

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе

Сибирского отделения Российской академии наук



На правах рукописи

Копьев Евгений Павлович

Исследование горения жидкого топлива в условиях паровой газификации

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Диссертация на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

д.ф.-м.н.

Шарыпов Олег Владимирович

Новосибирск 2020

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1 Современное состояние проблемы.....	9
1.1. Общие сведения	9
1.2. Влияние водяного пара на горение углеводородов.....	15
1.3. Методы исследования процессов горения	29
1.4. Современные горелочные устройства на жидком топливе	38
ГЛАВА 2 Экспериментальная установка и методики измерений.....	41
2.1. Экспериментальный стенд.....	41
2.2. Методики измерения	53
ГЛАВА 3 Результаты экспериментальных исследований и их анализ.....	66
3.1. Горение дизельного топлива в автономном горелочном устройстве	66
3.2. Горение жидких углеводородов в горелочном устройстве с принудительной подачей перегретого водяного пара.....	79
3.3. Обсуждение полученных результатов.....	98
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	103
ПРИЛОЖЕНИЕ А	106
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	109
ПРИЛОЖЕНИЕ В	110
ЛИТЕРАТУРА	112

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. 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 [1, 2]. Предварительные исследования, проведенные в ИТ СО РАН на оригинальных горелочных устройствах [3], 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 прямооточных 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, обоснование перспективных научно-технических решений. В соответствии с целью, решались следующие основные **задачи**:

- разработка новых технических решений и создание лабораторных образцов оригинальных прямооточных 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, получении новых зависимостей в сопоставлении с показателями режимов горения с подачей воздуха, определении способа управления процессом, а также связана с новизной объектов исследования – оригинальных прямоточных жидкотопливных горелочных устройств испарительного типа с различными способами генерации перегретого водяного пара, разработанных на основе новых технических решений.

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.

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 и апробация результатов. 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. 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. По теме диссертации опубликовано 32 работы, включая 11 статей в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК, получено 3 патента РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы из 170 наименований, 3 приложения, 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.

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1.1. Горение: основные понятия

Горение – сложный физико-химический процесс, который изучается разделом науки, совмещающим множество направлений и использующим разнообразные методы исследования. Важнейшую роль в получении информации о процессах горения играет эксперимент, так как явления, происходящие при горении, зависят от большого количества факторов физической и химической природы, их замкнутое аналитическое описание или численное моделирование сопряжено с принципиальными трудностями.

Горение включает комплекс процессов, сопровождающих экзотермическую реакцию окисления при соединении вещества с кислородом. Основа этого явления – кинетика химических реакций и процессы переноса [4]. Всю обширную область явлений горения можно разделить на три основных группы:

- гомогенное горение газообразных смесей;
- гетерогенное горение конденсированного горючего в атмосфере окислителя;
- разложение конденсированных взрывчатых веществ.

Различают кинетический и диффузионный режимы горения в предварительно перемешанной или предварительно не перемешанной смеси. Определенной спецификой обладают механизмы воспламенения: цепной и тепловой. Распространение зоны горения может обеспечиваться механизмами различной природы: тепло-диффузионный, турбулентный, индукционный, ударно-волновой механизмы.

Всякий процесс горения является, прежде всего, химическим процессом, поскольку он сопровождается превращением вещества, изменением его качества.

Правила валентности, теория строения и химическая термодинамика указывают, в каком направлении и как глубоко пройдет та или иная реакция при заданных условиях. Но химические закономерности не дают исчерпывающей информации об изучаемых явлениях. Во многих случаях наибольшее практическое значение имеют закономерности горения, определяемые физическими условиями и факторами. Химический процесс при этом оказывается подчиненным таким физическим процессам, как перенос тепла, диффузия и другие, и ими регулируется [4].

Так как химический процесс – основа процессов горения, то для суждения о том или ином превращении, прежде всего, необходимо знать в каких отношениях исходные вещества вступают в соединения и каков состав получающихся продуктов [4]. Ответ на этот вопрос дают фундаментальные классические законы химической статики: закон сохранения массы (Ломоносова-Лавуазье) и закон простых кратных отношений (Дальтон), а также учение о химическом равновесии, которое базируется на законе действующих масс. Относительное содержание горючего в смеси принимается обычно за основную характеристику реагирующей системы [5]. Идеальным считается стехиометрический состав – состав топливной смеси, в котором окислителя ровно столько, сколько необходимо для полного окисления топлива. Если существует избыток горючего, говорят, что смесь богатая, а в случае избытка окислителя говорят, что смесь бедная. Например: $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ — стехиометрическая смесь; $3\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2$ — богатая смесь (H_2 в избытке); $\text{CH}_4 + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$ — бедная смесь (O_2 в избытке).

Скорость реакции экспоненциально зависит от температуры (закон Аррениуса), а также определяется концентрациями реагентов, которые, в свою очередь, зависят от параметров состояния системы. Существуют вещества, которые приводят к значительному повышению скорости реакции, но сами при этом не расходуются (катализаторы). Значительными каталитическими свойствами обладают и некоторые газообразные вещества. Например, отмечено

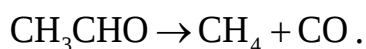
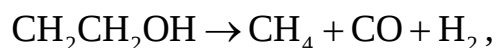
сильное ускоряющее действие водяного пара на реакцию окисления СО [4]. При этом горение жидких углеводородов с паровой и воздушной газификацией включает большое количество элементарных реакций, скорость протекания которых зависит от таких факторов, как: состав и температура жидкого горючего, количество окислителя в зоне воспламенения продуктов пиролиза, температура и концентрация подаваемого в зону реакции водяного пара. Задавая эти параметры, а также конструктивные характеристики горелочного устройства, можно управлять основными показателями процесса сжигания топлива (полнота сгорания топлива, распределение температуры, состав продуктов сгорания, экологическая безопасность).

1.1.2. Специфика горения жидкого углеводородного топлива

При горении жидкого топлива характерно то, что температура кипения значительно ниже температуры воспламенения [6–8], горение происходит в основном в газовой фазе и сам процесс можно разделить на несколько стадий: подогрев и испарение (сопровождающееся пиролизом, термическим разложением), смесеобразование в газовой фазе, воспламенение и сгорание горючей смеси [9, 10].

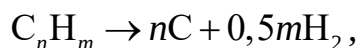
Самым простым способом сжигания жидкого топлива является его горение со свободной поверхности. При этом пламя располагается на некотором расстоянии от поверхности жидкости, а скорость горения определяется скоростью испарения. Массовая скорость горения, отнесенная к фронту пламени, для заданного горючего не зависит от величины и формы поверхности испарения и является постоянной величиной [10]. Как правило, стадия испарения – самая медленная из всех последовательных стадий горения жидкого топлива, что на практике накладывает ряд ограничений на мощность горелочных устройств. Для такого режима горения характерен большой химический недожог [11], например, для керосина – 17,7% [10].

Ход термического преобразования и предварительного окисления паров топлива зависит от количества кислорода, принимающего участие в этом процессе. Начальной стадией окисления жидких углеводородных топлив является образование спиртов – углеводородных соединений, содержащих гидроксильную группу CH , например $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$, и альдегидов — углеводородных соединений, характеризующихся наличием альдегидной группы CHO , например CH_3CHO . При отсутствии свободного кислорода спирты и альдегиды расщепляются с образованием простейших соединений [6, 10]:

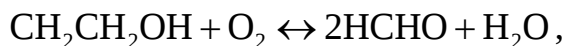


При этом, кроме термически устойчивых веществ (CO и H_2), образуется метан, при разложении которого образуется сажа.

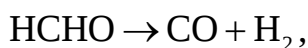
При движении внутри конусообразного факела до фронта пламени, при горении жидких горючих со свободной поверхностью, при нахождении в области высоких температур в отсутствие кислорода испаренные углеводороды подвергаются термическому разложению вплоть до образования свободного углерода и водорода [10]

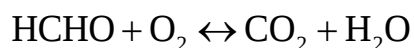


Однако при наличии свободного кислорода в зоне термического преобразования спирты и альдегиды окисляются до формальдегида HCHO :



Дальнейшее окисление и термическое разложение формальдегида не сопровождаются образованием частиц сажи, так как он легко распадается на оксид углерода и водород, а также может окисляться с образованием углекислого газа и воды [6].



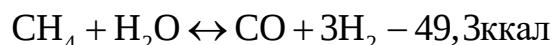
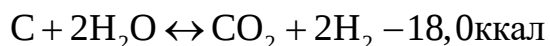
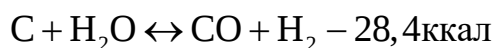


Тем самым, частичное окисление углеводородных соединений в начальной стадии их термического преобразования является эффективным способом предотвращения возникновения свободного углерода. Такое окисление, называемое предварительной газификацией, благоприятствует последующему процессу горения [10].

1.1.3. Механизмы и способы газификации углеводородного топлива

Газификация есть термохимический процесс преобразования твердого или жидкого топлива в результате реакции с кислородом в горючий газ (смесь CO, H₂ и др.), предназначенный для последующего сжигания (энергетический и бытовой газ) или для технологических целей (технологический газ). В основе газификации лежит либо неполное сгорание топлива (при недостатке кислорода), либо полное сгорание с последующим реагированием углерода с углекислотой и водяным паром с целью получения горючих газов [12, 13].

В общем случае процесс газификации твердого топлива достаточно полно описывается следующими реакциями [14, 15]:





Для оценки газификации жидких топлив служат те же основные показатели, что и при описании газификации твердых топлив [15, 6]. Важной особенностью газификации жидких топлив является выделение элементарного углерода (сажи) при недостатке окислителя [12, 17]. Как было отмечено выше, выход свободного углерода зависит от удельного расхода кислорода или водяного пара, температуры и давления процесса, качества смешивания топлива окислителем. Известен метод впрыска водяного пара в факел для уменьшения количества сажи в дымовых газах (бездымное горение) [18, 19].

Механизм газификации жидких углеводородов можно разделить на две стадии: на первой стадии – при нагреве жидкого топлива – происходит его термическое разложение (пиролиз) с образованием газообразных углеводородов и углерода (частиц сажи); на второй стадии – под действием окислителя – имеет место конверсия углеводородов и газификация углерода [16, 20]. Следовательно, при паровой газификации продуктов пиролиза жидкого топлива происходят те же реакции, что и при газификации твердого топлива [14].

Принципы газификации жидкого топлива делят на некаталитические (или высокотемпературные) и каталитические. По технологическим принципам они разделяются на циклические и непрерывные. [15]. Из циклических способов газификации жидких топлив обычно рассматриваются способы C.C.R. и O.N.I.A.G.E.G.I. К непрерывным относятся процесс Фаузера–Монтекати, способ Копперса–Тотцека, способ Техасо, процесс Shell и др. [14–16].

В настоящее время, процесс газификации все чаще предлагается в качестве основного для сжигания «тяжелых» углеводородных топлив и горючих производственных отходов – как эффективный и экологически безопасный путь их использования [21, 22]. Однако его реализация, как правило, сопряжена с высокими экономическими затратами на создание и обслуживание технологического оборудования. Поэтому весьма актуальной задачей в настоящее время является проведение исследований, направленных на поиск новых способов

(и научное обоснование путей повышения эффективности технологий) сжигания углеводородного топлива с использованием прямого впрыска воды и водяного пара в зону реакции.

1.2. ВЛИЯНИЕ ВОДЯНОГО ПАРА НА ГОРЕНИЕ УГЛЕВОДОРОДОВ

Влияние воды и водяного пара на горение углеводородов наблюдается учеными и исследователями и активно применяется инженерами еще с конца XVIII века. Вода используется во множестве приложений от снижения тепловой нагрузки в камере сгорания до диспергирования тяжелых топлив и создания водно-топливных эмульсий. Как отмечается в работе [23], до середины XX века уже существовало огромное количество технических решений, использующих воду для снижения температурных нагрузок и предотвращения детонации в агрегатах. Однако в середине XX века, после описания механизма образования оксидов азота Я.Б. Зельдовичем [24], в дополнение к уже ранее существовавшим работам появился новый всплеск исследований, направленных на использование воды для снижения выбросов оксидов азота применительно к двигателям с воспламенением от сжатия, к двигателям с искровым зажиганием, к газовым турбинам, котлам и т.д. Причем в каждом случае эффект от применения воды зависел от ее параметров и способа подачи. Оказалось, что именно организация добавления воды в процессе сжигания топлива существенно влияет как на физику, так и на химическую кинетику всего процесса. Тем не менее, не смотря на обилие работ, практически до конца 70-х годов двадцатого столетия они, зачастую, имели узко практический характер и были направлены на модернизацию существующих агрегатов, и лишь очень малая часть работ была ориентирована на изучение фундаментальных основ и зависимостей протекающих процессов.

1.2.1. Влияние на детонацию

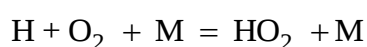
Одно из направлений таких исследований связано с изучением механизма влияния воды на подавление детонации. Ранее считалось, что предотвращение детонации топливной смеси в двигателе при добавлении воды в область горения происходит за счет понижения температуры смеси [25]. Однако простые расчеты показывают, что на полное испарение и нагрев воды, составляющей после испарения даже 30% от объема смеси, уйдет не более 4% от суммарного тепловыделения, что не позволит значительно снизить порог детонации [23]. Поэтому, с большой вероятностью, водяной пар оказывает некоторое химическое ингибирование кинетики горения углеводородов, помимо снижения температуры системы. Был предложен механизм воздействия воды на процесс горения, способствующий рекомбинации радикалов водорода и кислорода и снижающий скорость разветвления цепи, благодаря чему увеличивается характерное время воспламенения [23].

1.2.2. Снижение вредных выбросов при горении

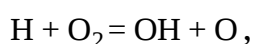
Впрыск воды или перегретого водяного пара

Помимо антидетонационных свойств, вода, как уже было отмечено, зачастую используется при сжигании углеводородных топлив в качестве эффективного метода снижения эмиссии оксидов азота [26-33], наряду с методами рециркуляции отработанных газов [34-36], в которых также содержатся водяные пары. Однако при рассмотрении воздействия рециркуляционных газов на процесс сжигания, как отмечается в работе [37], по большей части исследователи относят такой положительный эффект подавления NO_x к разбавлению горючей смеси «балластными» газами, такими как CO_2 и N_2 , вследствие чего понижается температура процесса и снижается вероятность образования термического NO_x . Таким образом, исследователи не рассматривают наличие существенной части паров воды в рециркуляционных газах, которая помимо термического эффекта может вносить дополнительные эффекты через химические преобразования.

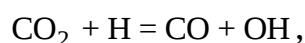
Чтобы оценить химическое воздействие воды и водяного пара на процесс горения, во второй половине XX века исследователями был проведен ряд работ с различными веществами. Так, например, добавление воды в зону горения водородо-воздушной смеси [30], которая может использоваться в беспламенных горелках, показало снижение выбросов вредных веществ, в частности оксидов азота. Авторы связывают данное снижение с эффектами разбавления и тепловыми механизмами, однако, также отмечают, что помимо этого, при окислении водорода, вода выступает в роли замедлителя реакции горения, так как в ее присутствии происходит ускорение реакции



с образованием менее активного по сравнению с водородом радикала HO_2 . Таким образом, снижается количество водорода и кислорода в области сжигания, необходимых для основной реакции процесса



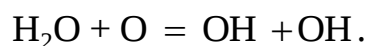
и наблюдается снижение скорости реакции в целом. Однако авторы отмечают, что эффект от разбавления смеси водой менее выражен, чем при разбавлении смеси углекислым газом, и связывают это с тем, что при добавлении CO_2 в развитии цепи увеличивается вклад реакции



которая более эффективно снижает количество водорода в области сжигания с получением менее активных компонентов CO и OH .

При рассмотрении сжигания метано-воздушных смесей в присутствии воды и водяного пара [29, 30, 38-41] также отмечается снижение выбросов NO_x . Кроме того, в [38, 42, 43] установлено, что при увеличении разбавления горючей смеси водой снижаются температура и ламинарная скорость пламени, чем авторы работ и обуславливают снижение эмиссии NO_x . К тому же при добавлении воды наблюдается увеличение времени задержки воспламенения как для метановых, так и для водородных смесей [30]. В работе [38] отмечается, что влияние воды на скорость распространения метано-воздушного пламени можно сравнить с

обеднением смеси с той разницей, что в смесях с добавкой воды сохраняется топливно-воздушное соотношение. В то же время, в [27] указывают на то, что снижение как скорости, так и температуры пламени при добавлении воды связано с разбавлением горючих компонентов и тепловыми эффектами, что, однако, в некоторой степени компенсируется положительным вкладом от химии протекания процесса. В работе [37] было проведено моделирование процесса горения метано-воздушной смеси при добавлении фиктивного разбавителя. Такой фиктивный разбавитель имел те же физические свойства, что и вода (плотность, теплоемкость и т.д.), но не вступал в химическое взаимодействие с горючими компонентами пламени. Показано, что скорость пламени с фиктивным H_2O меньше, чем в случае добавления химически активного «аналога». Поэтому присутствие воды, например, в рециркуляционных газах, может частично химически компенсировать «замораживание» пламени, вызванное разбавлением компонентов смеси «балластными газами» и термическими эффектами. Кроме того, обнаружено, что при добавлении H_2O в топливную смесь наблюдается снижение не только выбросов NO_x по сравнению с простым горением метано-воздушной смеси, но также некоторое снижение CO и увеличение содержания H_2 в продуктах сгорания. При более подробном рассмотрении химического эффекта от добавления воды на протекание реакции горения метано-воздушной смеси, в работе [44] отмечают, что основной вклад воды осуществляется через реакцию



Кроме того, как отмечалось ранее, вода участвует в ускорении протекании реакции [30] $H + O_2 + M = HO_2 + M$. В силу протекания этих двух реакций, наблюдается понижение концентраций кислорода, участвующего в основной цепи окисления метана $CH_4 + O = CH_3 + OH$ и водорода в реакции $H + O_2 = OH + O$, вследствие чего и наблюдается влияние на характеристики пламени в целом. Однако согласно исследованию концентраций H , O и OH , проведенному в [26], при повышении температуры в области горения за счет ее насыщения кислородом изменение концентраций этих компонентов практически

не наблюдается, в отличие от случая простого метано-воздушного горения, где наблюдается снижение концентраций Н и О почти в два раза и повышение содержания радикала ОН.

Для анализа влияния воды на образование и реакции промежуточных компонентов горения метана в работе [45] исследовано окисление ацетилена в среде аргона в присутствии воды. Результат показал, что вода также может влиять на химию процесса горения углеводородов через образование дополнительных радикалов ОН в результате реакции $\text{H}_2\text{O} + \text{H} = \text{OH} + \text{H}_2$.

Схожие выводы о влиянии воды на процесс горения делают и авторы работ [43, 46, 47], рассматривая сжигание этилено-воздушной, пропилено-воздушной и пропано-воздушной смесей в присутствии воды. Этилен и пропилен интересны тем, что они являются основными продуктами крекинга тяжелой нефти. При исследовании путей протекания химических реакций было показано, что в присутствии воды тормозится процесс окисления этилена и понижается скорость пламени, причем этот эффект ослабевает при кислородном обогащении топливной смеси. Кроме того, для этилено-воздушной, пропилено-воздушной и пропано-воздушной смесей с ростом количества пара в зоне горения наблюдается снижение температуры пламени. Также при окислении этилена в присутствии водяного пара снижается производство диоксида углерода. В то же время процесс окисления пропилена практически не подвержен изменениям со стороны водяных паров, что возможно связано с более высокой температурой его горения.

Тем не менее, при сжигании синтез газа (H_2 и CO) в газовой турбине [28] в присутствии разбавителей, вода обеспечивает наибольшее снижение выбросов оксида азота по сравнению с CO_2 и N_2 . Однако авторы отмечают, что разбавление водой при работе с аппаратами мощностью мене 30 кВт может быть причиной увеличения выбросов CO , по причине неполного выгорания смеси. Это связано с тем, что вода обладает высокой удельной теплоемкостью, поэтому при разбавлении смеси она приводит к большему снижению температуры, чем остальные разбавители, нарушая условия протекания реакции и снижая полноту

сгорания синтез газа. В этом случае рекомендуется разбавление смеси CO_2 и N_2 . Однако при работе с агрегатами с мощностью более 40 кВт, предпочтительным, как наиболее эффективным способом снижения выбросов NO_x , оказывается использование воды. Положительное влияние водяного пара на процесс сжигания синтез газа отмечается также в работе [48]

В работе [49] приведены данные о снижении производства NO_x при сжигании керосина в газовых турбинах с добавлением перегретого водяного пара. Экспериментально исследованы различные способы подачи пара в область горения топлива, а именно: пар вводили в камеру сгорания возле корня факела независимо от воздуха, либо его предварительно смешивали с воздухом и вводили в камеру сгорания через завихритель, установленный на впускном отверстии, а также пар вводили в камеру сгорания через четыре отверстия в корпусе камеры сгорания на некотором расстоянии от основания факела. Авторы обнаружили, что при подаче пара первыми двумя способами обеспечивается наиболее эффективное подавление образования NO_x в продуктах сгорания при горении керосина. В третьем случае, авторы также отмечают снижение концентрации NO_x , но оно не так ярко выражено, как в первых двух случаях. Кроме того, при увеличении подачи пара во всех режимах наблюдается дальнейшее снижение концентрации оксидов азота в продуктах сгорания, однако одновременно с этим повышается содержание CO (с определенного уровня расхода пара).

Наиболее близки к теме работы результаты экспериментальных исследований сжигания различных видов жидких углеводородных топлив [3] при добавлении перегретого водяного пара в область горения. Показано, что в режиме с паровой газификацией обеспечивается высокая интенсивность сгорания, при этом существенно улучшаются экологические показатели. Авторы предложили следующее объяснение интенсификации процесса: в камере сгорания при горении продуктов пиролиза в условиях недостатка окислителя образуется первичный факел, содержащий «нанокластеры» сажи. При подаче в первичный факел струи

перегретого водяного пара на кластерах сажистых наночастиц происходит каталитическое разложение молекул воды, вследствие чего достигается концентрация активных радикалов (ОН), значительно превосходящая равновесные значения. Это обеспечивает высокую скорость процесса горения и полноту сгорания горючего (в том числе – низкокачественных видов жидкого углеводородного топлива и отходов). Испытания, проведенные на лабораторной модели горелочного устройства (~20 кВт) в работе [3], показали, что при сажепаровом сжигании на выходе из горелки сажа практически отсутствует, концентрация СО в продуктах горения ниже на два порядка, концентрация NO ниже на порядок по сравнению с образцами горелок такой же мощности производства ведущей в этой сфере фирмы Weishaupt (Германия). При сжигании некондиционных топлив (отработанного картерного масла, сырой нефти, и др.) устойчивость воспламенения заметно ухудшалась, происходило быстрое закоксовывание внутренних поверхностей горелки. При исследовании факела в области смещения паров воды и горючего в пробах были зарегистрированы сажевые частицы нанометрового диапазона. По излучению ультрафиолетовой области было зафиксировано наличие в факеле ОН-радикала. На основе видеонаблюдений факела в разных режимах горения был установлен пульсационный режим горения, а также обнаружены более темные зоны перед зоной максимальной светимости. Авторы предположили, что в этих темных областях происходит основной конденсационный и коагуляционный рост сажевых наночастиц. Гетерогенные реакции на развитой удельной поверхности конденсированной фазы приводят к быстрому разогреву факела (от 800°C в темных областях до 1600°C в яркой области).

Альтернативные методы

Вода оказывает сильное влияние на процесс горения, и эффективность ее воздействия зависит от многих параметров. Основным назначением добавления воды и водяного пара при горении является снижение образования оксидов азота. Считается, что NO_x – главный загрязнитель воздуха, так как является

первопричиной многих весомых экологических проблем: фотохимический смог, кислотные дожди, и даже глобальное потепление. Кроме того, оксиды азота оказывают негативное влияние на здоровье человека [35].

Несмотря на привлекательность впрыска воды в область реакции, существует ряд других методов подавления оксидов азота. Например, широкое распространение получили технологии селективного некаталитического восстановления (СНКВ) и селективного каталитического восстановления (СКВ) [50]. Методы СНКВ имеют преимущества по сравнению с СКВ ввиду меньших затрат на реализацию СНКВ процессов, из-за отсутствия катализатора и оборудования для его размещения, что упрощает и удешевляет технологию. Принцип селективного некаталитического восстановления заключается во взаимодействии оксидов азота с аминсодержащими восстановителями [51]. На заре использования метода СНКВ использовался аммиак, но как высокотоксичный агент, создающий сложности при транспортировке и хранении, а также требующий точных методов дозирования и контроля [52], аммиак в последние годы уступил место восстановителям, получаемым на основе керамбида. К недостаткам метода СНКВ относятся зависимость от используемого восстановителя, необходимость транспортировки и хранения восстанавливающего агента, эффективность метода варьируется в зависимости от видов восстановителя, сжигаемого топлива и стехиометрического отношения.

Селективное каталитическое восстановление работает по схожему с СНКВ принципу: аммиак, или мочевины впрыскиваются в поток очищаемых газов в присутствии катализатора. Такая технология требует наличия в конструкции устройства катализатора, удовлетворяющего широкому спектру требований: высокая восстановительная активность в отношении NO_x , малый вес, низкое гидравлическое сопротивление, высокая стойкость к термическим ударам, высокая механическая стабильность [53]. Также требуется стойкость к загрязнению катализатора и стабильность его восстановительной активности. Сложность конструкции, вместе с необходимостью периодической замены

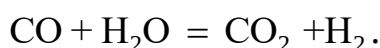
дорогостоящего катализатора по истечению его срока службы, делает метод достаточно дорогим в эксплуатации.

Другим из распространенных способов уменьшения выбросов оксидов азота является сжигание топлива с малыми избытками воздуха. [54]. Избыток воздуха $1,03 \div 1,05$ считается наиболее эффективным, максимум концентрации NO_x обычно наблюдается в диапазоне $1,1 \div 1,3$, так как при этих условиях происходит максимально полное сгорание топлива и наличие локальных областей с высокой температурой, что, согласно механизму Зельдовича [24], и приводит к повышенному производству оксидов азота. Однако низкий избыток воздуха связан с увеличением выбросов твердых частиц, а также монооксида углерода, что требует существенной доработки горелочных устройств с целью правильной организации зон горения.

Наравне с уменьшением избытка воздуха пользуется популярностью технология двухступенчатого, или двухстадийного сжигания, которая подразумевает сжигание, с подачей в зону горения воздуха в соотношении меньшем стехиометрического (около $0,8 \div 0,95$), а остальное необходимое количество воздуха вводится далее по длине факела. В результате организации процесса сжигания данным способом, наблюдается уменьшение образования топливных оксидов азота в начале факела, по причине пониженной концентрации кислорода, и снижение температуры на второй стадии, снижается уровень образования термических NO_x . Технология достаточно дешева и при правильной реализации обеспечивает снижение концентрации NO_x на 40-50% [54]. Однако данный метод на практике сопряжен со сложностями реализации: воздух должен быть подан так, чтобы обеспечить полное смешение с продуктами реакции первой стадии, причем недостаточно полное смешение может привести к существенному увеличению продуктов неполного сгорания. Кроме того, для разных конструкций горелочных устройств и топок эта методика не может быть масштабирована, так как требует разработки каждой уникальной конструкции.

Среди разнообразных технологий снижения концентрации вредных веществ в продуктах сгорания, наиболее эффективным и не оказывающим существенного влияния на тепловые характеристики сжигания [55] является метод рециркуляции продуктов сгорания, при котором часть дымовых газов отбирается из потока и направляется обратно в зону горения. Считается, что снижение температуры в зоне реакции обеспечивается за счет уменьшения скоростей цепных реакций вследствие присутствия инертных газов и снижения концентраций реагирующих веществ. Для максимально эффективного применения данной методики используется ввод рециркулирующих газов в зону горения с дутьевым воздухом. На практике данный метод чувствителен к выбору места расположения шлицов для подачи газов, его применение связано с дополнительными капитальными затратами на реорганизацию процесса сжигания.

Несмотря на многочисленные публикации, механизм влияния воды в технологиях рециркуляции продуктов сгорания и непосредственного впрыска воды в зону горения остается недостаточно изученным. Например, для STIG цикла [55] пар подается в корень факела горения и, как считается, выступает там в качестве балласта. Однако в работе [56] отмечают, что подаваемый в корень факела горения пар – это активный баланс, так как он не только уменьшает температуру и NO_x , но и смещает равновесие в реакции окисления CO



Кроме того, высокая эффективность применения этих методов может быть достигнута при равномерном распределении парового балласта так, чтобы сохранялось оптимальное соотношение необходимой доли пара в каждом объеме смеси. Принципиальным решением этой проблемы могло бы служить предварительное перемешивание, но оно не всегда применимо с учетом специфики видов топлива и горелочных устройств. Поэтому важной и актуальной научно-технической задачей является разработка способов оптимальной подачи воды или водяного пара в зону горения.

1.2.3. Подавление образования сажи

Жесткие экологические ограничения на выбросы твердых частиц для горелок и котлов требуют специальной организации процесса сжигания топлива. Одним из путей подавления образования сажи является повышение концентрации радикалов ОН в зоне реакции, которые окисляют зародыши сажи, препятствуя тем самым сажеобразованию в пламени, а также способствуют «доокислению» оксида углерода, повышая полноту сгорания топлива [23]. Однако в условиях недостатка окислителя (например, для снижения образования термического NO_x при горении) концентрация радикалов ОН обычно очень мала, поэтому добавление воды как источника радикалов гидроксила в область воспламенения может привести к снижению сажеобразования, не вызывая повышения уровня выбросов других вредных веществ.

При изучении пламен этилено-воздушной и пропано-воздушной смесей [43] обнаружено, что добавление водяного пара существенно подавляет образование сажи. С одной стороны, это можно объяснить тем, что добавление пара ведет к росту концентрации водорода, тем самым происходит преобразование углерода в ацетилен [29]. С другой стороны, как отмечено выше, добавление пара обеспечивает увеличение концентрации радикалов ОН, которые реагируют с углеродными частицами уже на начальной стадии их роста. Оба эти эффекта могут иметь место при добавлении пара, в той или иной степени, влияя на сажеобразование.

