

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

Копьев Евгений Павлович



НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах подготовленной научно-квалификационной работы  
(диссертации)

«Исследование горения жидких углеводородов в горелочных устройствах  
испарительного типа с подачей перегретого водяного пара»

Направление подготовки:

03.06.01 – Физика и астрономия

Специальность подготовки:

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Научный руководитель  
д.ф.-м.н. Шарыпов О.В.

Новосибирск, 2020

## **Актуальность исследования**

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

Так как горение – сложный физико-химический процесс, который изучается разделом науки, совмещающим множество направлений и использующим разнообразные методы исследования, то 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.

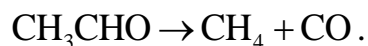
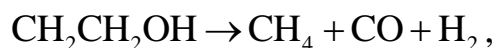
Всякий процесс горения или разложения веществ является, прежде всего, химическим процессом, поскольку он сопровождается превращением вещества, изменением его качества. Правила валентности, теория строения и химическая термодинамика указывают, в каком направлении и как глубоко пройдет та или иная реакция при заданных условиях. Но химические закономерности не дают исчерпывающей информации об изучаемых явлениях. Во многих случаях наибольшее практическое значение имеют процессы горения, подчиняющиеся, в первую очередь, физическим закономерностям. Химический процесс при этом оказывается подчиненным таким физическим процессам, как перенос тепла, диффузия и другие, и ими регулируется [1]. Таким образом, 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. Например, отмечено влияние водяного пара на реакцию окисления СО [1]. 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).

При горении жидкого топлива характерно то, что температура кипения жидких углеводородов значительно ниже температуры воспламенения [2–4], поэтому горение происходит в основном в газовой фазе и сам процесс можно поделить на несколько стадий: подогрев и испарение (сопровождающееся

пиролизом, термическим разложением), образование газовой фазы, ее воспламенение и сгорание [5-6].

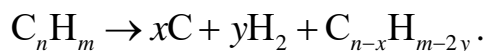
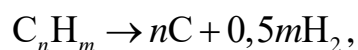
Одним из способов сжигания жидкого топлива является его горение со свободной поверхности. Особенность такого режима заключается в том, что пламя наблюдается на некотором расстоянии от поверхности жидкости, а скорость горения определяется скоростью испарения жидкости. Для такого режима горения характерен большой химический недожог [7], например, для керосина – на уровне 17,7% [6]. Кроме того, в таком случае, массовая скорость горения, отнесенная к площади поверхности пламени, является постоянной величиной [6]. К тому же, стадия испарения – самая медленная из всех последовательных стадий горения жидкого топлива, что на практике накладывает ряд ограничений на мощность горелочных устройств.

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 OH, например  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ , и альдегидов — углеводородных соединений, характеризующихся наличием альдегидной группы CHO, например  $\text{CH}_3\text{CHO}$ . При отсутствии свободного кислорода спирты и альдегиды расщепляются с образованием простейших соединений [2, 6]:

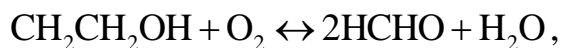


Видно, что в таком случае, кроме термически устойчивых веществ ( $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ ), образуется метан, при разложении которого образуется сажа.

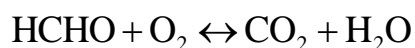
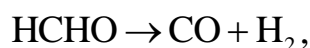
Парообразные углеводороды при движении внутри конусообразного факела до фронта пламени, при горении жидких горючих со свободной поверхностью, при нахождении в области высоких температур при отсутствии кислорода подвергаются термическому разложению вплоть до образования свободного углерода и водорода по уравнению [6]



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



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 [2]:



Отсюда видно, что эффективным способом предотвращения возникновения свободного углерода является частичное окисление углеводородных соединений в начальной стадии их термического преобразования. Такое окисление, называемое предварительной газификацией, способствует последующему процессу горения, так как наличие кислорода в составе углеводородов способствует дальнейшему их окислению [6]. В настоящее время процесс газификации все чаще рассматривается в качестве основного способа эффективного и экологически безопасного сжигания «тяжелых» углеводородных топлив и горючих производственных отходов [8-9]. Однако почти всегда это ведет к большим экономическим затратам как по строительству установок, так и по их содержанию. Все большую актуальность приобретают исследования влияния прямого впрыска воды и водяного пара на процесс окисления углеводородного (как жидкого, так и газообразного) топлива, как альтернативного и менее затратного способа.

