

На правах рукописи

Копьев Евгений Павлович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА
В УСЛОВИЯХ ПАРОВОЙ ГАЗИФИКАЦИИ**

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент
Шарыпов Олег 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

Касымов Денис Петрович, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», заведующий учебной лабораторией кафедры физической и вычислительной механики.

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Защита состоится 23 декабря 2020 года в 9.30 часов на заседании диссертационного совета Д 003.053.01 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН и на официальном сайте в сети “Интернет” – <http://www.itp.nsc.ru>

Отзывы в двух экземплярах, оформленные в соответствии с требованиями Минобрнауки России, просьба отправлять по адресу: Институт теплофизики СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 1, г. Новосибирск, 630090. dissovet@itp.nsc.ru

Автореферат разослан « ____ » _____ 2020 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета

д.ф.-м.н., профессор

 Кузнецов Владимир Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Энергетика является одной из ключевых отраслей современной мировой экономики, обеспечение экономического роста связано с повышением энергопотребления, при этом затраты на производство энергии в значительной степени определяют доступность товаров и услуг. Высокая стоимость широко используемых энергоносителей, таких как природный газ и качественные нефтепродукты связана, в том числе с истощением запасов доступных первичных энергоресурсов и недостаточным уровнем их полезного использования. Этим обусловлен интерес к применению дешевых низкокачественных видов топлива, не востребованных энергетикой в настоящее время. К ним относятся и различные горючие производственные отходы (отработанные масла и др.). Основная причина низкого удельного веса таких видов топлива в топливно-энергетическом балансе заключается в отсутствии технологий, отвечающих современным требованиям к эффективности и экологической безопасности. Накапливаемые отходы производства создают угрозу экологическому благополучию населения, лишь относительно небольшая их часть перерабатывается, а основная – может найти применение в производстве тепловой энергии. Тем самым, особую **актуальность** приобретают исследования, направленные на развитие научного задела и обоснование разработки новых устройств и технологий, обеспечивающих высокие технические и экологические показатели при производстве энергии с использованием низкокачественных видов углеводородного топлива, в том числе – для решения задач автономного теплоснабжения производственных и жилых объектов.

Одной из перспективных технологий является сжигание низкокачественных видов жидкого углеводородного топлива в «сажепаровом» режиме. Предварительные исследования, проведенные в ИТ СО РАН на оригинальных горелочных устройствах, показали, что процесс горения жидких углеводородов резко интенсифицируется при подаче в зону горения струи перегретого водяного пара (режим горения с паровой газификацией), взаимодействующего с углеродом частиц сажи и других продуктов термического разложения топлива. В результате паровой и воздушной газификации углеродосодержащих компонентов горючей смеси образуются высокореакционные H_2 и CO , формируется высокотемпературный факел с низким содержанием сажи и токсичных продуктов сгорания (CO , NO_x). Для создания высокоэффективных горелочных устройств, работающих в таком режиме, требуются научные

данные о влиянии режимных параметров на структуру факела, тепловые характеристики и экологические показатели при горении различных видов топлива.

Предметом исследования служат основные характеристики и закономерности «сажепарового» режима горения в лабораторных образцах прямоточных жидкотопливных горелочных устройств испарительного типа (**объекты исследования**). **Целью работы** является определение влияния параметров водяного пара на тепловые, газодинамические и экологические характеристики процесса горения жидких углеводородов на примере дизельного топлива и отработанного машинного масла (далее – отработанное масло), обоснование перспективных научно-технических решений. В соответствии с целью, решались следующие основные **задачи**:

- разработка новых технических решений и создание лабораторных образцов оригинальных прямоточных жидкотопливных горелочных устройств испарительного типа мощностью до 10 кВт с подачей в зону горения перегретого водяного пара или воздуха;
- диагностика структуры высокотемпературного турбулентного потока и измерение распределения температуры в факеле в широком диапазоне режимных параметров;
- контроль полноты сгорания топлива и газовый анализ состава продуктов сгорания, определение режимов с низким содержанием токсичных компонентов (CO и NO_x) при различных параметрах подаваемого потока пара и воздуха;
- обоснование способа управления экологическими показателями горения жидких углеводородов в режиме с подачей перегретого водяного пара в зону реакции – применительно к проблеме эффективной и безопасной утилизации производственных отходов.

Научная новизна работы заключается в комплексном изучении влияния параметров пара на тепловые и экологические характеристики горения жидких углеводородов применительно к важным практическим задачам. Получены новые экспериментальные данные, характеризующие процесс горения дизельного топлива и отработанного машинного масла с подачей в зону реакции перегретого водяного пара или воздуха, разработаны и применены новые принципиальные технические решения, реализованные в созданных лабораторных образцах прямоточных жидкотопливных горелочных устройств испарительного типа с

различными способами генерации перегретого пара, определены условия интенсивного горения распространенных видов жидкого углеводородного топлива и производственных отходов с низким производством оксидов азота и монооксида углерода в горелочных устройствах испарительного типа с подачей в зону реакции струи перегретого водяного пара.

Теоретическая значимость работы связана с важностью получения новых научных данных о влиянии перегретого водяного пара на основные характеристики горения жидких углеводородов в конкретных условиях, обоснованием способа управления процессом для достижения высоких тепловых и экологических показателей.

Практическая значимость работы определяется перспективами использования результатов исследований при создании эффективных и экологически безопасных горелочных устройств, реализующих новый способ утилизации производственных отходов с получением тепловой энергии. На разработанные в рамках выполнения работы новые технические решения получены патенты на изобретения, которые используются ООО «ЗиО-КОТЭС» (гор. Новосибирск) по лицензионному договору.

Методология и методы исследования.