В работе [57] исследовано влияние разбавителей на процесс образования сажи при диффузионном горении различных углеводородов. Для предварительно перемешанной смеси сажеобразование зависит от стехиометрического соотношения топлива и окислителя, и чем оно ниже, тем выше такая тенденция. Для диффузионного горения определяющим параметром в данном случае является массовый расход топлива [58]. Чем ближе массовый расход к так называемой точке сажеобразования, тем выше вероятность неполного сгорания. Склонность к сажеобразованию у пламени зависит от скорости образования

зародышей сажи вследствие процесса пиролиза и скорости их окисления, преимущественно ОН-радикалами [59, 60]. Поэтому при сжигании предварительно перемешанной смеси в условиях близких к стехиометрии наблюдается наивысшая температура пламени, что способствует увеличению концентрации радикалов ОН. В диффузионном же пламени зародыши сажи образуются за счет пиролиза в условиях отсутствия радикалов гидроксила, и повышение температуры ведет к повышению скорости образования углеродных частиц без заметной интенсификации процессов окисления.

Авторы работы [61] отмечают, что при добавлении воды в область горения диффузионного пламени ее влияние может быть двояким: во-первых, обеспечивается понижение температуры пламени, за счет чего снижается скорость пиролиза топлива и, соответственно, образования сажи; во-вторых, имеют место химические процессы, приводящие к образованию дополнительных радикалов ОН, активно вступающих в реакцию с частицами сажи. Однако, авторы работы [57] считают, что вода не оказывает химического влияния на тенденцию диффузионного пламени к сажеобразованию, а наблюдаемый эффект имеет только тепловую природу. При этом говорится, что образование сажи в диффузионном пламени в основном зависит от условий начального пиролиза топлива, т.е. тенденция к сажеобразованию определяется температурой пламени и структурой топлива.

1.2.4. Водно-топливные эмульсии

Водно-топливные эмульсии и суспензии активно исследуются с середины XX века. Основное внимание уделялось созданию водно-бензиновых эмульсий [62, 63], а в последующем и водно-угольных суспензий [64, 65]. Отмечено, что при сжигании таких смесей снижаются выбросы вредных веществ, а также увеличивается полнота сгорания топлива. Однако такие смеси имеют существенный недостаток, связанный с их нестабильностью, что снижает экономическую целесообразность широкого использования такого топлива в

энергетике. Несмотря на это, продолжают исследования по созданию смесей с использованием различных видов топлива и применением недорогих способов повышения их стабильности. Кроме того, помимо исследования традиционных видов углеводородных топлив, в последнее время все чаще рассматривают добавление воды в биотопливо, что также приводит к положительным эффектам в отношении снижения вредных выбросов [66].

В работах [67-71] исследовано сжигание водно-дизельной эмульсии в двигателе внутреннего сгорания, а также продемонстрированы преимущества использования такого топлива по сравнению с дизельным. Показано, что добавление воды в топливо более перспективно для дизельных двигателей, чем для бензиновых, так как первые работают при более высоких параметрах (давление и температура).

В целом, использование водно-топливных эмульсий позволяет снизить выбросы NO_x и сажи [72, 73], а также расход топлива за счет более качественного сжигания [67]. Данный эффект связывают с понижением температуры цикла, вследствие чего снижается производство «термических» оксидов азота [70, 71]. Типичная водно-топливная эмульсия содержит от 10 до 20 % воды. Однако при сжигании топлива с высоким содержанием азота в виде водно-топливной эмульсии, вода, на общем уровне, может оказывать незначительное влияние на содержание NO_x в продуктах сгорания [67], если основной вклад вносит окисление азотосодержащих компонентов топлива.

Тем не менее, для широкого диапазона углеводородного топлива отмечается эффект снижения количества сажи при сжигании в виде водно-топливной эмульсии, независимо от содержания азота в топливе [74]. Также показано, что сжигание топлива с водой в виде эмульсии эффективнее, чем сжигание топлива в условиях повышенной влажности, хотя в обоих случаях наблюдается значительное снижение содержания NO_x в продуктах сгорания [67]. Эффективность эмульсий связывают с «микровзрывами» содержащихся в ней капель воды [23, 75, 76], которые при резком нагреве в пламени способствуют

окислению углерода, в том числе, за счет вклада воды в образование дополнительных радикалов ОН [71]. При сжигании эмульсий, содержащих воду, заметно снижается количество пиренов и флуоренов, которые, являются одними из основных источников образования зародышей сажи. С физической точки зрения, наличие воды усиливает диспергирование топлива, что увеличивает удельную межфазную поверхность, интенсифицирует межфазный тепломассообмен и процессы смешения топлива и окислителя [23]. При горении эмульсий важными факторами являются как содержание воды, так и распределение по размеру внутренней (дисперсной) фазы.

Однако несмотря на столь значительные преимущества водно-топливных эмульсий, они имеют ряд проблем, где наиболее важная – это обеспечение стабильности смеси с однородным распределением воды в топливе. Для повышения стабильности, помимо использования различных присадок, был предложен метод создания микроэмульсии: сначала топливо добавляют в воду, а затем полученная смесь добавляется в топливо. Получается топливно-водно-топливная эмульсия. Кроме повышенной стабильности, микроэмульсии обеспечивают образование более мелких капель в пламени и более низкие выбросы NO_x и CO [78, 79]. При этом создание качественной микроэмульсии требует существенных затрат, что делает ее использование в настоящее время экономически не целесообразным.

Таким образом, непосредственный впрыск в зону горения воды и водяного пара остается одним из наиболее перспективных способов управления характеристиками сжигания жидкого топлива. Тем не менее, в научной литературе представлено очень мало результатов исследований горения жидких топлив (таких как дизельное топливо, отработанные масла) в горелочных устройствах со впрыском пара, нет работ, посвященных комплексному изучению влияния параметров пара на показатели горения. Для решения задач 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.

1.3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ

1.3.1. Скорость и структура потока

В настоящее время существует ряд методов измерения скорости газовых и жидкостных потоков, которые основаны на различных физических принципах. Все они делятся на контактные и бесконтактные, которые, в свою очередь, подразделяются на точечные и панорамные (полевые).

Известный метод проволочной термоанемометрии относится к контактным методам измерения скорости потока [5]. Основным недостатком этого метода является то, что он вносит возмущение в поток. Кроме того, флуктуации температуры или состава газовой смеси интерпретируются как изменения скорости потока. Метод имеет низкую производительность и ограничения по временному и пространственному разрешению. В случае реагирующего потока нагреваемая проволочка может оказывать влияние на скорость протекающих реакций. Несмотря на эти ограничения, метод измерения скорости проволочным термоанемометром лежит в основе целой отрасли промышленности по производству электронных регуляторов массовых потоков горючего, воздуха и других газов, он долгое время был основным методом измерения скорости потока.

Бесконтактные (оптические) методы основаны на измерении скорости введенных в поток микрочастиц (трассеров): лазерная доплеровская анемометрия – ЛДА, цифровая трассерная визуализация – PIV и их модификации. Основными достоинствами этих современных методов оптической диагностики потоков являются отсутствие возмущений, вносимых в поток, высокая производительность и точность, применимость для случая реагирующих потоков.

Широкое распространение в диагностике потоков получили лазерные доплеровские анемометры (измерительные ЛДА-системы) [80]. В основе метода лежит эффект Доплера, согласно которому при относительном движении источника и приемника излучения регистрируемая частота отраженного (рассеянного) излучения зависит от скорости объекта. Так как в оптическом диапазоне трудно с высокой точностью измерить частоту рассеянного излучения, то регистрируется разность частот лазерного и рассеянного излучений [81]. Метод ЛДА успешно применяется в экспериментальной аэродинамике и гидродинамике, например, при исследовании пристеночных течений с малыми скоростями, в исследованиях гиперзвуковых газовых потоков в больших аэродинамических трубах, а также воздушных потоков в атмосфере на расстояниях до нескольких километров от установки. Распространенные схемы ЛДА: схема с опорным пучком, дифференциальная схема и инверсно-дифференциальная схема [81]. К основным параметрам ЛДА относятся: диапазон измеряемых скоростей, число измеряемых компонент вектора скорости, пространственное разрешение, погрешность измерений. Недостатком метода ЛДА является то, что он обеспечивает измерение в отдельной точке (локальность измерений, ограничивающая производительность метода и его применимость для нестационарных потоков). Поэтому в настоящей работе для измерения скорости потока в факеле горелочного устройства был выбран панорамный метод цифровой трассерной визуализации, позволяющий получать информацию о поле скорости одновременно во всей исследуемой области (заданном сечении факела).

Метод цифровой трассерной визуализации (particle image velocimetry, PIV) – один из распространенных современных бесконтактных методов измерения скорости в потоках [82]. Измерение «мгновенного» поля скорости потока в заданном сечении основано на регистрации перемещений трассеров, находящихся в плоскости сечения, за фиксированный интервал времени между последовательными импульсами лазера. В поток жидкости или газа вводятся трассеры, размер, плотность и объемная концентрация которых подбираются

таким образом, чтобы эффекты, связанные с двухфазностью потока, инерционностью и плавучестью частиц, были минимальны. Измерительной областью потока считается плоскость, «вырезаемая» световым ножом. Частицы в измерительной плоскости потока должны быть освещены, минимум, дважды с достаточно малым временным интервалом. Образы частиц регистрируются на фотографический или электронный носитель (цифровую камеру). Компьютерная обработка изображений позволяет рассчитать смещения частиц за время между вспышками источника света и построить двухкомпонентное поле скорости. В качестве источника излучения обычно используются твердотельные импульсные Nd:YAG лазеры. Такие лазеры имеют малую длительность импульса ($\sim 4\text{--}10$ нс) и достаточно высокую энергию в импульсе. Использование двух лазеров, работающих на одной оптической оси, позволяет получать короткую временную задержку между импульсами, что необходимо для исследования высокоскоростных потоков. Иногда для освещения частиц применяют непрерывные лазеры, сканирующие поток при помощи вращающихся призм и зеркал. Основными преимуществами метода являются: бесконтактность, высокая производительность, широкий диапазон измеряемых скоростей.

Одним из основных элементов метода PIV является обработка полученных в эксперименте изображений. Различают несколько модификаций количественной стробоскопической визуализации в зависимости от концентрации частиц и, соответственно, методов обработки. В случае использования корреляционных алгоритмов обработки трассерных изображений все поле течения разбивается на элементарные измерительные области, для каждой из которых вычисляется корреляционная функция сдвигов частиц [82]. Сущность кросскорреляционного подхода заключается в следующем. Имеются два изображения, на одном из которых зафиксированы частицы в момент первой вспышки, а на другом – в момент второй вспышки лазера. Каждое изображение разбивается на элементарные области (расчетные области) размером $d_x \times d_y$. Интенсивность отраженного от частиц и зарегистрированного камерой света можно представить

дискретной функцией двух переменных x и y : $I_1(x, y)$ и $I_2(x, y)$ для первого и второго кадра, соответственно. Рассчитывается корреляционная функция, максимум которой соответствует наиболее вероятному сдвигу частиц в данной области. При этом в идеальном случае предполагается, что скорость потока в элементарной области неизменна и все частицы совершают одинаковое перемещение, то есть у корреляционной функции существует один наиболее ярко выделенный максимум на фоне шума.

Погрешность метода PIV во многом определяется характеристиками измерительной системы и параметрами эксперимента. Точность измерения перемещений трассеров зависит от локальных параметров потока и получаемого изображения, по которому это смещение рассчитывается, поэтому в общем случае указывается только характерное значение погрешности. Основной вклад в погрешность PIV-измерений вносит точность определения перемещений частиц, на которую в свою очередь влияют следующие факторы [83]: локальные градиенты скорости, абсолютная величина смещения трассеров, разрядность цифровой камеры, фоновые шумы изображения, размер частиц на изображении, эффективное количество частиц, оптические эффекты, размер и плавучесть трассеров. При учете всех факторов, как правило, характерная погрешность измерений не превышает 10%.

Для PIV-измерений скорости потока газа стандартным способом засева является ввод микрочастиц масла, образованных специальной форсункой. Размер микрокапель составляет ~ 1 мкм, то есть трассеры являются малоинерционными и их скорость соответствует локальной скорости потока. Однако для исследования высокотемпературных потоков (выше 600°C) подобные трассеры не подходят. Поэтому в потоках с горением газовой смеси в качестве трассеров обычно используются твердые частицы (оксид алюминия, титана, магния, кремния и т.д.) [84, 85]. Как и микрокапли, твердые частицы тоже вносятся в поток (в подаваемый воздух или предварительно перемешанную смесь) извне с помощью специальных устройств.

1.3.2. Температура пламени

Измерение температуры пламени является одним из наименее надежных физических измерений. Это связано как с экспериментальными трудностями, так и с тем, что определение самого понятия температуры условно в силу существенной неравновесности процессов. Распределение энергии при горении может существенно отклоняться от закона равномерного распределения между различными степенями свободы [86]. Пламена содержат такие активные вещества, как радикалы OH и CH , которые могут вступать в химические реакции на поверхности измеряющего объекта, введенного в пламя, выделяющееся при этом тепло может привести к повышению температуры объекта до уровня, сопоставимого с температурой самого пламени.

Несмотря на это, определение температуры факела позволяет характеризовать развитие процесса горения, производить расчеты скоростей и объемных расходов факела, оценивать условия образования вредных выбросов, в частности оксидов азота. Для этого, например, в [87] для горелочных устройств предлагается использовать следующие приборы: термоэлектрический термометр (ТЭТ) с открытыми рабочими концами; отсосный ТЭТ с одним или несколькими экранами; метод двух ТЭТ, отличающихся диаметром рабочих концов; термодинамический пирометр; оптический пирометр. В качестве рабочих элементов ТЭТ для измерения температуры предлагаются к использованию платинородий-платинородиевые, платинородиевые, хромель-алюмелевые термопары, номинальные статические характеристики (НСХ) преобразования которых должны соответствовать [88]. Выбор типа термопары и диаметр термоэлектродов зависят от способа ее применения и диапазона измерения согласно [89]. Кроме того, важным параметром, характеризующим термопару, является ее пространственное разрешение, определяемое формой и размером ее поперечного сечения (круглая, либо ленточная термопары). Обычно предполагается, что пространственное разрешение круглой термопары определяется её диаметром, а ленточной – её толщиной [90]. Допустимые

погрешности измерений температуры ТЭТ по [87] должны находиться в пределах 3%. При этом, погрешность измерения температуры ТЭТ может включать в себя, в том числе вклад от возможной каталитической реакции на поверхности термопары, теплопередачу от проводящих элементов к основе термопары, излучение проводящих элементов, теплообмен с окружающей средой (кондуктивный, конвективный и радиационный перенос) [5], а также инструментальную погрешность термопары.

Для расширения пространственного и временного разрешения, ограниченного в случае термопарных измерений возможно использование в качестве измерительного прибора оптического пирометра или инфракрасной камеры [91]. Такие камеры (тепловизоры) могут применяться для решения различных задач, например, для изучения разрушения материала под действием температуры [92-96], определения излучения горячей струи [97, 98], изучения горения со свободной поверхности [99, 100], горения в вихревом потоке [101] и «файерболов» [102], определения скорости испарения топливных капель [103] и т.д. Данный метод, являясь бесконтактным, обладает рядом преимуществ по сравнению с контактными методами: во-первых, не вносит возмущений в структуру пламени (характерных для термопар); во-вторых, дает возможность одновременной регистрации сразу всего поля температуры, что особенно важно при исследовании нестационарных процессов; в-третьих, позволяет проводить измерения с высоким временным разрешением, что позволяет регистрировать пульсации температуры в турбулентном факеле [104-109]. Инфракрасная термографическая камера регистрирует излучение от объекта. В зависимости от типа камеры полученные показания преобразовываются в значения температуры, при этом для преобразования сигнала используется либо известный коэффициент излучения, либо он измеряется экспериментально [99]. Для получения значения этого параметра можно использовать различные процедуры, при этом само значение, в дальнейшем, обычно принимают за постоянное по всей поверхности пламени [97]. Одним из таких методов является измерение температуры в точке

пламени любым контактным методом, например, при помощи термопары [99]. Измеряя температуру в этой же точке при помощи тепловизора, подбираются такие значения коэффициента излучения, чтобы значение температуры, выдаваемое тепловизором, совпадало с измерением термопары. Кроме того, для правильного расчета температуры необходимо учитывать следующие параметры: расстояние между камерой и измеряемым объектом, температуру окружающей среды, относительную влажность, так как все они связаны с передачей излучения через окружающую среду, которая разделяет излучающий объект и измерительное оборудование (ИК-камеру) [91, 110]. Таким образом, несмотря на значительные преимущества метода ИК-термографии перед традиционными термопарными измерениями, предпочтительнее использовать его лишь для определения характера распределения температуры, в связи со значительными методическими трудностями при измерении распределения температуры в оптически прозрачном объекте (в пламени) [87].

Кроме упомянутых методов, существует и применяется ряд других достаточно эффективных методов измерения температуры пламени. Например, метод обращения линий натрия, когерентная антистоксова рамановская спектроскопия, лазерно-индуцированная флуоресценция [5].

1.3.3. Тепловыделение и состав продуктов сгорания

Для всех горелочных устройств важнейшими параметрами и показателями являются тепловая мощность (полнота сгорания топлива), расход воздуха, количество вредных продуктов сгорания. Для их определения в исследовательских целях используются лабораторные образцы горелочных устройств, калориметры различного типа, газоанализаторы и другие приборы. При этом состав научного оборудования и применяемые методики измерений определяются в соответствии с характером изучаемого процесса, в том числе – диапазоном температуры, в котором производятся измерения, мощностью тепловыделения, компонентным составом, и требуемой точностью. В отношении

промышленных горелок для сжигания жидкого топлива в смеси с воздухом [111], предназначенных для практического применения, используется методика испытаний, описанная в [112]. Горелочное устройство устанавливается в камеру горения испытательного стенда, размер которой зависит от мощности устройства, и на выходе которой имеется участок, предназначенный для измерения температуры продуктов сгорания и давления в камере горения, а также для отбора проб продуктов для анализа объемных концентраций компонентов и определения сажевого числа или концентрации сажистых частиц. При этом эксплуатационные характеристики горелки проверяют в условиях стационарного режима, когда в течение 15 мин не изменения не превышают: 2% по тепловой мощности, 5°C по температуре продуктов сгорания, 0,2% (абсолютных) по объемной концентрации диоксида углерода в сухих продуктах сгорания. По полученным результатам и по физическим характеристикам топлива (удельная низшая теплота сгорания, плотность, кинематическая вязкость, температура вспышки, содержание углерода, водорода, кислорода, серы и золы [113-118]) вычисляются необходимые параметры.

Методы отбора проб для определения содержания концентраций кислорода, диоксида углерода, монооксида углерода, диоксида серы, а также оксидов азота в отходящем газовом потоке при использовании автоматических измерительных систем указаны в [119], причем отбор пробы должен производиться вдали от препятствий, которые могут значительно нарушить поток газа в газоходе или трубе. Газовый анализ может проводиться при помощи оборудования, принцип действия которого может быть основан на применении следующих методов [120-122]: парамагнетизм и электрохимия для определения концентрации O_2 ; электрохимия и ИК абсорбционная спектроскопия – для CO; ИК абсорбционная спектроскопия – для CO_2 ; хемилюминесценция, недисперсионная ИК и УК спектроскопия, дифференциальная оптическая абсорбционная спектрометрия – для NO_x ; поглощение в ИК и в УФ областях спектра, флуоресценция с использованием УФ излучения, интерферометрия, кондуктометрия – для SO_2 .

В итоге полученные характеристики промышленной горелки для сжигания жидкого топлива в смеси с воздухом должны удовлетворять общим техническим требованиям, регламентированным [123]: коэффициент избытка воздуха не должен превышать значения, находящегося в пределах от 1,2 до 1,4 в зависимости от мощности устройства, при этом сажевое число не должно превышать 3 по шкале Бахараха, а у горелок мощностью свыше 0,8 МВт и при работе на легких видах жидких топлив – 2. В то же время, содержание оксидов азота в продуктах сгорания на выходе из камеры горения не должно превышать 0,05%. Для работы горелочного оборудования на соответствующем котле установлены нормы по выбросам монооксида углерода и оксидов азота [124-126], эти ограничения для жидкотопливных горелок приведены в таблице 1.

Однако вышеупомянутые стандарты не регламентируют максимальную объемную концентрацию содержания SO_2 в продуктах сгорания. В то же время, устанавливается предельное содержание серы в различных видах жидкого топлива [127, 128], чем и ограничивается содержание диоксида серы в продуктах сгорания. В то же время для крупных котельных установок (до 200 МВт тепла или до 320 т/ч пара) содержание SO_2 ограничено предельным уровнем 1400 мг/м³ [129].

Таблица 1. Предельное содержание CO и NO_x в сухих неразбавленных продуктах сгорания для котлов различного типа и мощности [124-126].

Тип котла	Вид топлива	Производительность котла	CO мг/м ³	NO_x мг/м ³
Отопительный	Легкое жидкое	Тепло до 0,1 МВт	115	229
Отопительный	Легкое жидкое	Тепло 0,1 – 1 МВт	250	300
Отопительный	Легкое жидкое	Тепло 1 – 3,5 МВт	200	300
Отопительный	Мазут	Тепло 0,4 – 3,5 МВт	250	300
Паровой	Легкое жидкое	Пар менее 4 т/ч	115	230
Паровой	Мазут	Пар менее 4 т/ч	200	490

1.4. СОВРЕМЕННЫЕ ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА НА ЖИДКОМ ТОПЛИВЕ

На сегодняшний день в мире существует множество запатентованных конструкций устройств, предназначенных для сжигания жидких углеводородов (включая качественные и некондиционные виды топлива). Высокий интерес к этой области науки и техники обусловлен наличием нерешенных вопросов, а также непрерывным повышением требований к эффективности и экологической безопасности технологий. Основными задачами, стоящими перед учеными и инженерами, являются снижение выбросов NO_x при сжигании различных видов топлива, повышение полноты сгорания, обеспечение надежности (снижение шлакоотложения, коксования и т.п.).

В частности, исследователи, работающие в данной области, большое внимание уделяют процессам газификации топлива, которые протекают в условиях недостатка окислителя и позволяют существенно снизить содержание концентрацию NO_x в продуктах сгорания. Исследователями предложено и запатентовано множество различных устройств, реализующих данный процесс [130-149]. В каждом случае предложен свой, уникальный способ газификации жидкого топлива с термическим разложением топлива либо в топливопроводе – при нагреве за счет контакта топливопровода с пламенем или горячими элементами горелки, либо в топке устройства – путем свободного испарения с нагретой поверхности. Однако подобные технические решения имеют существенные недостатки, так как при пиролизе увеличивается вероятность шлакоотложения для высокозольных топлив, а неравномерная газификация может приводить к расслоению высоковязкого топлива и загрязнению как каналов устройства, так и самой топки. Кроме того, невысокая температура горения в топочной камере при свободном испарении топлива приводит к сажеотложению на поверхностях топки и деталях, расположенных в ее объёме, а при

использовании «тяжелых» топлив, к тому же еще и высока вероятность закоксовки внутренней поверхности дна камеры сгорания.

Существуют изобретения [150], которые обеспечивают снижение выбросов NO_x при горении жидкого топлива за счет реализации схемы двухступенчатого сжигания, при котором топливо воспламеняется при недостатке окислителя, а затем промежуточные продукты реакции, дожигаются во вторичном факеле. Данная схема позволяет избавиться от зон локального максимума температуры, которые являются первопричиной образования термического NO_x . Однако такие схемы сложны в реализации, требуют точных настроек расхода воздуха на каждой ступени.

В [151] предложено устройство, предназначенное для газовых турбин, которое позволяет снижать выбросы NO_x и CO за счет равномерного распределения воздуха в камере горения, при этом снижая падение давления, испытываемое рабочей текучей средой перед началом ее расширения в турбине. Данный способ позволяет избежать использования дополнительных устройств управления потоком, за счет реализации «правильной» аэродинамики в конструкции камеры сгорания. Однако данное изобретение предназначено для сжигания газа, либо легкого жидкого топлива, используемых в газовых турбинах. Кроме того, реализация специальной аэродинамики конструкции представляет сложность в изготовлении, что приводит к повышению стоимости камеры сгорания и снижению надежности устройства.

Предлагаются также различные подходы к модернизации существующих горелок, позволяющие достичь более высоких значений отдельных технических параметров. Например, в [152] используется коррозионно-стойкий магнитный насос высокого давления, который позволяет создать более мелкодисперсный аэрозоль за счет повышенного давления в форсунке устройства, тем самым увеличивая скорость и полноту сгорания, температуру пламени. Однако это не решает проблему наличия локальных максимумов

температуры и, как следствие, образования «термических» оксидов азота. Кроме того, насосы высокого давления зачастую не работают с загрязненными и высоковязкими топливами, что требует дополнительных затрат по очистке и разогреву топлива.

На общем фоне можно отметить изобретения [1, 2, 153-155], обеспечивающие преимущества режима газификации жидкого топлива в условиях недостатка окислителя, исключив при этом недостатки, характерные для большинства других принципиальных технических решений. Этих изобретения основаны на использовании в качестве газифицирующего агента перегретого водяного пара, подаваемого в зону горения. Этот способ позволяет улучшить конверсию топлива по сравнению с традиционной схемой термического разложения топлива, используемой во многих патентах. Кроме того, в [153-155] предложено автономное малогабаритное горелочное устройство, в котором поток перегретого пара создается без использования дополнительных устройств и источников энергии. В горелочном устройстве реализуется интенсивное сжигание легких видов жидкого углеводородного топлива. Принципиальные особенности конструктивного решения позволили получить эффективное миниатюрное устройство.

Для проведения экспериментального исследования горения жидких углеводородов с подачей перегретого водяного пара за основу было выбрано горелочное устройство испарительного типа [154], подробное описание которого приведено в разделе 2.1.1.

ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

Глава 2 посвящена описанию экспериментального стенда и лабораторных образцов горелочных устройств, методик измерений поля скорости (на основе метода PIV), распределения температуры в факеле (с использованием термопары и тепловизора), тепловыделения и состава уходящих газов при горении жидкого углеводородного топлива с паровой и с воздушной газификацией.

2.1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

Исследования выполнялись на огневом стенде в лаборатории радиационного теплообмена ИТ СО РАН (см. рисунок 1), оснащенным автоматизированной системой управления подачей топлива, системой генерации и принудительной подачи перегретого водяного пара, системой регулируемой подачи сжатого воздуха, оригинальными горелочными устройствами, а также двухкомпонентной PIV-системой «Полис», проточным калориметром, контрольно-измерительным оборудованием для измерений температуры (термопара и тепловизор), приборами для проведения газового анализа. Стенд обеспечен координатно-перемещающим устройством, системой сбора и компьютерной обработки данных, системой вентиляции (с вытяжным вентилятором: 1,5 кВт, 1500 об/мин).

Стабильный массовый расход топлива задается топливной форсункой и насосом, масса горючего контролируется при помощи электронных весов Asom PC-100W-10H (предел допускаемой погрешности 1 г). Для высоковязкого топлива предусмотрена система подогрева и очистки (см. рисунок 2). Управление форсункой и запись показаний весов осуществляется при помощи автоматизированной системы управления подачей топлива, данные с которой для дальнейшей обработки поступают на персональный компьютер.

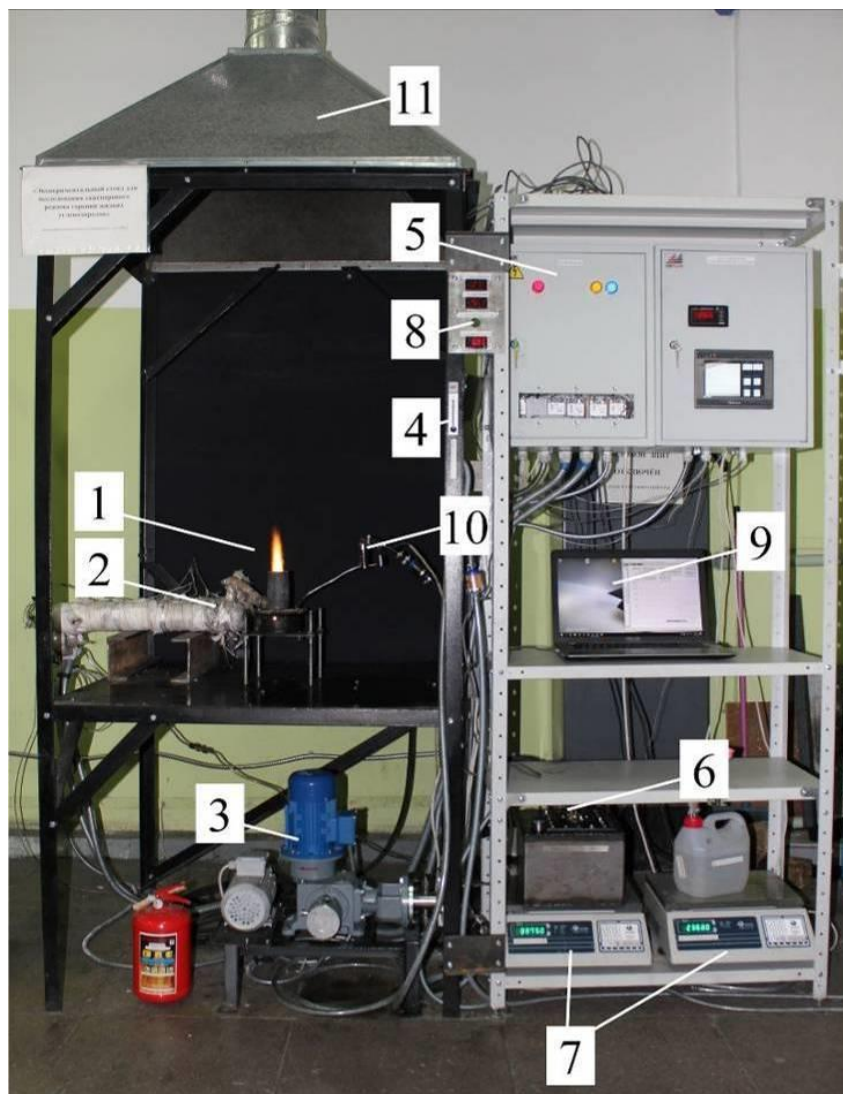


Рисунок 1. Огневой стенд: 1 – горелочное устройство с принудительной подачей в зону реакции струи перегретого водяного пара, 2 – электрический парогенератор, 3 – плунжерный дозирующий насос, 4 – система подачи сжатого воздуха, 5 – автоматизированная система управления парогенератором и подачей топлива, 6 – система управления подачей топлива, 7 – электронные весы, 8 – индикаторы контрольно-измерительных приборов, 9 – компьютер, 10 – топливопровод, 11 – система вентиляции.