Влияние воды и водяного пара на процесс горения углеводородов изучается и активно используется в практике еще с конца XVIII века. Вода используется во множестве приложений, начиная от снижения тепловой нагрузки в камере

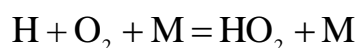
сгорания, заканчивая диспергированием тяжелых топлив и созданием водно-топливных эмульсий. До середины XX века, как отмечается в работе [10], уже существовало огромное количество приложений по использованию воды для снижения температурных нагрузок и предотвращения режима детонации. Однако в середине века, после описания механизма образования оксидов азота Я.Б. Зельдовичем [11], 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 применение воды зависело от ее параметров и способа подачи. Таким образом, при помощи организации добавления воды в процессе сжигания топлива можно влиять на режим горения. Тем не менее, не смотря на обилие работ, практически до конца 70-х годов двадцатого столетия они, зачастую, имели чисто практический характер и были направлены на модернизацию существующих агрегатов, и лишь очень малая часть работ описывала фундаментальные основы и зависимости протекающих процессов для понимания и проектирования новых систем.

Одно из направлений таких исследований связано с описанием антидетонационных свойств добавления воды. Ранее считалось, что снижение детонации топливной смеси в двигателе при добавлении воды в область горения происходит за счет внутреннего охлаждения процесса [12]. Однако, простые расчеты, проделанные в работе [10], показывают, что на полное испарение и нагрев даже 30% воды по объему от топлива уйдет не более 4% от суммарной энергии горения, что не позволит значительно снизить порог детонации. Поэтому, с большой вероятностью, водяной пар оказывает некоторое химическое ингибирование кинетики горения углеводородов помимо снижения температуры системы.

Помимо антидетонационных свойств, вода, как уже было отмечено, зачастую используется при сжигании углеводородных топлив в качестве эффективного метода снижения образования оксидов азота [13-20], наряду с методами

рециркуляции отработанных газов [21-23], в которых также содержатся водяные пары. Однако при рассмотрении воздействия рециркуляционных газов на процесс сжигания, как отмечается в работе [24], по большей части исследователи относят такой положительный эффект подавления  $\text{NO}_x$  к разбавлению горючей смеси «балластными» газами, такими как  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2$ , вследствие чего понижается температура и снижается вероятность образования термического  $\text{NO}_x$ . При этом, исследователи не рассматривают наличие паров воды в рециркуляционных газах, которая помимо термического эффекта может вносить дополнительные эффекты через химические преобразования, что делает использование воды более привлекательным.

Чтобы оценить химическое воздействие воды и водяного пара на процесс горения, исследователями был проведен ряд работ с различными веществами. Так, например, добавление воды в зону горения водородно-воздушной смеси [17] позволило снизить 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  $\text{HO}_2$ .

При рассмотрении сжигания метано-воздушных смесей в присутствии воды и водяного пара [16-17, 25-28] также отмечается снижение выбросов  $\text{NO}_x$ . Кроме того, в [25, 29-30] установили, что при увеличении разбавления горючей смеси водой снижается температура и ламинарная скорость пламени, чем авторы работ и обуславливают снижение эмиссии  $\text{NO}_x$ . К тому же, при добавлении воды наблюдается увеличение времени задержки воспламенения как для метановых, так и для водородных смесей [17]. В работе [25] 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 [14] указано на то, что

снижение как скорости, так и температуры пламени при добавлении воды связано с разбавлением горючих компонентов и тепловыми эффектами, однако этот эффект несколько компенсируется положительным вкладом от химии протекания процесса. В работе [24] было проведено моделирование процесса горения метано-воздушной смеси при добавлении фиктивного разбавителя  $H_2O$ . 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  $H_2O$  уменьшается, по сравнению с его химически активным аналогом. 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 реальным горением метано-воздушной смеси, а также некоторое снижение  $CO$  и увеличение содержания  $H_2$  в пламени.

Схожие выводы о влиянии воды на процесс горения делают и авторы в работе [30-32], рассматривающие 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 замедляется процесс окисления этилена и уменьшается его 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 реакции горения наблюдается снижение температуры пламени. Также при окислении этилена в присутствии водяного пара снижается формирование оксида 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.



При сжигании керосина с использованием технологии добавления перегретого водяного пара, как одного из эффективных способов снижения образования  $\text{NO}_x$  в газовых турбинах, в работе [33] экспериментально исследуют различные способы подачи пара в область горения топлива, а именно пар вводили в камеру сгорания возле корня факела, независимо от воздуха для горения, также его предварительно смешивали с воздухом для горения и вводили в камеру сгорания через завихритель на впускном отверстии, а также пар вводили в камеру сгорания через четыре отверстия, сделанные в корпусе камеры сгорания на некотором расстоянии от основания факела. Авторы обнаружили, что при подаче пара первыми двумя способами обеспечивается наиболее эффективное подавление образования  $\text{NO}_x$  в продуктах сгорания при горении керосина. В третьем случае, авторы также отмечают снижение концентрации  $\text{NO}_x$ , 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 уровень  $\text{CO}$ , но с определенного значения количества подачи пара.