Исследования носят экспериментальный характер и основываются на использовании комплекса методов измерения тепловых и газодинамических параметров высокотемпературного турбулентного однофазного потока, а также химического состава охлажденных продуктов реакции. Рассматриваются процессы горения дизельного топлива в автономном горелочном устройстве испарительного типа с нерегулируемыми параметрами перегретого водяного пара, а также горения дизельного топлива и отработанного масла в горелочном устройстве с принудительной подачей пара при заданных параметрах, варьируемых в широком диапазоне. Наряду с подачей пара, эксперименты проведены в режимах с подачей нагретого воздуха. Основными параметрами служат расход топлива и пара (воздуха), температура перегрева пара. Получение данных о структуре газофазного реагирующего турбулентного потока основано на бесконтактном методе цифровой трассерной визуализации (particle image velocimetry, PIV). Распределения температуры в факеле различных образцов горелочных устройств, в том числе в зависимости от параметров подаваемого пара,

исследованы с использованием термопарного и тепловизионного методов. Контроль полноты сгорания топлива в различных режимах осуществляется калориметрическим методом. Газовый анализ состава продуктов сгорания выполнен на аттестованном газоаналитическом оборудовании. Производились автоматизированный сбор и компьютерная обработка массивов экспериментальных данных, полученных для различных режимов горения с подачей перегретого пара или воздуха. Выполнен анализ результатов, представленных в форме таблиц и в виде графиков. Разработаны и применены новые технические решения.

На защиту выносятся:

1. Разработанные новые технические решения, примененные при выполнении исследований.
2. Результаты экспериментального исследования комплекса тепловых, газодинамических и экологических характеристик процесса горения жидких углеводородов в горелочных устройствах испарительного типа с различными способами генерации перегретого водяного пара, подаваемого в зону реакции.
3. Закономерности влияния соотношения расходов пара и топлива, температуры пара на показатели горения.
4. Сравнительный анализ полученных результатов для режимов горения дизельного топлива и отработанного масла с подачей перегретого водяного пара и с подачей нагретого воздуха.
5. Обоснование способа управления горением жидких углеводородов при подаче перегретого водяного пара для обеспечения эффективного и экологически безопасного сжигания.

Степень достоверности. Результаты диссертационной работы были получены при помощи экспериментальных методов и оборудования, соответствующих поставленным задачам, проводились статистическая обработка данных и оценка погрешностей измерений, контролировалась воспроизводимость результатов в пределах определенных доверительных интервалов.

Апробация результатов. Результаты исследований и используемые методики были вынесены на обсуждение как в форме публикации статей в ведущих рецензируемых журналах, так и в виде представления докладов на всероссийских и международных конференциях: международной конференции «Студент и научно-технический прогресс» (Новосибирск, 2014, 2015), Всероссийской научно-практической конференции с

международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» (Томск 2014), International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics (Новосибирск, 2014), Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 2014, 2018), Всероссийской конференции «Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, 2014, 2017), Всероссийской школе-семинаре молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидро-газодинамики» (Новосибирск, 2014, 2016), Всероссийской конференции с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (Новосибирск, 2015), Минском международном коллоквиуме по физике ударных волн, горения и детонации (Минск, 2015, 2017), международной конференции «Минский международный форум по тепломассообмену» (Минск, 2016), Всероссийской школе-конференции с международным участием «Химия и физика горения и дисперсных систем» (Новосибирск 2016), Всероссийской научной конференции с элементами школы молодых учёных «Теплофизика и физическая гидродинамика» (Ялта, 2016, 2018), Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (Санкт-Петербург, 2017), международной научно-технической конференции «Перспективы развития новых технологий в энергетике России» (Москва, 2017), International Seminar on Flame Structure (Новосибирск, 2017), International School of Young Scientists «Interfacial Phenomena and Heat Transfer» (Новосибирск, 2017).

Публикации. Полученные результаты диссертации опубликованы, в том числе в виде 7 статей в научных журналах, рекомендованных ВАК, получено 3 патента РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы из 170 наименований, 3 приложений, общий объем диссертационной работы составляет 130 страниц, включая 41 рисунок, 7 таблиц.

Личный вклад автора. Работа выполнена под научным руководством д.ф.-м.н. Шарыпова О.В. Личный вклад автора заключается в участии в создании и модернизации экспериментального стенда, проведении экспериментов, обработке полученных данных, анализе и обобщении результатов исследований, подготовке материалов к публикации. Автор внес определяющий вклад в получение результатов, обладающих научной новизной; основные выносимые на защиту результаты получены им лично.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования, характеризуется степень ее разработанности, осуществляется выбор предмета, объекта и методов исследования, определяются цель и задачи работы, формулируются положения, выносимые на защиту, их научная новизна, достоверность, теоретическая и практическая значимость.

В **первой главе** приведен обзор современного состояния проблемы, рассмотрены представленные в научной литературе подходы к исследованию физико-химических процессов при горении жидких углеводородов, проанализированы достигнутые результаты и предложенные технические решения. При сгорании таких видов топлива можно выделить следующие основные стадии (процессы): термическое разложение и испарение топлива, газификация углеродосодержащих компонентов, воспламенение газообразных продуктов термического разложения. Химико-кинетические зависимости и показатели горения определяются составом горючей смеси, концентрацией активных радикалов, теплофизическими свойствами компонентов. В зависимости от условий в широком диапазоне могут изменяться полнота сгорания топлива, удельное тепловыделение, содержание сажи и токсичных продуктов, опасных для окружающей среды и человека, таких как оксиды азота, монооксид углерода и т.д. Рассматриваемый процесс является многопараметрическим, его изучение требует применения комплексного подхода.