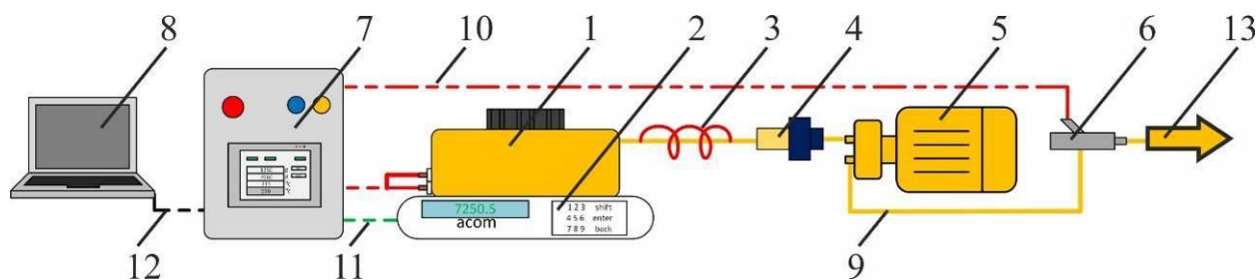


Рисунок 2. Схема автоматизированной системы управления подачей топлива:

1 – топливный бак, 2 – электронные весы, 3 – система подогрева топлива, 4 – система очистки топлива, 5 – топливный насос, 6 – топливная форсунка, 7 – автоматизированная система управления подачей топлива, 8 – персональный компьютер, 9 – линия подачи топлива, 10 – линия управления устройствами, 11 – сигнальная линия, 12 – линия обмена данными, 13 – дозированная подача топлива.

Система генерации и принудительной подачи перегретого водяного пара включает в себя разработанный электрический парогенератор (средняя потребляемая мощность 1,5 кВт) (см. Приложение А) [156], позволяющий на выходе получать водяной пар с заданными параметрами: температура до 550 °С, давление до 1,5 МПа, массовый расход до 1,6 кг/ч. Парогенератор состоит из трех последовательно соединенных нагревательных блоков (см. рисунок 3). Каждый блок представляет собой металлическую трубу (внешний диаметр 38 мм) длиной 0,5 м с толщиной стенки 8 мм. Внутри трубы установлен трубчатый электрический нагреватель U-образной формы (максимальная мощность 700 Вт). Пространство между нагревателем и стенкой трубы заполнено периклазом DM-1 для увеличения теплопередачи. В стенке каждой трубы, по всей длине, выполнены по спирали закрытые паровые каналы прямоугольного поперечного сечения (4×2 мм) и длиной 6 м (для каждого блока). Снаружи трубы теплоизолированы. На поверхности каждого блока установлены контрольные датчики температуры.

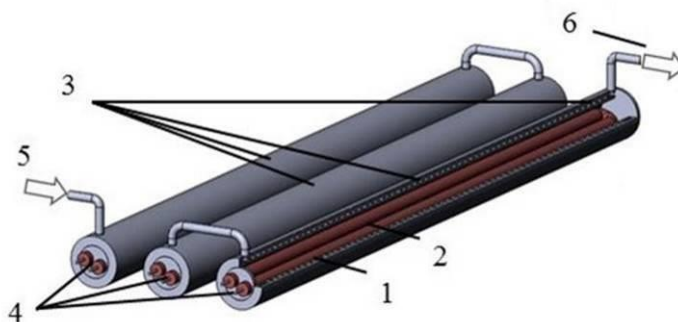


Рисунок 3. Схема электрического парогенератора: 1 – нагревательный блок, 2 – трубчатые электрические нагреватели (ТЭНы), 3 – места установки датчиков температуры, 4 – клеммы питания ТЭНов, 5 – подача питательной воды, 6 – выход пара.

Регулировка параметров и подача перегретого водяного пара реализована следующим образом (см. рисунок 4): в стационарном режиме температура пара измеряется при помощи хромель-алюмелевой термопары типа К, расположенной на выходе из последнего нагревательного блока, и регулируется мощностью нагревателей; давление контролируется с использованием цифрового датчика давления (погрешность 1 кПа); стабильная подача воды в парогенератор обеспечивается плунжерным дозировочным насосом (класс точности – 0.5), расход до 1,6 л/ч; масса воды контролируется при помощи электронных весов Acom PC-100W-5 (предел допускаемой погрешности 0,5 г). Управление и запись данных со всех устройств осуществляется при помощи автоматизированной системы управления парогенератором.

Система регулируемой подачи сжатого воздуха используется для реализации режима воздушной газификации, происходящей при подаче воздушной струи (вместо струи пара) в зону неполного окисления топлива. Она состоит из редуктора (максимальное давление до 1,6 МПа) с манометром, подключенным к магистрали сжатого воздуха, и ротаметра постоянного перепада давления Dwyer rma-21-ssv (диапазон измерения и регулирования расхода 1-10 л/мин, максимальное давление

0,7 МПа) (см. рисунок 5). Нагрев воздуха происходит в электрическом парогенераторе.

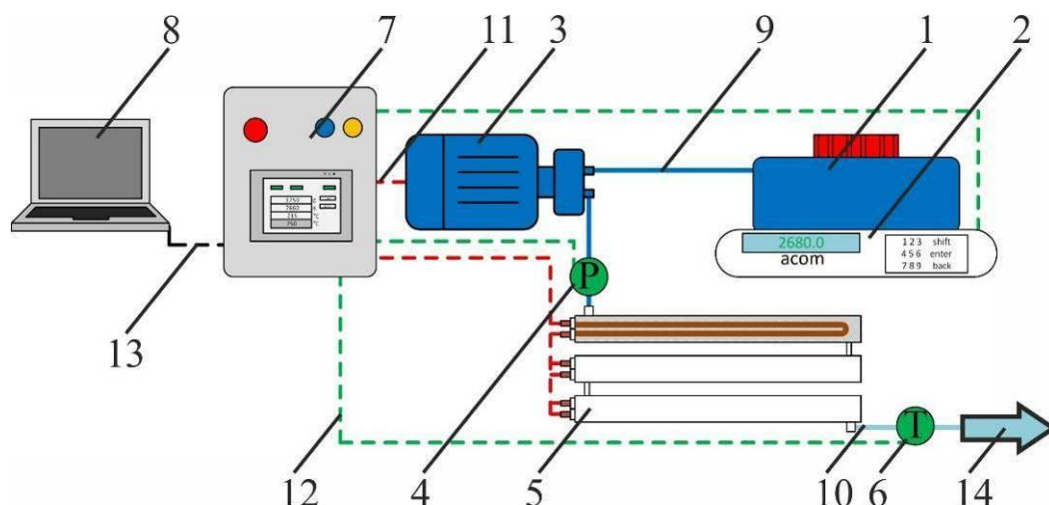


Рисунок 4. Схема системы генерации и подачи перегретого водяного пара: 1 – бак с питательной водой, 2 – электронные весы, 3 – плунжерный дозировочный насос, 4 – цифровой датчик давления, 5 – электрический парогенератор, 6 – датчик температуры пара, 7 – блок управления, 8 – персональный компьютер, 9 – линия подачи питательной воды, 10 – линия подачи перегретого водяного пара, 11 – линия управления устройствами, 12 – сигнальная линия, 13 – линия обмена данными, 14 – подача перегретого водяного пара.

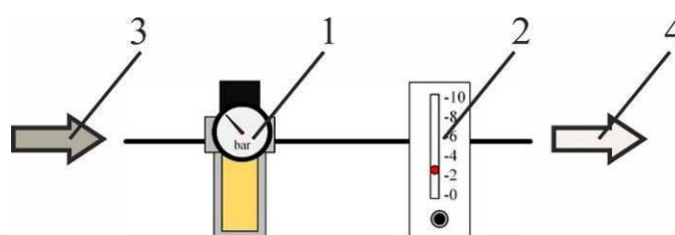


Рисунок 5. Схема системы регулируемой подачи сжатого воздуха: 1 – редуктор с манометром, 2 – ротаметр, 3 – поток воздуха из магистрали, 4 – подача сжатого воздуха к форсунке горелочного устройства.

Регулировка параметров и подача сжатого воздуха происходит путем установления постоянного давления на редукторе, после чего выставляется

значение расхода воздуха запорным клапаном в ротаметре. Так как ротаметр работает по принципу постоянного перепада давления, то показания, снимаемые со шкалы, корректируются по стандартным условиям давления и температуры. А именно: $Q_2 = Q_1 \sqrt{P_1 T_2 / P_2 T_1}$, где Q_1 – наблюдаемое показание, Q_2 – стандартный расход скорректированный для давления и температуры на выходе из ротаметра, P_1 – давление на выходе из ротаметра, P_2 – стандартное давление (0,101325 МПа), T_1 – температура воздуха на выходе из ротаметра, T_2 – стандартная температура (293,15 К).

Исследования характеристик процесса горения жидких углеводородов проводились на лабораторных образцах оригинальных горелочных устройств (ГУ) испарительного типа, разработанных в ИТ СО РАН. «Автономные» ГУ позволяют получать поток перегретого пара без использования внешнего парогенератора. Другой вид используемых ГУ предусматривает подключение к системе генерации и принудительной подачи перегретого водяного пара, что позволяет варьировать параметры потока пара в широком диапазоне (в отличие от «автономных» ГУ). Оба вида ГУ могут работать также в режиме сжигания топлива с подачей в зону горения потока нагретого воздуха (потребляемого из магистрали сжатого воздуха) с регулируемым расходом и температурой.

2.1.1. Автономное горелочное устройство

Одним из исследуемых лабораторных образцов горелочных устройств является автономное горелочное устройство мощностью до 10 кВт и объемом бачка-испарителя $\sim 300 \text{ см}^3$ [154], которое непрерывно работает на дизельном топливе при атмосферном давлении (рабочее давление в бачке-испарителе $0,5 \div 1,0$ МПа, время непрерывной работы в автономном режиме – до 1 ч) [157, 158]. Расход топлива составляет $0,5 \div 0,8$ кг/час. Средний расход пара составляет $\sim 0,25$ кг/ч. Время работы устройства ограничено запасом воды. Размеры устройства: диаметр 120 мм, высота 200 мм, диаметр выходного отверстия 26 мм.

Элементы изготовлены из стали марки 12Х18Н10Т. Принципиальная схема горелочного устройства представлена на рисунке 6.

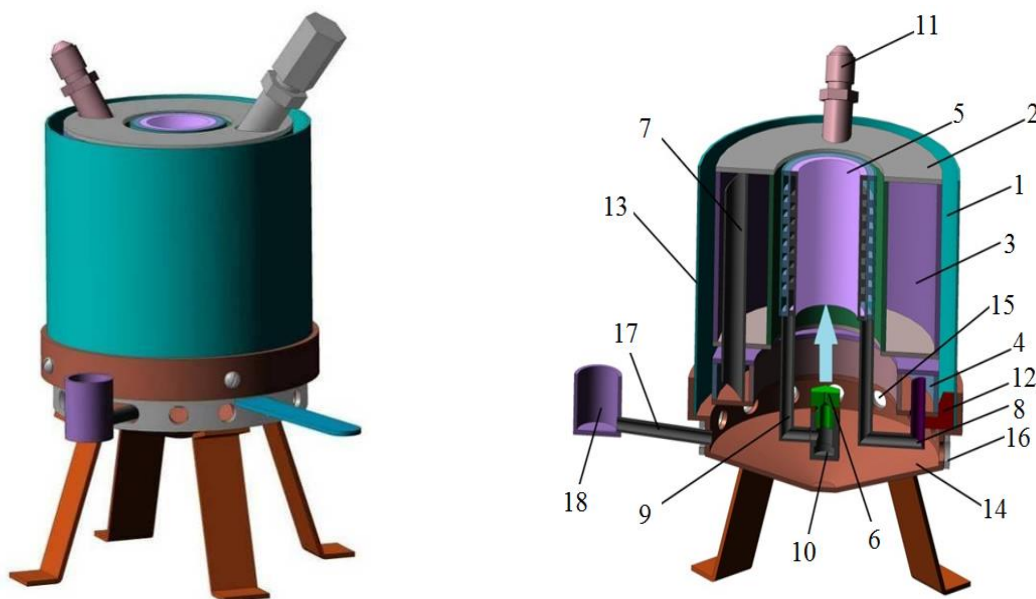


Рисунок 6. Автономное горелочное устройство для сжигания жидких углеводородов: 1 – корпус, 2 – парогенератор, 3 – бачок-испаритель, 4 – паросепаратор, 5 – пароперегреватель, 6 – форсунка, 7-9 – трубки-паропроводы, 10 – держатель, 11 – заливная горловина, 12 – лапки, 13 – цилиндрический кожух, 14 – топка, 15 – отверстия-воздуховоды, 16 – заслонка, 17 – топливопровод, 18 – топливоприемник.

Горелочное устройство состоит из следующих основных элементов: цилиндрического корпуса, встроенного парогенератора с форсункой и камеры газогенерации. Корпус состоит из цилиндрического кожуха, топки, имеющей отверстия-воздуховоды с заслонкой. Жидкое топливо подается в топку по топливопроводу, на конце которого размещен топливоприемник. Парогенератор, выполненный в форме кольцевой камеры, содержит три отдельных блока: бачок-испаритель, паросепаратор, пароперегреватель. Цилиндрическая камера газогенерации окружена парогенератором и ориентирована вертикально, а паровая форсунка установлена соосно с ней. В объем горелки отдельно поступают топливо, воздух и перегретый водяной пар. Бачок-испаритель и паросепаратор не

имеют общих стенок и соединены трубкой. Водяной пар поступает по трубке из паросепаратора в пароперегреватель, а затем по трубке попадает в держатель форсунки. К бачку-испарителю приварена заливная горловина. Через форсунку в горелочное устройство, вместо пара, может подаваться сжатый воздух с регулируемыми параметрами.

Горелочное устройство работает следующим образом. Запуск происходит с использованием сухого горючего. Тепло, выделяемое при его горении, идет на нагрев и испарение воды с повышением давления в бачке-испарителе. Насыщенный водяной пар, проходя паросепаратор и пароперегреватель, перегревается и в виде вертикально направленной струи истекает из паровой форсунки во внутреннюю цилиндрическую полость, окруженную пароперегревателем. При этом высокоскоростная струя создает эжекционный эффект, вызывающий приток атмосферного воздуха в топку через отверстия-воздуховоды, расположенные в нижней части корпуса. После этого через топливоприемник и топливопровод в топку подается жидкое топливо, где происходит термическое разложение и испарение топлива, с последующим воспламенением в условиях недостатка окислителя. Углеродосодержащие продукты, в том числе образовавшиеся первичные частицы сажи попадают в поток перегретого водяного пара. В результате паровой газификации выделяются водород и монооксид углерода (синтез-газ). Часть этих промежуточных продуктов выносятся из горелочного устройства и, смешиваясь с кислородом из атмосферы, они сгорают, формируя внешний факел. Часть тепла, выделяющегося при горении, расходуется на дополнительный нагрев пара в пароперегревателе. При достижении в бачке-испарителе давления $\sim 0,7$ МПа устанавливается стационарный режим интенсивного стабильного горения топлива с ярким коротким факелом (см. рисунок 7-а). Этот режим горения резко отличается от режима горения без подачи пара (см. рисунок 7-б), для которого характерно образование большого количества сажи.



а)



б)

Рисунок 7. Горение жидкого углеводородного топлива в автономном горелочном устройстве: а) установившийся режим горения с подачей пара; б) режим горения в отсутствие струи водяного пара.

Для усовершенствования описанного горелочного устройства были разработаны новые технические решения (см. рисунок 8): автономное горелочное устройство длительного действия (мощностью до 25 кВт) с горизонтальным факелом [159] и пусковое горелочное устройство (мощностью ~ 3 кВт) [160], на которые получены патенты (см. Приложение А). Разработанные технические решения позволили увеличить время непрерывной работы автономного горелочного устройства до 6 ч, сократив при этом время его выхода на установившийся режим в 6 раз (до пяти минут). Тем самым удалось существенно улучшить характеристики ГУ, важные для их дальнейшего практического применения.



а)



б)

Рисунок 8. Горение жидкого углеводородного топлива:

а) в автономном горелочном устройстве длительного действия;

б) в пусковом горелочном устройстве.

Увеличение мощности и времени работы автономного горелочного устройства обеспечены за счет увеличения размера топки, тем самым изменена площадь испарения подаваемого топлива, а также объем бачка-испарителя. Пароперегреватель выполнен плоским, чтобы изменение габаритов устройства не приводило к увеличению расстояния от поверхности испарения топлива до паровой струи. Этот показатель определяет качество сажи, попадающей в поток пара, и процесс коксования. Кроме того, в новом устройстве предусмотрены заслонки и пробка во внутреннем отверстии бачка-испарителя. Изменяя их положение, можно управлять давлением пара в парогенераторе.

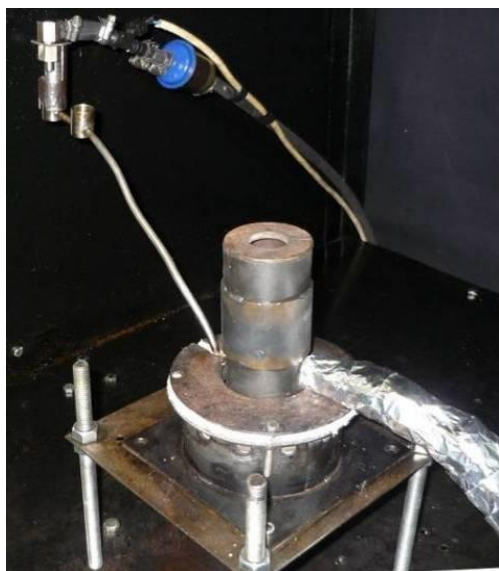
Увеличенный объем бачка-испарителя требует большего количества тепла для поднятия давления при запуске устройства. В силу особенностей конструкции подвод тепла удобнее осуществлять сверху. С учетом этого разработано пусковое горелочное устройство. Оно тоже автономное, но имеет уменьшенный объем бачка-испарителя, суммарное время запуска устройства составляет не более пяти минут. При этом паровая форсунка ориентирована так, что струя пара формирует факел, направленный вниз. Устанавливаемое сверху, пусковое устройство

позволяет быстро нагреть воду в бачке-испарителе горелки длительного действия и повысить в нем давление пара, что значительно облегчает запуск горелочного устройства длительного действия. Полученные патенты на изобретения используются ООО «ЗиО-КОТЭС» (гор. Новосибирск) по лицензионному договору (см. Приложение Б).

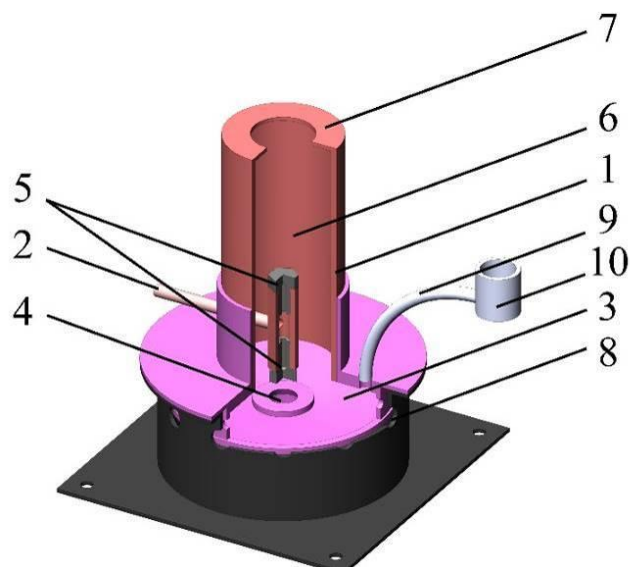
2.1.2. Горелочное устройство с принудительной подачей перегретого водяного пара

Другой вид используемых в работе жидкотопливных горелочных устройств испарительного типа предусматривает внешнюю генерацию и принудительную регулируемую подачу пара. Их основными элементами горелочного устройства являются: цилиндрический корпус, топочная камера с форкамерой, паровые форсунки, камера газогенерации и выходное сопло [161–164], см. рисунок 9.

Все элементы горелочного устройства выполнены из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т. Внешний диаметр топочной камеры 130 мм, внутренний диаметр камеры газогенерации 50 мм, высота 180 мм, диаметр выходного отверстия 30 мм. Конструкцией горелочного устройства предусмотрен естественный приток воздуха из атмосферы в зону реакции – через отверстия в нижней части топочной камеры. Две паровые форсунки (угол раскрытия 17°, выходной диаметр 0,5 мм), соединенные с внешним парогенератором, установлены соосно над топочной камерой у основания камеры газогенерации и ориентированы вертикально. Нижняя форсунка направлена вниз, в форкамеру (с внутренней полостью в виде полусферы и конусным выходом), расположенную на дне топочной камеры по центру и предназначенную для торможения потока пара без прямого контакта с жидким топливом. Основное предназначение этой струи пара – повышение температуры элементов топки для предотвращения коксования поверхностей и интенсификации испарения. Вторая форсунка направлена вверх – в камеру газогенерации.



а)



б)

Рисунок 9. Пример используемого жидкотопливного горелочного устройства испарительного типа с внешней генерацией перегретого водяного пара:

а) внешний вид; б) схема: 1 – корпус, 2 – место подачи пара, 3 – топка, 4 – форкамера, 5 – паровая форсунка, 6 – камера газогенерации, 7 – выходное сопло, 8 – воздухопроводы, 9 – топливопровод, 10 – топливopриемник.

Устройство работает следующим образом: насос подает воду с заданным расходом в подключенный к устройству и предварительно нагретый парогенератор, из которого пар поступает в горелочное устройство и нагревает его элементы. После этого через топливopриемник по топливопроводу топливо с заданным расходом подается в топку горелочного устройства. Поджигание испаряющегося топлива осуществляется внешней газовой горелкой через отверстия в нижней части топочной камеры. В течение трёх минут происходит выход на стационарный режим работы горелочного устройства.

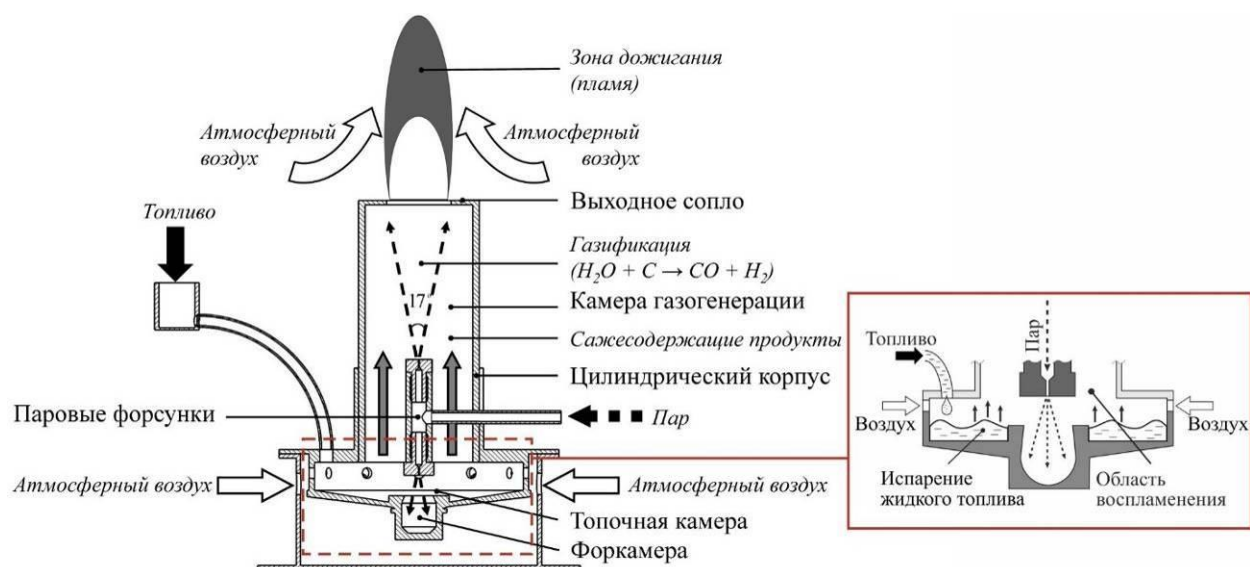


Рисунок 10. Схема работы горелочного устройства.

Схема процесса сжигания в данном горелочном устройстве аналогична описанной выше для лабораторного образца автономного горелочного устройства. А именно, испаряющиеся компоненты топлива воспламеняются в топочной камере, компоненты смеси поступают в камеру газогенерации, при перемешивании с направленной вверх струей перегретого водяного пара происходит газификация продуктов термического разложения и неполного сгорания топлива. Образующаяся горючая смесь водорода и монооксида углерода догорает во внешнем факеле, смешиваясь с воздухом (см. рисунок 10).

2.2. МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ

2.2.1. Методика измерения скорости потока в факеле

Экспериментальное исследование структуры потока в факеле горелочного устройства при горении жидкого углеводородного топлива с подачей перегретого водяного пара в зону горения проведено на основе оптического метода измерения скорости (PIV), реализованного в двухкомпонентной измерительной системе «Полис», разработанной в ИТ СО РАН (см. рисунок 11) [157]. Указанная система

включает в себя: двойной импульсный Nd:YAG лазер QuantelEVG с энергией в импульсе 145 мДж (длина волны 532 нм, частота до 15 Гц, длительность импульса 10 нс); объектив для формирования лазерного ножа; цифровая камера Видеоскан 4021 с разрешением 2048×2048 пикселей, кадровая частота 1,5 Гц (которая и определяет максимальную частоту измерений при достаточной скорости записи данных в ПЗУ компьютера); широкоугольный объектив Nikkor 28mm F/2.8 D (диаметр 52 мм); синхронизирующий процессор; персональный компьютер с программным обеспечением ActualFlow. Для подавления собственной яркости факела использовались оптические светофильтры (532 ± 10 нм), последовательно установленные на объектив.

Высокая температура потока и специфика используемых жидкотопливных горелочных устройств испарительного типа осложняют выбор трассеров и их подачу в среду для проведения PIV-измерений. Стандартные (твердые) трассеры и методы засева потока здесь не подходят, поскольку в данном случае трассеры не могут быть введены в факел с потоком пара или воздуха, как и не могут перейти в газовую среду, будучи добавлены к жидкому топливу. Кроме того, важно, чтобы при диагностике реагирующего потока трассеры были химически инертны и стабильны.

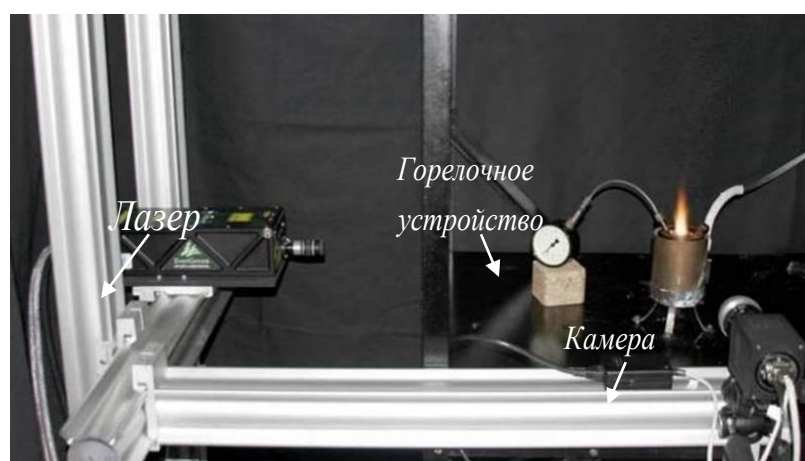


Рисунок 11. Установка, оснащенная PIV-системой для измерения поля скорости в факеле.

Найти решение этой проблемы удалось добавлением силиконового масла в жидкое топливо. Во время проведения измерений силиконовое масло марки ПМС-5 подавалось через воздуховоды шприцем в топливо, находящееся в топке горелочного устройства. Силиконовое масло (имеющее температуру кипения $\sim 170^{\circ}\text{C}$) испарялось вместе с топливом, и в результате в зоне горения образовывались твердые микрочастицы диоксида кремния, которые обеспечивали засев потока трассерами, подходящими для проведения PIV-измерений. Достоинством применяемой методики является то, что добавление в топливо небольшого количества силиконового масла (до 50 г на 1 кг топлива) не влияет на характеристики процесса горения (в отличие, например, от железосодержащих соединений). Данное решение оказалось не только простым, но и эффективным: силиконовое масло хорошо растворяется в жидких углеводородах, при низкой концентрации не оказывает заметного влияния на процесс горения, имеет относительно низкую стоимость, не токсично и не приводит к образованию токсичных продуктов в факеле, а образующиеся частицы имеют размеры (~ 1 мкм), отвечающие требованиям метода PIV. Низкая инерционность этих частиц и хорошая различимость на изображениях позволяют с достаточной точностью определять их перемещения и измерять скорость потока с характерной методом PIV погрешностью в пределах 10 %.