Экспериментальные исследования горения различных видов жидких углеводородных топлив при добавлении перегретого водяного пара в область горения показали, что в режиме с паровой газификацией обеспечиваются высокие интенсивность сгорания различных видов топлив, при этом существенно улучшаются экологические показатели [34]. 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 ( $\text{OH}$ ), 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 [34] 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 смешения паров воды и горючего в пробах были зарегистрированы сажевые частицы нанометрового диапазона. По излучению ультрафиолетовой области было зафиксировано наличие в факеле OH-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).

Известные данные свидетельствуют о перспективности непосредственного впрыска воды (водяного пара) в зону горения как способа управления характеристиками сжигания жидкого топлива. Этот подход применен для достижения высоких технических и экологических показателей при производстве энергии с использованием низкокачественных видов углеводородного топлива [35-36]. При подаче в зону горения струи перегретого водяного пара паровой происходит воздушная и паровая газификация углеродосодержащих продуктов термического разложения топлива с образованием высокореакционных  $H_2$  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 углеводородного топлива.

### **Предмет исследования**

Предметом исследования служат основные характеристики и закономерности «сажепарового» режима горения в лабораторных образцах прямооточных жидкотопливных горелочных устройств испарительного типа (объекты исследования).

### **Цель и задачи**

Целью работы является определение влияния параметров потока 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 (СО и NO<sub>x</sub>) 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**

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 – созданных оригинальных прямооточных жидкотопливных горелочных устройств испарительного типа с различными способами генерации перегретого водяного пара, разработанных на основе новых технических решений.

### **Теоретическая и практическая значимость**

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.

### **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).

#### **Положения, выносимые на защиту**

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 машинного 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.

Работа выполнена под научным руководством д.ф.-м.н. Шарыпова О.В. в лаборатории радиационного теплообмена ИТ СО РАН. С участием автора создан и модернизирован экспериментальный стенд, проведены эксперименты, обработка полученных данных, анализ и обобщение результатов исследований, подготовка материалов к публикации. Все результаты получены автором лично.