В научной литературе представлены результаты исследований, подтверждающие эффективность добавления воды в горючую смесь как способа снижения производства оксидов азота и подавления сажеобразования при горении органических топлив. Вода и пар используются на практике для решения целого ряда задач: от снижения тепловой нагрузки и подавления детонации в камере сгорания до диспергирования тяжелых топлив и сжигания водо-топливных эмульсий. Анализ литературы показывает, что влияние параметров пара на показатели горения жидких углеводородов в настоящее время изучено недостаточно полно, для нестандартных видов топлива отсутствуют данные, позволяющие прогнозировать характеристики горения и состав продуктов сгорания. Исследования в основном носят экспериментальный характер и проведены при невысоком перегреве пара. Математическое моделирование горения нестандартных видов горючего затруднено ввиду дефицита достоверных данных о химической кинетике. Проведенный

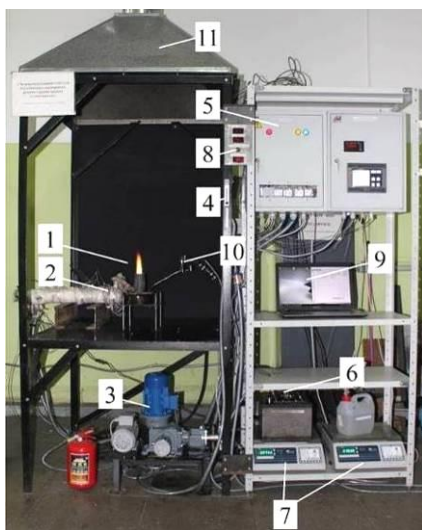
обзор подтверждает научную новизну задач, поставленных в диссертационной работе, а также необходимость применения экспериментального подхода к их решению.

Представлен обзор методов экспериментального изучения характеристик процессов горения: контактные (термоанемометрия) и бесконтактные (particle image velocimetry (PIV), лазерно-доплеровская анемометрия) методы диагностики газодинамической структуры пламени; контактные (термопарные) и бесконтактные (тепловизионные) методы измерения распределения температуры в реагирующем потоке; калориметрические методы определения тепловыделения; методы газового анализа для контроля состава продуктов сгорания. Определен комплекс методов измерений, позволяющий решить поставленные задачи. Для изучения осесимметричной осредненной по времени пространственной структуры турбулентного пламени достаточно точным и производительным является метод PIV, позволяющий получать поле скорости в заданной плоскости. Для исследования распределения температуры в факеле определенными преимуществами обладает бесконтактный (оптический) метод ИК-термографии, поскольку не вносит возмущений в поток и позволяет получать «панорамные данные» с высоким временным и пространственным разрешением. Поскольку применение оптических методов при измерении температуры в оптически прозрачном объекте имеет определенные методические трудности, то, наряду с ними, целесообразно использовать также и контактные (термопарные) методы. Решение задачи определения количества выделяемого тепла на единицу массы топлива и мощности тепловыделения обеспечивается измерениями на проточном калориметре с оценкой потоков тепла, связанных с предварительным нагревом компонентов и потерями тепла в окружающую среду. Для оценки содержания токсичных компонентов в продуктах сгорания необходимо использование газоаналитического оборудования.

Изучение характеристик горения жидких углеводородов предполагает использование горелочных устройств (ГУ). Приведенный обзор современных горелочных устройств обосновывает выбор в качестве основы разработанных в ИТ СО РАН лабораторных горелочных устройств испарительного типа, обеспечивающих как автономный режим работы с подачей перегретого водяного пара в зону горения, так и режимы горения с паром (или воздухом) параметры которого регулируются в широком диапазоне расхода и перегрева.

Вторая глава посвящена описанию разработанных технических решений и ГУ, созданной экспериментальной установки и применяемых измерительных методик. Огневой стенд, оснащён современным измерительным оборудованием и системами для исследования влияния перегретого водяного пара на процесс горения жидких углеводородов (Рисунок 1).

На Рисунке 2 представлена схема экспериментальной установки, включающей автоматизированные системы с централизованным управлением параметрами: систему генерации перегретого водяного пара, состоящую из контура подачи питательной воды (расход $0.2 \div 1.4$ кг/ч) и электрического парогенератора (перегрев пара до 400 град.); систему подачи воздуха (расход $0.3 \div 1.0$ кг/ч); систему подачи и подогрева жидкого топлива (расход $0.4 \div 2.2$ кг/ч).



- 1 – ГУ с принудительной подачей перегретого водяного пара,
- 2 – парогенератор,
- 3 – плунжерный дозирующий насос,
- 4 – система подачи сжатого воздуха,
- 5 – автоматизированная система управления парогенератором и подачей топлива,
- 6 – система подачи топлива,
- 7 – электронные весы,
- 8 – индикаторы контрольно-измерительных приборов,
- 9 – компьютер,
- 10 – топливopровод,
- 11 – система вентиляции.

Рисунок 1 – Вид огневого стенда

Для исследования процессов горения жидкого углеводородного топлива в режимах с паровой и воздушной газификацией используются два типа прямоточных жидкотопливных ГУ испарительного типа мощностью до 10 кВт: горелочное устройство, обеспечивающее автономную подачу перегретого пара в зону горения (для производства пара не требуется дополнительное оборудование и внешние источники энергии, Рисунок 3-а);

горелочное устройство с системой принудительной подачи и регулирования параметров перегретого водяного пара или воздуха (Рисунок 3-б), включающей разработанный электрический парогенератор (патент РФ № 2701970) и насос.

