

На правах рукописи



Ануфриев Игорь Сергеевич

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

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Новосибирск – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный консультант: академик РАН, доктор физико-математических наук, лауреат международной премии «Глобальная энергия», заведующий лабораторией Института теплофизики СО РАН, Алексеев Сергей Владимирович

Официальные оппоненты:

Быковский Федор Афанасьевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, главный научный сотрудник

Зарко Владимир Егорович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского Сибирского отделения Российской академии наук, главный научный сотрудник.

Минаев Сергей Сергеевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной математики Дальневосточного отделения Российской академии наук, главный научный сотрудник.

Ведущая организация:

Открытое акционерное общество «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт» (ОАО «ВТИ»).

Защита диссертации состоится 6 декабря 2019 года в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.02 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте www.nstu.ru.

Автореферат разослан « » сентября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент



Боруш Олеся Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований.

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 газокапельного 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 аэрозоль; 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 газокapельных 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; термopарные 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 газокapельных 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 «Силловые 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. Алексеевко:
- 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 газочапельных 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 (Алексеенко 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.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы и пяти приложений. Работа содержит 254 страница 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.

ОСНОВНОЕ 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.

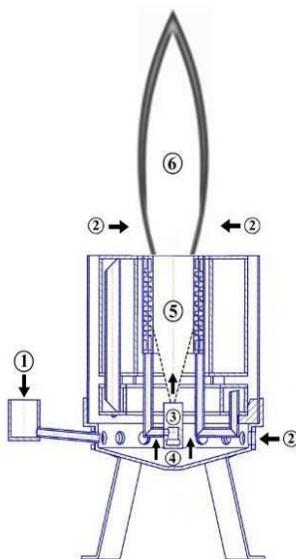
В разделе 2 приведены результаты экспериментальных исследований характеристик частиц сажи, образующихся в процессе сжигания дизельного топлива в лабораторном образце автономного горелочного устройства испарительного типа с подачей струи перегретого водяного пара или струи воздуха (Рис.1). Исследовалось 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. На рисунке 2 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. 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 $5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$.



(a)



(б)

Рисунок 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

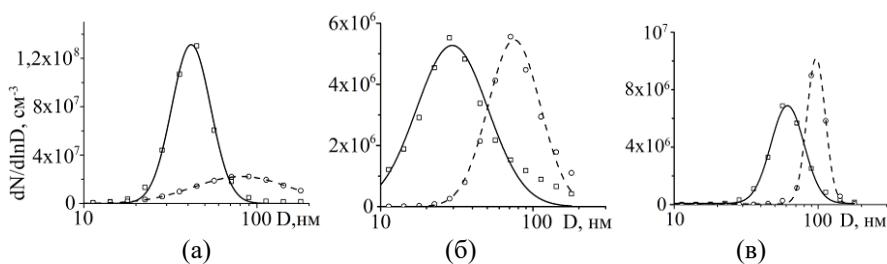


Рисунок 2 – Дисперсный состав сажевых частиц в режиме горения с подачей струи пара (квадраты, сплошная линия) и в режиме с подачей струи воздуха (круги, пунктирная линия) в разных точках: $h = 0$ мм (а); $h = 140$ мм (б); в охлажденных продуктах сгорания (в); линии – аппроксимация логнормальным распределением (N – концентрация, D – размер частиц)

С использованием просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) изучена морфология агрегатов, образующихся при коагуляции первичных частиц сажи (Рис. 3). 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 (см. рис. 2).

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.

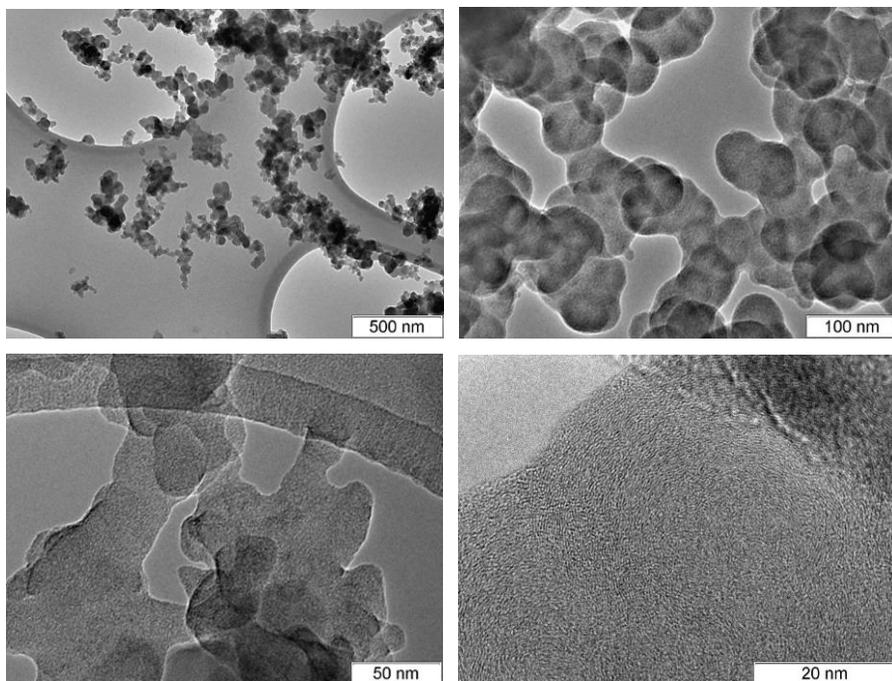


Рисунок 3 – Фотографии частиц сажи (режим с подачей пара) при отборе проб на выходе из горелочного устройства (микроскоп JEOL JEM-2010)

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 газокпельного 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 (Рис. 4).