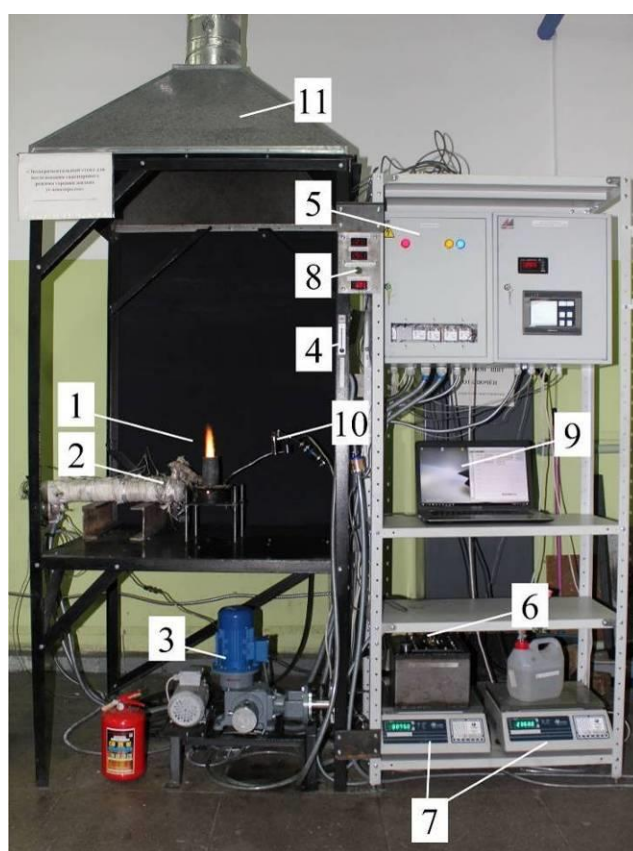
## Экспериментальный стенд

Исследования характеристик процесса сжигания жидких углеводородов проводились на различных лабораторных образцах горелочных устройств испарительного типа, работающих как с автономной, так и с принудительной подачей в зону реакции струи перегретого водяного пара. Такой тип устройств был выбран в связи с простотой реализации схемы горения – сжигание жидкого топлива со свободной поверхности. Все экспериментальные работы выполнялись на огневом экспериментальном стенде в лаборатории радиационного теплообмена ИТ СО РАН, оснащенный системой дозирования топлива, системой принудительной подачи перегретого водяного пара, системой подачи сжатого воздуха, оригинальными горелочными устройствами (см. рисунок 1), а также дополнялся двухкомпонентной PIV-системой «Полис», контрольно-измерительным оборудованием для измерений температуры (термопара и тепловизор), проточным калориметром, приборами для проведения газового анализа. Стенд обеспечен системой вентиляции (вытяжной вентилятор мощностью 1,5 кВт, 1500 об/мин).

На установке реализованы система генерации перегретого водяного пара, состоящей из контура подачи питательной воды (расход  $0.2 \div 1.4$  кг/ч) и электрического парогенератора (степень перегрева пара  $T_s$  до 400 градусов), система подачи воздуха, вместо пара (расход  $0.3 \div 1.0$  кг/ч), система подачи и подогрева жидкого топлива (расход топлива  $0.4 \div 2.2$  кг/ч) (Рисунок 2). Системы автоматизированы и работают независимо друг от друга, управление параметрами осуществляется централизованно, через шкаф управления.

Система принудительной подачи перегретого водяного пара включает в себя разработанный электрический парогенератор (средняя потребляемая мощность 1.5 кВт) [37], используемый для работы горелочного устройства с принудительной подачей перегретого водяного пара в зону реакции горения, позволяет на выходе получать водяной пар с параметрами: температура до  $550^\circ \text{C}$ , давление до 1,5 МПа, массовый расход до 1.6 кг/ч. Парогенератор состоит из трех

последовательно соединенных нагревательных блоков. 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.



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 подачи топлива, 7 – электронные весы, 8 – индикаторы контрольно-измерительных приборов, 9 – компьютер, 10 – топливопровод, 11 – система вентиляции

Рисунок 1. Огневой экспериментальный стенд



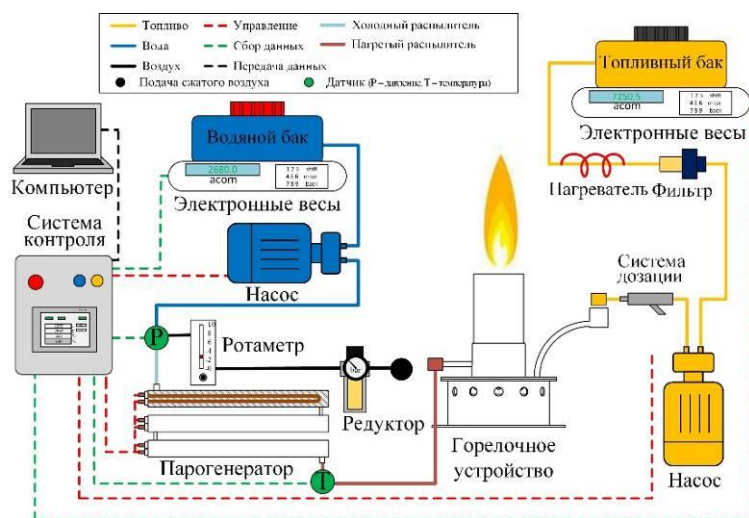


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки

Система подачи сжатого воздуха, необходимая для реализации воздушной газификации, происходящей при подаче воздушной струи в зону неполного окисления топлива вместо паровой, состоит из редуктора (максимальное давление до 1,6 МПа) с манометром, подключенного к главной 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). Для нагрева воздуха, система подключается к электрическому парогенератору вместо подачи питательной воды.