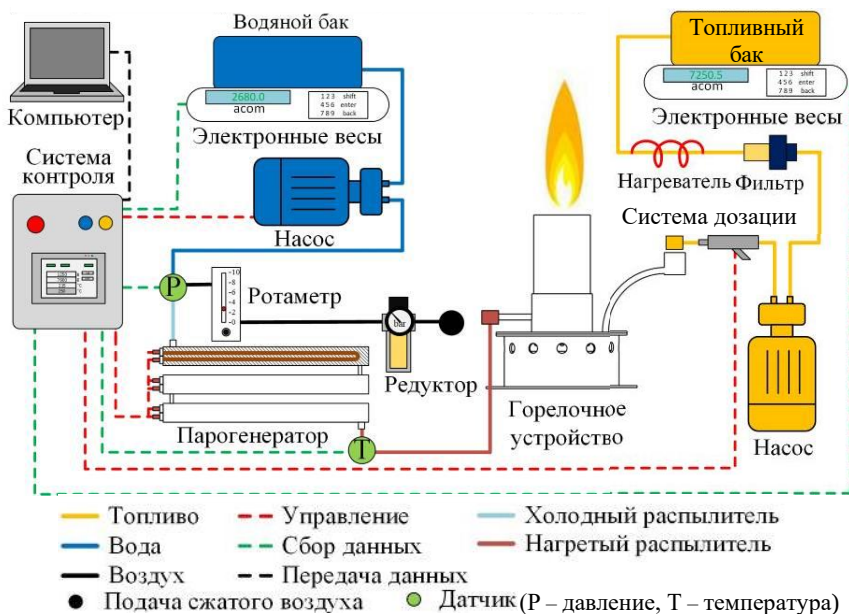


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки

Конструкцией автономного ГУ предусмотрено наличие резервуара с водой, получающей тепло непосредственно из зоны горения. Пар, проходя через пароперегреватель и паросепаратор, в виде струи истекает в зону горения. В установившемся режиме давление в резервуаре составляет 7 атм при расходе топлива 0.65 кг/ч, подаваемого в нижнюю часть ГУ. Время работы такого ГУ ограничено запасом воды. Для проведения исследований и дальнейшего практического применения было разработано автономное ГУ, время работы которого составляет около 6 ч (патент РФ № 2705494). Благодаря разработанному пусковому ГУ (патент РФ № 2705495) время выхода автономного ГУ на установившийся режим удалось сократить с 30 минут до пяти (пусковое ГУ показано на Рисунке

3-в в режиме горения этилового спирта). Через форсунки в ГУ, вместо пара, может подаваться сжатый воздух с регулируемым расходом.

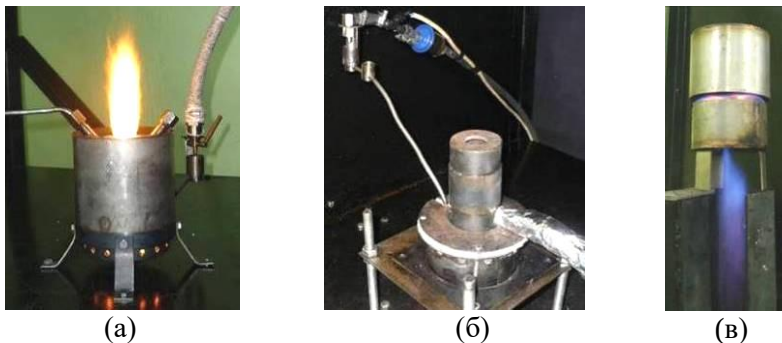


Рисунок 3 – Вид горелочных устройств

Второй тип ГУ отличается тем, что пар (или воздух) подается к форсунке от электрического парогенератора. Последовательно соединенные нагревательные блоки парогенератора представляют собой металлические трубы, внутри которых установлены трубчатые электрические нагреватели, а в стенках выполнены спиральные каналы прямоугольного сечения. Массовый расход и перегрев пара в парогенераторе регулируются насосом и мощностью электрических нагревателей (в диапазоне 0.2 – 1.4 кг/ч, 0.5 – 15 атм, 100 – 600°C), параметры пара контролируются датчиком давления и термопарой. В режимах горения без пара через парогенератор подается воздух с регулируемым расходом, который нагревается до заданной температуры.

Для оптической диагностики газодинамической структуры пламени использовалась двухкомпонентная PIV-система «Полис», разработанная в ИТ СО РАН и включающая импульсный лазер, цифровую камеру со светофильтром. В качестве трассеров применялись продукты термического разложения силиконового масла, добавляемого в топливо (50 г на 1 кг топлива).

Изучение распределения температуры во внешнем факеле проводилось при помощи тепловизионной камеры FLIR серии JADE, обладающей широким диапазоном параметров как по скорости съемки (до 18 000 кадров/с), так и по измеряемому спектру излучения. Использовался узкополосный оптический фильтр в диапазоне 2.5–2.7 мкм, соответствующем излучению паров воды и углекислого газа – основных

продуктов сгорания. Для согласования и контроля результатов использовалась платинородий-платинородиевая термопара, установленная на координатно-перемещающем устройстве, синхронизированном с системой сбора данных, включающей 24-битный АЦП. На основании сопоставления результатов термодинамических и оптических измерений температуры определено значение коэффициента излучения пламени.

Исследование тепловыделения и состава продуктов сгорания осуществлялось на проточном калориметре, оснащённом газоанализатором. Термопарами измерялась разность температуры теплоносителя (воды) на входе и выходе калориметра, контролировались объёмный расход теплоносителя и массовый расход топлива, по этим данным рассчитывалось удельное тепловыделение и тепловая мощность.

В третьей главе описаны результаты проведенного комплексного экспериментального исследования газодинамических, тепловых и экологических характеристик горения жидких углеводородных топлив в разработанных ГУ: дизельного топлива в автономном ГУ; дизельного топлива и отработанного масла в ГУ с принудительной подачей перегретого водяного пара (или воздуха). Согласно результатам химического анализа элементного состава, брутто-формулы используемых видов горючего: $C_{12}H_{22,38}O_{0,084}$ (дизельное топливо), $C_{12}H_{23,04}N_{0,084}O_{0,156}$ (отработанное масло).

Для автономного ГУ получены распределения осредненной температуры, осевой и радиальной компонент осредненной скорости в факеле (Рисунок 4) при относительном массовом расходе пара $\gamma = 0.4$ ($\gamma = F/F_f$, где F – массовый расход пара или воздуха, $F_f = 0.65$ кг/ч – массовый расход топлива), измерены пульсационные характеристики скорости потока.