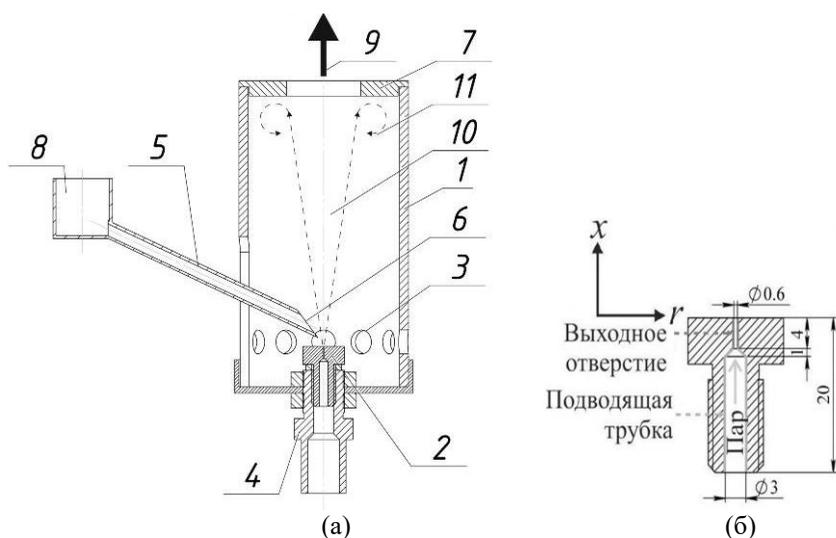


Рисунок 4 – (а) Схема горелочного устройства: цилиндрический корпус – 1, форсунка – 2, воздухоподводящие отверстия – 3, паропровод – 4, топливоподающая трубка – 5, скос – 6, сопло – 7, топливopриемник – 8, факел – 9, паромасляная струя – 10, зона рециркуляции – 11; (б) форсунка

В горелочном устройстве реализована следующая схема диспергирования и сжигания жидкого топлива, при котором происходит паровая газификация продуктов термического разложения и неполного сгорания жидкого топлива. (Рис. 5). Перегретый водяной пар (или воздух) подается в горелочное устройство из электрического парогенератора через форсунку, установленную в основании горелки. Высокоскоростная струя пара истекает из форсунки в камеру газогенерации. 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 газочапельный поток (Рис. 5-б). Помимо распыления топлива, перегретый водяной пар повышает температуру капель, что интенсифицирует массообмен и смесеобразование, способствуя устойчивому воспламенению с последующей газификацией. 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.

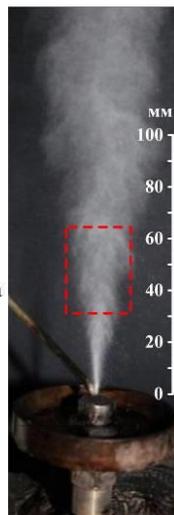
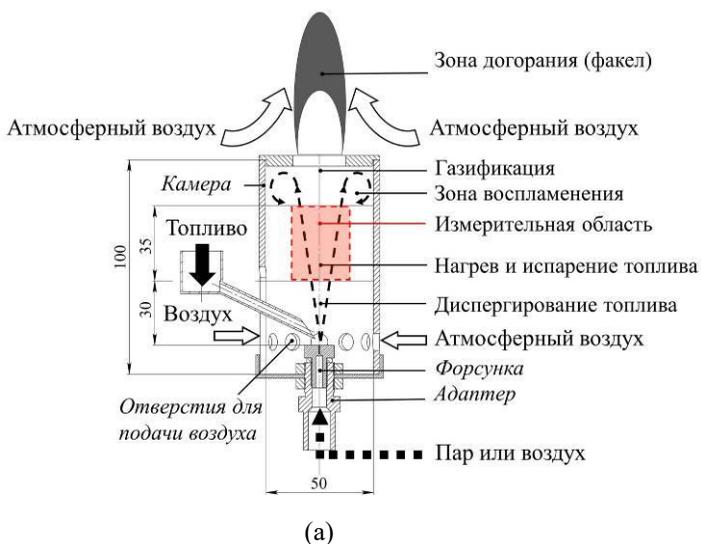


Рисунок 5 – (а) Схема процесса в горелочном устройстве с распылением жидкого топлива струей перегретого водяного пара (или воздуха), мм; (б) распыление жидкого топлива струей перегретого водяного пара (красной рамкой показана измерительная область)

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.

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 цифровой трассерной визуализации (particle image velocimetry, PIV) и метода теневой фотографии (shadow photography, SP) исследована структура однофазного газового потока (несущей фазы), истекающего из форсунки горелочного устройства (Рис. 4). Метод PIV основан на регистрации перемещений частиц (трассеров), добавляемых в исследуемый поток. Для засева потока трассерами применялись микроскопические капли растительного масла, образующиеся в результате прохождения сжатого воздуха через сопло Ласкина.

На примере сжатого воздуха получены характерные поля скорости в однофазном потоке при различных режимных параметрах (Рис. 6). 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.

Эксперименты по измерению дисперсного состава при распылении жидкого топлива струей перегретого водяного пара или воздуха проводились в открытом пространстве (Рис. 5-б); в качестве измерительной области выбрана область на оси симметрии форсунки, соответствующая зоне воспламенения в горелочном устройстве (Рис. 5).

Для измерения дисперсного состава и структуры газочапельного потока применялся SP-метод, основанный на регистрации объекта, имеющего коэффициент преломления, отличный от окружающей среды (Рис.7-а), а также интерферометрический метод измерения размеров капель (interferometric particle imaging, IPI): размер капли вычисляется по интерференционной картине, наблюдаемой на расфокусированном изображении частицы, освещенной лазерным ножом; свет, отраженный и однократно преломленный сферической поверхностью капли, создает на образах капель интерференционные полосы, частота которых пропорциональна диаметру капли (Рис.7-б).

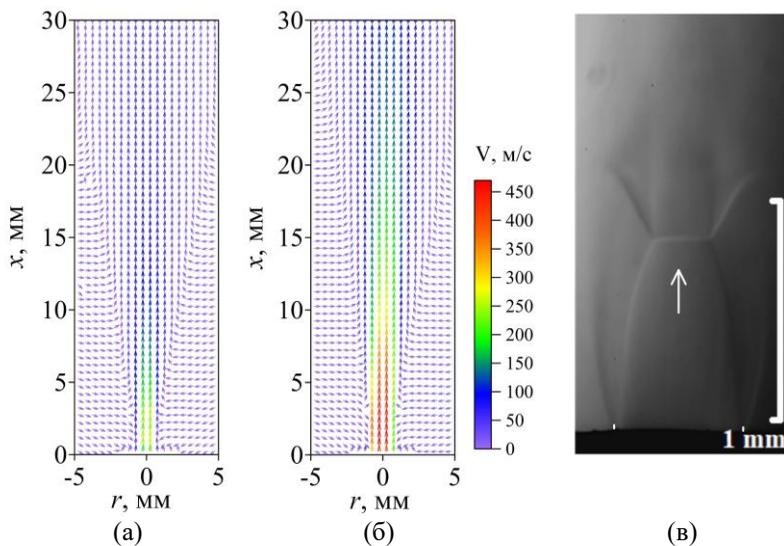


Рисунок 6 – Картина потока в однофазной воздушной струе вблизи форсунки: (а) векторное поле средней скорости (давление 150 кПа, массовый расход 0,4 кг/ч, $T_a = 23\text{ }^\circ\text{C}$) – PIV-измерения; (б) векторное поле средней скорости (давление 760 кПа, массовый расход 1,2 кг/ч, $T_a = 23\text{ }^\circ\text{C}$) – PIV-измерения; (в) теньевая фотография (SP)