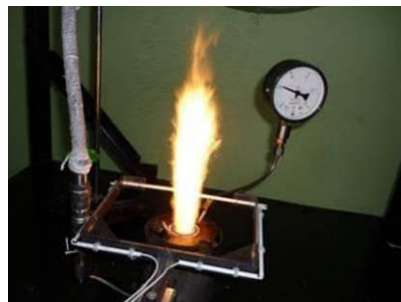
2.2.2. Методика измерения температуры

Для измерения температуры в высокотемпературном факеле в используемых горелочных устройствах [163-165] была выбрана платинородий-платинородиевая термопара типа В производства ОАО НПП «Эталон» (Pt-30%, Rh / Pt-6%, Rh), диапазон $600\text{--}1600^{\circ}\text{C}$ (кратковременно до 1800°C), диаметр проволоки 0,5 мм, длина термоэлектродов 70 см (см. рисунок 12), характерное время релаксации 5 с. Термопара имеет П-образную форму, а рабочий спай располагается посередине горизонтального отрезка буквы П. Термоэлектроды

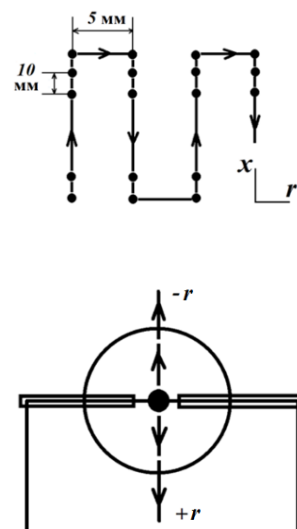
защищены газонепроницаемым керамическим чехлом TRA-116316 (Al_2O_3 99%, до 1900°C) с диаметром 5 мм.



а)



б)



в)

Рисунок 12. Общий вид экспериментального стенда с КПУ и термопарой (а); общий вид устройства для термопарных измерений (б); схема перемещения термопары (в).

Измерения проводятся в плоскости симметрии горелочного устройства. Рабочий конец термопары помещается в различные точки внутри факела (согласно плану) при помощи координатно-перемещающего устройства (КПУ), шаг от 5 мм. Сигнал с термопары через АЦП LTR114 (24 бита, 4 кГц) поступает на компьютер. Автоматизированный сбор данных, визуализация, первичная обработка и сохранение осуществляются в программе Automated Thermocouple Measurements. Основное назначение данной программы: синхронизация КПУ и АЦП; управление автоматизированным перемещением измерительной системы; визуализация сигналов в абсолютных величинах в момент измерений; автоматизированный непрерывный сбор и сохранение данных в файл; одновременный синхронизированный запуск нескольких каналов. Последующая визуализация данных выполняется на компьютере.

Данная методика имеет ряд источников погрешности измерений. Одна из них – это влияние каталитической реакции вследствие способности платиновых металлов к абсорбции газов (в частности O_2 , H_2) [90]. Также следует учитывать излучение проводящих элементов при их помещении в высокотемпературную зону. В работе [166] показано, что данные, полученные при помощи термопар, в пламени могут отличаться от результатов расчетов на величину ~ 100 К. Основной причиной отклонения авторы считают тепловое излучение термопары в окружающую среду, при учете которого результаты измерений приближаются к расчетным. Для оценки погрешности, связанной с излучением, в работе [167] для круглых термопар рекомендуется использовать следующую формулу:

$$\Delta T = 1,25 \varepsilon \sigma d^{3/4} T_c^4 (\eta / \rho V)^{1/4} / \lambda,$$

где T_c – температура термоспая, ε – степень черноты термопары, σ – постоянная Стефана-Больцмана, d – диаметр термопары, λ , η – коэффициенты теплопроводности и вязкости газа, ρ , V – плотность и скорость газа.

В работе [167] для учета поправки на излучение проводящих элементов все параметры несущей фазы берут для воздуха вследствие сложности оценки параметров для многокомпонентной смеси в пламени. Поэтому, используя λ , η и ρ для воздуха, с учётом их зависимости от температуры [168], получим величину поправки на уровне 5%.

Кроме того, существует инструментальная погрешность датчика, которая составляет по паспорту $\pm 0,5\%$ [88]. Погрешность же приемника данных (шум АЦП) при частоте 10 Гц составляет 1,5 мкВ, при частоте 100 Гц – около 10 мкВ. Для выполняемых измерений это означает приборную погрешность $\sim 0,5$ К (или $\sim 0,03\%$ от характерной измеряемой температуры).

Несмотря на большое число факторов, влияющих на достоверность результатов, считается, что основной вклад в погрешность измерений температуры вносят излучение проводящих элементов и инструментальная погрешность датчика, хотя достоверно оценить погрешность приемника данных и

влияние каталитической реакции – весьма сложно. Поправка на холодный спай термопары, который находится при комнатной температуре, не вводится, так как изменение сигнала при низкой температуре холодного спая несущественно для выбранного типа термопар (малый вклад в ТЭДС) [88], (см. рисунок 13).

Наряду с этим для исследования температурных неоднородностей измерения температуры пламени также осуществлялись при помощи тепловизионной камеры фирмы FLIR серии JADE J530SB (см. рисунок 14) совместно с сотрудниками кафедры ФВМ Томского государственного университета [160–162, 169]. Данный прибор имеет широкий диапазон параметров: частота съемки может устанавливаться от 177 Гц (с разрешением кадра 320x240 пикселей) до 18 кГц (с разрешением 320 x 4 пикселей); камера позволяет работать с инфракрасным излучением в диапазоне 2,5–5 мкм, что соответствует длинам волн излучения продуктов горения (H_2O , CO_2 , CO и др.). Камера укомплектована светофильтрами с длиной волны пропускания 2,5–2,7, 2,64–3,25, 3,1–3,3, 3,7–3,9, 4,0–5,0 мкм. Согласно рекомендации производителя, для измерений температуры выше 1400 К использовался светофильтр 2,5–2,7 мкм.

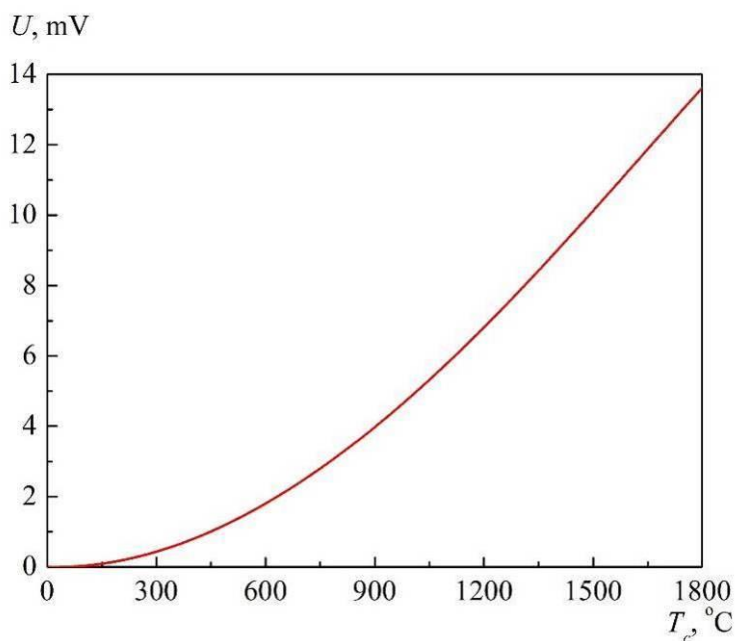


Рисунок 13. Зависимость ТЭДС термопары типа В от температуры.



Рисунок 14. Фотография экспериментального стенда с тепловизором FLIR JADE J530SB.

Для определения эффективного коэффициента излучения ε одновременно с измерениями тепловизором в контрольных точках регистрировалась температура с помощью платинородий-платинородиевой термопары типа В ($600\ldots 1600^\circ\text{C}$) с диаметром термоэлектродов 0,5 мм. На полученной средней по времени термограмме определялась значение температуры в области расположения спая.

2.2.3. Методика измерения тепловыделения

Оценка энергоэффективности исследуемого способа сжигания жидких углеводородов, полноты сгорания топлива может опираться на измерение количества тепла, полученного от продуктов сгорания [163–165]. Для этого был создан проточный калориметр (см. рисунок 15).

Калориметр состоит из пяти последовательно соединенных секций (общая длина 12 м). Каждая секция состоит из двух коаксиальных стальных труб (толщина стенок 4 мм). Внутренний канал (с диаметром 68 мм) предназначен для потока воздуха и продуктов сгорания, а кольцевой канал (с шириной 10 мм) – для подачи теплоносителя (воды). В верхних коленах установлены автоматические воздухоотводчики из кольцевого канала и патрубки к внутреннему каналу для

установки измерительных приборов. В нижних коленях установлены краны для слива теплоносителя, а также пробки для удаления конденсата из внутреннего канала. Внешняя поверхность покрыта теплоизолирующим материалом «термофлекс». Калориметр оснащен необходимыми измерительными приборами.

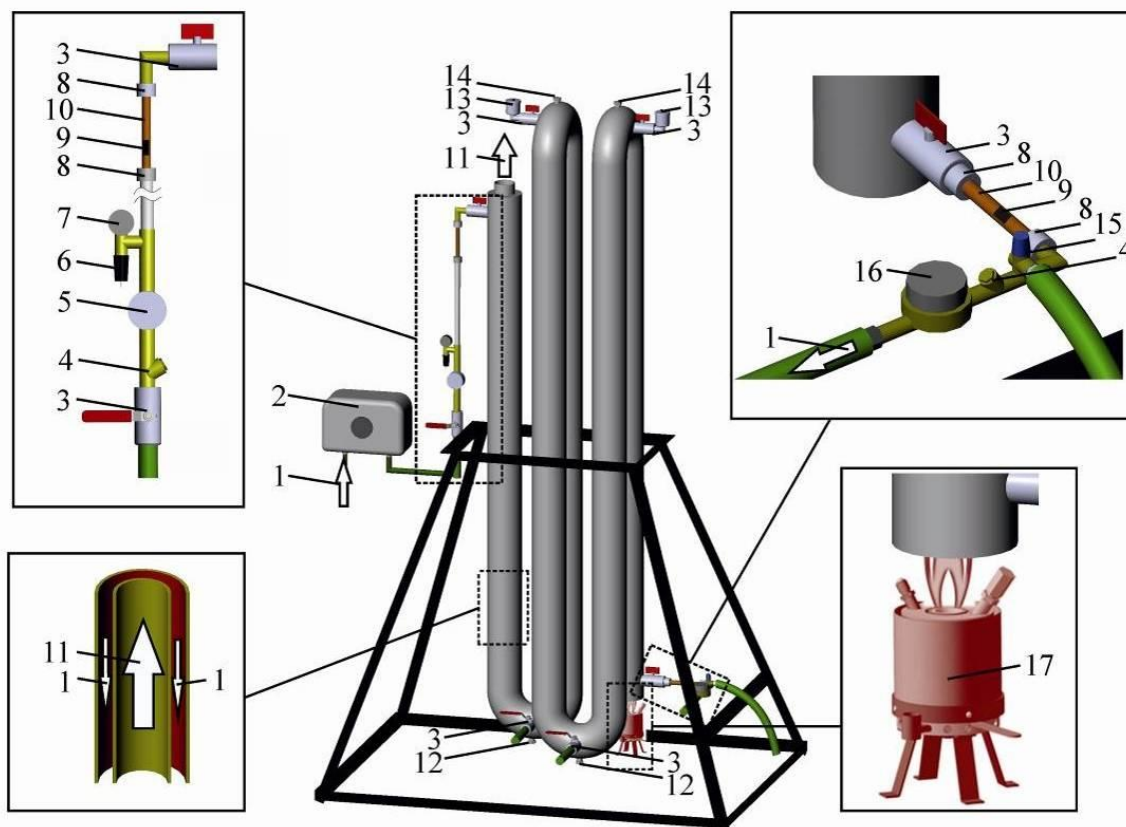


Рисунок 15. Схема проточного калориметра: 1 – направление движения теплоносителя; 2 – водонагреватель; 3 – шаровой кран; 4 – фильтр сетчатый; 5 – расходомер; 6 – цифровой датчик давления; 7 – манометр; 8 – фторопластовая терморазвязка; 9 – термопара хромель-алюмелевая; 10 – медная трубка; 11 – направление движения уходящих газов; 12 – пробки для слива конденсата из внутренних труб; 13 – клапан воздухоотвода; 14 – патрубки для ввода измерительных зондов во внутренние трубы; 15 – предохранительный клапан; 16 – контрольный расходомер; 17 – горелочное устройство.

Калориметрические измерения тепловой энергии, получаемой от продуктов сгорания, проводились при установлении стационарного теплового режима в калориметре. Контролировалась разность температуры теплоносителя на входе и выходе калориметра, объемный расход теплоносителя и массовый расход топлива. Вода из центральной системы городского водоснабжения подается в калориметр через проточный водонагреватель с начальной температурой, равной температуре окружающей среды ($T_a \approx 20^\circ\text{C}$). Потоки воды и продуктов сгорания имеют противоположные направления. Температура воды на входе калориметра измерялась с помощью хромель-алюмелевых термопар ($\varnothing 0,2$ мм). Термопары устанавливались на изолированную конденсаторной бумагой поверхность медных трубок, по которым проходил теплоноситель. Измерительные зоны были теплоизолированы от корпуса калориметра при помощи фторопластовых вставок. Свободные концы термопар помещались в жидкостный термостат ВТ10 производства компании «Термэкс», где поддерживалась постоянная температура 30°C . Объемный расход воды регулировался краном на входе в калориметр и регистрировался с использованием водосчетчика с импульсным выходом ВСХд-20 (пределы относительной погрешности 2 %; цена одного импульса 1 л). Вывод сигналов на компьютер осуществлялся с использованием АЦП LTR114. Сбор данных, их визуализация и экспорт производились в программе LGraph2. Объемный расход и температура газов, выходящих из калориметра, определялись с помощью термоанемометра TESTO 425, (погрешность измерения скорости $\pm(0,03 \text{ м/с} + 5 \text{ \% от измеренного значения})$, температуры $\pm 0,5^\circ\text{C}$). Факел горелочного устройства вводился во внутренний канал калориметра при равенстве температуры воды на входе и на выходе калориметра. Измерение тепла продуктов сгорания производилось после установления стационарного теплового режима в калориметре (характерное время тепловой релаксации составляет $\sim 12,5$ мин).

Методика обеспечивает измерение тепла продуктов сгорания с точностью до тепловых потерь, связанных с избыточной теплотой уходящих газов (за счет

того, что их температура на 2–4 К выше температуры окружающей среды T_a). При этом продукты сгорания, попадающие в калориметр, содержат не все тепло, выделяющееся при сгорании топлива, поскольку часть тепла передается в окружающую среду (теплоотдача на поверхности горелочного устройства). Суммарная оценка этих потерь тепла (в расчете на 1 кг топлива) составляет не более 1 % от высшей теплотворной способности дизельного топлива 44,9 МДж/кг.

Основной вклад в погрешность методики вносит дискретность импульсов прибора, регистрирующего расход теплоносителя ~ 2 %. Оценка погрешности от остальных приборов, а также за счет тепловых потерь, связанных с избыточной теплотой уходящих газов и теплоотдачей с корпуса горелочных устройств, превышает 1 %. Тем самым, суммарную относительную погрешность определения значений тепловыделения (q) и тепловой мощности (W) следует оценить на уровне до 3 %.

2.2.4. Методика газового анализа состава уходящих газов

Для измерения газового состава уходящих газов в случае сжигания дизельного топлива в автономном горелочном устройстве использовался газоанализатор «ТЕСТ-1» [165]. Данный прибор позволяет измерять такие компоненты как O_2 (до 21 % об.), H_2 (до 40 % об.), CO (до 60 % об.), CO_2 (до 30 % об.), CH_4 (до 30 % об.), NO (до 1000 ppm), NO_2 (до 200 ppm). В приборе реализованы следующие методы анализа: CH_4 , CO , CO_2 измеряются оптико-абсорбционным методом, O_2 , NO , NO_2 – электрохимическим, H_2 – полярографическим. Данные с прибора регистрировались компьютером в реальном времени. Время установления показаний содержания газов в пробе 5 с. Предел допускаемой относительной погрешности показаний прибора ± 5 %, для метана ± 10 %, для водорода $\pm 1,5$ %.

Наряду с указанным прибором, для определения состава продуктов сгорания применялся газоанализатор TESTO 350 [163, 164], также удовлетворяющий стандартам [119] и позволяющий измерять содержание

основных компонентов: O₂ (до 25 % об.), CO (до 500 ppm), CO₂ (до 50 % об.), NO (до 300 ppm), NO₂ (до 500 ppm) и SO₂ (до 5000 ppm). В приборе реализованы следующие методы анализа: CO₂ измеряется инфракрасным методом, O₂, CO, NO, NO₂, SO₂ – электрохимическим. Полученная информация о содержании веществ передается в реальном времени на персональный компьютер для ее записи и дальнейшего анализа. Время установления показаний содержания газов в пробе 1 с. Предел допускаемой относительной погрешности показаний прибора 5 %.

Методика измерения газоанализатором заключается в следующем – так как в используемых газоанализаторах не предусмотрен анализ «горячих» газов, то все проводимые измерения (забор пробы) осуществляются на выходе из проточного калориметра, где температура дымовых газов близка к температуре окружающей среды (см. рисунок 16). Тем самым, исследования состава продуктов сгорания проводились одновременно с измерениями полученного от них количества тепла.

Данные, полученные с помощью газоанализатора, о содержании токсичных веществ в продуктах сгорания на выходе из проточного калориметра могут быть использованы для сопоставления с различными современными требованиями и нормативами по экологической безопасности. Например, для сравнения с требованиями [124] результаты, представленные в [ppm], достаточно пересчитать на массовое содержание вещества в стехиометрическом объеме сухих продуктов сгорания при сжигании 1 кг топлива [мг/м³], а для сопоставления с [170] – на массовое содержание вещества, отнесенное к количеству выделившейся тепловой энергии при сжигании 1 кг топлива [мг/кВт ч]. Стоит отметить, что все величины легко пересчитываются для нормальных условий и коэффициента избытка воздуха равного 1 по формуле [112]:

$$\left[\frac{\text{мг}}{\text{м}^3} \right] = [\text{ppm}] \left(\frac{21}{21 - [\text{O}_2]} \right), \quad (1)$$

где [O₂] – содержание кислорода в уходящих газах. Умножив полученное значение на плотность исследуемого газа, получим требуемую по документу размерность:

$$[\text{мг/м}^3] = [\text{ppm}] \left(\frac{21}{21 - [\text{O}_2]} \right) \rho_x, \quad (2)$$

где ρ_x – плотность газа x при нормальных условиях, кг/м^3 (ρ_x для NO_x считается равным $2,056 \text{ кг/м}^3$, так как данное вещество пересчитывается по параметрам NO_2 [124, 170]).



Рисунок 16. Расположение зонда газоанализатора на калориметре.

Пересчет значений из $[\text{ppm}]$ в $[\text{мг/кВт ч}]$ возможен по формуле [170]:

$$[\text{мг/кВт ч}] = [\text{ppm}] \rho_x \left(\frac{21}{21 - [\text{O}_2]} \right) \frac{V_{d.g.}}{H}, \quad (3)$$

где $V_{d.g.}$ – стехиометрический объем сухих продуктов сгорания при сжигании 1 кг топлива, $\text{м}^3/\text{кг}$; H – низшая удельная теплота сгорания топлива, кВт ч/кг .

Не учитывая малый вклад в суммарный объем сухих продуктов сгорания компонентов, получаемых из содержащихся в топливе азота, серы и кислорода, получаем $V_{d.g.}$ как:

$$V_{d.g.} = \frac{\left(\frac{C_f}{\mu_c} + 0,79 \frac{H_{2f}}{2\mu_{H_2}} \right)}{0,21} \frac{RT}{P_{atm}}, \quad (4)$$

где C_f – массовая доля углерода в топливе, кг; H_{2f} – массовая доля водорода в топливе, кг; μ_x – молярная масса газа x , кг/моль ; R – газовая постоянная; T –

температура продуктов сгорания при нормальных условиях, К ($T = 273$ К); P_{atm} – атмосферное давления для нормальных условий, Па ($P_{atm} = 101325$ Па).

Таким образом, подставляя результаты уравнения (4) в (3) и умножая его на значение низшей удельной теплоты сгорания топлива H , либо умножая (2) на стехиометрический объем сухих продуктов сгорания при сжигании 1 кг топлива $V_{d.g.}$, легко также пересчитать показания газоанализатора из [ppm] в массовое содержание вещества на количество сгоревшего топлива [г/кг]:

$$[\text{мг/кг}] = [\text{ppm}] \left(\frac{21}{21 - [\text{O}_2]} \right) \rho_x V_{d.g.} \quad (5)$$

ГЛАВА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Проведены исследования горения жидких углеводородов в различных лабораторных образцах горелочных устройств: дизельного топлива в автономном горелочном устройстве; дизельного топлива и отработанного машинного масла в горелочном устройстве с принудительно подачей перегретого водяного пара. Химический состав используемых видов горючего приведен в Приложении В.

3.1. ГОРЕНИЕ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА В АВТОНОМНОМ ГОРЕЛОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ

Горение дизельного топлива в лабораторном образце автономного горелого устройства изучалось в стационарном режиме, в котором расход топлива составлял 0,65 кг/ч, относительный массовый расход пара (отношение массового расхода пара к расходу топлива) – 0,4 кг/ч, давление в бачке-парогенераторе – 0,7 МПа, температура перегретого водяного пара ~400°C.

3.1.1. Скорость и структура потока

С использованием двухкомпонентной PIV-системы «ПОЛИС» получены данные о пространственном распределении скорости высокотемпературного турбулентного потока в заданных сечениях внешнего факела горелочного устройства при установившемся режиме горения дизельного топлива [157].

На рисунке 17 в качестве примера представлено PIV-изображение облака частиц (контрастность изображения специально изменена). Окружающий воздух содержит микрокапли жидкости на основе глицерина (туман), а выходящий из горелки поток (факел) содержит твердые частицы оксида кремния. Видно, что

твердые частицы лучше рассеивают падающее излучение (выглядят ярче на PIV-изображениях).



Рисунок 17. Твердые частицы, образованные в результате испарения силиконового масла (в факеле), и аэрозоль (в окружающем пространстве)

Яркость излучения факела очень высока и при использовании цифровой камеры Видеоскан 4021 (время экспозиции 128 мс) со световыми фильтрами (полоса пропускания 532 ± 10 нм) происходит локальное засвечивание кадров. В связи с этим PIV-измерения проведены с использованием высокоскоростной камеры PCO.1200hs, имеющей минимальное время экспозиции первого кадра 50 нс (время экспозиции второго кадра определяется временем записи данных с первого кадра и составляет ~ 2 мс) при частоте до 636 Гц и максимальном разрешении 1280×1024 . Частота съемки была ограничена частотой лазера 15 Гц. Собственная оперативная память высокоскоростной камеры – 4 Гб.

Эксперимент запускался в программе ActualFlow, задавались следующие параметры: задержка между парой кадров 100 мкс для расчетной ячейки 64×64 пикс., время между парами кадров 70 мс (при максимальной частоте лазера 15 Гц). Управление камерой PCO.1200hs и сбор информации происходили в программе CamWare. На камеру устанавливался объектив Nikkor 28mm F/2.8 D.

Диафрагменное число подбиралось по яркости снимков и составляло 5,6. На объектив устанавливался один оптический фильтр L.O.T.-Oriel с полосой пропускания 532 ± 10 нм. После проведения серии измерений данные с камеры сохранялись на компьютере, после чего импортировались в программу ActualFlow и обрабатывались. Для обработки использовался итерационный кросскорреляционный алгоритм расчёта полей скорости с разбиением расчётной области на ячейки размером 64×64 пикс. с пространственным перекрытием в 50%. (Масштабный коэффициент составил 0,222).

На рисунках 18-20 представлены результаты, полученные с использованием высокоскоростной камеры. Мгновенные распределения скорости (см. рисунок 19) демонстрируют сложную нестационарную структуру потока в турбулентном факеле.

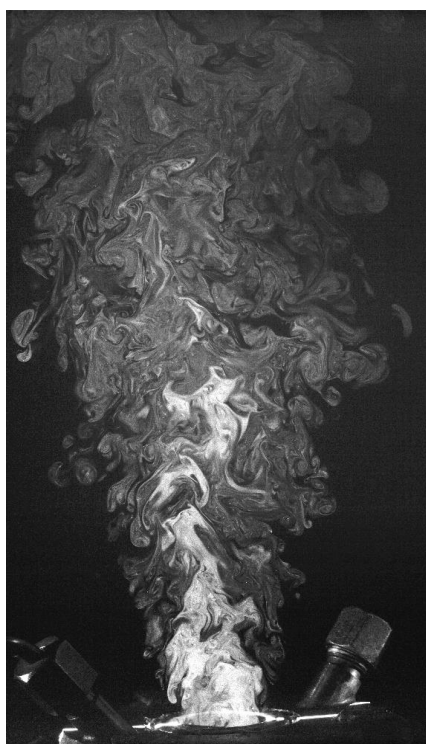


Рисунок 18. PIV-фотография потока.

В отсутствие закрутки потока осредненная во времени структура течения близка к осесимметричной, и измерение двух компонент скорости (радиальной и

аксиальной) с помощью 2D PIV-системы обеспечивает достаточно полную информацию о поле скорости.

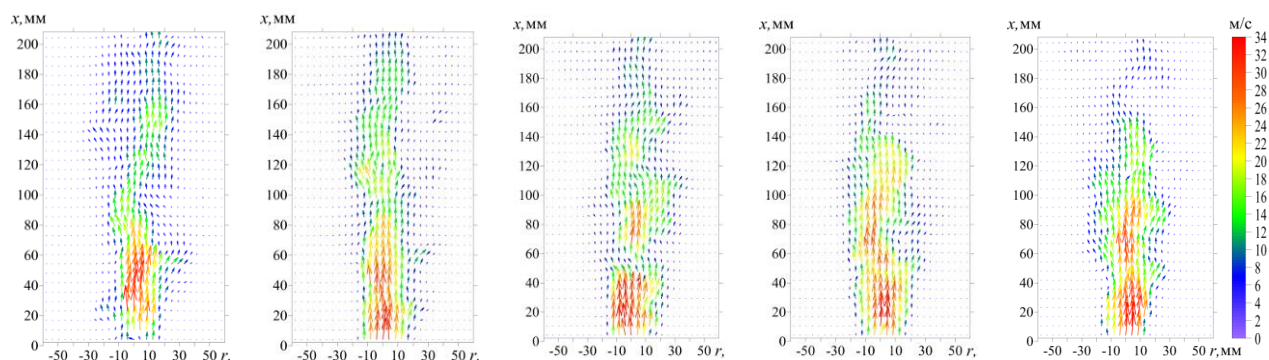


Рисунок 19. Мгновенные поля скорости в плоскости оси горелочного устройства в последовательные моменты времени с интервалом 70 мс (цветовая шкала обозначает модуль средней скорости).

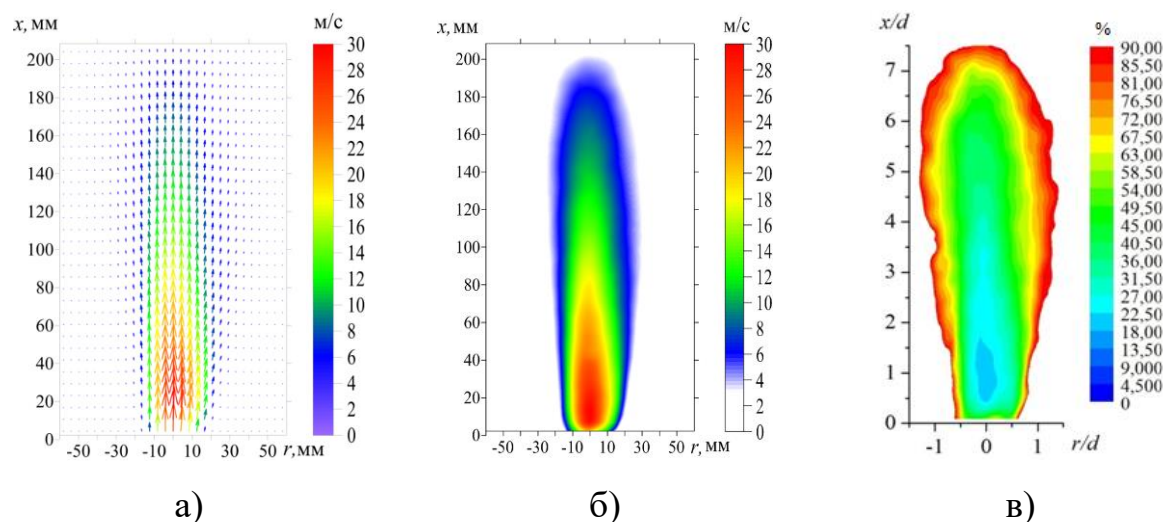


Рисунок 20. Векторное поле средней по времени скорости потока (а); распределение аксиальной компоненты средней скорости (б); распределение пульсаций скорости в факеле – относительное среднеквадратичное отклонение аксиальной компоненты скорости (в), $d = 26$ мм – диаметр выходного отверстия горелки.

На рисунке 20-а представлен характерный результат измерения распределения средней по времени (500 реализаций) скорости потока в плоскости

симметрии факела (r – радиус). На рисунке 20-б приведено распределение аксиальной компоненты скорости. Видно, что в отличие от химически инертной затопленной струи, зависимость аксиальной компоненты средней скорости от продольной координаты x оказывается немонотонной: ее значение достигает максимума (~ 30 м/с) на оси факела на некотором расстоянии от среза горелки. На рисунке 20-в представлено распределение относительного среднеквадратического отклонения аксиальной компоненты скорости. Наиболее сильные относительные пульсации скорости наблюдаются на периферии факела, где они достигают уровня средней скорости потока.