Результаты измерений демонстрируют существенное влияние водяного пара на характеристики режима горения дизельного топлива. Подача в зону реакции струи перегретого пара приводит к резкой интенсификации горения, что выражается в формировании высокотемпературного короткого внешнего факела (Рисунок 4-а), скорость в котором достигает 30 м/с (Рисунок 4-г). Зарегистрированы высокочастотные пульсации давления в факеле (~100 Гц), свидетельствующие о нестационарности процесса смесеобразования и воспламенения в ГУ. Показано, что максимальная температура (до 1500°C) достигается на некотором расстоянии от среза горелки (Рисунок 4-в), т.е.

догорание смеси происходит во внешнем факеле при поступлении окислителя из атмосферы.

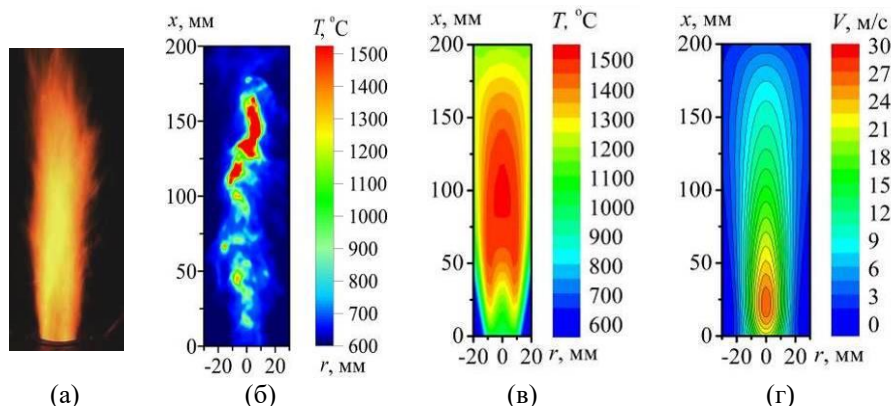


Рисунок 4 – Фотография факела (а); «мгновенное» распределение температуры в факеле, измеренной тепловизором (б); примеры распределений осредненных по времени температуры в факеле, измеренной термопарой (в), и аксиальной компоненты средней скорости (г) (относительный массовый расход пара $\gamma = 0.4$)

На проточном калориметре в различных режимах горения с подачей пара и воздуха проведены измерения количества тепла, получаемого от продуктов сгорания дизельного топлива в автономном ГУ. С учетом погрешности (2.5%) удельное тепловыделение (q) составило 99.6–94.7% от высшей теплотворной способности (44.9 МДж/кг), что свидетельствует о высокой полноте сгорания топлива. Мощность тепловыделения (W), относительный массовый расход пара или воздуха (γ) и объемный расход уходящих газов (G_{fg}) приведены в Таблице 1. Сравнение показателей в режимах горения с подачей пара и воздуха производилось при сопоставимых значениях W (с учетом погрешности). При этом давление в бачке-испарителе в режиме с паром составляло 7 атм, а с воздухом – 5 атм.

Результаты газового анализа показали, что режим горения дизельного топлива в автономном ГУ с подачей пара обеспечивает более низкую объемную концентрацию контролируемых токсичных компонентов продуктов сгорания по сравнению с режимом горения с подачей воздуха (NO_x – на 20%, CO – в два с половиной раза).

Таблица 1 – Результаты calorиметрических измерений
и газового анализа (автономное ГУ)

Режим горения	γ	q , МДж/кг	W , кВт	G_{fg} , м ³ /ч	Содержание веществ в газо- образных продуктах сгорания			
					O ₂	CO ₂	CO	NO _x
с подачей пара	0.4	43.6	7.9	17.8	% об.		ppm	
					12.5 ±2.1	6.4 ±1.6	20±8	17±6
							г / кг топлива	
							0.6	0.9
с подачей воздуха	0.5	41.4	7.5	17	% об.		ppm	
					12.1 ±1.9	6.7 ±1.5	50±7	22±6
							г / кг топлива	
							1.5	1.1

На ГУ с принудительной подачей перегретого водяного пара исследовано влияние параметров пара (расход и температура) на характеристики горения дизельного топлива и отработанного масла. При заданном массовом расходе топлива (0.8 кг/ч) исследованы режимы с различными значениями отношения массового расхода пара и воздуха к расходу топлива (γ) при разной температуре в парогенераторе (150–565°C), перегрев пара достигал 425°C. Отработанное масло предварительно нагревалось до 50°C для снижения вязкости. Представленные на Рисунке 5 фотографии факела и карта режимов демонстрируют определяющее влияние параметра γ на характер процесса. Оценка количества кислорода, поступающего с воздухом в ГУ, показывает, что даже с учетом кислорода, содержащегося в подаваемом водяном паре, процессы внутри ГУ протекают в условиях значительного недостатка окислителя.

По результатам термопарных измерений для режимов с паром и с воздухом, область с максимальной температурой приближается к срезу горелки по мере увеличения γ (Рисунок 6). При этом согласно видеорегистрации, длина факела уменьшается. С уменьшением γ максимальное значение температуры при горении дизельного топлива снижается от 1500°C до 1400°C. При подаче, вместо перегретого пара, струи воздуха максимальное значение температуры достигает 1600°C. При горении отработанного масла с подачей пара максимальная температура достигает 1400°C, а в случае подачи воздуха – 1600°C.

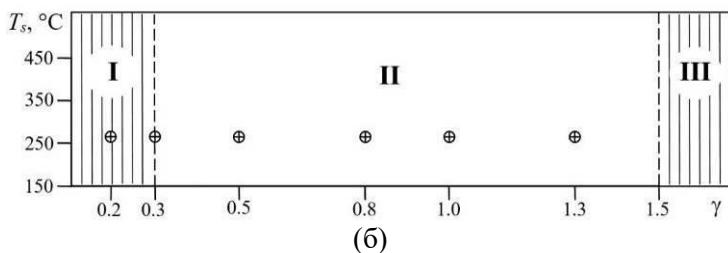
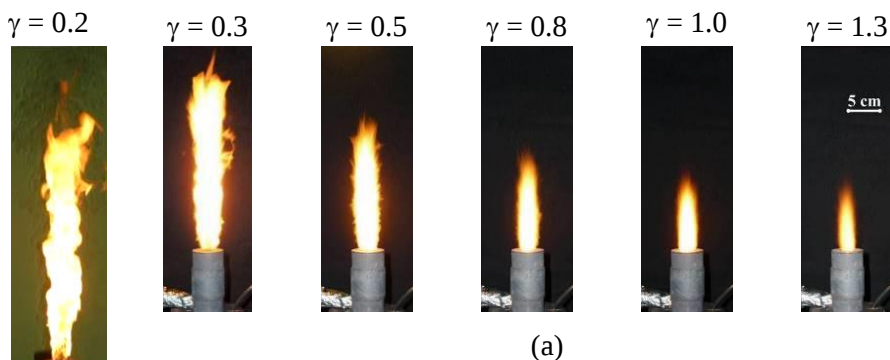


Рисунок 5 – Вид факела (а) и карта режимов (б) в зависимости от γ .
 Характерные режимы: пламя с высоким содержанием сажи (I);
 устойчивое интенсивное горение (II); срыв горения (III).
 Символами $\oplus$ отмечены режимы, соответствующие фотографиям

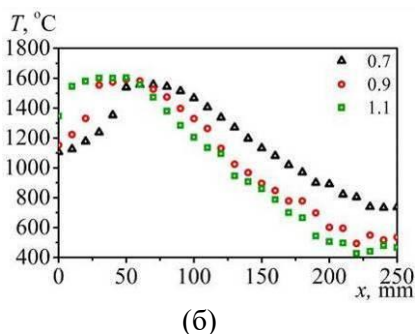
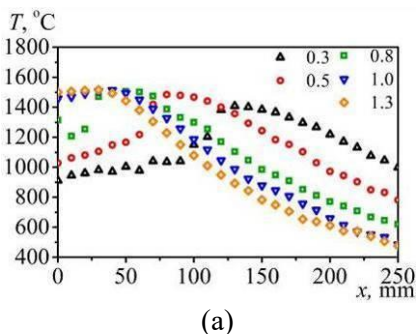


Рисунок 6 – Распределение средней во времени температуры
 вдоль оси внешнего факела при различном значении γ в режимах
 горения дизельного топлива: с паром (а); с воздухом (б)

Количество тепла (q) измерялось для обоих видов топлива как с подачей в зону реакции струи пара, так и (вместо этого) воздушной струи. При охлаждении продуктов сгорания в калориметре происходила конденсация водяного пара. Тепло, полученное газом в парогенераторе, учитывалось в тепловом балансе. Результаты показали, что в пределах погрешности q слабо изменяется при изменении γ , не зависит от температуры пара или воздуха в парогенераторе и имеет значение, близкое к высшей теплоте сгорания топлива.

По результатам газового анализа состава уходящих газов при сжигании дизельного топлива и отработанного масла в ГУ с принудительной подачей перегретого водяного пара определен диапазон режимов ($0.8 < \gamma < 1.0$), обеспечивающих низкое содержание токсичных продуктов сгорания. На Рисунках 7 и 8 представлено содержание CO и NO_x в продуктах сгорания в зависимости от γ для разных режимов горения исследуемых видов топлива. Концентрация NO_x в продуктах сгорания дизельного топлива снижается с 60 до 20 ppm с ростом относительного расхода пара от 0.3 до 1.5; концентрация CO ниже предела чувствительности прибора (2 ppm) при $\gamma < 0.8$, но резко возрастает при $\gamma > 0.8$. При горении отработанного масла концентрации NO_x и CO существенно выше. Влияния температуры пара и воздуха на концентрацию NO_x и CO не обнаружено.

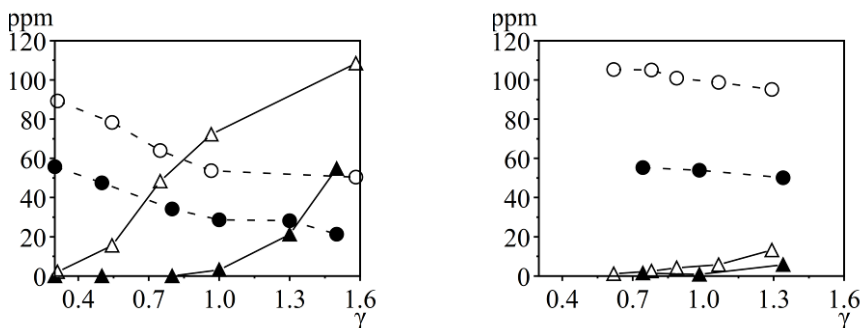


Рисунок 7 – Объемная концентрация CO (▲,△) и NO_x (●,○) для дизельного топлива (▲,●) и отработанного масла (△,○) в режиме горения: с паром (слева); с воздухом (справа)

При подаче воздушной струи (вместо пара) концентрации NO_x и CO слабо зависят от расхода и температуры воздуха. При низкой концентрации

CO в продуктах сгорания дизельного топлива и отработанного масла концентрация NO_x соответствует худшим показателям режима горения с паром. Тем самым, подача воздуха (в отличие от подачи пара) не позволяет управлять экологическими показателями сжигания жидких углеводородов. Использование пара обеспечивает возможность выбора режима с низкой эмиссией как CO, так и NO_x при достаточно высокой полноте сгорания топлива, причем основным управляющим параметром служит отношение массовых расходов пара и топлива (γ).

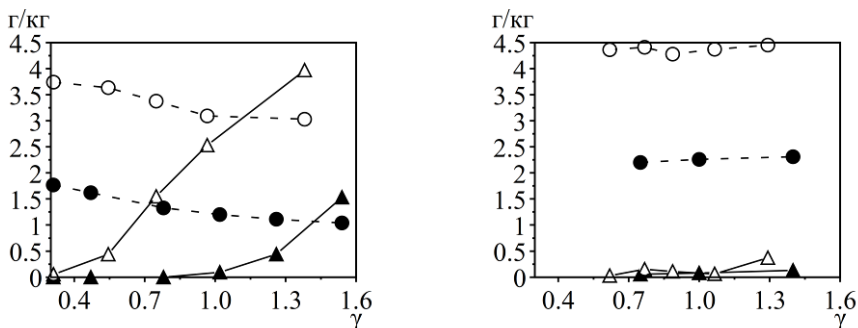


Рисунок 8 – Количество CO (▲,△) и NO_x (●,○) в расчете на 1 кг дизельного топлива (▲,●) и отработанного масла (△,○) в режиме горения: с паром (слева); с воздухом (справа)

Таблица 2 – Классификация горелочных устройств Weishaupt по удельным выбросам NO_x и CO и показатели исследуемых ГУ

ГУ на дизельном топливе	Мощность	Класс	CO, г/кг	NO _x , г/кг
WL5/1-B	21.5–40 кВт	2	≤ 1.3	≤ 2.2
WL5-A-H	16.5–40 кВт			
WL5-A-H 1LN	16.5–37 кВт	3	≤ 0.7	≤ 1.4
автономное ГУ в режиме с паром	7.9 кВт		0.6 (20 ppm)	0.9 (17 ppm)
автономное ГУ в режиме с воздухом	7.5 кВт		1.5 (50 ppm)	1.1 (22 ppm)
ГУ с принудительной подачей пара, $\gamma = 0.9$	9.9 кВт		< 0.1 (< 2 ppm)	1.26 (30 ppm)
ГУ с принудительной подачей воздуха, $\gamma = 0.9$	9.7 кВт		< 0.1 (< 2 ppm)	2.25 (55 ppm)

Согласно данным, приведенным в Таблице 2, экологические показатели разработанных ГУ испарительного типа при сжигании дизельного топлива с подачей перегретого водяного пара значительно ниже предельно допустимых концентраций и удовлетворяют наиболее жестким требованиям, предъявляемым к жидкотопливным ГУ (третий класс Стандарта DIN EN 267:2011-11), превосходят удельные показатели (на кг топлива) сопоставимых по мощности горелочных устройств ведущих производителей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В широком диапазоне режимных параметров работы горелочных устройств испарительного типа (расход топлива, перегрев и расход пара или воздуха) получены экспериментальные данные, характеризующие процесс горения дизельного топлива и отработанного машинного масла с подачей в зону реакции перегретого водяного пара или воздуха: распределения температуры и скорости реагирующего потока, тепловыделение, газовый состав продуктов сгорания. На основе анализа полученных данных:

а) показано, что относительный массовый расход пара является основным фактором, определяющим содержание оксидов азота и монооксида углерода в продуктах сгорания, – выбор значения этого параметра позволяет управлять экологическими показателями горения;

б) построена карта режимов и определен диапазон относительного массового расхода пара, в котором достигается низкая эмиссия оксидов азота и монооксида углерода при высокой тепловой производительности, – тем самым обоснован применимый на практике метод оптимизации режима работы горелочного устройства;

в) доказано, что режим горения с подачей пара по сравнению с режимом с подачей воздуха обеспечивает более низкий уровень эмиссии оксидов азота при близких тепловых показателях;

г) установлено, что разработанные горелочные устройства по экологическим показателям с запасом удовлетворяют наиболее жестким современным требованиям и превосходят известные образцы жидкотопливных горелочных устройств аналогичной мощности.

2. Созданы лабораторные образцы оригинальных прямоточных жидкотопливных горелочных устройств испарительного типа мощностью до 10 кВт, разработаны и применены новые технические решения, на которые получены патенты РФ на изобретения:

а) жидкотопливное горелочное устройство длительного действия (испарительного типа с автономным производством перегретого водяного пара, подаваемого в зону горения);

б) пусковое горелочное устройство, обеспечивающее сокращение времени выхода на установившийся режим работы используемых горелочных устройств с автономным производством пара;

в) электрический парогенератор для производства потока перегретого водяного пара с заданными параметрами (перегрев, расход).

3. Выполненные экспериментальные исследования позволили научно обосновать метод интенсификации горения жидких углеводородов применительно к задаче утилизации некоторых видов опасных производственных отходов. На примере сжигания отработанного машинного масла в разработанных горелочных устройствах испарительного типа (до 10 кВт) с подачей струи перегретого водяного пара реализованы режимы интенсивного устойчивого горения с высокой полнотой сгорания топлива при низком удельном содержании оксидов азота и монооксида углерода в продуктах сгорания.

Список публикаций автора по теме диссертации

1. 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, **Е.Р. Копьев** // Fuel. – 2019. – Vol. 254. – Article No. 115723. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.115723 (из перечня ВАК)

2. Алексеенко, С.В. Влияние параметров перегретого водяного пара на процесс горения жидких углеводородов / С.В. Алексеенко, И.С. Ануфриев, С.С. Арсентьев, М.С. Вигриянов, **Е.П. Копьев**, О.В. Шарыпов // Теплофизика и аэромеханика. – 2019. – Т. 26, № 1. – С. 109-113. DOI: 10.1134/S0869864319010104 (из перечня ВАК)

3. **Копьев Е.П.** Изучение характеристик пламени горелочного устройства при распылении жидких углеводородов паровой струей / Е.П. Копьев, И.С. Ануфриев, Е.Ю. Шадрин, Е.Л. Лобода, М.В. Агафонцев, М.А. Мухина // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2019. – Выпуск 2, № 43. – С. 38–55. (из перечня ВАК)

4. 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, **Е.П. Копьев**, О.В. Шарыпов // Физика горения и взрыва. – 2016. – Т. 52, № 3. – С. 37–44. DOI: 10.15372/FGV20160305 (из перечня ВАК)

5. Алексеенко, С.В. Сажепаровый режим горения жидких углеводородов: распределение скорости в факеле горелки / С.В. Алексеенко, И.С. Ануфриев, М.С. Вигриянов, В.М. Дулин, **Е.П. Копьев**, О.В. Шарыпов // Теплофизика и аэромеханика. – 2014. – Т. 21, № 3. – С. 411–414. DOI: 10.1134/S0869864314030123 (из перечня ВАК)

6. **Копьев, Е.П.** Thermography of flame during combustion of diesel fuel in the vaporizing burner / E.P. Kopyev, M.V. Agafontsev, E.L. Loboda, E.Yu. Shadrin // Journal of Physics: Conf. Series. – 2018. – Vol. 1128. – Article No. 012067. – 7 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1128/1/012067 (Scopus).

7. Anufriev, I.S. Thermography of flame during diesel fuel combustion with steam gasification / I.S. Anufriev, S.S. Arsentyev, M.V. Agafontsev, **Е.П. Копьев**, E.L. Loboda, E. Shadrin, O.V. Sharypov // Journal of Physics: Conf. Series. – 2017. – Vol. 925. – Article No. 012014. – 6 p. DOI: 10.1088/1742-6596/925/1/012014 (из перечня ВАК).

8. Пат. РФ № 2701970, F22B 1/28, F22B 27/14. Электрический парогенератор / **Копьев Е.П.**, Вигриянов М.С., Ануфриев И.С., Шарыпов О.В., Осинцев Я.А. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН). – № 2019101397 ; заявл. 17.01.2019 ; опубл. 02.10.2019, Бюл. № 28.

9. Пат. РФ № 2705494, F23C 99/00, F23L 7/00. Автономное горелочное устройство длительного действия / Вигриянов М.С., Алексеенко С.В., Ануфриев И.С., **Копьев Е.П.**, Арсентьев С.С., Осинцев Я.А. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН). – № 2019101396; заявл. 17.01.2019; опубл. 07.11.2019, Бюл. № 31.

10. Пат. РФ № 2705495, F23Q 13/00, F23C 99/00, F23L 7/00. Пусковое горелочное устройство / Алексеенко С.В., Вигриянов М.С., **Копьев Е.П.**, Ануфриев И.С., Шарыпов О.В. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН). – № 2019101398; заявл. 17.01.2019 ; опубл. 07.11.2019, Бюл. № 31.

11. Anufriev, I.S. Study of flame characteristics during liquid hydrocarbons combustion with steam gasification / I.S. Anufriev, **Е.П. Копьев**, E.L. Loboda // Proc. SPIE 9292, 20th International Symposium on

Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – 2014. – 6 p. DOI: 10.1117/12.2086623.

12. Алексеенко, С.В. Сжигание жидких углеводородов с подачей перегретого пара / С.В. Алексеенко, И.С. Ануфриев, М.С. Вигриянов, **Е.П. Копьев**, О.В. Шарыпов // VI Российская национальная конференция по теплообмену (РНКТ-6). – 27-31 октября 2014, Москва, Национальный исследовательский университет «МЭИ». – 4 с.

13. Ануфриев, И.С. Тепловизионные исследования пламени при сжигании жидких углеводородов с паровой газификацией / И.С. Ануфриев, Е.Л. Лобода, **Е.П. Копьев** // V Всероссийская научная конференция с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий», Томск, ТПУ, 15-17 октября 2014 г. – 4 с.

14. Алексеенко, С.В. Сжигание жидкого углеводородного топлива с паровой газификацией / С.В. Алексеенко, И.С. Ануфриев, М.С. Вигриянов, **Е.П. Копьев**, О.В. Шарыпов // Всероссийская конференция «XXXI Сибирский теплофизический семинар», ИТ СО РАН, Новосибирск, 17–19 ноября 2014. – № 2-01. – С. 543-546.

15. Алексеенко, С.В. Сжигание жидких углеводородов с паровой газификацией / С.В. Алексеенко, И.С. Ануфриев, М.С. Вигриянов, **Е.П. Копьев**, О.В. Шарыпов // Сборник докладов. IV Минский международный коллоквиум по физике ударных волн, горения и детонации, 9-12 ноября 2015 г., Минск, Белоруссия. – С. 11–17. Изд-во: Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси. ISBN 978-985-7138-01-2.

16. Ануфриев, И.С. Исследование наночастиц сажи при сжигании дизельного топлива в присутствии перегретого водяного пара / И.С. Ануфриев, А.М. Бакланов, О.В. Боровкова, **Е.П. Копьев**, В.В. Лещевич, Е.Ю. Шадрин, О.В. Шарыпов // XV Минский международный форум по тепло- и массообмену (ММФ-XV), Минск, Беларусь, 23-26 мая 2016. – ИТМО НАНБ, 2016. – Т. 2. – С. 18-22. ISBN 978-985-7138-03-6

17. Алексеенко, С.В. Сжигание некондиционных жидких углеводородов в условиях паровой газификации / С.В. Алексеенко, И.С. Ануфриев, С.С. Арсентьев, М.С. Вигриянов, **Е.П. Копьев**, О.В. Шарыпов // Перспективы развития новых технологий в энергетике России: материалы II Международной научно-технической конференции, 26-27 октября 2017 г. / под общ. ред. С.В. Сафронова. – М.: ОАО «ВТИ», 2017. – 292 с. – С. 129-133.

18. Алексеенко, С.В. Сжигание дизельного топлива в прямоточной горелке в струе перегретого водяного пара / С.В. Алексеенко, И.С. Ануфриев, О.В. Шарыпов, **Е.П. Копьев**, С.С. Арсентьев // Труды Седьмой Российской национальной конференции по теплообмену: в 3 томах (22-26 октября 2018 г., Москва). Т. 1. – М.: Издательский дом МЭИ, 2018. – 582 с. – С. 359-363.

Подписано к печати 2020 г. Заказ №
Формат 60×84/16. Объем 1 уч.-изд. л. Тираж 100 экз.

Отпечатано в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1.