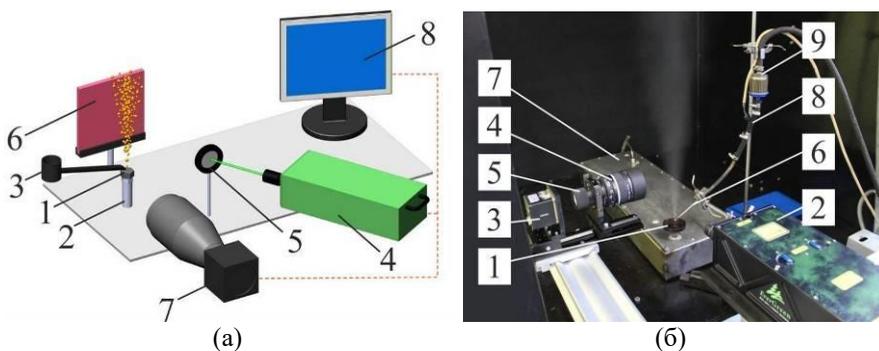


Рисунок 7 – (а) Схема измерительного участка при измерениях теньевым методом: 1 – форсунка; 2 – канал для подачи перегретого водяного пара (или воздуха); 3 – канал для подачи топлива; 4 – импульсный лазер; 5 – диффузное стекло; 6 – фоновый экран с люминесцентным покрытием; 7 – цифровая камера; 8 – компьютер; (б) экспериментальный стенд для PIV-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 измерения скорости дисперсной фазы применялся метод particle tracking velocimetry (PTV). 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. Для вычисления скорости использовались изображения, полученные при теневых измерениях газокапельного потока в двухкадровом режиме (т.е. трассерами являлись сами капли топлива).

В качестве жидких углеводородов в экспериментах использовалось два 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 свойства.

Массовый расход топлива F_f изменялся в диапазоне 0,4–2,2 кг/ч, в котором обеспечивается устойчивая работа горелочного устройства, необходимая для изучения процесса сжигания в лабораторных условиях. Расход перегретого водяного пара выбирался из соображений соответствия наиболее характерным режимам работы горелочного устройства. Для заданного диапазона расхода топлива, массовый расход пара F_v варьировался от 0,2 до 1,4 кг/ч с использованием электрического лабораторного парогенератора. 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%. Температура пара выбиралась в диапазоне от насыщенного пара до условий, соответствующих промышленным, и варьировалась в диапазоне 150–550 °С с шагом около 100 °С, при этом максимальный перегрев пара достигал 400 градусов.

Для сопоставления режимов с подачей пара и воздуха в качестве определяющего параметра выбрана интенсивность динамического воздействия газовой струи на каплю распыляемого топлива (влияющего на дисперсный состав и процессы переноса), связанная с потоком импульса и имеющая размерность силы: $F \cdot V$ (F – массовый расход газа, V – скорость газа на выходе из форсунки). Сопоставление режимов производилось при условии равенства указанного параметра.

В случае вязкого топлива (масло) вблизи выхода из форсунки, наряду с каплями, в потоке присутствуют вытянутые нитевидные структуры и пленки жидкости (Рис. 8), которые ниже по течению распадаются на капли в результате взаимодействия с высокотемпературным потоком. При распылении дизельного топлива уже на начальном участке формируется густой однородный туман, состоящий из микрокапель топлива, сконцентрированных преимущественно в пределах угла раскрытия паровой

струи (Рис. 9). Таким образом, вязкость топлива сильно влияет на структуру потока в ближней области газок капельной струи.

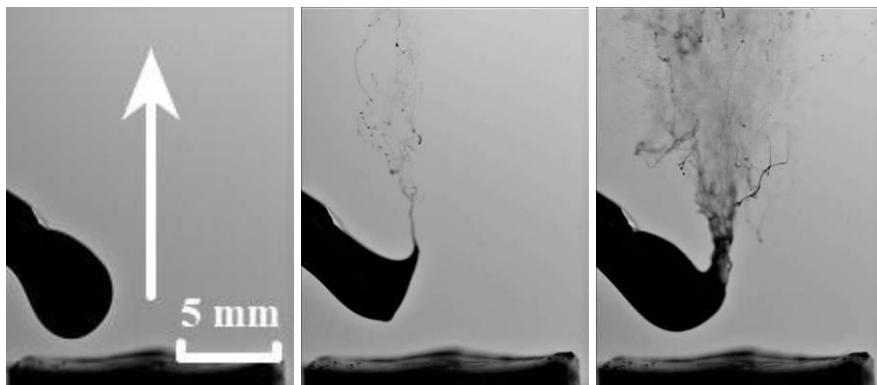


Рисунок 8 – Характерные теневые фотографии начальной стадии дробления капли масла при распылении паровой струей

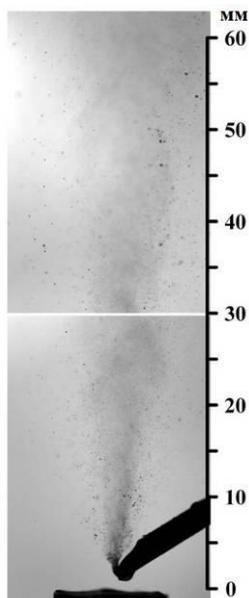


Рисунок 9 – Распыление дизельного топлива паровой струей

Чтобы провести корреляцию между скоростью несущей фазы и скоростью капель, 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. Ниже по потоку – в измерительной области (см. Рис. 5-а) – устанавливается равновесие (Рис. 10). В этой зоне струи скорость капель имеет максимальное значение около 100 м/с, а на расстоянии 60 мм от форсунки, где в горелочном устройстве происходит воспламенение, скорость потока падает до 50 м/с.

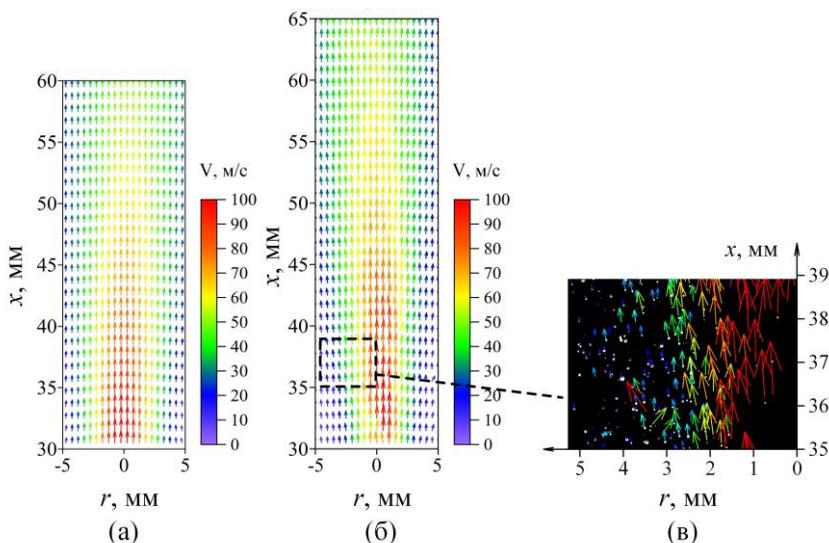


Рисунок 10 – (а) Поле средней скорости несущей фазы (массовый расход 1,52 кг/ч, $T_a = 23$ °C) – PIV-измерения; поле средней скорости (б) и поле мгновенной скорости (в) дисперсной фазы при распылении дизельного топлива струей пара ($F_v = 0,8$ кг/ч, $F_f = 1,2$ кг/ч, $T_s = (260 \pm 10)$ °C) – PTV-измерения;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

В результате обработки изображений, полученных SP- и PPI-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 (Рис. 11), 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 CO в продуктах сгорания не связаны с размерами капель.

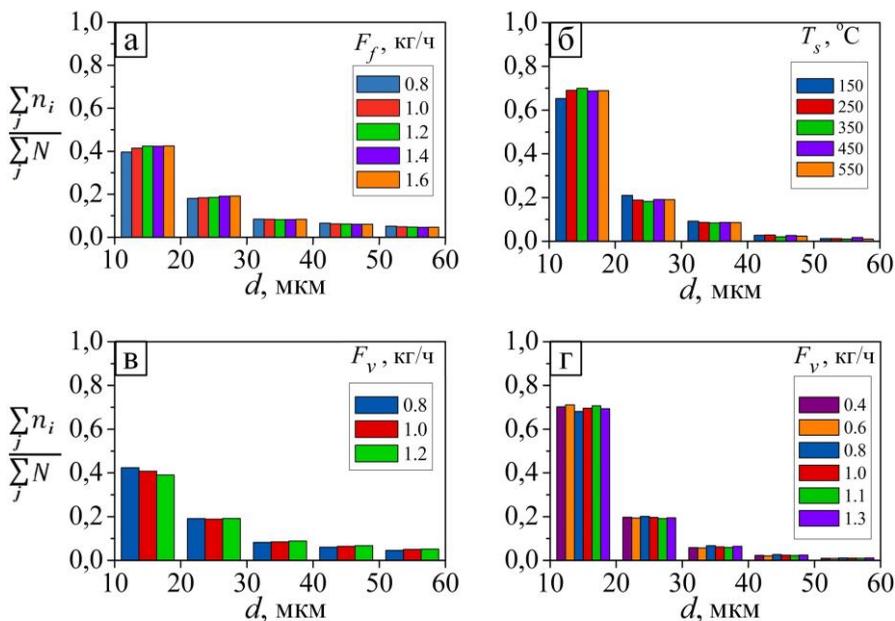


Рисунок 11 – Дисперсный состав капель топлива, образующихся при распылении дизельного топлива струей перегретого водяного пара в атмосфере: (а) $F_v = 0,8$ кг/ч, $T_s = (260 \pm 10)$ °C; (б) $F_v = 0,6$ кг/ч, $F_f = 1,0$ кг/ч; (в) $F_f = 1,4$ кг/ч, $T_s = (260 \pm 10)$ °C; (г) $\gamma = 0,7$, $T_s = (260 \pm 10)$ °C

В разделе 4 описаны экспериментальные исследования теплотехнических и экологических характеристик сжигания жидких углеводородов при распылении струей перегретого водяного пара (или воздуха) в зависимости от режимных параметров работы горелочного устройства.

Лабораторный образец атмосферного прямооточного горелочного устройства распылительного типа, исследуемый в работе, показан на рисунке 12. 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). Конструкция лабораторного образца прямооточной горелки выбрана из соображений устойчивого воспламенения распыленного топлива в камере сгорания с последующей газификацией и догоранием во внешнем факеле. Вертикальная ориентация горелки обеспечивает возможность измерений тепловыделения и газового состава с использованием проточного калориметра.

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.

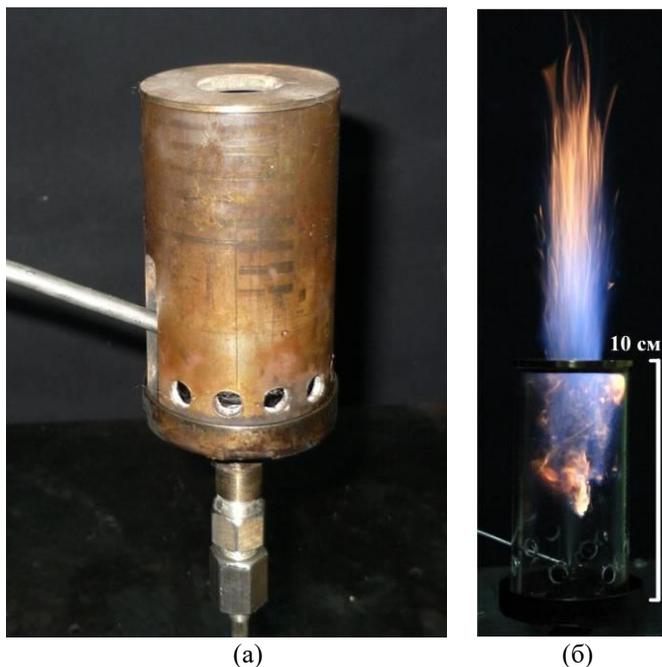


Рисунок 12 – (а) Вид горелочного устройства; (б) визуализация процесса горения в горелочном устройстве со стеклянным корпусом

Лабораторный образец изготовлен из стали 12X18Н10Т. Основные составные части горелочного устройства (см.Рис. 4-а): 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. 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 закономерностей влияния перегретого

водяного пара на характеристики процессов диспергирования и сжигания жидкого топлива.