3.1.2. Температура факела

При проведении термопарных и тепловизионных измерений распределения температуры в факеле горелочного устройства видимая высота пульсирующего факела составляла 18–20 см [158]. С учетом того, что время непрерывной работы автономного горелочного устройства составляет до 50 мин, суммарное время измерений было ограничено. Поэтому пространственный шаг сетки задавался по горизонтали 5 мм, по вертикали 10 мм; размер измерительной области 25×200 мм, и с учетом симметрии измерения проводились только в половине продольного сечения факела. Время перемещения КПУ при таком плане составляло около 3 с; предварительно подобранная необходимая задержка (при перемещении из одной точки в другую) на нагрев или остывание термопары задавалась равной 7 с; время измерения в точке составляло 10 с; частота измерений 200 Гц.

Результаты термопарных измерений (см. рисунки 21, 22) показывают, что область максимальной температуры ($\sim 1500^\circ\text{C}$) находится на расстоянии около 0,1 м от среза горелки. Вблизи выхода из горелки «сглаженные» изотермы имеют сходящуюся форму (см. рисунок 21-б), характерную для диффузионного режима горения. Это свидетельствует о том, что выходящий из горелки поток содержит значительное количество непрореагировавших горючих компонентов, которые сгорают во внешнем факеле по мере перемешивания с окружающим воздухом. За

счет этого температура потока возрастает на 500 градусов. Динамика температуры в факеле означает также, что процессы внутри горелочного устройства протекают в условиях недостатка окислителя. Более тёмная область вблизи среза горелки на фотографии факела (см. рисунок 22-б) соответствует выходящему потоку, горение в котором активизируется только после поступления окислителя из атмосферы.

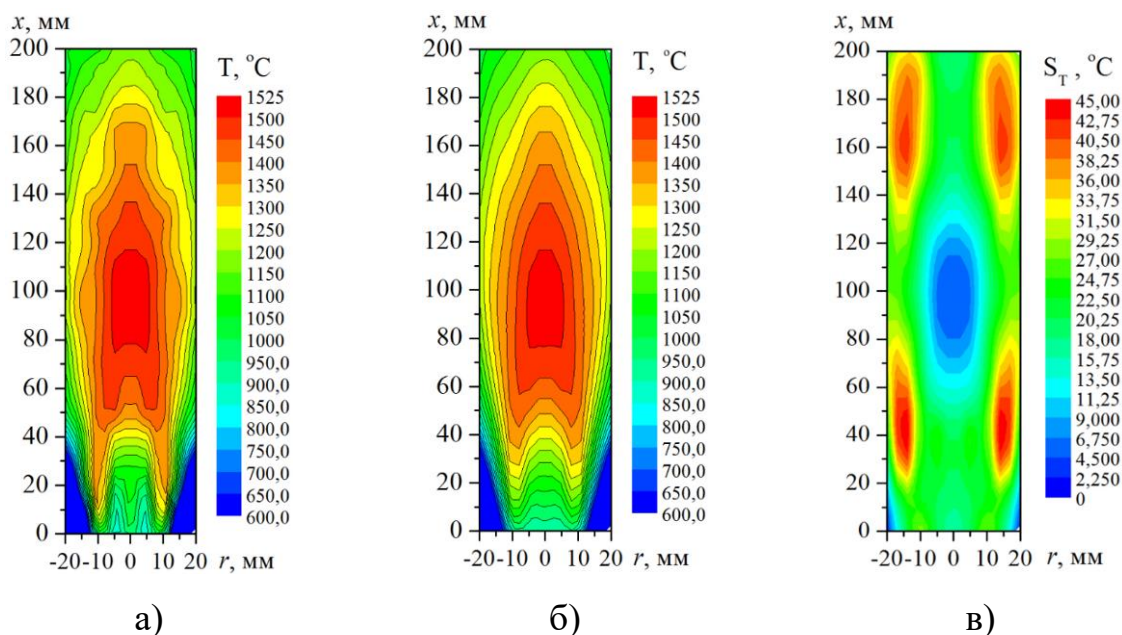


Рисунок 21. Распределения: средней во времени температуры в факеле (а); распределение средней во времени температуры в факеле со «сглаживанием» (б); среднеквадратического отклонения температуры (в).

Рисунок 22 позволяет непосредственно сопоставить распределения температуры и скорости в факеле. Распределение среднеквадратического отклонения температуры, показанное на рисунке 21-в, имеет максимумы на периферии факела, где также наблюдаются наиболее сильные относительные пульсации скорости (см. рисунок 20-в), в том числе вследствие неустойчивости сдвигового течения на границе струи и интенсивного перемешивания продуктов сгорания с окружающим воздухом.

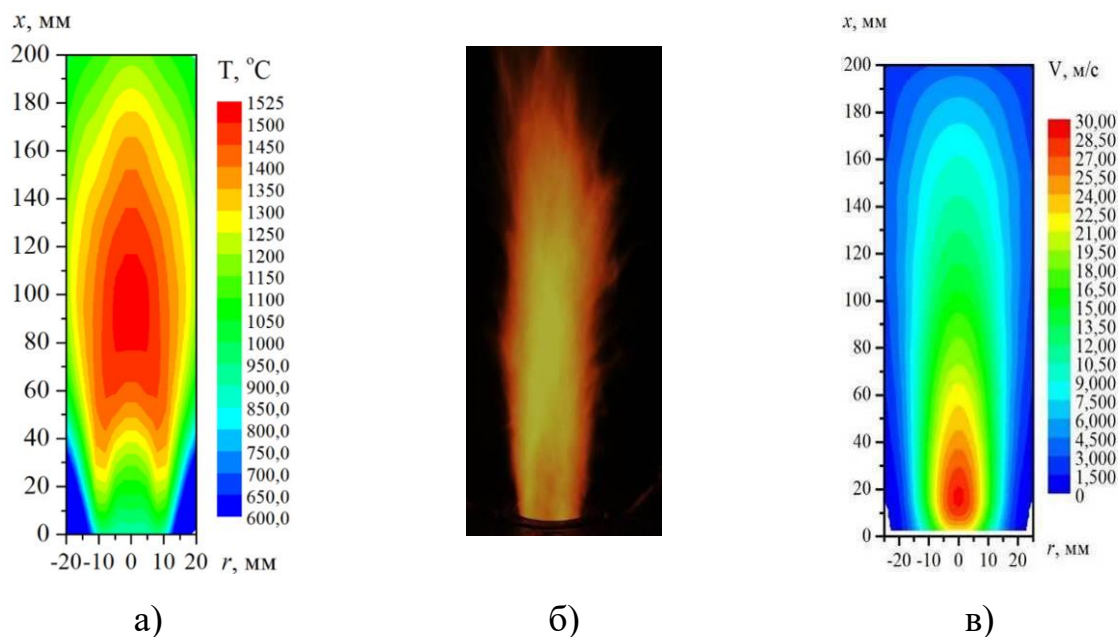


Рисунок 22. Распределение средней во времени температуры в факеле (а);
фотография факела (б); аксиальная компонента средней скорости (в).

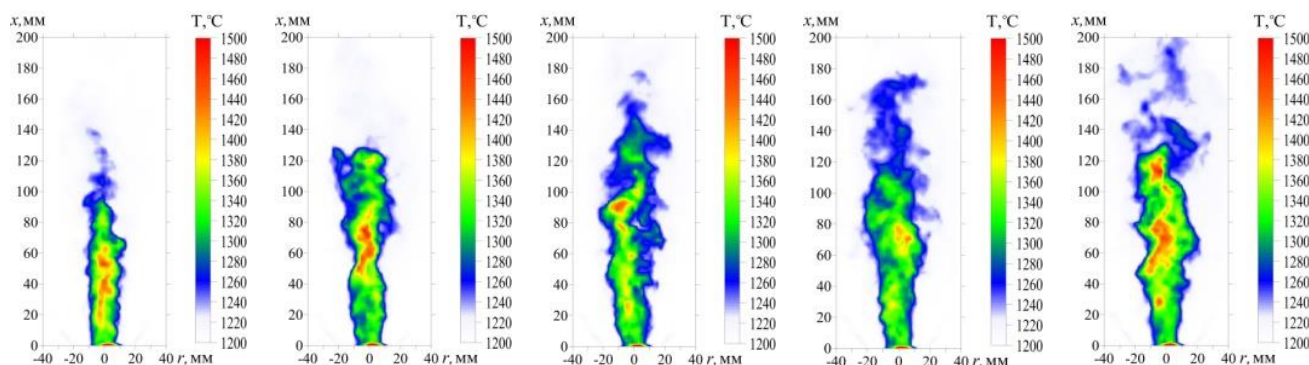


Рисунок 23. Мгновенные поля температуры в последовательные
моменты времени с интервалом 5,6 мкс.

В отличие от распределения скорости на срезе горелки с максимумом на оси потока (см. рисунок 20-а,б), зависимость температуры от радиуса на выходе из камеры сгорания является немонотонной (см. рисунок 21-а): коаксиальные зоны с температурой около 1000°C находятся в центральной части потока и вблизи границ горловины, а между этими горячими зонами поток имеет температуру на

100–200 градусов ниже. Немонотонность распределения температуры в радиальном направлении сохраняется вниз по потоку до расстояния ~60 мм от среза горелки. Такое распределение температуры, по-видимому, является следствием неоднородного по радиусу химического состава потока в цилиндрической камере сгорания и формирования в нем коаксиальных зон, различающихся по химическим процессам.

При измерении температуры внешнего факела автономного горелочного устройства тепловизором съемка выполнялась при максимальном допустимом разрешении кадра 320x240 пикс. при частоте 177 Гц. Время выдержки кадра составляло 64 мкс. Эффективный коэффициент излучения был равен 0,2. Обработка полученных термограмм производилась в специализированной программе Altair. Мгновенные поля температуры в турбулентном факеле представлены на рисунке 23, они качественно согласуются с PIV-картинами, представленными на рисунке 19, и демонстрируют сложную нестационарную структуру турбулентного факела.

3.1.3. Тепловыделение

Для определения тепловыделения в проточном калориметре измерения расхода и температуры теплоносителя проводились в течение ~ 30 мин после установления стационарного теплового режима. Сбор данных осуществлялся с частотой 5 Гц [165]. Скорость и температура выходящих из калориметра газов составляли 1,3 м/с, 25,9°C, соответственно. Давление в калориметре 1 атм, средний объемный расход теплоносителя $\bar{G} \approx 282$ л/ч.

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

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

где $Q_i = \tau G_i \rho_i \int_{T_a}^{T_i} c(T) dT$, индекс $i = 1, 2$ указывает параметры на входе и на выходе калориметра, соответственно; $G, \rho(T), c(T)$ – объемный расход ($\text{м}^3/\text{с}$), плотность ($\text{кг}/\text{м}^3$) и удельная теплоемкость теплоносителя ($\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$); T – температура ($^\circ\text{C}$); $T_a = 22,7 \text{ } ^\circ\text{C}$ – температура окружающей среды; 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 $\tau N = 1500 \text{ с}$.

Поскольку до начала калориметрических измерений вода в бачке-испарителе была нагрета до температуры кипения при повышенном давлении, то из полученного значения Q следует отнять количество тепла, запасенного водой, поступающей в зону реакции $Q^+ = \tau N c \Delta T F$, здесь F – средний массовый расход подаваемого водяного пара, ΔT – отличие температуры кипения воды в бачке-испарителе от T_a (для условий эксперимента $Q^+/Q \approx 0,8\%$). В итоге определялись тепловая мощность $W = (Q - Q^+)/\tau N$ и удельное количество тепла, полученного от продуктов сгорания 1 кг топлива $q = W/F_f$.

На рисунке 24 представлена характерная временная зависимость тепловой энергии, переносимой теплоносителем за интервал времени τ между последовательными измерениями, на входе (Q_1) и на выходе (Q_2) калориметра. Средняя скорость потока теплоносителя $\sim 1,6 \text{ см}/\text{с}$, т.е. теплоноситель находится в калориметре в течение 12,5 мин, что соответствует характерному времени тепловой релаксации калориметра на графике $Q_2(t)$ (см. рисунок 24). Видно, что флуктуации Q_2 существенно возрастают в период ввода тепла в калориметр (среднеквадратическое отклонение составляет $\sim 80 \text{ Дж}$). Нестационарность факела не влияет на эти флуктуации: анализ спектра пульсаций факела, регистрируемых с помощью анализатора шума (Bruel&Kjaer, диапазон давления до 103,5 кПа, частота измерений 4–20000 Гц, чувствительность 54,9 мВ/Па), выявил

характерную частоту ~ 100 Гц (см. рисунок 25), которая намного выше частоты измерения параметров теплоносителя и характерной частоты флуктуаций $Q_2(t)$.

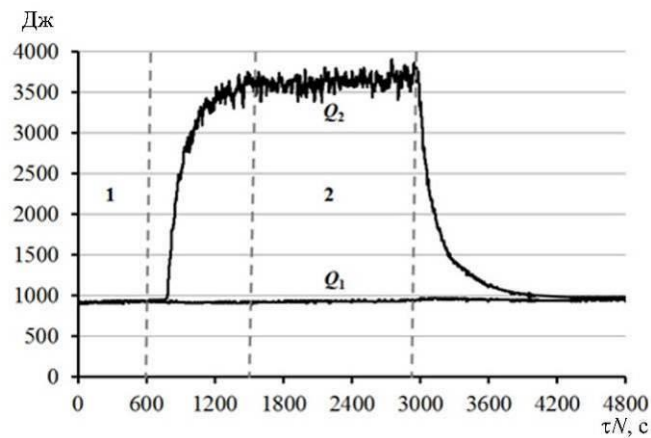


Рисунок 24. Характерная временная зависимость тепловой энергии, переносимой теплоносителем за интервал времени между последовательными измерениями $\tau=0,2$ с, на входе (Q_1) и на выходе (Q_2) калориметра: 1 – период до ввода факела в калориметр; 2 – период определения q при стационарном тепловом режиме в калориметре.

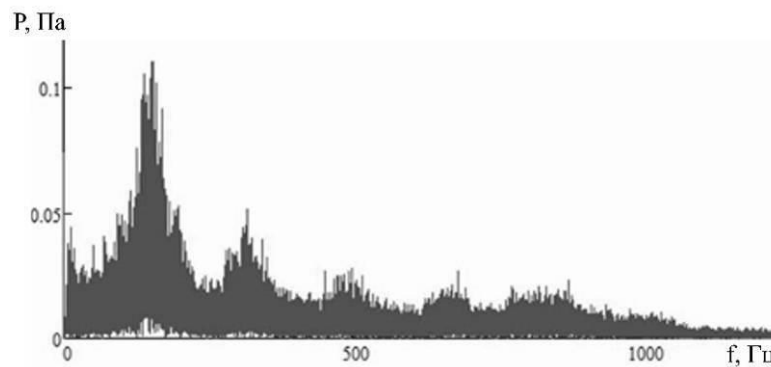


Рисунок 25. Характерный спектр пульсаций давления в факеле.

Указанные отклонения $(Q_2)_n$ от среднего значения не являются следствием случайной погрешности измерений. Характерный период этих колебаний составляет $\sim 5-10$ с. Их основной причиной служит нестационарный (хаотический) характер переноса тепла в условиях конвективной неустойчивости

неоднородно нагретого потока теплоносителя в канале сложной формы. Без ввода тепла в калориметр среднеквадратическое отклонение от среднего значения Q_2 понижается до уровня ~ 10 Дж (при этом спектр колебаний близок к однородному). Эти незначительные флуктуации связаны с возможными случайными изменениями параметров потока теплоносителя, а также с совокупной случайной погрешностью контрольно-измерительных приборов. Тем самым, относительная случайная погрешность определения разности $[Q_2 - Q_1]$ не превышает $\pm 0,6 \%$: $[Q_2 - Q_1]_n = (1570 \pm 10)$ Дж. При подготовке к проведению экспериментов были предприняты необходимые меры для исключения возможной систематической инструментальной погрешности (тарировка термопары, расходомера). Основная погрешность $\sim 2 \%$ может быть связана с дискретностью импульсов прибора, регистрирующего расход теплоносителя. Можно сделать вывод, что в целом используемая методика обеспечивает определение значений тепловыделения в расчете на 1 кг топлива (q) и тепловой мощности (W) с относительной погрешностью в пределах $\pm 2,6 \%$.

В итоге получим значения для q и W : $43,6 \pm 1,1$ МДж на 1 кг сгорающего дизельного топлива и $7,9 \pm 0,2$ кВт. С учетом потерь $\sim 1\%$ тепла (согласно оценке, приведенной в разделе 2.2.3) полученное значение в пределах погрешности соответствует высшей теплотворной способности дизельного топлива, что свидетельствует о высокой полноте сгорания топлива в исследуемом режиме.

Для сравнения эффективности работы автономного горелочного устройства, также было проведено исследование тепловыделения и газового состава горения дизельного топлива при подаче воздуха, вместо пара. Для этого к заливной горловине бачка-испарителя горелочного устройства была подключена система подачи сжатого воздуха. Сравнение показателей в режимах горения с подачей пара и воздуха производилось при сопоставимых значениях W (с учетом погрешности). При этом давление в бачке-испарителе с воздухом составило 0,5 МПа. Уменьшение расхода воздуха приводило к существенному недожогу

топлива (продукты содержали значительное количество сажи), а при повышении расхода воздуха горение становилось нестабильным (вероятная причина — понижение температуры в канале горелочного устройства). Для данных условий расход воздуха составил 0,33 кг/ч. Полученные значения q и W при работе горелочного устройства в таком режиме составили: $41,4 \pm 1,1$ МДж на 1 кг сгорающего дизельного топлива и $7,5 \pm 0,2$ кВт.

3.1.4. Состав уходящих газов

Анализ состава уходящих газов при сжигании дизельного топлива осуществлялся совместно с калориметрическими измерениями [165], поэтому условия проведения экспериментов аналогичны. По полученным на газоанализаторе данным производился перерасчет содержания вредных веществ из их относительного объема в продуктах сгорания в массу, производимую при сгорании 1 кг топлива по формуле (5) (см. п. 2.2.4).

Результаты измерений и расчетов приведены в таблице 2 для режимов сжигания дизельного топлива с подачей в зону реакции струи перегретого водяного пара и воздушной струи.

Обозначения в таблице 2: γ — относительный массовый расход подаваемого водяного пара или сжатого воздуха ($\gamma = F / F_f$, F — средний массовый расход подаваемого водяного пара или сжатого воздуха), F_f — средний массовый расход топлива, q — количество тепла, полученного от продуктов сгорания в калориметре в расчете на 1 кг топлива, W — средняя тепловая мощность, G_{fg} — средний объемный расход газообразных продуктов сгорания.

Таблица 2. Результаты калориметрических измерений и газового анализа.

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	

Результаты газового анализа показали, что содержание токсичных компонентов (CO и NO_x) в уходящих газах значительно ниже уровня предельно допустимых концентраций. Примечательно, что при сжигании дизельного топлива в режиме со струей воздуха количество оксида азота, содержащегося в продуктах сгорания, на 20–30 % превышает данный показатель в режиме с подачей пара (для одинаковой массы сгорающего топлива). Вероятно, характерные для разных режимов особенности неоднородного пространственного распределения температуры смеси и концентрации кислорода в канале горелочного устройства могут быть причиной существенного различия скоростей образования оксидов азота. Более значительным является различие исследуемых режимов по содержанию CO в уходящих газах: в режиме сжигания топлива с паровой струей количество CO на 1 кг топлива оказывается в 2,5 раза ниже. Возможное объяснение этого эффекта связано с тем, что подача пара обеспечивает в канале горелочного устройства более высокое содержание кислорода, находящегося в недостатке, что ускоряет доокисление CO (по сравнению с режимом с воздушной струей). Более полное обоснование причин пониженного содержания токсичных продуктов сгорания в режиме с паровой струей требует детального анализа на основе математического моделирования совокупности физико-химических процессов.

3.2. ГОРЕНИЕ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ГОРЕЛОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ С ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА

3.2.1. Горение дизельного топлива

Изучение горения дизельного топлива и отработанного машинного масла в лабораторном образце горелочного устройства с принудительной подачей перегретого водяного пара проводилось при различных режимных параметрах: относительный массовый расход пара $\gamma = F / F_f$ изменялся от 0,3 до 1,5 при фиксированном среднем значении $F_f = 0,8$ кг/ч для дизельного топлива [164] и $F_f = 0,7$ кг/ч для отработанного машинного масла [163] (отклонения от заданных средних значений расходов – в пределах ± 5 % для пара и $\pm 2,5$ % для топлива). Для каждого значения параметра γ варьировалась температура перегретого пара в диапазоне 150–550 °С с шагом около 100 °С. Давление пара в зависимости от значений γ и T_s составляло от 0,15 до 0,9 МПа, перегрев пара $T_s - T_b$ достигал 400 °С. Режимные параметры приведены в Таблице 3.

Таблица 3. Значения режимных параметров
при исследовании горения дизельного топлива ($F_f = 0.8$ кг/ч).

γ	T_s , °С	P , кПа	$T_s - T_b$, °С
0,3	170	150	59
	261	165	146
	355	164	240
	440	193	319
	548	200	425
0,5	151	188	31
	250	288	115
	354	354	214
	451	302	314

	552	321	414
0,8	157	391	15
	259	391	117
	357	416	213
	454	449	309
	554	460	408
1,0	156	503	9
	261	527	112
	349	576	198
	448	594	296
	552	618	399
1,3	175	600	23
	268	630	114
	366	652	210
	454	695	296
	563	710	403
1,5	155	786	–10
	271	836	102
	377	894	203
	452	890	279
	561	912	386

Фотографии внешнего факела для различных режимов работы устройства (при одинаковой температуре пара $T_s = (260 \pm 10)^\circ\text{C}$ и различных значениях F) при сжигании дизельного топлива приведены на рисунке 26-а. На рис. 26-б представлена карта режимов, построенная по результатам измерений. Показано, что в диапазоне температуры пара 150–550 °С при $0,3 < \gamma < 1,5$ наблюдается режим интенсивного устойчивого горения (область II на рисунке 26-б).

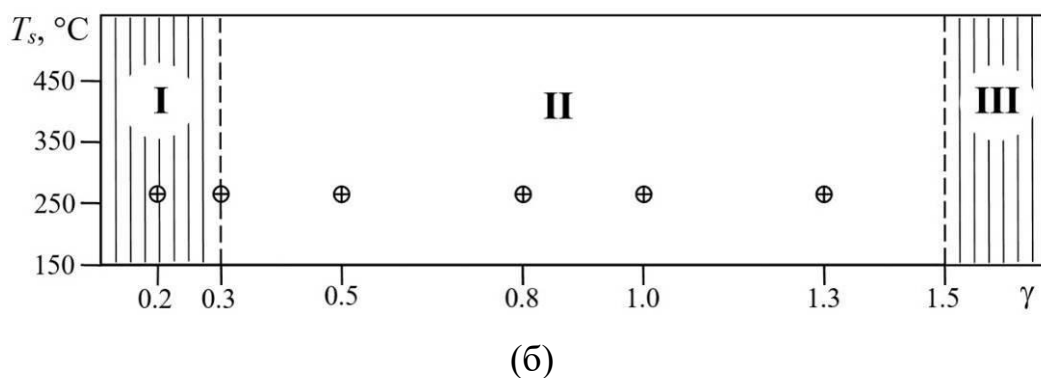
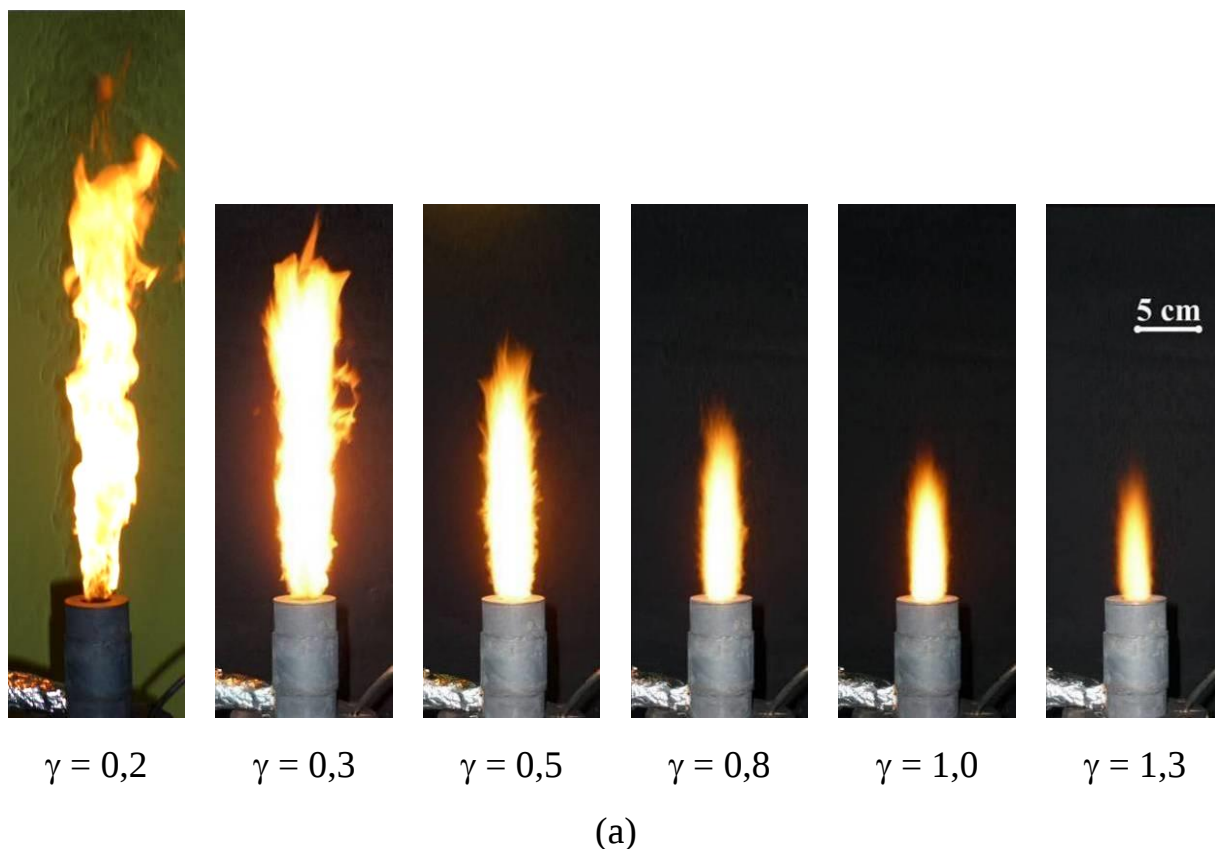


Рисунок 26. Фотографии факела при сжигании дизельного топлива при разном расходе пара (а) и карта режимов (б). Символами $\oplus$ отмечены режимы, соответствующие фотографиям пламени при разном относительном расходе пара (γ) при $T_s = (260 \pm 10)^\circ\text{C}$, $F_f = 0,8$ кг/ч. Режимы горения: I – пламя с высоким содержанием сажи; II – устойчивое горение; III – срыв пламени.

При $\gamma < 0,3$ формируется пламя с высоким содержанием сажи, топливо сгорает не полностью (область I на рисунке 26-б), а при $\gamma > 1,5$ наблюдается нестабильность воспламенения топлива, – повышение расхода пара приводит к

срыву горения (область III на рисунке 26-б). При температуре пара ниже 150°C пар не был перегретым, струя пара содержала капли, и воспламенение было нестабильным. Режимы при $T_s > 550$ °C не исследовались, поскольку оборудование не рассчитано на такие параметры пара.

Факел имеет ярко-желтый цвет, его длина L (характерный продольный размер светящейся зоны) в каждом режиме измерялась визуально по серии фотографий в последовательные моменты времени. Средняя по времени длина факела изменяется от 0,27 до 0,1 м при увеличении γ от 0,3 до 1,3 (см. рисунок 27). С ростом температуры пара при фиксированном значении γ длина факела уменьшается и стремится к постоянному значению. Данные для случая $\gamma = 0,5$, представленные на рисунке 27, показывают, что при $T_s > 350$ °C длина факела не зависит от температуры пара и приблизительно равна 160 мм.

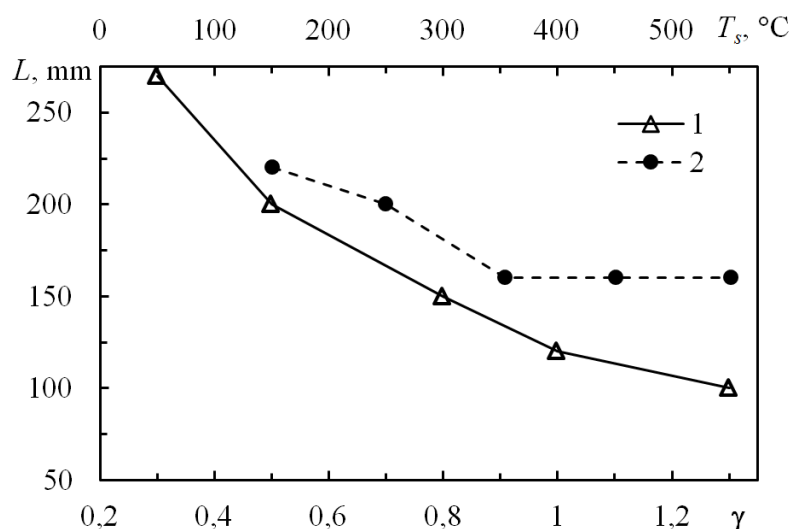


Рисунок 27. Характерная длина внешнего факела горелки в зависимости от γ и T_s :

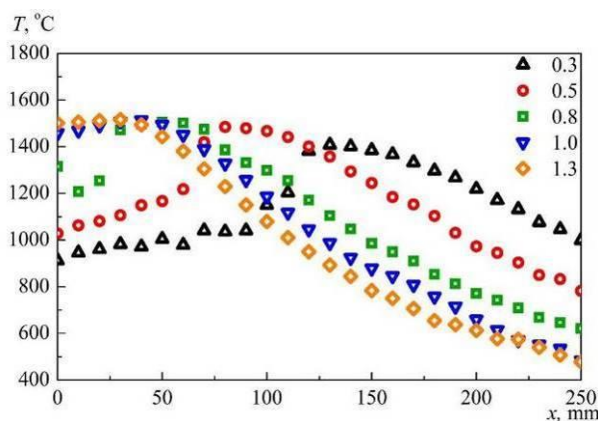
1 — $L(\gamma)$ при $T_s = (260 \pm 10)$ °C; 2 — $L(T_s)$ при $\gamma = 0,5$.

Температура факела

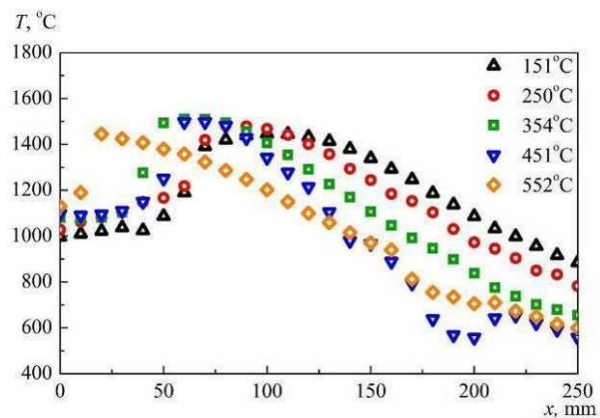
Термопарные измерения температуры в факеле горелочного устройства проводились вдоль оси симметрии факела до 250 мм (предел перемещения КПУ по вертикали) с пространственным шагом 10 мм [164]. Время перемещения КПУ

в таком случае составляло около 3 с; предварительно подобранная необходимая задержка (при перемещении из одной точки в другую) на нагрев или остывание термопары задавалась равной 7 с; время измерения в точке составляло 10 с; частота измерений 100 Гц.

Результаты термопарных измерений представлены на рисунке 28 (распределения температуры внешнего факела вдоль оси горелки при различных значениях T_s и γ). Анализ результатов показывает, что максимальное значение температуры достигает 1500°C (в режиме с высоким расходом пара, $\gamma = 1,3$) и понижается до 1400°C с уменьшением γ до 0,3 (рисунок 28-а). По мере увеличения γ и уменьшения длины факела область с максимальной температурой приближается к срезу горелки (рисунок 28-а). По сравнению с расходом, температура пара слабее влияет на распределение температуры в факеле (рисунок 28-б) и на длину факела (рисунок 27) (граница светящейся зоны для исследуемых режимов соответствует средней температуре $\sim 980^\circ\text{C}$).



(а)



(б)

Рисунок 28. Распределение средней во времени температуры во внешнем факеле вдоль вертикальной оси горелки: (а) при различном относительном расходе перегретого водяного пара, $T_s = (250 \pm 10)^\circ\text{C}$; (б) при различной температуре перегретого водяного пара, $\gamma = 0,5$.

При тепловизионных измерениях температуры внешнего факела горелочного устройства с принудительной подачей перегретого водяного пара съемка выполнялась при максимальном допустимом разрешении кадра 320x240 пикс. при частоте 100 Гц. Время выдержки кадра составляло 64 мкс. Обработка полученных термограмм производилась в специализированной программе Altair.

На рисунке 29 показаны поля средней по времени температуры во внешнем факеле горелочного устройства для различных расходов пара при $T_s = (250 \pm 10) \text{ C}$ [161]. Представленные термограммы демонстрируют существенное влияние расхода подаваемого пара на распределение температуры во внешнем факеле.

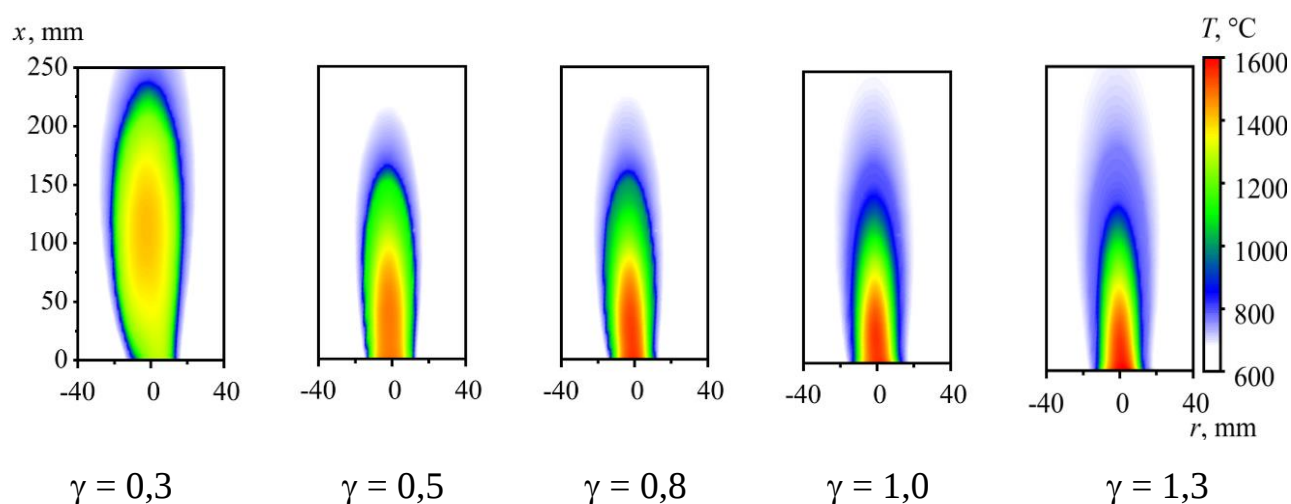


Рисунок 29. Термограммы факела для различных расходов пара (при постоянной температуре пара $T_s = (250 \pm 10) \text{ C}$).

Из рисунка 29 также видно, что максимальная температура в факеле увеличивается с ростом γ . При этом продольный размер светящейся зоны оказывается уменьшается (см. рисунок 27). Максимальная температура в факеле возрастает с увеличением температуры пара (рисунок 28). В режимах с высокими значениями параметра γ температуры факела монотонно понижается по мере удаления от среза горелки. При $\gamma \leq 1,0$ зависимость немонотонная, и максимум

температуры наблюдается на некотором расстоянии от среза горелки, что свидетельствует о неполном сгорании смеси до выхода в атмосферу.

Также была установлена зависимость коэффициента излучения пламени (ε) от расхода подаваемого пара (рисунок 30): значение ε уменьшается с увеличением параметра γ . Зависимость максимальной температуры факела ($T_{\max}$) от параметра γ также оказывается линейной, но $T_{\max}$ увеличивается с ростом γ .

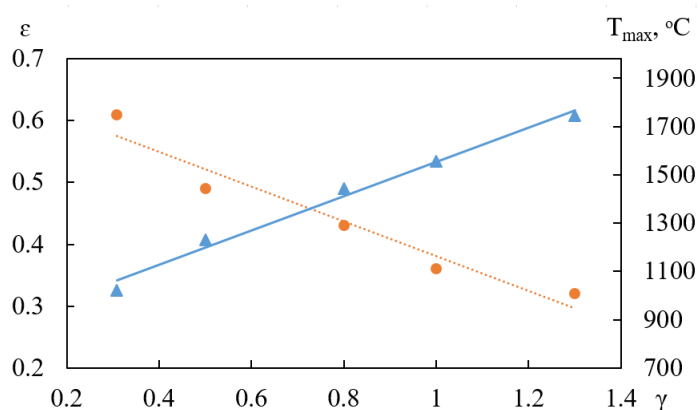


Рисунок 30. Зависимости эффективного коэффициента излучения пламени (●) и максимальной температуры (▲) во внешнем факеле от параметра γ ,
 $T_s = (250 \pm 10) \text{ C}$.

Термопарным методом измерено распределение температуры в факеле для режима горения дизельного топлива с подачей воздушной струи (вместо пара). Для этого к месту подачи пара горелочного устройства через электрический парогенератор вместо питательной воды была подключена система подачи сжатого воздуха. При этом температуре воздуха составляла $T_{\text{air}} = (250 \pm 10)^\circ\text{C}$. На рисунке 31 показаны распределения средней по времени температуры вдоль оси внешнего факела при различном расходе воздуха.

Видно, что, как и в случае с подачей перегретого пара, с увеличением расхода воздуха повышается температура факела и область с максимальной температурой смещается к срезу горелки, при этом длина факела уменьшается, максимальное значение температуры достигает 1600°C .

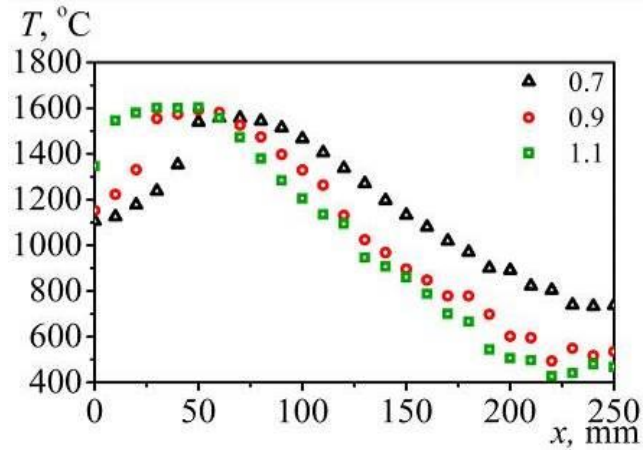


Рисунок 31. Распределение средней во времени температуры вдоль оси внешнего факела при горении дизельного топлива при различном относительном расходе воздуха γ ($T_{air} = 250^\circ\text{C}$).

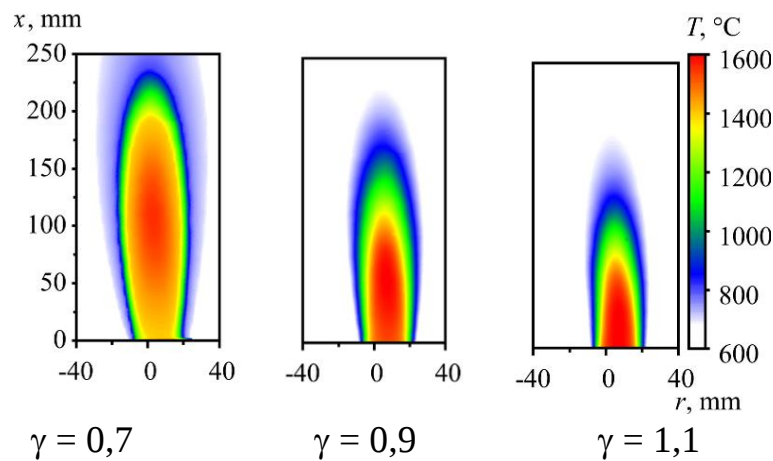


Рисунок 32. Термограммы факела для различных расходов воздуха (при постоянной температуре $T_{air} = (250 \pm 10)^\circ\text{C}$).

На рисунке 32 показаны поля средней по времени температуры во внешнем факеле горелочного устройства для различных расходов воздуха при $T_{air} = (250 \pm 10)^\circ\text{C}$ [162]. Как и термопарные измерения, термограммы демонстрируют существенное влияние расхода подаваемого воздуха на распределение температуры во внешнем факеле.

Тепловыделение

Определение тепловыделения и тепловой мощности при горении жидкого топлива в вертикальном прямоточном испарительном горелочном устройстве с регулируемой принудительной подачей в зону горения струи перегретого водяного пара – в методическом отношении аналогична исследованию, проведенному на автономном горелочном устройстве (см. п. 3.1.3), с тем дополнением, что в данном случае из Q вычиталась энергия пара Q_0 , полученная в парогенераторе и выделяемая затем при охлаждении и конденсации пара в калориметре [164]:

$$Q_0 = \tau N^* F \left(\int_{T_a}^{T_b} c(T) dT + \lambda + \int_{T_b}^{T_s} c_s(T) dT \right),$$

где c_s – удельная теплоёмкость пара (Дж/(кг °С)); F – массовый расход пара (кг/с); T_s – температура пара (°С); $T_b(P)$ – температура кипения воды (°С) в парогенераторе при давлении P (Па); $\lambda(T_b)$ – удельная теплота парообразования (Дж/кг). Отношение Q_0 / Q при различных режимах составляло от 2 до 10 %. Результаты калориметрических исследований при горении с подачей струи перегретого водяного пара представлены на рисунке 33 в форме зависимости удельного тепловыделения от относительного расхода пара (γ) и его температуры (T_s). На рисунке 34 представлены результаты исследования режима сжигания дизельного топлива в вертикальном прямоточном испарительном горелочном устройстве с регулируемой принудительной подачей в зону горения струи нагретого воздуха (вместо перегретого водяного пара).

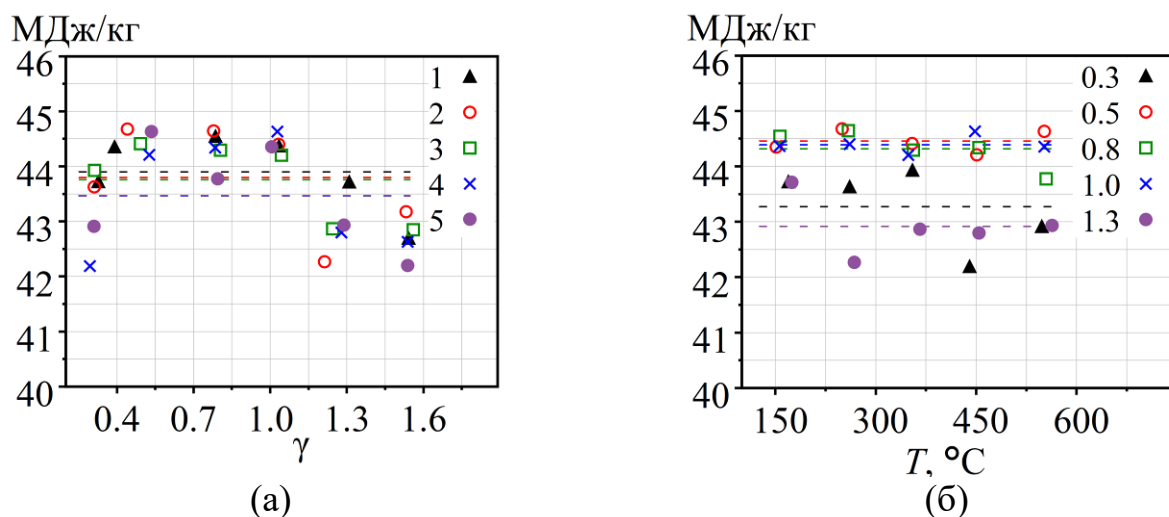


Рисунок 33. Удельное количество тепла, полученное в калориметре от продуктов сгорания в различных режимах горения топлива с подачей струи перегретого водяного пара: (а) в зависимости от γ при различных значениях T_s , 1 – $(163 \pm 12)^\circ\text{C}$, 2 – $(260 \pm 10)^\circ\text{C}$, 3 – $(363 \pm 14)^\circ\text{C}$, 4 – $(447 \pm 7)^\circ\text{C}$, 5 – $(556 \pm 8)^\circ\text{C}$; (б) в зависимости от T_s при заданном γ . Символы – экспериментальные данные. Пунктир: средние арифметические значения $q(\gamma)$ при фиксированном T_s (а); средние арифметические значения $q(T_s)$ при фиксированном γ (б).

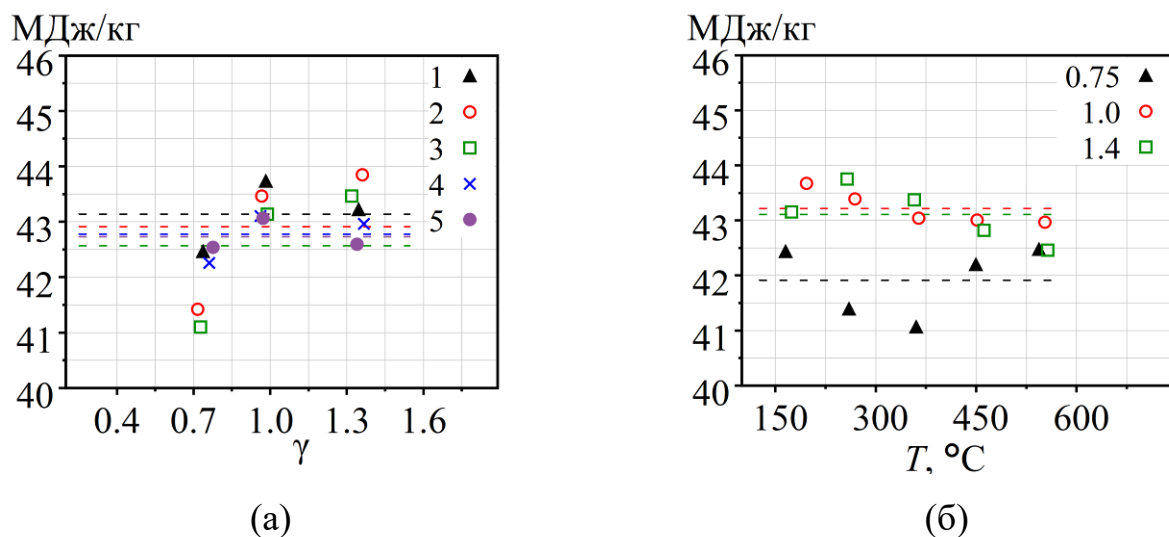


Рисунок 34. Удельное количество тепла, полученное в калориметре от продуктов сгорания при горении топлива с подачей струи нагретого воздуха (в различных режимах): (а) в зависимости от γ при различных значениях T_{air} , 1 – $(168 \pm 8)^\circ\text{C}$, 2 – $(262 \pm 7)^\circ\text{C}$, 3 – $(360 \pm 5)^\circ\text{C}$, 4 – $(454 \pm 7)^\circ\text{C}$, 5 – $(551 \pm 6)^\circ\text{C}$;

(б) в зависимости от T_{air} при заданном γ . Символы – экспериментальные данные.

Пунктир: средние арифметические значения $q(\gamma)$ при фиксированном T_s (а);

средние арифметические значения $q(T_s)$ при фиксированном γ (б).

Анализ полученных данных для режимов горения с подачей перегретого водяного пара и с подачей нагретого воздуха показывает, что в пределах погрешности q слабо зависит от γ (рисунки 33-а, 34-а), не зависит от температуры пара в парогенераторе (рисунок 33-б) или воздуха (рисунок 34-б) и имеет значение, близкое к высшей теплоте сгорания топлива (44,9 МДж/кг).

Состав продуктов сгорания

Как и в случае с автономным горелочным устройством, анализ состава уходящих газов осуществлялся совместно с калориметрическими измерениями [164].

На рисунке 35 представлены результаты измерений CO и NO_x в продуктах сгорания в зависимости от расхода пара. Для всех исследуемых режимов измеренное содержание токсичных компонентов CO и NO_x в уходящих газах не превышает 60 ppm (удовлетворяет действующим экологическим нормативам) (см. рисунок 35-а). При $\gamma < 0,5$ значения концентрации CO лежат ниже порога чувствительности прибора: CO < 2 ppm. Однако, при $\gamma > 0,8$, концентрация CO резко возрастает. Концентрация NO_x понижается от 60 до 20 ppm с увеличением γ от 0,3 до 1,5. Возможной причиной является изменение кинетики образования «термических» оксидов азота при высокой концентрации водяного пара в зоне реакции и недостатке воздуха. Также установлено, что в пределах погрешности измерений концентрация CO и NO_x не зависит от T_s . Тем самым, полученные данные позволяют организовывать режимы с низким содержанием этих токсичных продуктов сгорания. На рисунке 35-б представлены результаты газового анализа, пересчитанные в массу веществ на 1 кг топлива [г/кг].

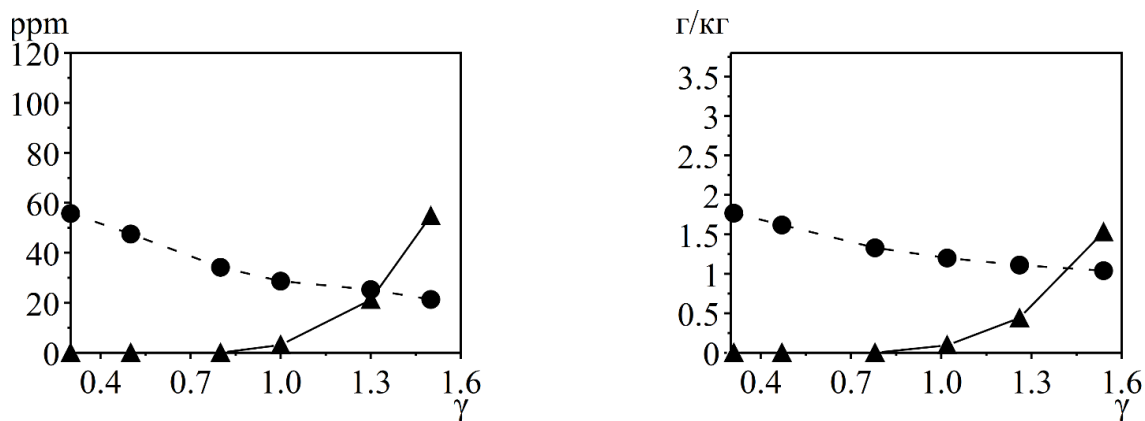


Рисунок 35. Показатели эмиссии CO (▲) и NO_x (●) в зависимости от отношения расходов пара и топлива при температуре пара $T_s = (260 \pm 10)^\circ\text{C}$:

- (а) объемная концентрация CO и NO_x в газообразных продуктах сгорания;
- (б) масса указанных веществ, образующихся при сгорании 1 кг горючего.

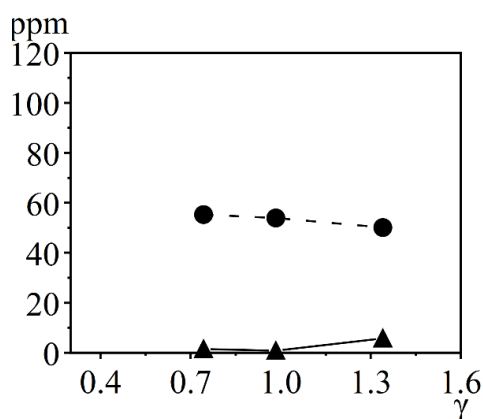


Рисунок 36. Концентрация CO (▲) и NO_x (●) в зависимости от отношения расходов нагретого воздуха и топлива при температуре воздуха $T_{air} = (262 \pm 7)^\circ\text{C}$.

На рисунке 36 представлены результаты измерений CO и NO_x в продуктах сгорания при подаче, вместо перегретого водяного пара, струи нагретого воздуха в зависимости от его расхода при фиксированной средней температуре подаваемого воздуха $T_{air} = (262 \pm 7)^\circ\text{C}$. Как в режиме горения с паром, во всем исследованном диапазоне относительное объемное содержание CO и NO_x в уходящих газах не превышает 60 ppm. При этом концентрация CO для всех измеренных режимов минимальна, концентрация NO_x изменяется незначительно.

Кроме того, видно, что значение концентраций токсичных компонентов при подаче водяного пара с $\gamma = 0,3$ совпадает со значениями при работе устройства с подачей струи нагретого воздуха, поэтому можно считать $\gamma = 0,3$ «предельным» режимом работы устройства, где достигается положительный эффект от использования паровой струи.

Оценка количества окислителя в камере сгорания

Для понимания условий, в которых протекают процессы в камере газогенерации при сжигании дизельного топлива в различных режимах (γ) подачи перегретого водяного пара, необходимо иметь данные о количестве кислорода воздуха. Чтобы оценить расход воздуха, свободно поступающего из окружающей среды в топку устройства через отверстия (воздуховоды), расположенные в нижней части горелочного устройства, измерена скорость воздуха непосредственно вблизи отверстия. Использовался термоанемометр Testo 425 (скорость потока до 20 м/с, погрешность 0,03 м/с + 5 % от измерения). Показания термоанемометра можно рассматривать как среднее по сечению значение скорости потока, поскольку диаметр отверстия сопоставим с размером чувствительного элемента прибора. По полученным значениям рассчитан суммарный расход воздуха, поступающего в топку устройства при различных значениях параметра γ , определяющего эжектирующий эффект (см. таблицу 4).

Таблица 4. Скорость и расход воздуха, поступающего в топку горелочного устройства из окружающей среды через отверстия в нижней части устройства, при различных значениях относительного расхода пара (γ).

γ	0,5	1,0	1,3
Измеренная средняя скорость потока воздуха, м/с	0,5±0,14	0,6±0,2	0,7±0,2
Рассчитанный расход воздуха, м ³ /ч	2,1±0,6	2,6±0,8	2,9±0,9

К кислороду, поступающему из окружающей среды, в камере газогенерации добавляется кислород в составе принудительно подаваемого воздуха или пара, а также кислород топлива. В таблице 5 приведены оценки суммарного массового расхода кислорода внутри горелочного устройства (принято, что при одном и том же значении γ расход воздуха через отверстия-воздуховоды в режиме горения с принудительной подачей воздуха приблизительно равен измеренному расходу воздуха, поступающему из атмосферы в режиме с подачей пара).

Таблица 5. Расход кислорода в горелочном устройстве при различных режимах горения и значение для стехиометрической смеси.

Массовый расход кислорода, необходимого для полного сгорания дизельного топлива при $F_f = 0,8$ кг/ч	2,7 кг/ч		
γ	0,5	1,0	1,3
Рассчитанный суммарный массовый расход кислорода в камере газогенерации с учетом принудительной подачи нагретого воздуха и кислорода в составе топлива, кг/ч	0,7	0,9	1,0
Рассчитанный суммарный массовый расход кислорода в камере газогенерации с учетом кислорода в составе подаваемого водяного пара и в составе топлива, кг/ч	0,9	1,4	1,7

Расход кислорода (2,7 кг/ч), соответствующий стехиометрической смеси, определен по известному массовому составу топлива, используемого в экспериментах (см. приложение В). Это значение не учитывает реакции с образованием оксидов азота и серы. В последней строке таблицы 5 учтен весь кислород, вносимый в горелку потоком пара, тем самым указанные значения следует расценивать как «теоретический предел», поскольку значительная часть кислорода может оставаться в составе молекул воды и радикалов ОН. Но даже эти завышенные значения соответствуют условиям горения с недостатком

окислителя. Оценки, полученные для режимов горения с принудительной подачей воздуха, тоже явно свидетельствуют о том, что процессы внутри горелочного устройства протекают в условиях недостатка окислителя: характерное количество кислорода составляет 25–40 % от уровня в стехиометрической смеси. Можно заключить, что значительная часть горючих компонентов должна выходить из горелочного устройства и, смешиваясь с воздухом, сгорать во внешнем факеле.

3.2.2. Горение отработанного масла

Изучение горения отработанного масла в лабораторном образце горелочного устройства с принудительной подачей перегретого водяного пара [163] проведено при фиксированном среднем расходе топлива $F_f = 0,7$ кг/ч с варьированием относительного массового расхода пара $\gamma = F / F_f$ в диапазоне от 0,3 до 1,5. Поскольку при исследовании режимов горения дизельного топлива было показано, что температура перегретого пара не оказывает заметного влияния на концентрацию СО и NO_x в продуктах сгорания, то эксперименты проведены при одном значении температуры пара $T_s = (257 \pm 4)^\circ\text{C}$ (давление от 0,25 до 0,9 МПа). Режимные параметры приведены в Таблице 6 ($F_f = 0,7$ кг/ч).

Таблица 6. Значения режимных параметров.

γ	$T_s, ^\circ\text{C}$	$P, \text{кПа}$	$T_s - T_b, ^\circ\text{C}$
0,3	256	238	125
0,5	259	430	114
0,8	259	608	105
1,0	260	754	95
1,5	251	865	77

Приведенные на рисунке 37 фотографии внешнего факела демонстрируют устойчивое горение отработанного масла в диапазоне режимов с $\gamma = 0,3 - 1,5$.

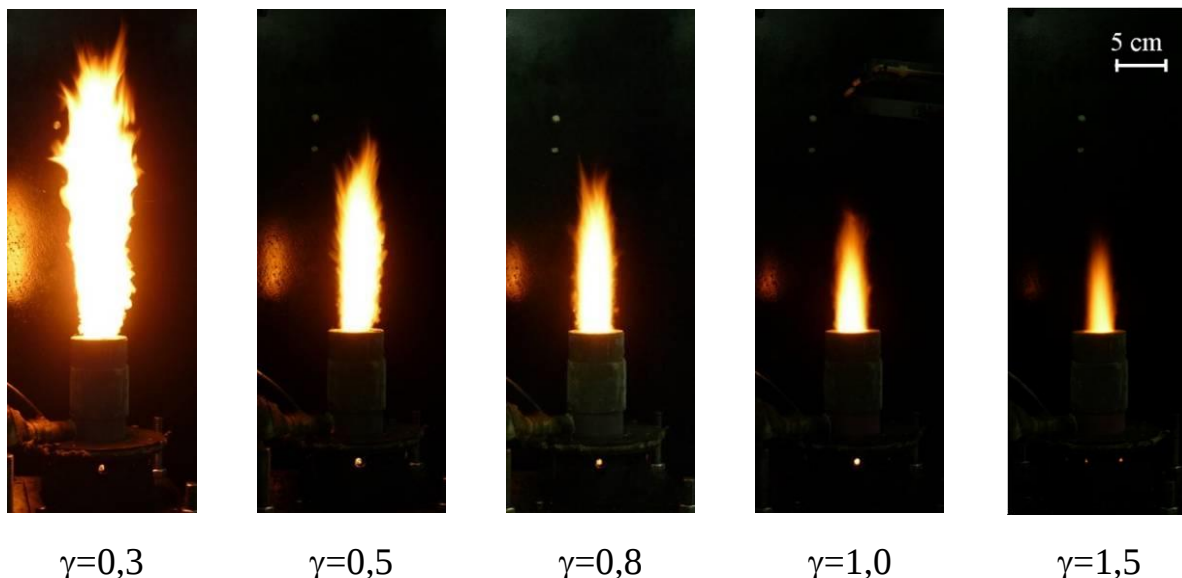
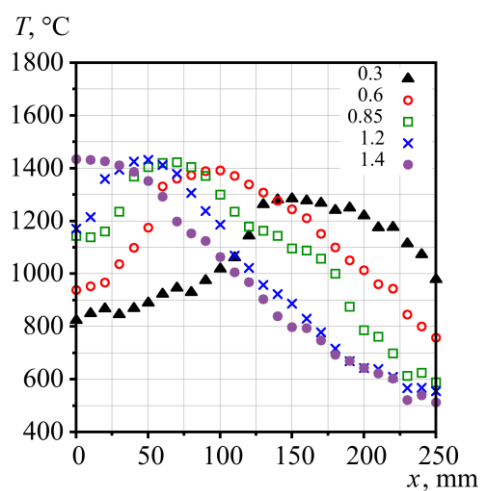


Рисунок 37. Горение отработанного масла в прямоточной испарительной горелке при различных расходах перегретого водяного пара, $T_s = (257 \pm 4)^\circ\text{C}$.

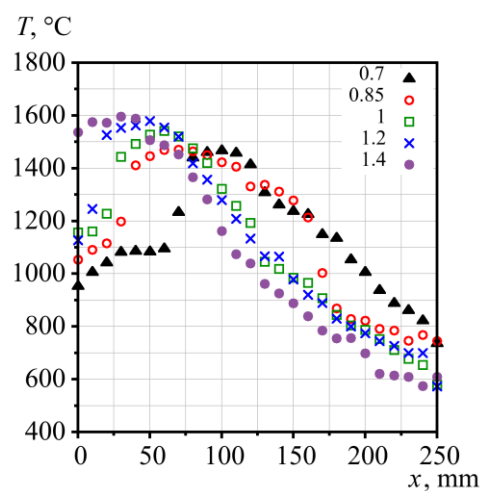
Средняя по времени длина факела изменяется от 0,3 до 0,1 м при увеличении γ от 0,3 до 1,5.

Температура факела, тепловыделение

Температура факела при горении отработанного масла измерялась с помощью платинородий-платинородиевой термопары [163]. Аналогично экспериментам, описанным выше, измерения проводились вдоль оси горелочного устройства от среза горелки до расстояния 250 мм (предел перемещения КПУ по вертикали) с пространственным шагом 10 мм. Результаты представлены на рисунке 38-а для режимов горения с подачей перегретого водяного пара и рисунке 38-б для режимов с подачей нагретого воздуха. Максимальная температура в факеле растет с увеличением γ и при $\gamma = 1,4$ достигает 1430°C в случае подачи пара и 1600°C при использовании воздуха. Видно, что по мере увеличения γ и уменьшения длины факела (см. рисунок 37) область максимальной температуры приближается к срезу горелки (как при подаче пара, так и воздуха).



(а)



(б)

Рисунок 38. Распределения средней во времени температуры во внешнем факеле вдоль вертикальной оси горелки при различных значениях γ :

(а) режимы с подачей перегретого водяного пара, $T_s = (257 \pm 4)^\circ\text{C}$;

(б) режимы с подачей нагретого воздуха, $T_{air} = (250 \pm 8)^\circ\text{C}$.

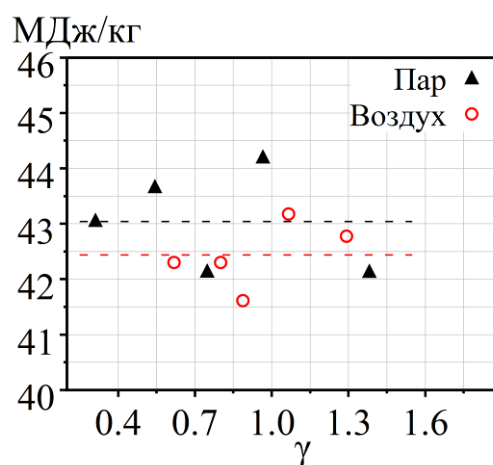


Рисунок 39. Удельное количество тепла, полученное в калориметре от продуктов сгорания отработанного масла в режимах с различными значениями γ :

▲ – с подачей струи перегретого водяного пара при $T_s = (257 \pm 4)^\circ\text{C}$;

○ – с подачей струи нагретого воздуха при $T_{air} = (254 \pm 5)^\circ\text{C}$.

Пунктир – средние арифметические значения.

Аналогично результатам исследования горения дизельного топлива, при сжигании отработанного масла данные, полученные на проточном калориметре с использованием методики, описанной в п. 3.2.3, показывают [163], что в пределах погрешности q не зависит от значения γ в диапазоне режимов устойчивого горения (см. рисунки 39) и имеет значение, близкое к высшей теплоте сгорания топлива (45,3 МДж/кг).

Состав продуктов сгорания

На рисунке 40-а приведены результаты измерений содержания CO и NO_x в продуктах сгорания отработанного масла в зависимости от относительного расхода пара γ [163]. С ростом γ от 0,3 до 1,5 объемная концентрация CO в дымовых газах увеличивается от низкого (< 2 ppm) уровня до 110 ppm, а концентрация NO_x убывает от 90 до 55 ppm. При заданном расходе горючего в режимах с $0,7 < \gamma < 1,0$ одновременно обеспечиваются низкие концентрации CO и NO_x при высокой тепловой мощности. На рисунке 40-б полученные данные представлены в виде массы этих токсичных компонентов, производимых при сгорании 1 кг горючего.

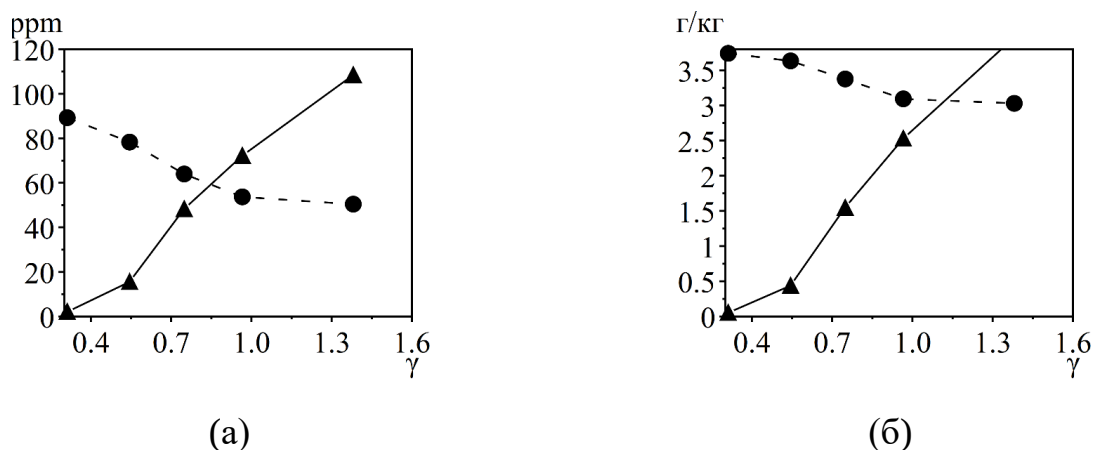


Рисунок 40. Показатели эмиссии CO (▲) и NO_x (●) в зависимости от отношения расходов пара и топлива при температуре пара $T_s = (257 \pm 4)^\circ\text{C}$:
(а) объемная доля; (б) масса на 1 кг сгоревшего топлива.

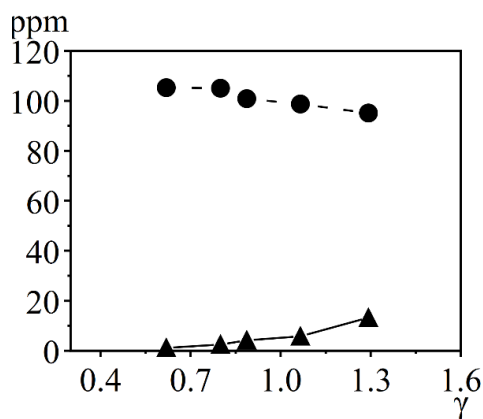


Рисунок 41. Объемная концентрация CO (▲) и NO_x (●) зависимости от отношения расходов нагретого воздуха и топлива, $T_{air} = (254 \pm 5)^\circ\text{C}$.

Результаты исследования газового состава продуктов сгорания при использовании струи воздуха (вместо струи перегретого водяного пара), нагретого до $T_{air} = (254 \pm 5)^\circ\text{C}$, представлены на рисунке 41. в зависимости от расхода воздуха при фиксированной средней температуре. Как и в случае сжигания дизельного топлива, Концентрация CO во всех исследованных режимах остается достаточно низкой, а концентрация NO_x слабо уменьшается с увеличением $\dot{\gamma}$ и составляет приблизительно 100 ppm.

Оценка количества окислителя в камере сгорания

Согласно данным о массовом составе отработанного масла, приведенным в Приложении В, для полного сгорания 0,7 кг топлива в час расход кислорода должен составлять приблизительно 2,3 кг/ч. Оценки суммарного расхода кислорода в исследованных режимах горения отработанного масла, проведенные аналогично представленным выше расчетам для горения дизельного топлива, свидетельствуют о том, что процессы в горелочном устройстве протекают в условиях недостатка кислорода (коэффициент избытка окислителя в режимах с принудительной подачей воздуха составляет 0,3–0,45).

3.3. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Комплексное экспериментальное исследование влияния водяного пара на горение жидких углеводородов проведено с использованием оригинальных прямоточных горелочных устройств испарительного типа (мощностью до 10 кВт), конструкции которых предусматривают подачу в зону реакции струи перегретого водяного пара. Горелочные устройства в основном различаются способом генерации потока пара. «Автономное» горелочное устройство включает бачок-испаритель, паросепаратор и пароперегреватель, производство перегретого пара происходит непосредственно за счет тепла, выделяющегося при горении. В установившемся режиме работы такого устройства расход и перегрев пара зависят только от вида и расхода топлива, т.е. возможность регулирования параметров потока пара отсутствует. Автономное горелочное устройство использовалось для изучения горения дизельного топлива, как в режиме подачи пара, так и в режиме, когда вместо пара через форсунку подается нагретый воздух с регулируемым расходом. На основе конструкции используемого в работе автономного горелочного устройства (имеющего ограниченный ресурс – до 1 часа) разработаны новые технические решения и созданы: автономное горелочное устройство длительного действия (до 6 часов), пусковое горелочное устройство (быстро выходящее на рабочий режим с формированием факела, направленного вниз), на которые получены патенты.

С целью исследования влияния расхода и температуры потока пара на показатели горения использовалось горелочное устройство, оснащенное разработанным электрическим парогенератором (на который получен патент). Оно позволило исследовать зависимость температуры и скорости потока в факеле, тепловой мощности и состава продуктов сгорания от параметров потока пара при различном расходе горючего. Исследования проведены для дизельного топлива и для отработанного машинного масла в различных режимах с регулируемой принудительной подачей перегретого пара или нагретого воздуха.

Методики измерений, применяемые в экспериментах на обоих указанных типах горелочных устройств, были одинаковы. Для заданных режимных параметров (расход топлива, расход и температура подаваемого пара или воздуха) в установившемся режиме горения измеряются:

- поле осредненной по времени скорости и температуры, распределение пульсаций скорости и температуры во внешнем факеле горелочного устройства;
- мощность тепловыделения;
- состав газофазных продуктов сгорания, охлажденных до комнатной температуры.

Используются: высокопроизводительный панорамный метод измерения скорости – цифровая трассерная визуализация (PIV) структуры турбулентного потока, термопарный метод измерения распределения осредненной температуры и инфракрасная термография нестационарного факела, проточный калориметр, газоаналитическое оборудование, регистратор акустических колебаний и др. Измерительные методики адаптированы к измерениям в высокотемпературных газовых потоках. В частности, применены специальные оптические фильтры, проведена калибровка, определен эффективный коэффициент излучения пламени, учтены радиационные тепловые потери, решена проблема засева потока трассерами (с использованием силиконового масла, добавляемого в горючее). Проведена компьютерная обработка экспериментальных данных, полученных на автоматизированном огневом стенде. Оценены погрешности измерений.

Полученные результаты позволили проанализировать зависимости основных характеристик исследуемых процессов горения от режимных параметров, определив:

- условия режима устойчивого интенсивного горения, срыва пламени и развития низкочастотных пульсаций, связанных с нестационарностью процессов смесеобразования и воспламенения (результаты представлены в форме карты режимов горения);

- уровень и расположение области максимальной осредненной по времени температуры, «мгновенную» тепловую структуру факела;
- геометрические характеристики светящейся зоны внешнего факела;
- динамическую структуру потока (на основе измерений продольной и радиальной компонент скорости) и расположение зон с высоким уровнем относительных пульсаций скорости (в области смещения струи с окружающим воздухом);
- тепловыделение (полноту сгорания топлива);
- эмиссию монооксида углерода и оксидов азота (объемное содержание в продуктах сгорания и количество, производимое при сгорании 1 кг топлива).

Анализ распределений и зависимостей этих характеристик от режимных параметров позволяет обосновать ряд выводов.

а) Температура перегретого водяного пара или подаваемого воздуха оказывает слабое влияние на характер горения.

б) Основным параметром, определяющим характеристики процесса, является относительный расход пара (γ), влияющий на значение максимальной температуры, длину внешнего факела и на производство СО и NO_x. В режиме интенсификации горения за счет принудительной подачи воздуха максимальная температура и длина факела тоже зависят от относительного расхода подаваемого воздуха (γ), но этот параметр почти не влияет на концентрации указанных токсичных компонентов продуктов сгорания.

в) Режимы устойчивого интенсивного горения исследуемых видов топлива реализуются в определенном диапазоне значений параметра γ .

г) Удельное тепловыделение во всех режимах устойчивого интенсивного горения в пределах погрешности соответствует высшей теплотворной способности (обеспечивается высокая полнота сгорания топлива).

д) Распределения температуры и скорости потока во внешнем факеле свидетельствуют о том, что внутри горелочного устройства процессы протекают в условиях недостатка окислителя, часть горючих компонентов выносятся в

атмосферу и сгорает во внешнем факеле, смешиваясь с воздухом. Осредненная тепловая структура факела имеет вид, характерный для диффузионного пламени.

При анализе полученных зависимостей особое внимание уделено сопоставлению режимов горения с подачей в зону реакции перегретого водяного пара с режимами принудительной подачи нагретого воздуха. Результаты выполненных исследований свидетельствуют о важных преимуществах способа интенсификации горения жидких углеводородов с использованием перегретого водяного пара. Даже при частичном замещении паром поступающего в горелку воздуха (~50% по массовому расходу) наблюдается снижение максимальной температуры на 100–200 градусов. Полнота сгорания топлива не ухудшается, но производство оксидов азота снижается вдвое при сохранении на низком уровне содержания СО в продуктах сгорания. Кроме этого, весьма важно, что параметр γ при горении с подачей пара позволяет управлять экологическими показателями, в отличие от режима с подачей воздуха.

Выводы о перспективности использования пара подтверждаются исследованиями горения жидких углеводородов в горелочных устройствах распылительного типа, в которых диспергирование топлива производится высокоскоростной струей перегретого водяного пара (см.: Ануфриев И.С. Экспериментальное исследование процессов при сжигании жидких углеводородов в горелочных устройствах с подачей перегретого водяного пара. – Дисс. д.т.н. – НГТУ, Новосибирск, 2019).

ГУ испарительного типа с принудительной подачей перегретого водяного пара при сжигании дизельного топлива обеспечивают значительно более низкую эмиссию СО и NO_x по сравнению с предельно допустимой концентрацией. По экологическим показателям они удовлетворяют наиболее жестким требованиям, предъявляемым к жидкотопливным ГУ ([124], третий класс Стандарта DIN EN 267:2011-11 [170]) и превосходят удельные показатели (на 1 кг топлива) сопоставимых по мощности горелочных устройств ведущих производителей (см. таблицу 7).

Таблица 7 – Классификация горелочных устройств Weishaupt по удельным выбросам NO_x и CO и показатели разработанных ГУ испарительного типа

ГУ на дизельном топливе	Мощность, кВт	CO, г/кг	NO _x , г/кг	Класс
WL5/1-B	21,5–40	≤ 1,3	≤ 2,2	2
WL5-A-H	16,5–40			
WL5-A-H 1LN	16,5–37	≤ 0,7	≤ 1,4	3
автономное ГУ (режим с подачей пара)	7,9	0,6 (20 ppm)	0,9 (17 ppm)	
автономное ГУ (режим с подачей воздуха)	7,5	1,5 (50 ppm)	1,1 (22 ppm)	
ГУ с принудительной подачей пара, $\gamma = 0,9$	9,9	< 0,1 (< 2 ppm)	1,26 (30 ppm)	
ГУ с принудительной подачей воздуха, $\gamma = 0,9$	9,7	< 0,1 (< 2 ppm)	2,25 (55 ppm)	

Преимущества использования способа сжигания жидких углеводородов с подачей перегретого водяного в зону реакции являются следствием ряда эффектов. Во-первых, пар обладает высокой теплоемкостью (по сравнению с воздухом), что ведет к понижению температуры пламени и уменьшению производства «термических» оксидов азота. Кроме этого, присутствие пара в зоне реакции оказывает влияние на химические процессы, протекающие в условиях недостатка окислителя. Полученные экспериментальные данные могут служить основой для верификации математических моделей, которые позволят прояснить характер этих процессов внутри горелочного устройства, где применение экспериментальных методов сталкивается со значительными трудностями.

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.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнялись в 2012–2019 гг. в рамках Программы фундаментальных научных исследований (государственное задание ИТ СО РАН), отдельные задачи относились к работам по грантам РФФИ и РФФИ, результаты исследований состава уходящих газов при сжигании различных видов топлива в горелочном устройстве с принудительной подачей перегретого водяного пара получены в 2019 году по гранту Правительства РФ для поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых № 075-15-2019-1888.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает признательность академику РАН С.В. Алексеенко, к.ф.-м.н. И.С. Ануфриеву, М.С. Вигриянову, Е.Ю. Шадрину, д.ф.-м.н. Е.Л. Лободе, М.В. Агофонцеву за большую помощь в выполнении работы.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2701970

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПАРОГЕНЕРАТОР

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) (RU)*

Авторы: *Копьев Евгений Павлович (RU), Вигриянов Михаил Степанович (RU), Ануфриев Игорь Сергеевич (RU), Шарыпов Олег Владимирович (RU), Осинцев Ярослав Андреевич (RU)*

Заявка № 2019101397

Приоритет изобретения 17 января 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 02 октября 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 17 января 2039 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2705494

АВТОНОМНОЕ ГОРЕЛОЧНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛИТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) (RU)*

Авторы: *Вигриянов Михаил Степанович (RU), Алексеенко Сергей Владимирович (RU), Ануфриев Игорь Сергеевич (RU), Копьев Евгений Павлович (RU), Арсентьев Сергей Сергеевич (RU), Осинцев Ярослав Андреевич (RU)*

Заявка № 2019101396

Приоритет изобретения 17 января 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 07 ноября 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 17 января 2039 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2705495

ПУСКОВОЕ ГОРЕЛОЧНОЕ УСТРОЙСТВО

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) (RU)*

Авторы: *Алексеев Сергей Владимирович (RU), Вигриянов Михаил Степанович (RU), Копьев Евгений Павлович (RU), Ануфриев Игорь Сергеевич (RU), Шарынов Олег Владимирович (RU)*

Заявка № 2019101398

Приоритет изобретения 17 января 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 07 ноября 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 17 января 2039 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



ПРИЛОЖЕНИЕ Б



Общество с ограниченной ответственностью
«ЗиО-КОТЭС»
ул. Кропоткина, д. 96/1
г. Новосибирск, 630049
Тел.: (383) 319 05 07
e-mail: zioinfo@zio-cotes.ru
www.zio-cotes.ru

В диссертационный совет

№ 179 от 07.09.2020 г.

Справка

о практическом использовании и внедрении результатов диссертационной работы Копьева Евгения Павловича

ООО «ЗиО-КОТЭС» в лице Генерального директора Цепенка А.И., предоставляет настоящую справку в том, что полученные **Копьевым Евгением Павловичем** в диссертационной работе «Исследование горения жидкого топлива в условиях паровой газификации» результаты исследований нашли практическое применение при CFD-моделировании процессов горения жидких топлив. Это позволило верифицировать используемые математические модели для дальнейшей достоверной оценки экологических характеристик и эффективности сжигания жидких углеводородов, усовершенствовать способы их сжигания, повысить технико-экономические и экологические показатели процесса.

Использование результатов работы Копьева Е.П. подтверждается заключенными между ООО «ЗиО-КОТЭС» и Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (далее ИТ СО РАН) Лицензионными договорами № РД0331938 от 29.04.2020 и № РД0337622 от 29.07.2020 на полученные ИТ СО РАН и зарегистрированные результаты интеллектуальной деятельности, соавтором которых является соискатель диссертации:

– патент РФ на изобретение № 2684300 Паромасляное горелочное устройство, патентообладатель ИТ СО РАН, авторы: Ануфриев И.С., Вигриянов М.С., Алексеенко С.В., Шарыпов О.В., **Копьев Е.П.**, зарегистрирован 05.04.2019, приоритет от 09.02.2018.

– патент РФ на изобретение № 2701970 Электрический парогенератор, патентообладатель ИТ СО РАН, авторы: **Копьев Е.П.**, Вигриянов М.С., Ануфриев И.С., Шарыпов О.В., Осинцев Я.А., зарегистрирован 02.10.2019, приоритет от 17.01.2019.

– патент РФ на изобретение № 2705494 Автономное горелочное устройство длительного действия, патентообладатель ИТ СО РАН, авторы: Вигриянов М.С.,

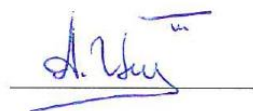
Алексеев С.В., Ануфриев И.С., **Копьев Е.П.**, Арсентьев С.С., Осинцев Я.А., зарегистрирован 07.11.2019, приоритет от 17.01.2019.

– патент РФ на изобретение № 2705495 Пусковое горелочное устройство, патентообладатель ИТ СО РАН, авторы: Ануфриев И.С., Вигриянов М.С., Алексеев С.В., Шарыпов О.В., **Копьев Е.П.**, зарегистрирован 07.11.2019, приоритет от 17.01.2019.

Указанные разработки используются ООО «ЗиО-КОТЭС» в новых перспективных конструкциях горелочных устройств для промышленных и энергетических установок с паровыми и водогрейными котлами при: использовании сложных для сжигания жидких углеводородов, повышенных требованиях к устойчивости горения, широкой гаммы сжигаемых топлив, повышенных требованиях к экологическим показателям.

Справка дана **Копьеву Е.П.** для представления в диссертационный совет.

Генеральный директор,
кандидат технических наук



Цепенюк А.И.

М.П.



ПРИЛОЖЕНИЕ В

Результаты анализа состава образцов используемых видов горючего,
полученные НИОХ СО РАН.

	Дизельное топливо	Отработанное масло	Методика	Погреш- ность, %
Массовая доля углерода, %	85,85	84,25	ФР.1.31.2011.111 66	6
Массовая доля водорода, %	13,34	13,48		9
Массовая доля азота, %	0,00	0,73		Вне области аккредит ации
Массовая доля серы, %	0,00	0,00		
Массовая доля кислорода , %	0,75	1,55		
Брутто- формула	$C_{12}H_{22,38}O_{0,084}$	$C_{12}H_{23,04}N_{0,084}O_{0,156}$		

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. RU2219435, F23L7/00. Способ бесплажного сжигания топлива / Вигриянов М.С., Саломатов В.В., Алексеенко С.В. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН). – № 2002103813 ; заявл. 11.02.2002 ; опубл. 20.12.2003.
2. Пат. РФ № 2450207, F23C99/00 ; F23G7/05 ; F23D11/20 ; F23L7/00. Горелочное устройство / Вигриянов М.С. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН). – № 2010144214/06 ; заявл. 28.10.2010 ; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 13.
3. Алексеенко, С.В. Нанокластерное инициирование горения неконденсированных углеводородных топлив / С.В. Алексеенко, С.Э. Пашенко, В.В. Саломатов // Инженерно-физический журнал. – 2010. – Т. 83, № 4. – С. 682-693.
4. Хитрин, Л.Н. Физика горения и взрыва. – М.: Изд-во Московского университета, 1957.
5. Варнатц, Ю. Горение / Ю. Варнатц, У. Маас, Р. Диббл. – М.: Физматлит, 2003. – 352 с.
6. Частухин, В.И. Топливо и теория горения / В.И. Частухин, В.В. Частухин. – Киев: Выща школа, 1989.
7. Ентус, Н.Р., Шарихин В.В. Трубчатые печи в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности / Н.Р. Ентус, В.В. Шарихин. – М.: Химия, 1987.
8. Рабинович, О.М. Котельные установки. – Л.: Машгиз, 1963.

9. Карабин, А.И. Сжигание жидкого топлива в промышленных установках. – М.: Metallurgizdat, 1957.
10. Хзмалян, Д.М. Теория горения и топочные устройства / Д.М. Хзмалян, Я.А. Каган. – М.: Энергия, 1976.
11. Спейшер, В.А. Повышение эффективности использования газа и мазута в энергетических установках / В.А. Спейшер, А.Д. Горбаненко. – М.: Энергоиздат, 1982.
12. Письмен, М.К. Производство водорода в нефтеперерабатывающей промышленности. – М.: Химия, 1976.
13. Канторович, Б.В. Введение в теорию горения и газификации твердого топлива. – М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1960.
14. Higman, C. Gasification / C. Higman, M. Burgt. – Oxford, 2008.
15. Мельников, Е.Я. Справочник азотчика. – М.: Химия, 1967.
16. Иоффе, В.Б. Основы производства водорода. – Л.: Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы. Ленинградское отделение, 1960.
17. Рябцев, И.И. Производство газа из жидких топлив для синтеза аммиака и спиртов / И.И. Рябцев, А.А. Волков. – М.: Химия, 1968.
18. Персиянцев, М.Н. Добыча нефти в осложненных условиях. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2000.
19. Кафаров, В.В. Принципы создания безотходных химических производств. – М.: Химия, 1968.
20. Копытов, В.В. Газификация конденсированных топлив. – М.: Агрорус, 2012.
21. Furimsky, E. Gasification in petroleum refinery of 21st century // Oil & Gas Science and Technology. – 1999. – Vol. 54. – No. 5. – P. 597-618.
22. Wallace, P.S. Heavy oil upgrading by the separation and gasification of asphaltenes / P.S. Wallace, M.K. Anderson, A.I. Rodarte, W.E. Preston // Gasification Technologies Conference. – 1998.

23. Dryer, F. L. Water addition to practical combustion systems — Concepts and applications // Symposium on Combustion. – 1977. – Vol. 16. – P. 279–295.
24. Зельдович, Я.Б. Окисление азота при горении / Я.Б. Зельдович, П.Я. Садовников, Д.А. Франк-Каменецкий. – М. ; Л.: АН СССР, 1947. – 150 с.
25. Brun, R.J. End-zone water injection as a means of suppressing knock in spark-ignition engine / R.J. Brun, H.L. Olsen, C.D Miller. – Washington: NACA, 1944; Restricted Bulletin E4127. – 14 с.
26. Mazas, A.N. Effects of water vapor addition on the laminar burning velocity of oxygen-enriched methane flames / A.N. Mazas, B. Fiorina, D.A. Lacoste, T. Schuller // Combustion and Flame. – 2011. – Vol. 158. – P. 2428–2440.
27. Boushaki, T. Effects of hydrogen and steam addition on laminar burning velocity of methane-air premixed flame: Experimental and numerical analysis / T. Boushaki, Y. Dhue, L. Selle, B. Ferret, T. Poinso // International Journal of Hydrogen Energy. – 2012. – Vol. 37. – P. 9412–9422.
28. Lee, M.C. Experimental study on the effect of N₂, CO₂, and steam dilution on the combustion performance of H₂ and CO synthetic gas in an industrial gas turbine / M.C. Lee, S.B. Seo, J. Yoon, M. Kim, Y. Yoon // Fuel. – 2012. – Vol. 102. – P. 431–438.
29. Graus, W.H.J. Effects of SO₂ and NO_x control on energy-efficiency power generation / W.H.J. Graus, E. Worrell // Energy Policy. – 2007. – Vol. 35. – P. 3898–3908.
30. Cong, L. Experimental and detailed modeling study of the effect of water vapor on the kinetics of combustion of hydrogen and natural gas, impact on NO_x / L. Cong, P. Dagaut // Energy and Fuels. – 2009. – Vol. 23. – P. 725–734.
31. Farokhipour, A. A numerical study of NO_x reduction by water spray injection in gas turbine combustion chambers / A. Farokhipour, E. Hamidpour, E. Amani // Fuel. – 2018. – Vol. 212. – P. 173–186

32. Xue, R. Effect of steam addition on gas turbine combustor design and performance / R. Xue, C. Hua, V. Sethi, T. Nikolaidis, P. Pilidis // *Applied Thermal Engineering*. – 2016. – Vol. 104. – P. 249–257
33. Terhaar, S. Impact of steam-dilution on the flame shape and coherent structures in swirl-stabilized combustors / S. Terhaar, K. Oberleithner, C.O. Paschereit // *Combustion Science and Technology*. – 2014. – Vol. 186. – P. 889–911.
34. Integrated pollution prevention and control. Reference document on best available techniques for large combustion plants. – European Commission, 2006. – 580 c.
35. Skalska, K. Trends in NO_x abatement: A review / K. Skalska, J.S. Miller, S. Ledakowicz // *Science of the Total Environment*. – 2010. – Vol. 408. – P. 3976–3989.
36. Correa, S.M. Power generation and aeropropulsion gas turbines: from combustion science to combustion technology // *Symposium on Combustion*. – 1998. – Vol. 27. – P. 1793–1807.
37. Matynia, A. Comparative study of the influence of CO₂ and H₂O on the chemical structure of lean and rich methane–air flames at atmospheric pressure / A. Matynia, J.-L. Delfau, L. Pillier, C. Vovelle // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 2009. – Vol. 45, N. 6 – P. 635–645.
38. Babkin, B.S. Effect of water vapor on the normal burning velocity of a methane–air mixture at high pressures / B. S. Babkin, A. V. Vyun // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 1971. – Vol. 7, N. 3 – P. 339–341.
39. Cong, L. Effect of water vapor on the kinetics of combustion of hydrogen and natural gas: experimental and detailed modeling study / L. Cong, P. Dagaut // *Proceedings of the ASME Turbo Expo*. – 2008. – P. 319–328.
40. Zou, C. The chemical mechanism of steam's effect on the temperature in methane oxy-steam combustion / C. Zou, Y. Song, G. Li, S. Cao, Y. He, C. Zheng // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2014. – Vol. 75. – P. 12–18.