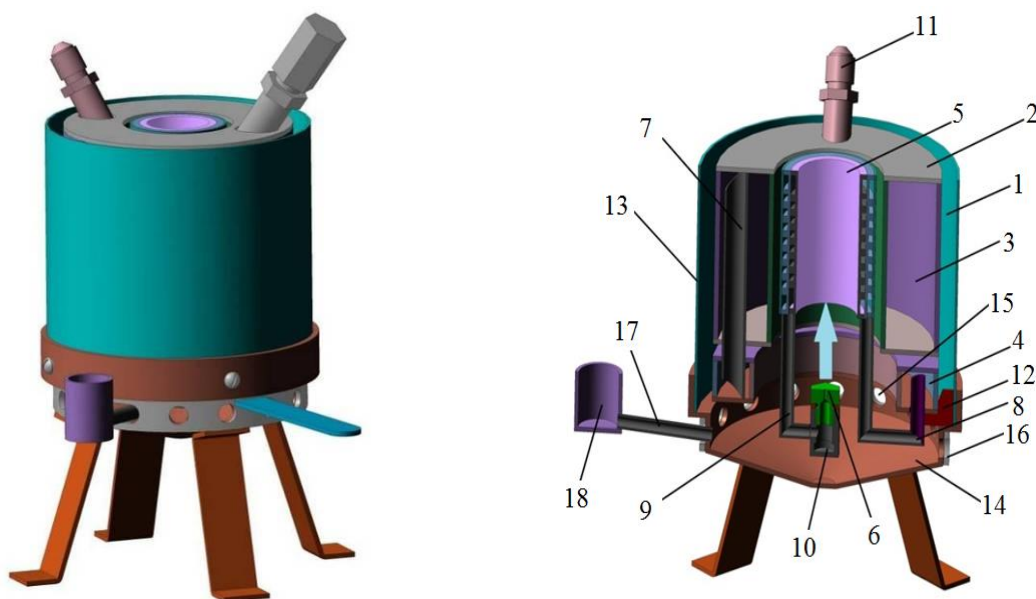
Регулировка параметров и подача сжатого воздуха происходит путем установления постоянного давления на редукторе, после чего выставляется значение расхода воздуха запорным клапаном в ротаметре. Так как ротаметр работает по принципу постоянного перепада давления, то показания, снимаемые со шкалы, корректируются по стандартным условиям давления и температуры. А именно:

$$Q_2 = Q_1 \sqrt{\frac{P_1 T_2}{P_2 T_1}},$$

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).

## Объекты исследования

Одним из исследуемых лабораторных образцов горелочных устройств является автономное горелочное устройство мощностью до 10 кВт и объемом бачка-испарителя  $\sim 300 \text{ см}^3$  [38], которое непрерывно работает на дизельном топливе при атмосферном давлении (рабочее давление в бачке-испарителе  $0.5 \div 1.0 \text{ МПа}$ , время непрерывной работы в автономном режиме – до 1 ч) [39-40]. Расход топлива составляет  $0.5 \div 0.8 \text{ кг/час}$ . Средний расход пара составляет  $\sim 0.25 \text{ кг/ч}$ . 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 3.



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 – воздуховоды, 16 – заслонка, 17 – топливопровод,  
18 – топливоприемник

Рисунок 3. Автономное горелочное устройство  
для сжигания жидких углеводородов

Устройство работает следующим образом (см. рисунок 4). Запуск происходит при помощи сухого горючего, и тепло выделяемое при его горении идет на начальную генерацию перегретого водяного пара, так как в начале процесса паровая струя из форсунки отсутствует и при сжигании жидких топлив в таком случае, формируется факел, содержащий большое количество сажевых частиц (см. рисунок 4-а). Происходит нагрев воды и повышение давления в бачке-испарителе. Часть тепла, выделяющегося при горении, расходуется на дополнительный нагрев пара в пароперегревателе. Далее, насыщенный водяной пар через паросепаратор и пароперегреватель истекает в виде вертикально направленной струи из паровой форсунки во внутреннюю цилиндрическую полость, окруженную пароперегревателем, создавая необходимый перепад давления в топке за счет эжекционного эффекта. После этого, в топливоприемник из системы дозирования топлива поступает жидкое топливо, и по топливопроводу попадает в топку, где происходит его неполное термическое разложение и горение при недостатке окислителя с выделением большого количества сажи. Однако, наличие струи перегретого водяного в области, содержащей частицы сажи, приводит к паровой газификации, при этом образующийся синтез-газ ( $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ ) догорает в факеле, смешиваясь с кислородом из атмосферы. В результате изменяется состав смеси, происходит резкая интенсификация горения. При достижении в испарителе давления  $\sim 0.7$  МПа устанавливается режим интенсивного стабильного горения с ярким коротким факелом, не содержащим сажи (см. рисунок 4-б).

На основе используемого горелочного устройства для проведения будущих исследований и дальнейшего практического применения было разработано автономное горелочное устройство длительного действия мощностью  $\sim 25$  кВт, время работы которого составляет около 6 ч [41] (см. рисунок 5-а). Благодаря разработанному пусковому горелочному устройству [42] (см. рисунок 5-б) мощностью  $\sim 3$  кВт, время выхода автономного устройства длительного действия на установившийся режим удалось сократить с 30 минут до пяти.



а)



б)

Рисунок 4. