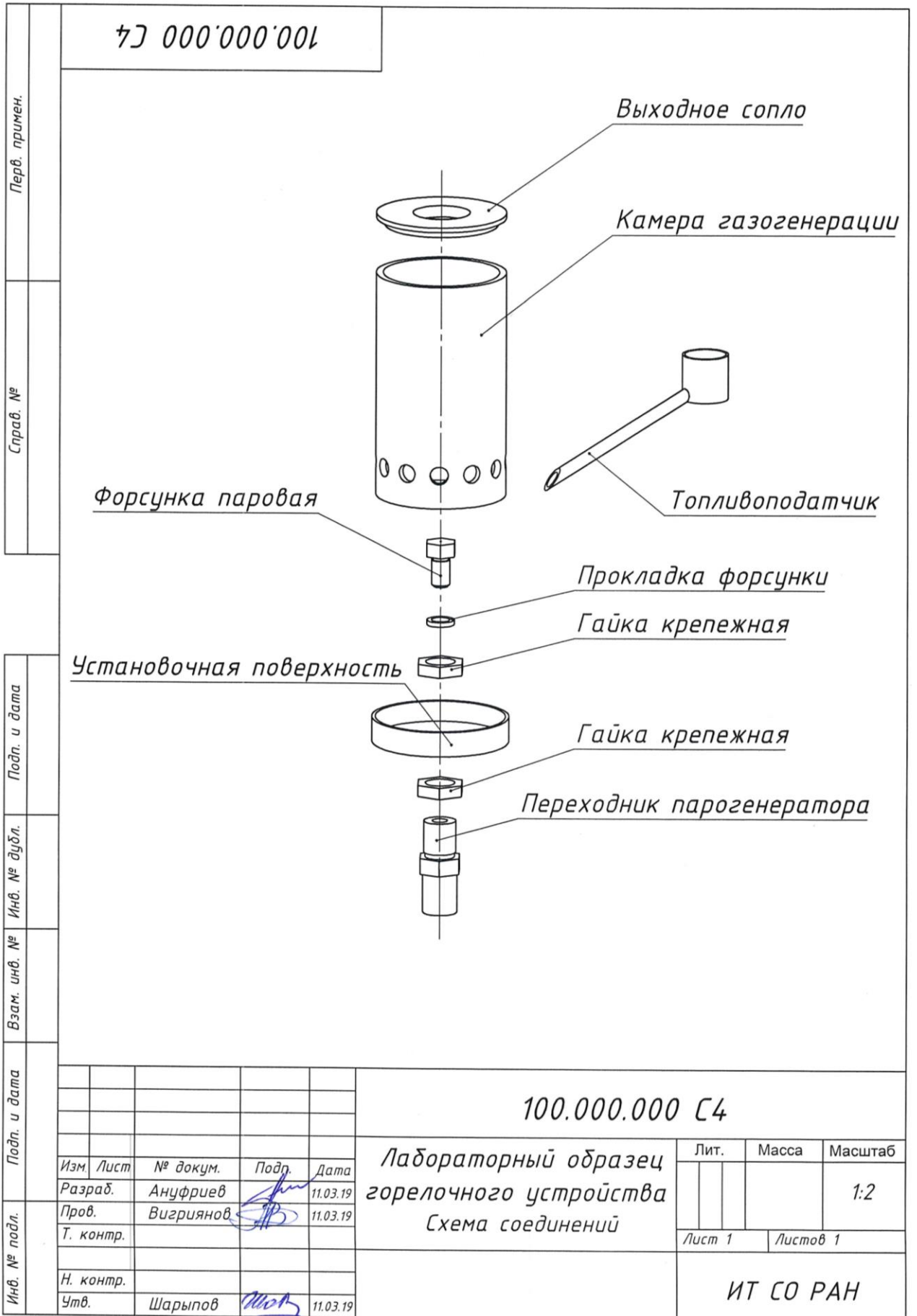
100.000.000 В0

ИТ СО РАН

Лист 1 Листов 2

Масштаб 1:1

Формат А3



Формат А4

100.000.000 С5

Перв. примен.