41. Albin, E. Experimental investigation of burning velocities of ultra-wet methane–air–steam mixtures / E. Albin, H. Nawroth, S. Göke, Y. D'Angelo, C.O. Paschereit // *Fuel Processing Technology*. – 2013. – Vol. 107. – P. 27–35.
42. Fells, I. Burning velocity of methane-air flames / I. Fells, A. G. Rutherford // *Combustion and Flame*. – 1969. – Vol. 13. – P. 130–138.
43. Muller-Dethlefs, K. The effect of steam on flame temperature, burning velocity and carbon formation in hydrocarbon flames / K. Muller-Dethlefs, A.F. Schladert // *Combustion and Flame*. – 1976. – Vol. 27. – P. 205–215.
44. Hwang, D.-J. Numerical study on flame structure and NO formation in CH₄-O₂-N₂ counterflow diffusion flame diluted with H₂O / D.-J. Hwang, J.-W. Choi, J. Park, S.-I. Keel, C.-B. Ch, D.-S. Noh // *International Journal of Energy Research*. – 2004. – Vol. 28. – P. 1255–1267.
45. Renard, C. Effect of CO₂ or H₂O addition on hydrocarbon intermediates in rich C₂H₄/O₂/Ar flames / C. Renard, M. Musick, P. J. Van Tiggelen, J. Vandooren // *Proceedings of European Combustion Meeting*. – 2003. – P. 221.
46. Liu, F. Effects of water vapor addition to the air stream on soot formation and flame properties in a laminar coflow ethylene/air diffusion flame / F. Liu, J.-L. Consalvi, A. Fuentes // *Combustion and Flame*. – 2014. – Vol. 161. – P. 1724–1734.
47. Cong, T.L. Oxidation of ethylene and propene in the presence of CO₂ and H₂O: experimental and detailed kinetic modeling study / T.L. Cong, E. Bedjanian, P. Dagaut // *Combustion Science and Technology*. – 2010. – Vol. 182. – P. 333–349.
48. Pugh, D.G. Dissociative influence of H₂O vapour/spray on lean blowoff and NO_x reduction for heavily carbonaceous syngas swirling flames / D.G. Pugh, P.J. Bowen, R. Marsh, A.P. Crayford, J. Runyon, S. Morris, A. Valera-Medina, A. Giles // *Combustion and Flame*. – 2017. – Vol. 177. – P. 37–48.
49. Furuhashi, T. Effect of steam addition pathways on NO reduction characteristics in a can-type spray combustor / T. Furuhashi, T. Kawata, N. Mizukoshi, M. Arai // *Fuel*. – 2010. – Vol. 89. – P. 3119–3126.

50. Смирнов, Б.Ю. Восстановление оксидов азота в отходящих дымовых газах. эколого-экономический анализ / Б.Ю. Смирнов, С.Б. Смирнова, Л.М. Альбитер // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 14, №5. – С.846–849
51. Кулиш, О.Н. Очистка дымовых газов промышленных тепловых агрегатов от оксидов азота методом некаталитического восстановления / О.Н. Кулиш, С.А. Кужеватов, И.Ш. Глейзер, М.Н. Орлова, Е.В. Иванова // Экология и промышленность России. – 2015. – Т. 19, № 8. – С. 4–9.
52. Третьяков, В.Ф. Экологический катализ: достижения и перспективы // Зеленая химия в России. – М.:МГУ, 2004. – С.52–63
53. Прохоров, В.Б. Образование и методы снижения выбросов оксидов азота при сжигании топлив на ТЭС / В.Б. Прохоров, Н.Д. Рогалев, М.Г. Лысков. – М.:МЭИ, 2001. – 32 с.
54. Жуйков, А.В. Снижение оксидов азота в топках котлов // Журнал СФУ. Техника и технологии. – 2011. – Т. 6. – С.620–628
55. Колп, Д.А. Ввод в эксплуатацию первой в мире ГТУ полного цикла STIG на базе газогенератора LV#5000 / Д.А. Колп, Д.Ж. Мёллер // Современное машиностроение. – 1989. – № 11. – С. 1–14.
56. Иванов, А.А. О глубоком подавлении выбросов NO_x и СО в ГТУ с впрыском воды или пара / А.А. Иванов, А.Н. Ермаков, Р.А. Шляхов // Известия Академии Наук. – 2010. – № 3. – С. 119–128
57. Schug, K.P. Sooting Behavior of Gaseous Hydrocarbon Diffusion Flames and the Influence of Additives / K.P. Schug, Y. Manheimer-Timnat, P. Yaccarinc, I. Glassman // Combustion Science and Technology. – 1980. – Vol. 22. – P. 235–250.
58. Clark, A.E. The tendency to smoke of organic compounds on burning / A.E. Clark, T.C. Hunter, F.H. Garner // Journal of Petroleum Technology. – 1946. – Vol. 32. – P. 627–642.

59. Millikan, R.C. Non-equilibrium soot formation in premixed flames // *Journal of Physical Chemistry*. – 1962. – Vol. 66, Iss. 5. – P. 794–799.
60. Homann, K.H. Carbon formation in pre-mixed flames // *Combustion and Flame*. – 1967. – Vol. 11, Iss. 4. – P. 265–287
61. Dryer, F.L. Combustion chemistry of chain hydrocarbons, in *Alternative Hydrocarbon Fuels* / F. L. Dryer, I. Glassman // *Combustion and Chemical Kinetics*. – 1978. – Vol. 62, Iss. 5. – P. 255–306
62. Иванов, В.М. Топливные эмульсии. – М.: АН СССР, 1962. – 216 с.
63. Заводов, В.С. К вопросу об использовании водно-бензиновых эмульсий / В.С. Заводов, С.А. Лесняк, Г.Г. Муравьев, В.Н. Простов, Е.Р. Тайбер // *Труды Всесоюзной научной конференции «Защита воздушного бассейна от загрязнения токсичными выбросами транспортных средств»*. В 2 ч. Ч. 1. – Харьков: Институт проблемы машиностроения, 1977. – С.337–351.
64. Делягин, Г.Н. Закономерности процесса горения распыленной водоугольной суспензии в потоке воздуха // *Новые методы сжигания топлив и вопросы теории горения*. – М.: Наука. 1965. – С. 72–83.
65. Делягин, Г.Н. Исследование процесса воспламенения капли водоугольной суспензии / Г.Н. Делягин, Б.Н. Сметанников // *Новые методы сжигания топлив и вопросы теории горения*. – М.: Наука. 1965. – С. 84–90.
66. Crookes, R.J. Seed-oil bio-fuel of low cetane number: the effect of water emulsification on diesel-engine operation and emissions / R.J. Crookes, F. Kiannejad, M.A.A. Nazha // *Journal of the Institute of Energy*. – 1995. – Vol. 68. – P. 142–151.
67. Lif, A. Water-in-diesel emulsions and related systems / A. Lif, K. Holmberg // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2006. – Vol. 123–126. – P. 231–239.
68. Yahaya Khan, M. Current trends in water-in-diesel emulsion as a fuel / M. Yahaya Khan, Z.A. Abdul Karim, F.Y. Hagos, A.R.A. Aziz, I.M. Tan, // *The Scientific World Journal*. – 2014. – Vol. 2014, N. 527472.

69. Nadeem, M. Diesel engine performance and emission evaluation using emulsified fuels stabilized by conventional and gemini surfactants / M. Nadeem, C. Rangkuti, K. Anuar, M.R.U. Haq, I.B. Tan, S.S. Shah // *Fuel*. – 2006. – Vol. 85. – P. 2111–2119.
70. Alahmer, A. Engine performance using emulsified diesel fuel / A. Alahmer, J. Yamin, A. Sakhrieh, M.A. Hamdan // *Energy Conversion and Management*. – 2010. – Vol. 51. – P. 1708–1713.
71. Kannan, K. NO_x and HC emission control using water emulsified diesel in single cylinder diesel engine / K. Kannan, M. Udayakumar // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2009. – Vol. 4. – P. 59–62.
72. Ballester, J.M. Combustion characteristics of heavy oil-water emulsions / J.M. Ballester, N. Fueyo, C. Dopazo // *Fuel*. – 1996. – Vol. 75. – P. 695–705.
73. Andrews, G.E. Diesel/water emulsions. Influence on ignition delay and emissions / G.E. Andrews, S.W. Bartle, S.W. Pang, A.M. Nurein, P.T. Williams // *Proceedings of the International Centre for Heat and Mass Transfer*. – 1989. – P. 613–625.
74. Sjögren, A. Burning of water-in-oil emulsions // *Symposium on Combustion*. – 1977. – Vol. 16. – P. 297–305.
75. Morozumi, Y. Effect of physical properties on microexplosion occurrence in water-in-oil emulsion droplets / Y. Morozumi, Y. Saito // *Energy and Fuels*. – 2010. – Vol. 24. – P. 1854–1859.
76. Watanabe, H. Numerical simulation of emulsified fuel spray combustion with puffing and micro-explosion / H. Watanabe, Y. Matsushita, H. Aoki, T. Miura // *Combustion and Flame*. – 2010. – Vol. 157. – P. 839–852.
77. Hagos, F.Y. Water-in-diesel emulsion and its micro-explosion phenomenon-review / F.Y. Hagos, A.R.A. Aziz, I.M. Tan // *2011 IEEE 3rd International Conference on Communication Software and Networks*. – 2011. – N. 6014903. – P. 314–318.
78. Lin, C.-Y. Diesel engine performance and emission characteristics using three-phase emulsions as fuel / C.-Y. Lin, K.-H. Wan // *Fuel*. – 2004. – Vol. 83. – P. 537–545.

79. Lin, C.-Y. Effects of a combustion improver on diesel engine performance and emission characteristics when using three-phase emulsions as an alternative fuel / C.-Y. Lin, K.-H. Wang // *Energy and Fuels*. – 2004. – Vol. 18. – P. 477–484.
80. Федоровский, А.Д. Оптические методы в гидродинамике. – Киев: Наукова Думка, 1984.
81. Ринкевичус, Б.С. Лазерная диагностика потоков. – М.: Изд-во МЭИ, 1990.
82. Алексеенко С.В., Бильский А.В., Маркович Д.М. Применение метода цифровой трассерной визуализации для анализа турбулентных потоков с периодической составляющей // *Приборы и техника*. – 2004. – № 5. – С. 145-153.
83. Scarano, F. Advances in iterative multigrid PIV image processing / F. Scarano, M.L. Riethmuller // *Experiments in Fluids*. – 2000. – Vol. 29, No. 7. – P. 51-60.
84. Алексеенко, С.В. Влияние внешнего периодического возмущения на поднятое пламя / С.В. Алексеенко, В.М. Дулин, Ю.С. Козорезов, Д.М. Маркович // *Письма в ЖТФ*. – 2011. – Т. 37, В. 6. – С. 71-77.
85. Дулин, В.М., Исследование газодинамической структуры потока в закрученном турбулентном пламени стереоскопическим методом цифровой трассерной визуализации / В.М. Дулин, Ю.С. Козорезов, Д.М. Маркович, М.П. Токарев // *Вестник НГУ. Серия: Физика*. – 2009. – Т. 4, № 3. – С. 30-42.
86. Гейдон, А. Спектроскопия и теория горения. – М.: ИЛ, 1950. – 308 с.
87. СТП 34.26.724. Методические указания по испытаниям топочных и горелочных устройств котельных установок: МУ 34-70-180-87. – М.: Союзтехэнерго, 1988. – 67 с.
88. ГОСТ Р 8.585-2001. Государственная система обеспечения единства измерений. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 78 с.
89. ГОСТ Р 50342-92. Преобразователи термоэлектрические. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 10 с.

90. Гинзбург, С.И. Аналитическая химия платиновых металлов / С.И. Гинзбург, Н.А. Езерская, И.В. Прокофьева, Н.В. Федоренко, В.И. Шленская, Н.К. Бельский. – М.: Наука, 1972. – 614 с.
91. Rinieri, F. On the use of an infra-red camera for the measurement of temperature in fires of vegetative fuels / F. Rinieri, J.-H. Balbi, P-A. Santoni // QIRT. – 2006.
92. Bagavathiappan, S. Infrared thermography for condition monitoring – A review / S. Bagavathiappan, B.B. Lahiri, T. Saravanan, J. Philip, T. Jayakumar // Infrared Phys. Technol. – 2013, –V. 60. –P. 35-55.
93. Švantner, M. IR thermography heat flux measurement in fire safety applications / M. Švantner P. Vacíková, M. Honner // Infrared Phys. Technol. – 2012, –V. 55. – P. 292-298.
94. Din, X.P. Application of infrared thermography for laser metal-wire additive manufacturing in vacuum / X.P. Ding, H.M. Li, J.Q. Zhu, G.Y. Wang, H.Z. Cao, Q. Zhang, H.L. Ma // Infrared Phys. Technol. – 2017, –V. 81. –P. 166-169.
95. Rodríguez-Martín, M. Prediction of depth model for cracks in steel using infrared thermography / M. Rodríguez-Martín, S. Lagüela, D. González-Aguilera, J. Martinez // Infrared Phys. Technol.– 2015, –V. 71. –P. 492-500.
96. Grinzato, E. Comparison of ultrasonic velocity and IR thermography for the characterisation of stones / E. Grinzato, S. Marinetti, P.G. Bison, M.Concas, S.Fais // Infrared Phys. Technol. – 2004, –V. 46. –P. 63-68.
97. Palacios, A. Thermal radiation from vertical jet fires / A. Palacios, M. Munoz, R.M. Darbra, J. Casal // Fire Safety J.– 2012, –V. 51. –P. 93-101.
98. Zhang, B. Experimental study on propane jet fire hazards: thermal radiation / B. Zhang, Y. Liu, D. Laboureur, M.S. Mannan // Ind. Eng. Chem. Res. – 2015, –V. 54. –P. 9251-9256.
99. Planas-Cuchi, E. Determination of Flame Emissivity in Hydrocarbon Pool Fires Using / E. Planas-Cuchi, J.M. Chatris, C. Lopez, J. Arnaldos // Infrared Thermography. Fire Tech. – 2003, –V. 39. –P. 261-273.

100. Sudheer, S. Measurement of flame emissivity of gasoline pool fires / S. Sudheer, S.V. Prabhu // Nucl. Eng. Des. – 2010, –V. 210. –P. 3474-37480.
101. Wang, P. An experimental study on thermal radiation of fire whirl /, N. Liu, Y. Bai, L. Zhang, K. Satoh, X. Liu // Int. J. Wildland Fire. – 2017, –V. 26. –P. 693-705.
102. Blankenhagel, P. Thermal radiation assessment of fireballs using infrared camera / P. Blankenhagel, K.-D. Wehrstedt, K.B. Mishra, J. Steinbach // J. Loss Prev. Proc. Ind.– 2018, –V. 54. –P. 246-253.
103. Saha, A. Infrared thermography and numerical study of vaporization characteristics of pure and blended bio-fuel droplets / A. Saha, R. Kumar, S. Basu // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2010, –V. 53. –P. 3862-3873.
104. Shelkin, K.I., Influence of tube non-uniformities on the detonation ignition and propagation in gases // JETP 10, 823*827 (1940).
105. Loboda E.L., Reyno V.V., Vavilov V.P. The Use of Infrared Thermography to Study the Optical Characteristics of Flames from Burning Vegetation // Infrared Physics and Technology 67 (2014). P. 566-573.
106. V.T. Kuznetsov and E.L. Loboda Experimental study of peat ignition upon exposure to radiant energy // Combustion, Explosion, and Shock Waves, Vol. 46, No. 6, 2010. p. 690-695.
107. C. Qian and K. Saito. Measurements of Pool-Fire Temperature Using IR Technique // Combustion Institute/Central and Western States (USA) and Combustion Institute/Mexican National Section and American Flame Research Committee. Combustion Fundamentals and Applications. Joint Technical Meeting. Proceedings. April 23-26, 1995, San Antonio, TX, Gore, J. P., Editor(s), 81-86 pp.
108. F. Rinieri, J.-H. Balbi, P-A. Santoni. On the use of an infra-red camera for the measurement of temperature in fires of vegetative fuels // QIRT 2006 (<http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2006/papers/011.pdf>).

109. J. Dupuy, P. Vachet, J. Maréchal, J. Meléndez, A.J. De Castro. Thermal infrared emission–transmission measurements in flames from a cylindrical forest fuel burner // *International Journal of Wildland Fire*, 2007, № 16, 324–340.
110. Singh, P. Heat transfer and fluid flow characteristics of a pair of interacting dual swirling flame jets impinging on a flat surface / P. Singh, S. Chander // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 2018, –V. 124. –P. 90-108.
111. ГОСТ 17356-89. Горелки на газообразном и жидком топливах. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 7 с.
112. ГОСТ 28091-89. Горелки промышленные на жидком топливе. Методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 25 с.
113. ГОСТ 21261-91. Нефтепродукты. Метод определения высшей теплоты сгорания и вычисление низшей теплоты сгорания. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 23 с.
114. ГОСТ 3900-85. Нефть и нефтепродукты. Методы определения плотности. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 36 с.
115. ГОСТ 33-2000. Нефтепродукты. Прозрачные и непрозрачные жидкости. Определение кинематической вязкости и расчет динамической вязкости. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 19 с.
116. ГОСТ 6356-75. Нефтепродукты. Метод определения температуры вспышки в закрытом тигле. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 5 с.
117. ГОСТ 1437-75. Нефтепродукты темные. Ускоренный метод определения серы. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 7 с.
118. ГОСТ 1461-75. Нефть и нефтепродукты. Метод определения зольности. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 4 с.
119. ГОСТ Р ИСО 10396-2012. Выбросы стационарных источников. Отбор проб при автоматическом определении содержания газов с помощью постоянно установленных систем мониторинга. – М.: Стандартинформ, 2014. – 26 с.
120. ГОСТ Р ИСО 12039-2011. Выбросы стационарных источников. Определение содержания монооксида углерода, диоксида углерода и кислорода.

- Характеристики и калибровка автоматических измерительных систем в условиях применения. – М.: Стандартиформ, 2012. – 15 с.
121. ГОСТ Р ИСО 10849-2006. Выбросы стационарных источников. Определение массовой концентрации оксидов азота. Характеристики автоматических измерительных систем в условиях применения. – М.: Стандартиформ, 2006. – 19 с.
122. ГОСТ Р ИСО 7935-2007. Выбросы стационарных источников. Определение массовой концентрации диоксида серы. Характеристики автоматических методов измерений в условиях применения. – М.: Стандартиформ, 2007. – 11 с.
123. ГОСТ 27824-2000. Горелки промышленные на жидком топливе. Общие технические требования. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 12 с.
124. ГОСТ 20548-87. Котлы отопительные водогрейные теплопроизводительностью до 100 кВт. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 10 с.
125. ГОСТ 10617-83. Котлы отопительные теплопроизводительностью от 0,10 до 3,15 МВт. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 9 с.
126. ГОСТ 28193-89. Котлы паровые стационарные с естественной циркуляцией паропроизводительностью менее 4 т/ч. Общие технические требования. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 7 с.
127. ГОСТ 305-2013. Топливо дизельное. Технические условия. – М.: Стандартиформ, 2014. – 11 с.
128. ГОСТ 10585-2013. Топливо нефтяное. Мазут. Технические условия. – М.: Стандартиформ, 2014. – 8 с.
129. ГОСТ Р 50831-95. Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования. – М.: Изд-во стандартов, 1996. – 23 с.
130. Пат. RU139611, МПК F23D5/04. Горелочное устройство теплогенератора / Ковтун П.П. ; заявитель и патентообладатель Ковтун П.П. – № 2013112377/06 ; заявл. 19.03.2013 ; опубл. 20.04.2014, Бюл. № 11.

131. Пат. TW201116779, МПК F23D5/18 ; F24C5/02. Burner of liquid fuel / Su C.-G., Lin S.-J. ; заявитель Su C.-G. – № TW20090137368 20091104 ; опубли. 16.05.2011.
132. Пат. CN201836886, МПК F23D11/00 ; F23D11/44. Liquid fuel burner / Qingbai S. ; заявитель Shanghai Yinghuifei New Energy Technology Co., Ltd. – № CN20102260291U 20100715 ; опубли. 18.05.2011.
133. Пат. CN102052669, МПК F23D11/00 ; F23D11/36 ; F23D11/44. Liquid fuel burner / Zhanggeng S.; Shengji L. ; заявитель SU C.-G. – № CN20091212312 20091104 ; опубли. 11.05.2011.
134. Пат. CN101968218, МПК F23D11/00 ; F23D11/44. Liquid fuel burner / Yongan L. ; заявитель Yongan L. – № CN20101540436 20101031 ; опубли. 09.02.2011.
135. Пат. DE102009043681, МПК F23D11/44. Exchanger and provided upstream to evaporation and mixing chamber for heating air, where heat exchanger is formed as exhaust air heat exchanger / Ritter K., Klausmann W. ; заявитель Viessmann Werke Kg. – № DE20091043681 20091001 ; опубли. 07.04.2011.
136. Пат. DE102011006370, МПК F23D3/40 ; F23D5/00. Burner for burning liquid fuel e.g. petrol, has vaporizer element for vaporizing liquid fuel, and grid holding flame core of combustion flame from vaporizer element, where flame is generated during combustion of vaporized fuel / Pannwitz T., Schwanecke M., Smigiel B. ; заявитель Webasto Ag. – № DE20111006370 20110329 ; опубли. 04.10.2012.
137. Пат. CN202195479, МПК F23D11/00 ; F23D11/44. Liquid fuel gasification burner / Mingqing J. ; заявитель Mingqing J. – № CN20112183526U 20110531 ; опубли. 18.04.2012.
138. Пат. CN203203079, F23D11/00 ; F23D11/44 ; F24C5/12. Liquid fuel vaporization burner / Zhou Y. ; заявитель Zhou Y. – № CN20132245121U 20130423 ; опубли. 18.09.2013.
139. Пат. CN103256635, F23D11/00 ; F23D11/44 ; F24C5/12. Liquid fuel vaporization burner / Zhou Y. ; заявитель Zhou Y. – № CN20131166576 20130423 ; опубли. 21.08.2013.

140. Пат. CN102966948, МПК F23D11/00 ; F23D11/44. Liquid fuel gasification device and liquid fuel burner / Feng M.; Liu J.; Xing D.; Ren J.; Yang Y. ; заявитель Chongqing Dawei Energy Chemical Co., Ltd. – № CN20121541801 20121214 ; опубли. 13.03.2013.
141. Пат. CN102966947, МПК F23D11/00 ; F23D11/44. Liquid fuel gasification burner / Li Y., Li X. ; заявитель Li X. – № CN20111288571 20110831 ; опубли. 13.03.2013.
142. Пат. CN104075315, МПК F23D11/00 ; F23D11/36; F23D11/44. Liquid fuel gasification burner / Zou X., Lu Y., Xie M. ; заявитель Zou X. – № CN20141292827 20140625 ; опубли. 01.10.2014.
143. Пат. CN204574031, МПК F23D11/00 ; F23D11/44. Liquid fuel burner / Tian W., Tang X.G., Tian Y., Tian F. ; заявитель Tian W. – № CN20152114837U 20150211 ; опубли. 19.08.2015.
144. Пат. KR101498093, МПК F23D11/44 ; F24C5/12 ; F24C5/16 ; F24C5/18. Liquid outflowing type burner having control part for supplying fuel / Kim S.H. ; заявитель Kovea Co., Ltd. – № KR20140014676 20140210 ; опубли. 03.03.2015.
145. Пат. KR101498095, МПК F23D11/44 ; F24C5/12 ; F24C5/16 ; F24C5/18. Liquid outflowing type burner having control part for supplying fuel / Kim S.H. ; заявитель Kovea Co., Ltd. – № KR20140014677 20140210 ; опубли. 03.03.2015.
146. Пат. CN106104157, МПК F23D5/00 ; F23D5/04 ; F23D5/12. Evaporator burner for a mobile heating device operated with liquid fuel / Dell V., Mosl K., Sommerer S. ; заявитель Webasto Se. – № CN2015815006 20150311 ; опубли. 09.11.2016.
147. Пат. CN205825016, МПК F23D11/00 ; F23D11/44. Liquid fuel high temperature gasification burner / заявитель Gao S., Liu G. – № CN20162774701U 20160722 ; опубли. 21.12.2016.
148. Пат. CN205119156, МПК F23D5/18 ; F24C5/02. Liquid fuel burner that vaporizes / Chen X. ; заявитель Chen X. – № CN20152632838U 20150820 ; опубли. 30.03.2016.

149. Пат. KR20170052186, МПК F23D11/02 ; F23D11/36 ; F23D11/42. Liquid fuel burner / Oh B.K. ; заявитель Oh B.K. – № KR20150154343 20151104 ; опубли. 12.05.2017.
150. Пат. RU2432530, МПК F23D17/00. Горелка для сжигания газообразного и/или жидкого топлива с пониженным выбросом окислов азота / Королев П.В., Валуев Ю.А., Соколов С.Ю., Цветков Е.Н. ; заявитель и патентообладатель ЗАО "Научно-производственный центр энергетического оборудования". – № 2010116583/06 ; заявл. 27.04.2010 ; опубли. 27.10.2011, Бюл. № 30.
151. Пат. RU2523517, МПК F23D17/00 ; F23R3/28. Устройство горелки для текучего топлива и способ изготовления устройства горелки / Бётчер А., Кано В.М., Клуге А., Кригер Т., Старинг С., Вёрц У. ; заявитель и патентообладатель Сименс Акциенгезелльшафт. – № 2011141844/06 ; заявл. 11.03.2010 ; опубли. 20.07.2014, Бюл. № 20.
152. Пат. CN202581308, МПК F23D11/24; F23D11/36. Environment-friendly liquid fuel burner / Yang L.; Wang A. ; заявитель Qingyuan Jingwang Environmental Prot. Equipment Co., Ltd. – № CN20122273824U 20120604 ; опубли. 05.12.2012.
153. Пат. RU2373458, F23C99/00; F23L7/00. Горелочное устройство / Вигриянов М.С., Зубкевич Е.Ю. ; заявитель и патентообладатель Вигриянов М.С., Зубкевич Е.Ю. – № 2008121113/06; заявл. 26.05.2008 ; опубли. 20.11.2009, Бюл. № 32.
154. Пат. RU2523591, F23D11/44; F23C99/00. Горелочное устройство / Вигриянов М.С., Алексеенко С.В., 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). – № 2013116229/06 ; заявл. 09.04.2013 ; опубли. 20.07.2014, Бюл. № 20.
155. Пат. RU2579298, F23D5/04; F23C99/00. Горелочное устройство / Вигриянов М.С., Алексеенко С.В., 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). – № 2015105632/06 ; заявл. 18.02.2015 ; опубл. 10.04.2016, Бюл. № 10.
156. 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.
157. Алексеенко С.В., Ануфриев И.С., Вигриянов М.С., Дулин В.М., Копьев Е.П., Шарыпов О.В. Сажепаровый режим горения жидких углеводородов: распределение скорости в факеле горелки // Теплофизика и аэромеханика. – 2014. – Т. 21, № 3. – С. 411-414.
158. Anufriev I.S., Kopyev E.P., Loboda E.L. Study of flame characteristics during liquid hydrocarbons combustion with steam gasification // Proc. SPIE 9292, 20th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – 2014. – 6 p.
159. 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.
160. 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 ; опубли. 07.11.2019, Бюл. № 31.
161. Anufriev I.S., Arsentyev S.S., Agafontsev M.V., Kopyev E.P., Loboda E.L., Shadrin E., Sharypov O.V. Thermography of flame during diesel fuel combustion with steam gasification // Journal of Physics: Conf. Series. – 2017. – Vol. 925. – Article No. 012014. – 6 p.
162. Kopyev E.P., Agafontsev M.V., Loboda E.L., Shadrin E.Yu. Thermography of flame during combustion of diesel fuel in the vaporizing burner // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2018. – Vol. 1128. – Article No. 012067. – 7 p.
163. С.В. Алексеенко, И.С. Ануфриев, С.С. Арсентьев, М.С. Вигриянов, Е.П. Копьев, О.В. Шарыпов Влияние параметров перегретого водяного пара на процесс горения жидких углеводородов // Теплофизика и аэромеханика, 2019, том 26, № 1
164. I.S. Anufriev, S.V. Alekseenko, O.V. Sharypov, and E.P. Kopyev Diesel fuel combustion in a direct-flow evaporative burner with superheated steam supply // Fuel. – 2019. – № 115723.
165. Алексеенко С.В., Ануфриев И.С., Вигриянов М.С., Копьев Е.П., Шарыпов О.В. Характеристики сжигания дизельного топлива в горелочном устройстве с подачей струи перегретого водяного пара // Физика горения и взрыва. – 2016. – Т. 52, № 3. – С. 37-44.
166. Терещенко, А.Г. Влияние газодинамического и теплового взаимодействия термопары с пламенем на профиль измеряемой температуры во фронте пламени / А.Г. Терещенко , П.А. Сковородко, Д.А. Князьков, А.А. Палецкий, О.П., Коробейничев / Доклад на международной конференции «Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика», посвященная 90-летию со дня рождения академика Н.Н. Яненко.
167. Kaskan, W.E. The dependence of flame temperature on mass burning velocity // Proc. Combust. Inst. – 1957. – Vol. 6, No. 1. – P. 134-141.

168. Богданов, С.Н. Холодильная техника. Кондиционирование воздуха. Свойства веществ / С.Н. Богданов, С.И. Бурцев, О.П. Иванов, А.В. Куприянова. – СПб.: СПбГАХПТ, 1999. – 320 с.
169. 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.
170. DIN EN 267:2011-11. Automatic forced draught burners for liquid fuels. – Брюссель: European Committee for Standardization, 2011. – 91 с.