Тепловыделение (q) при сжигании жидкого топлива с распылением струей перегретого водяного пара определялось по измерениям на проточном калориметре (Рис. 13).

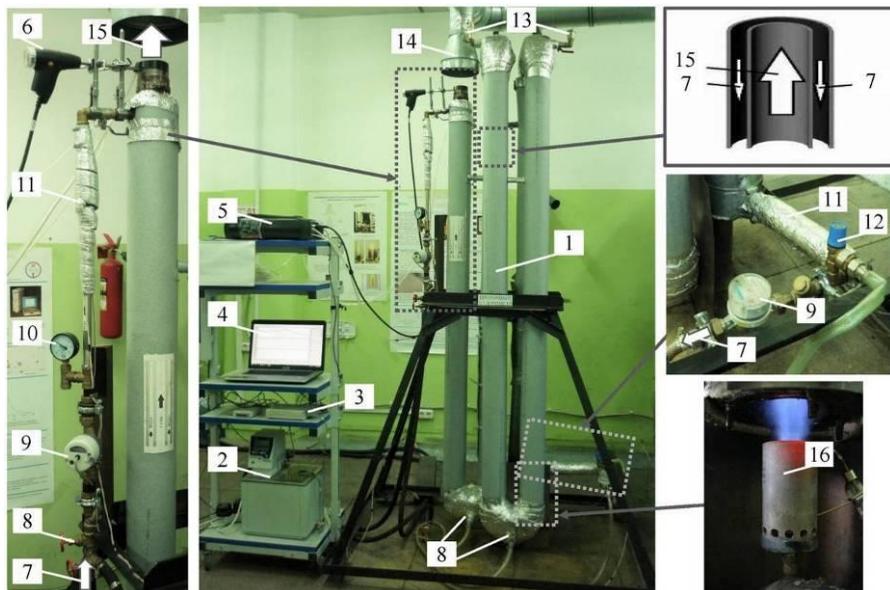


Рисунок 13 – Проточный калориметр с установленным газоанализатором TESTO 350: 1 – проточный калориметр, 2 – термостат, 3 – АЦП, 4 – ноутбук, 5 – блок газоанализатора, 6 – зонд газоанализатора, 7 – направление движения теплоносителя, 8 – запорный кран, 9 – расходомер, 10 – датчик давления, 11 – термопара хромель-алюмелевая, 12 – предохранительный клапан, 13 – воздухоотводчик автоматический, 14 – вентиляция, 15 – направление

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 комнатной температуре $T = T_a$):

$$Q = \sum_1^N (Q_2)_n - \sum_1^N (Q_1)_n, \quad (1)$$

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:

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

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 ($\text{Дж}/\text{кг}$). Отношение Q_0/Q при различных режимах составляло от 3,5 до 6,7 %.

Поскольку $T_a > T_1 = 14 \text{ }^\circ\text{C}$, то теплоноситель в калориметре получает от окружающей среды дополнительное тепло Q_+ , не связанное с тепловыделением реакции:

$$Q_+ = G_2 C_2 T_2 - G_1 C_1 T_1,$$

Эту величину, как и Q_0 , следует отнять из значения Q , полученного по формуле (1). В отсутствие факела разность температур $T_2 - T_1 \approx 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$, 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:

$$Q_r = S \varepsilon \sigma T^4 \tau N,$$

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:

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

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):

$$W = \frac{Q - Q_0 - Q_+ + Q_r + Q_g}{\tau N}$$

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

$$q = W/F_f,$$

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.

Для контроля состава газообразных продуктов горения использовался газоанализатор TESTO 350, позволяющий измерять следующие компоненты: O_2 – $0 \div 25$ об.%; CO – $0 \div 500$ ppm; NO – $0 \div 300$ ppm; NO_2 – $0 \div 500$ ppm; SO_2 – $0 \div 5000$ ppm; CO_2 – $0 \div 50$ об.%. Погрешность $\pm 5\%$. 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.

Для измерения температуры в факеле использовалась тепловизионная камера фирмы FLIR специальной серии JADE J530SB (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 2,5-5,0 мкм). Использовался узкополосный дисперсионный оптический фильтр F0616 с полосой пропускания 2,5-2,7 мкм. 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.

Кроме этого, измерение температуры в высокотемпературном факеле горелочного устройства проводилось 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. Время измерения в точке не менее 10 с, время задержки перед измерениями в точке 7 с. С помощью термопары также определялся эффективный коэффициент излучения при обработке термограмм, полученных с помощью тепловизора.

В первую очередь, изучалось влияние температуры перегретого водяного пара на характеристики горения дизельного топлива при распылении струей перегретого водяного пара. 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, содержание NO_x . Основная причина связана с тем, что при адиабатическом расширении паровой струи, истекающей из форсунки, ее температура в камере газогенерации резко снижается и на расстоянии ~60 мм от среза паровой форсунки (где находится зона воспламенения) достигает примерно одного значения для разной температуры пара в парогенераторе. Другим объяснением этого может быть то, что температура в камере газогенерации намного выше температуры пара и условия горения оказываются практически одинаковыми при разном перегреве пара. Поэтому измерения проведены при постоянной температуре пара $T_s = (260 \pm 10)^\circ\text{C}$, обеспечивающей достаточный перегрев пара и в то же время – невысокие затраты энергии на нагрев пара. Режимные параметры пара приведены в Таблице 1 (T_b – температура насыщенного пара), воздуха – в Таблице 2.

На рисунке 14 показана карта режимов горения дизельного топлива в струе перегретого водяного пара с характерными фотографиями внешнего факела. Границы области I построены по результатам визуальных наблюдений срыва пламени. Факел в области устойчивого горения II имеет преимущественно синий и желто-синий цвет, что характерно для горения более легкого жидкого топлива, например, керосина, а также газообразных углеводородов. Такое свечение обеспечивается при сгорании водяного газа ($\text{CO} + \text{H}_2$). Границы области III построены на основе результатов газового анализа, в ней концентрации $[\text{CO}] > 500 \text{ ppm}$. 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 (когда для заданного расхода пара получается переобогащенная топливом смесь).

Таблица 1 – Значения параметров пара в парогенераторе при $T_s=(260\pm 10)$ °С.

№.	F_v , кг/ч	p , кПа	$T_s - T_b$, °С
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

Таблица 2 – Значения параметров сжатого воздуха в парогенераторе при $T_{air}=(260\pm 10)$ °С.

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

Для режимов устойчивого горения (область II) 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 (Рис. 15).

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 (Рис. 15-а). С повышением расхода пара (при постоянном расходе топлива) размер факела уменьшается. С увеличением расхода топлива (при постоянном расходе пара), наоборот, размер факела увеличивается.

На рисунке 15-б приведены значения удельного количества тепла, полученного от продуктов сгорания в калориметре. Максимальное значение $q=44,3$ МДж/кг (что соответствует полноте сгорания топлива около 98 %, при высшей теплоте сгорания дизтоплива 44,947 МДж/кг) достигается при $F_f=1,4$ кг/ч и $F_v=0,8$ кг/ч ($\gamma=0,57$, $\omega_k=36\%$), 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.

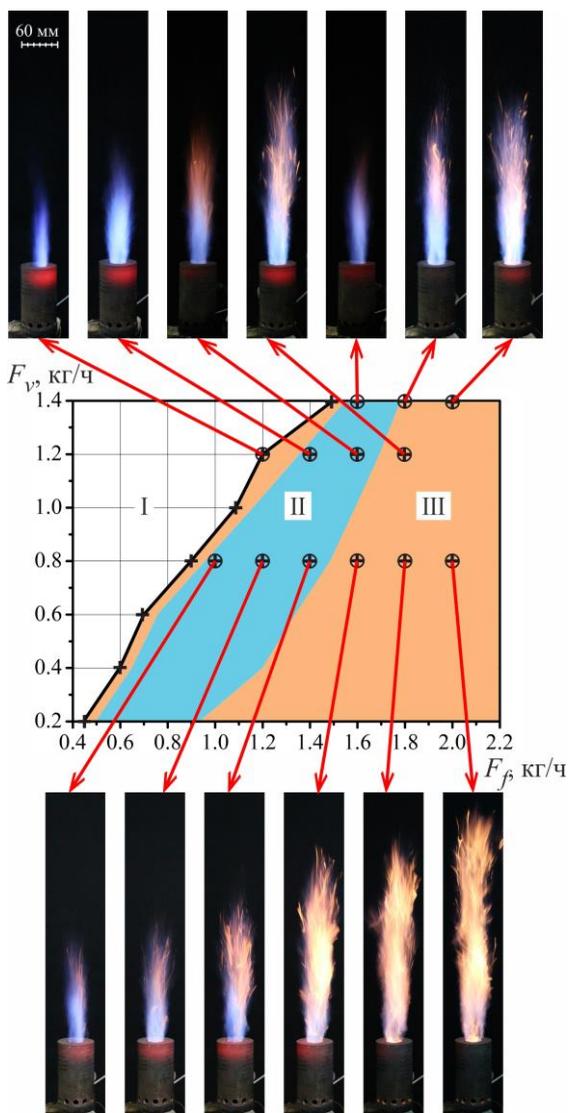


Рисунок 14 – Карта режимов горения дизельного топлива в струе перегретого водяного пара и характерный вид внешнего факела при $T_s = (260 \pm 10)^\circ\text{C}$:

I – срыв пламени (символами «+» обозначены режимы, при которых зафиксирован срыв пламени); II – область устойчивого горения; III – пламя с высоким содержанием CO в продуктах сгорания ($[\text{CO}] > 500 \text{ ppm}$)

Получена карта концентраций CO и удельного значения $\{CO\}$ в широком диапазоне расходов пара и топлива (Рис. 15-в,д). Выявлена область режимов с предельно низкой концентрацией оксида углерода в продуктах сгорания $[CO] < 50$ ppm (Рис. 15-в), в которой факел имеет преимущественно синий цвет (см. Рис. 14). 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 (Рис. 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 удельного количества $\{NO_x\}$ (суммарно NO и NO_2) показаны на рисунках 15-г,е. Наклон изолиний для NO_x совпадает с данными для CO. Для всех исследованных режимов в области II (Рис. 14) $[NO_x]$ не превышает 80 ppm (Рис. 15-г), что соответствует уровню $\{NO_x\} = 90$ мг/кВт ч (Рис. 15-е). Минимальные значения $\{NO_x\}$ наблюдаются у левой границы области II, вблизи срыва пламени, и составляют около 40 мг/кВт ч (Рис. 15-е). Область минимальных значений $\{NO_x\}$ соответствует области максимальной массовой доли пара в соотношении с топливом ω , близкой к 50 %. Вдоль линии минимальных значений $\{CO\}$ (у правой границы) (Рис. 15-в), уровень $\{NO_x\}$ является максимальным, но не превышает 90 мг/кВт ч (Рис. 15-г).

С увеличением расхода пара (при постоянном расходе топлива) наблюдается снижение концентрации NO_x . Основная причина подавления производства NO_x связана с понижением температуры пламени благодаря увеличению теплоемкости горючей смеси при наличии водяного пара. Наибольшее понижение максимальной температуры в факеле при этом зафиксировано на 180 градусов (понижается до 1173 °С).

На рисунке 16 показаны характерные результаты температурных измерений в пламени горелки. Поле мгновенной температуры, как и фотография факела, демонстрируют турбулентную структуру факела. Осредненное поле температуры показывает, 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 16-г показаны профили температуры в поперечном сечении факела на разной высоте: наблюдается хорошее согласование результатов тепловизионных и термометрических измерений.

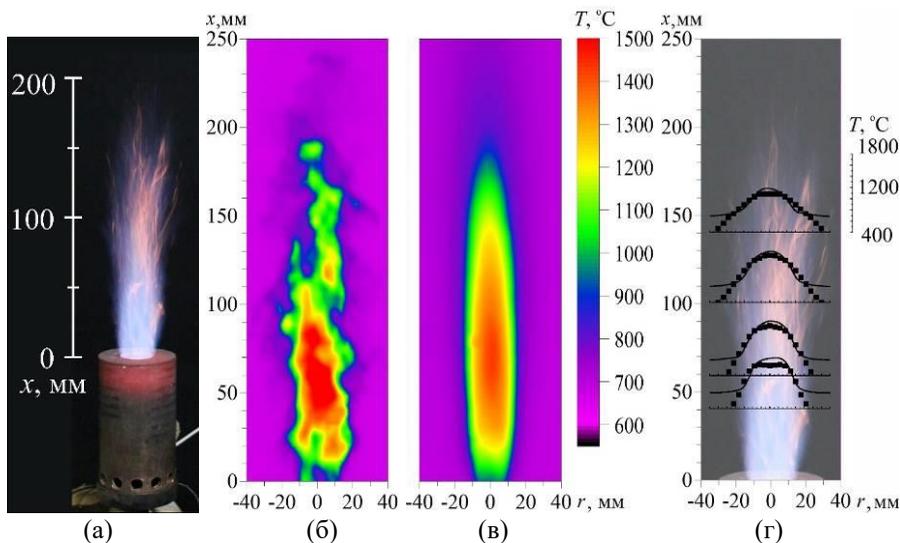


Рисунок 16 – Результаты экспериментов при $F_v = 0,8$ кг/ч, $F_f = 1,2$ кг/ч, $T_s = (260 \pm 10)$ °C: (а) фотография внешнего факела, (б) поле мгновенной температуры, (в) поле средней температуры, (г) профили средней температуры на различной высоте факела («сплошная линия» – измерения тепловизором, «символы» – измерения термопарой)

Жидкотопливные горелки известных мировых брендов (Vissmann, Weishaupt, Elco, Oilon и др.) по вредным выбросам соответствуют стандарту DIN EN 267 (Табл. 3). Для сравнения приведены характеристики популярных моделей дизельных горелок известной фирмы Weishaupt, некоторые из которых удовлетворяют лишь 2 классу норматива. Исследуемая горелка по концентрациям CO и NO_x удовлетворяет самому жесткому 3 классу (см. Рис. 15), а в некоторых режимах имеет более улучшенные показатели по CO – в 12 раз, а по NO_x – в 3 раза (Табл. 3), что говорит о преимуществах технологии сжигания с использованием пара.

Для оценки эффективности использования перегретого водяного пара при сжигании жидких углеводородов проведены сопоставления результатов с данными при распылении дизельного топлива струей сжатого воздуха (см. Табл. 2). На рисунке 17 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 качественно схож с картой при подаче паровой струи (см. Рис. 14). 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 $\{CO\}$, $\{NO_x\}$ (Рис. 18) также имеют схожий вид с результатами при подаче пара. Минимальные значения $\{CO\}$ наблюдаются вдоль правой границы области II и достигают 6 мг/кВт ч. Режимы с минимальным уровнем $\{NO_x\} = 60$ мг/кВт ч соответствуют области максимального отношения массовых расходов воздуха и топлива, близкого к 50%. Вдоль линии минимальных значений $\{CO\}$ (у правой границы) $\{NO_x\}$ имеет высокие значения, превышающие 120 мг/кВт ч, что соответствует 2 классу по EN 267 (Табл. 3). При этом максимальное тепловыделение в режиме с воздухом составляет $q = 43,9$ МДж/кг при мощности $W = 14,6$ кВт. В этом режиме $\{CO\} = 10$ мг/кВт ч, а $\{NO_x\} = 112$ мг/кВт ч, что вдвое превышает уровень для режима горения с паром. Максимальная температура в факеле достигает 1450 °С. Это в среднем на 100 градусов выше, чем в режимах с подачей пара, и способствует повышению производства оксидов азота.

Таким образом, при сжигании дизельного топлива в струе с воздухом минимальное количество оксидов азота на единицу производимой тепловой энергии в полтора раза превышает значение $\{NO_x\}$ в режиме горения с паром, но при этом в обоих случаях наблюдаются высокие значения $\{CO\}$. А в области минимальных $\{CO\}$ значения $\{NO_x\}$ оказываются на 30 % выше в режиме с воздухом, что подтверждает преимущества технологии сжигания с использованием пара.

Таблица 3 – Нормативы по выбросам $\{CO\}$ и $\{NO_x\}$.
Характеристики горелок Weishaupt 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,5-A-H	дизель	16.5...40
3	≤ 120	≤ 60	Weishaupt WL5-A-H 1LN	дизель	16.5...37
	≤ 90 (мин. 40)	≤ 50 (мин. 5)	Паровая горелка	дизель	10...20

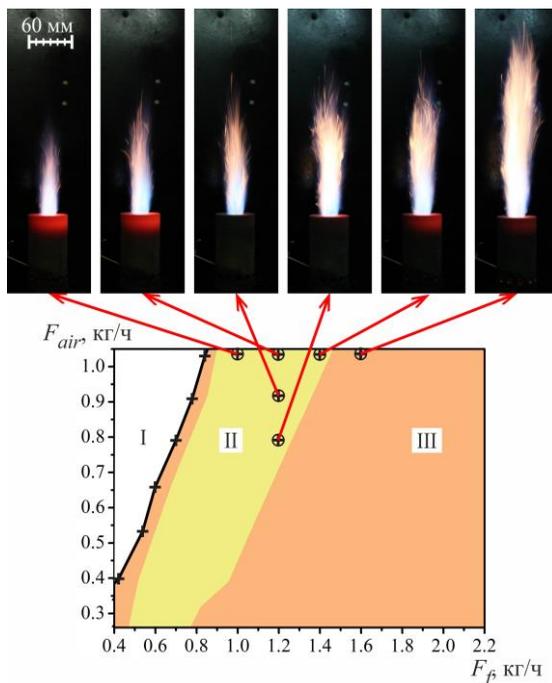


Рисунок 17 – Карта режимов горения дизельного топлива в струе воздуха с характерным видом внешнего факела при $T_a = (260 \pm 10)^\circ\text{C}$: I – срыв пламени (символами «+» обозначены режимы, при которых зафиксирован срыв пламени); II – область устойчивого горения (измерительная область); III – пламя с высоким содержанием CO в продуктах горения ($[\text{CO}] > 500$ ppm)

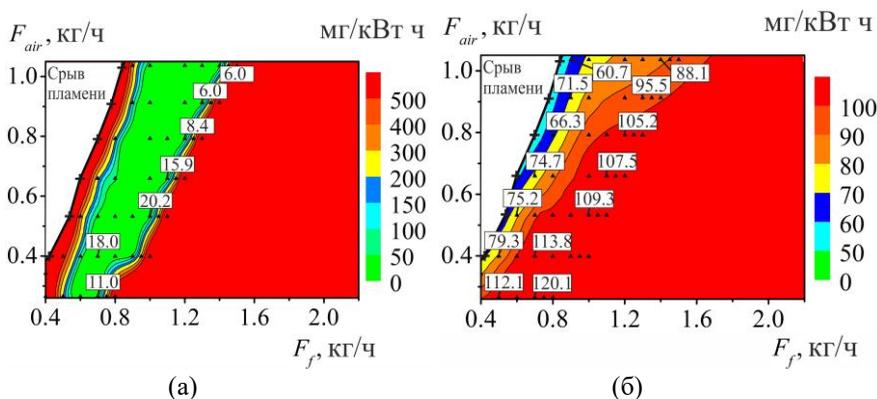


Рисунок 18 – Карта $\{\text{CO}\}$ (а) и $\{\text{NO}_x\}$ (б) в продуктах сгорания ($T_a = (260 \pm 10)^\circ\text{C}$), символами ▲ обозначены исследуемые режимы, изолинии построены на основе сплайн-интерполяции экспериментальных данных

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 газокапельного 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 газокапельный 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 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.

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

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ
ДИССЕРТАЦИИ

Рецензируемые журналы, входящие в перечень ВАК.

1. **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. (Q1)
2. **Anufriev, I. S.** Diesel fuel combustion in a direct-flow evaporative burner with superheated steam supply / I. S. Anufriev, S. V. Alekseenko, O. V. Sharypov, [et al.] // Fuel. – 2019. – Vol. 254. – 115723. (Q1)
3. 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.] // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2019. – Vol. 77. – P. 288-298. (Q1)
4. **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.
5. **Ануфриев, И. С.** Горение жидких углеводородов в струе перегретого водяного пара // Новое в российской электроэнергетике. – 2019. – № 4. – С. 13-24.
6. Копьев Е. П. Изучение характеристик пламени горелочного устройства при распылении жидких углеводородов паровой струей / Е. П. Копьев, **И. С. Ануфриев**, Е. Ю. Шадрин [и др.] // Доклады Академии наук Высшей школы Российской Федерации. – 2019. – Т. 43, № 2. – С. 38-58.
7. **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.
8. **Anufriev, I. S.** Combustion of substandard liquid hydrocarbons in atmosphere burners with steam gasification / I. S. Anufriev, S. V. Alekseenko, E. P. Kopyev, O. V. Sharypov // Journal of Engineering Thermophysics. – 2019. – Vol. 28, № 3. – P. 324-331.
9. 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
10. **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.
11. Алексеенко, С. В. Характеристики сжигания дизельного топлива в горелочном устройстве с подачей струи перегретого водяного пара / С. В. Алексеенко, **И. С. Ануфриев**, М. С. Вигриянов [и др.] // Физика горения и взрыва. – 2016. – Т. 52, № 3. – С. 37-44.

12. 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.
13. **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.
14. **Ануфриев, И. С.** Изучение аэродинамической структуры потока в модели вихревой топке 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.
15. 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, № 7. – P. 653-667.
16. 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.
17. **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 ЖТФ. – 2013. – Т. 39, вып. 10. – С. 36-43.

Патенты РФ.

18. Паромасляное горелочное устройство : пат. Рос. Федерации № 2684300 / **И. С. Ануфриев**, М. С. Вигриянов, С. В. Алексеенко, О. В. Шарыпов, Е. П. Копьев ; патентообладатель ИТ СО РАН ; зарег. 05.04.2019 ; заявка 2018105056, приоритет от 09.02.2018.
19. Горелочное устройство : пат. Рос. Федерации на изобретение № 2678150 / М. С. Вигриянов, С. В. Алексеенко, О. В. Шарыпов, **И. С. Ануфриев** ; патентообладатель ИТ СО РАН ; зарег. 23.01.2019 ; заявка 2018104942, приоритет от 08.02.2018.
20. Горелочное устройство : пат. Рос. Федерации на полезную модель № 82520 / М. С. Вигриянов, С. В. Алексеенко, О. В. Шарыпов, **И. С. Ануфриев** ; патентообладатель ИТ СО РАН ; зарег. 22.08.2018, приоритет от 09.02.2018.
21. Горелочное устройство : пат. Рос. Федерации на изобретение № 2647172 / М. С. Вигриянов, **И. С. Ануфриев**, И. С. Копьев, О. В. Шарыпов, Е. Ю. Шадрин ; патентообладатель ИТ СО РАН ; зарег. 14.03.2018, приоритет от 29.05.2017.
22. Горелочное устройство : пат. Рос. Федерации на изобретение № 2579298 / М. С. Вигриянов, С. В. Алексеенко, **И. С. Ануфриев**, О. В. Шарыпов ; патентообладатель ИТ СО РАН ; зарег. 03.03.2016, приоритет от 18.02.2015.

23. Горелочное устройство : пат. Рос. Федерации на изобретение № 2523591 / М. С. Вигриянов, С. В. Алексеенко, **И. С. Ануфриев**, О. В. Шарыпов ; патентообладатель ИТ СО РАН ; зарег. 27.05.2014, приоритет от 09.04.2013 ; опубл. 20.07.2014, Бюл. № 20.

Другие публикации, индексируемые в базах Scopus и Web of Sciences.

24. **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.

25. **Anufriev, I. S.** IR thermography of flame during combustion of off-grade liquid hydrocarbons in a superheated steam jet / I. S. Anufriev, M. V. Agafontsev, E. L. Loboda // Journal of Physics : Conf. Ser. – 2018. – Vol. 1105, art. 012033. – P. 1-6. DOI: 10.1088/1742-6596/1105/1/012033.

26. **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.

27. **Anufriev, I. S.** Combustion of sub-standard liquid hydrocarbons dispersed by a superheated steam jet / I. S. Anufriev, E. P. Kopyev, O. V. Sharypov [et al.] // Journal of Physics: Conf. Ser. – 2018. – Vol. 1128, art. 012059. – P. 1-6. DOI: 10.1088/1742-6596/1128/1/012059.

28. **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/mateconf/201711503013>.

29. **Anufriev I.** Investigating characteristics of liquid hydrocarbon spraying by a steam jet / I. Anufriev, E. Kopyev, E. Shadrin // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 115, art. 05010. – P. 1-4. DOI: 10.1051/mateconf/201711505010.

30. **Anufriev, I. S.** Thermography of flame during diesel fuel combustion with steam gasification / I. S. Anufriev, S. S. Arsentyev, M. V. Agafontsev // Journal of Physics : Conf. Ser. – 2017. – Vol. 925, art. 012014. – P. 1-6. DOI :10.1088/1742-6596/925/1/012014.

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

Отпечатано в типографии Новосибирского
Государственного технического университета
630073, г.Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Тел./факс (383) 346-08-57
Формат 60 x 84/16. Объем 2.5 п.л. Тираж 120 экз.
Заказ 1224. Подписано в печать 04.09.2019 г.