Справ. №

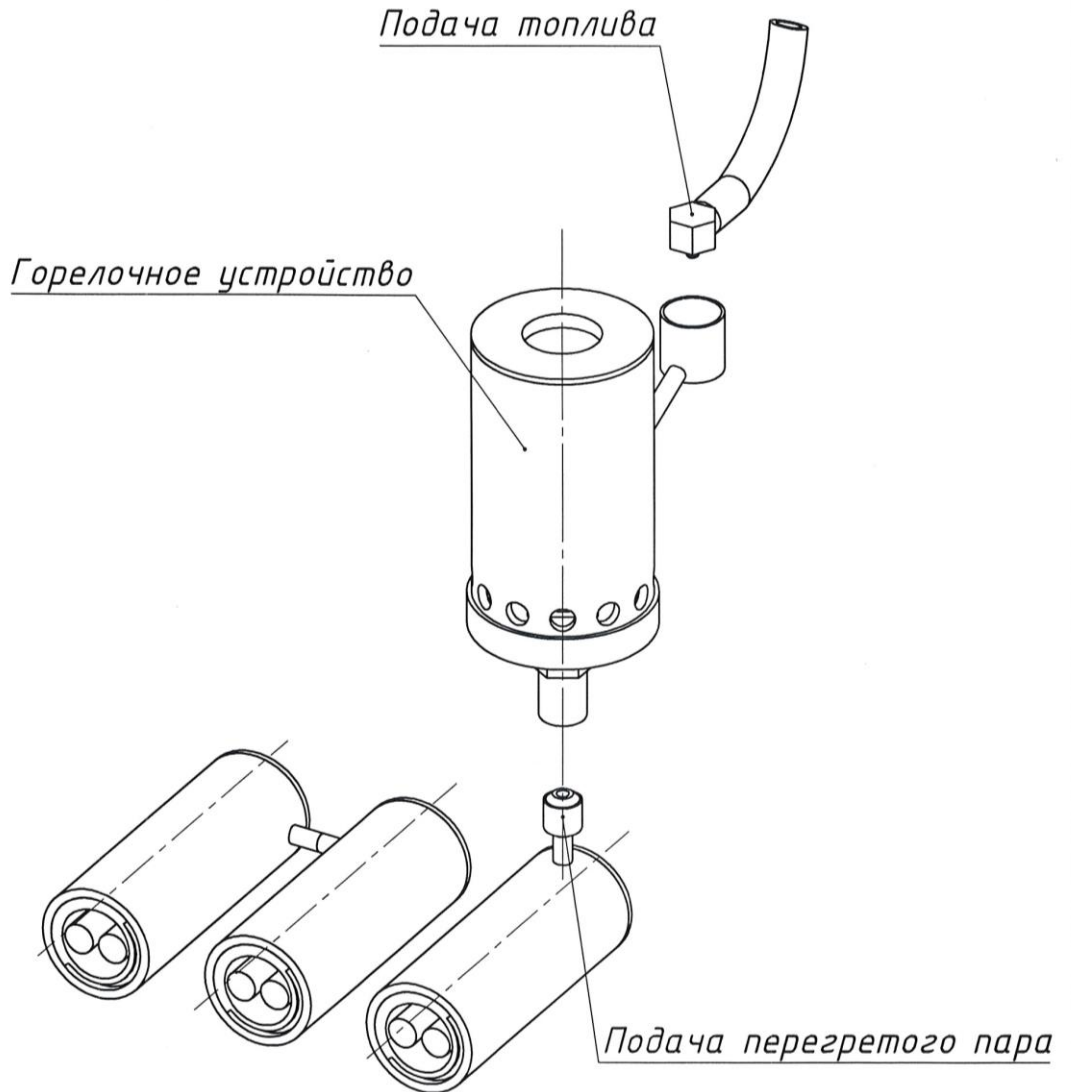
Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.



100.000.000 С5

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Ануфриев		11.03.19
Пров.		Вигриянов		11.03.19
Т. контр.				
Н. контр.				
Утв.		Шарыпов		11.03.19

Лабораторный образец
горелочного устройства
Схема подключения

Лит.	Масса	Масштаб
		1:2
Лист 1		Листов 1

ИТ СО РАН

Формат А4

100.000.000 С2

Перв. примен.

Справ. №

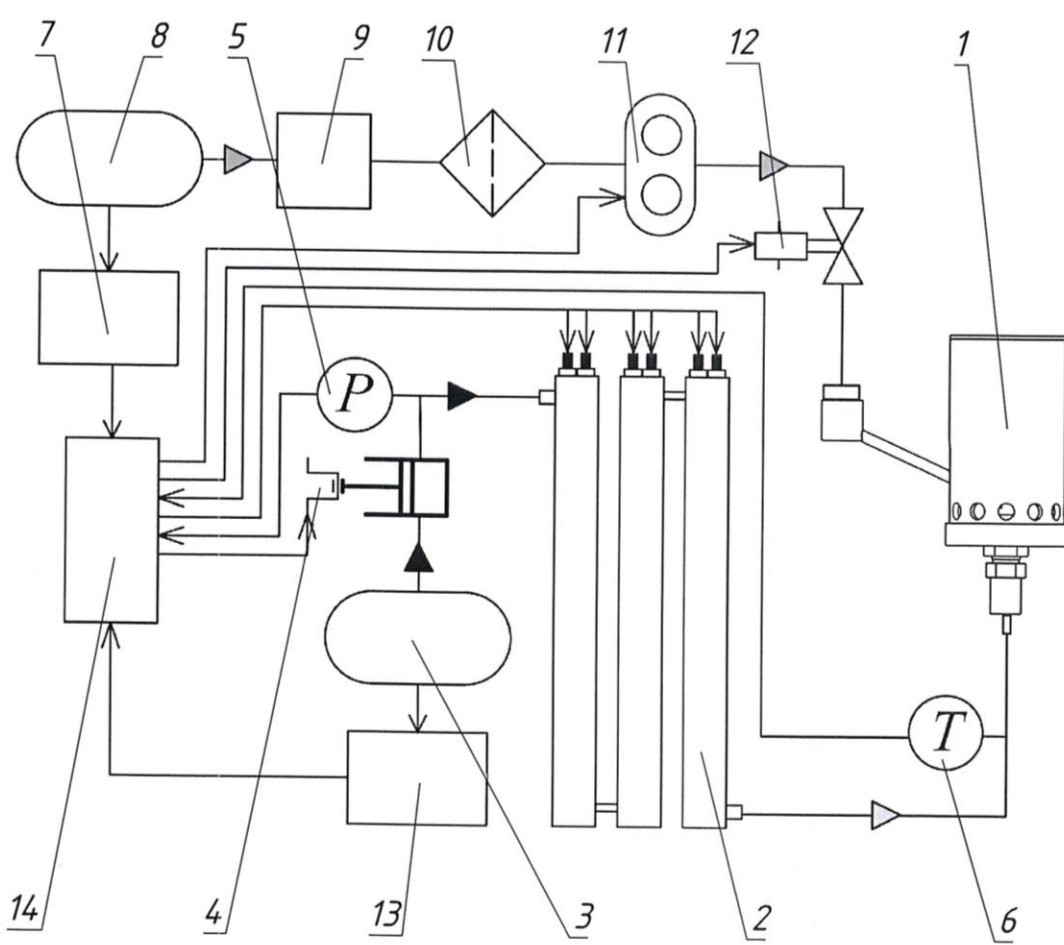
Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.



- 1 - Горелочное устройство
- 2 - Парогенератор
- 3 - Бак для воды
- 4 - Водяной насос
- 5 - Манометр
- 6 - Датчик контроля температуры пара
- 7 - Весы электронные (контроль расхода воды)
- 8 - Топливный бак
- 9 - Нагреватель
- 10 - Топливный фильтр
- 11 - Насос топливный
- 12 - Электромагнитный клапан
- 13 - Весы электронные (контроль расхода топлива)
- 14 - Шкаф управления

100.000.000 С2

Лабораторный образец
горелочного устройства
Схема комбинированная функциональная

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Ануфриев	<i>[Signature]</i>	11.03.19
Пров.		Вигриянов	<i>[Signature]</i>	11.03.19
Т. контр.				
Н. контр.				
Утв.		Шарыпов	<i>[Signature]</i>	11.03.19

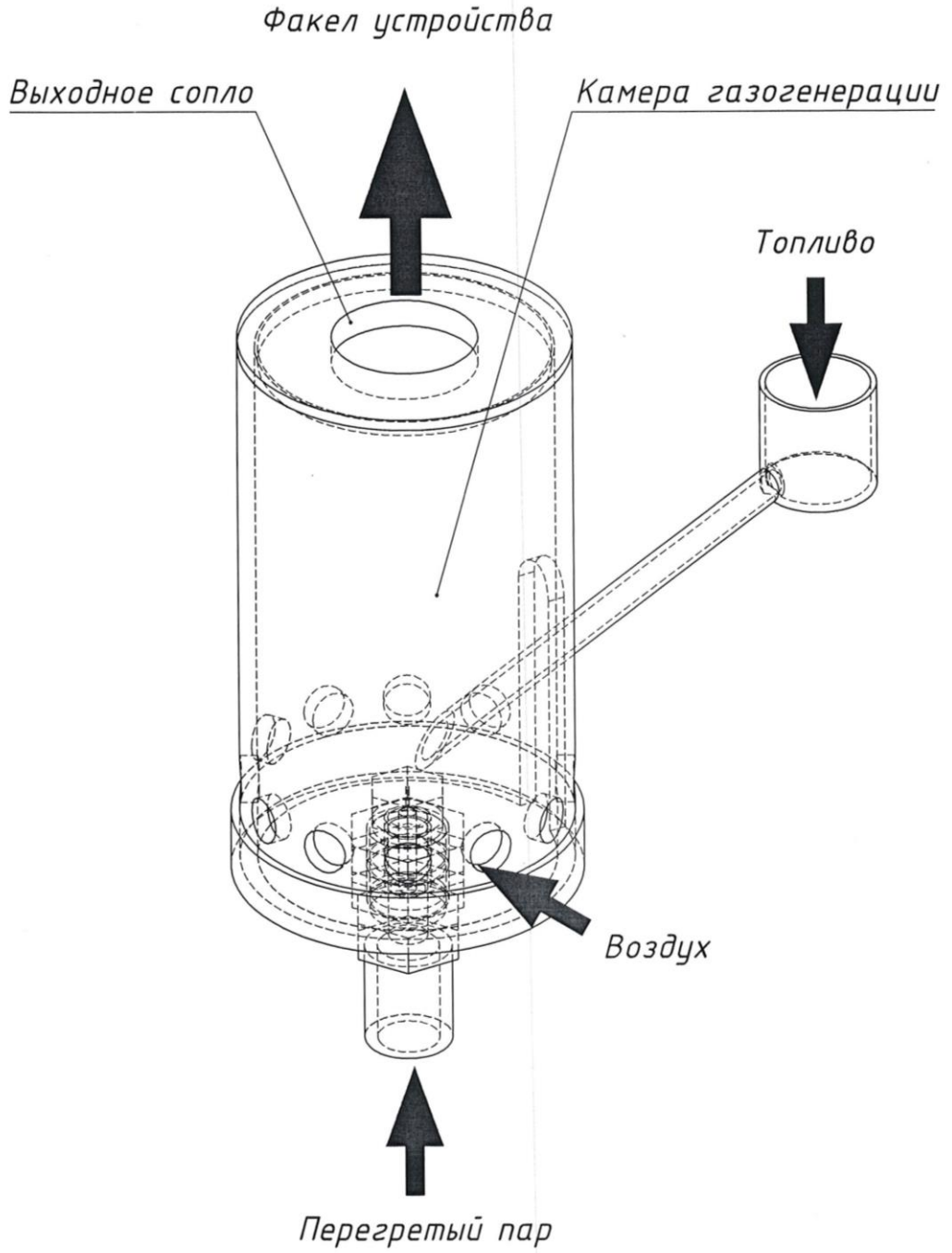
Лит.	Масса	Масштаб

Лист 1 / Листов 2

ИТ СО РАН

Формат А4

100.000.000 С2



Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
		Ануфриев		11.03.19

100.000.000 С2

Лист
2

Формат А4

ПРИЛОЖЕНИЕ Г: ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ



Общество с ограниченной ответственностью
«ЗиО-КОТЭС»
ул. Кропоткина, д. 96/1
г. Новосибирск, 630049
Тел.: (383) 319 05 07
e-mail: ziinfo@zio-cotes.ru
www.zio-cotes.ru

В диссертационный совет

Справка

о практическом использовании и внедрении результатов диссертационной работы Ануфриева Игоря Сергеевича

ООО «ЗиО-КОТЭС» в лице Генерального директора Цепенка А.И., предоставляет настоящую справку в том, что полученные Ануфриевым Игорем Сергеевичем в диссертационной работе «Экспериментальное исследование процессов при сжигании жидких углеводородов в горелочных устройствах с подачей перегретого водяного пара» результаты нашли практическое применение при CFD-моделировании процессов горения жидких топлив. Это позволило верифицировать используемые математические модели для дальнейшей достоверной оценки экологических характеристик и эффективности сжигания жидких углеводородов, усовершенствовать способы их сжигания, повысить технико-экономические и экологические показатели процесса.

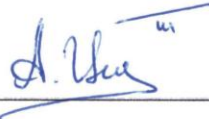
Кроме того, в рамках выполнения Соглашения о предоставлении субсидии №14.604.21.0185 от 26 сентября 2017 по теме: «Разработка научных основ создания новой энергоэффективной и экологически безопасной технологии сжигания некондиционных жидких углеводородных топлив в условиях паровой газификации» 2017-2020 (руководитель академик РАН Алексеенко С.В.), Получателем субсидии является Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, ООО «ЗиО-КОТЭС» является Индустриальным партнером, Ануфриев И.С. является исполнителем проекта. Согласно Договору «О дальнейшем использовании результатов исследований (проекта)» от 26 сентября 2017 года между Получателем субсидии и Индустриальным партнером в рамках указанного Соглашения заключен Лицензионный договор на полученные Получателем субсидии и зарегистрированные результаты интеллектуальной деятельности, а именно, на разработанное при участии соискателя диссертации горелочное устройство:

– патент РФ на изобретение № 2684300 Паромасляное горелочное устройство, патентообладатель ИТ СО РАН, авторы: Ануфриев И.С., Вигриянов М.С., Алексеенко С.В., Шарыпов О.В., Копьев Е.П., зарегистрирован 05.04.2019, приоритет от 09.02.2018.

Данная разработка используется ООО «ЗиО-КОТЭС» в новых перспективных конструкциях горелочных устройств для промышленных и энергетических установок с паровыми и водогрейными котлами при: использовании сложных для сжигания жидких углеводородов, повышенных требованиях к устойчивости горения, широкой гаммы сжигаемых топлив, повышенных требованиях к экологическим показателям.

Справка дана Ануфриеву И.С. для представления в диссертационный совет.

Генеральный директор
ООО «ЗиО-КОТЭС»,
кандидат технических наук



Цепенюк А.И.

10.04.2019



Цепенюк А.И. заверяю
подпись И.С. Ануфриева по кадрам ООО «ЗиО-КОТЭС» Леоу Тислюкова ТА
10.04.2019

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе НГТУ

д.т.н., доцент,



 С. В. Брованов

2019 г.

АКТ

внедрения результатов научной работы в учебный процесс

Настоящий акт подтверждает, что результаты, полученные в диссертационной работе «Экспериментальное исследование процессов при сжигании жидких углеводородов в горелочных устройствах с подачей перегретого водяного пара» Ануфриева Игоря Сергеевича внедрены в учебный процесс Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ).

Научные разработки и результаты исследований внедрены в учебный процесс для проведения практических и лабораторных занятий по курсу «Физика горения» на кафедре тепловых электрических станций факультета энергетики для бакалавров по направлению 13.03.01 - «Теплоэнергетика и теплотехника».

Заведующий кафедрой ТЭС, д.т.н., доцент



С. Л. Елистратов

Ученый секретарь кафедры ТЭС, к.т.н., доцент



Ю. И. Шаров



КОНКУРС
«ЛУЧШИЙ ИННОВАЦИОННЫЙ ПРОЕКТ
И ЛУЧШАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
РАЗРАБОТКА ГОДА»

ДИПЛОМ

награждается

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, Новосибирск

за разработку

Горелочное устройство для экологически безопасного сжигания
жидких углеводородных отходов с получением тепловой энергии

в номинации

Лучший инновационный проект (разработка) в области экологии,
рационального природопользования, сортировки
и переработки отходов, водоочистки

Председатель Экспертного Совета,
руководитель Представительства
в Санкт-Петербурге ФГБНУ НИИ РИНКЦЗ,
руководитель Санкт-Петербургского
отделения МАН ИПТ

Сопредседатель Конкурсной комиссии,
Генеральный директор ООО «ВО «РЕСТЭК»

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Фалеев", written over a larger, more stylized signature in blue ink that appears to read "И.П. Кирсанов".

С.П. Фалеев

И.П. Кирсанов

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, 2018



СОВЕТСКИЙ РАЙОН



БЛАГОДАРСТВЕННОЕ ПИСЬМО

**Администрация Советского района
города Новосибирска
выражает благодарность**

**АНУФРИЕВУ
ИГОРЮ СЕРГЕЕВИЧУ –**

*старшему научному сотруднику Федерального
государственного бюджетного учреждения науки
«Институт теплофизики имени С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук»*

**за активное участие в научно-исследовательской
работе, предложения по внедрению инновационных
проектов на предприятиях
и в организациях города Новосибирска**

Глава администрации



Д. М. Оленников

НОВОСИБИРСК



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о присуждении премии города Новосибирска
в сфере науки и инноваций

В НОМИНАЦИИ
«ЛУЧШИЙ МОЛОДОЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬ В ОРГАНИЗАЦИЯХ НАУКИ»

АНУФРИЕВУ ИГОРЮ СЕРГЕЕВИЧУ

в размере 100 000 рублей

Тема научного исследования:

«Исследование процессов горения жидких углеводородов в оригинальных горелочных устройствах в присутствии перегретого водяного пара для разработки технических решений по экологически безопасному сжиганию некондиционных топлив и горючих производственных отходов с получением тепловой энергии»

Мэр города
Новосибирска

Председатель
Совета депутатов
города Новосибирска

 А. Е. Локоть

 Д. В. Асанцев

2016 г.



КОНКУРС «ЛУЧШИЙ ИННОВАЦИОННЫЙ
ПРОЕКТ И ЛУЧШАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
РАЗРАБОТКА ГОДА»

ДИПЛОМ

II СТЕПЕНИ

(с вручением серебряной медали)

награждается

ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения РАН
Россия, Новосибирск

за разработку

Горелочное устройство бесплажного сжигания
жидких углеводородных отходов

в номинации

Лучший инновационный проект в области: экология, рациональное
природопользование, переработка отходов

Сопредседатель
Конкурсной комиссии,
Генеральный директор
ООО «ВО «РЕСТЭК»

И.П. Кирсанов

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, 2015



**ДИПЛОМ
НАГРАЖДАЕТСЯ**

Победитель XI Общероссийского конкурса
молодежных исследовательских проектов в
области энергетики «Энергия молодости»

ИГОРЬ АНУФРИЕВ

за проект «Экспериментальное исследование
способа интенсификации и экологических
характеристик горения жидких углеводородов в
оригинальных горелочных устройствах с высокой
концентрацией водяного пара»

Президент Некоммерческого
партнерства «Глобальная энергия»

И. М. Лобовский

г.Москва

02.12.2014



СОВЕТСКИЙ РАЙОН



БЛАГОДАРСТВЕННОЕ ПИСЬМО

*Администрация Советского района
города Новосибирска
выражает благодарность*

АНУФРИЕВУ ИГОРЮ СЕРГЕЕВИЧУ

*научному сотруднику Института теплофизики имени
С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской
академии наук*

*за вклад в развитие научно-производственного
потенциала города Новосибирска*

Глава администрации



В. А. Шварцкопф

июнь 2012 года

НОВОСИБИРСК



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о выделении муниципального гранта
города Новосибирска
победителю конкурса научных работ
молодых ученых

Ануфриеву Игорю Сергеевичу

по теме:

Разработка и обоснование технических решений для
повышения энергоэффективности, экономичности и
экологической безопасности оборудования ТЭС

в размере **200 000** рублей

Мэр города
Новосибирска

Handwritten signature of V. F. Gorodetskiy in blue ink.

В. Ф. Городецкий

Председатель
Совета депутатов
города Новосибирска

Handwritten signature of N. N. Boltenko in blue ink.

Н. Н. Болтенко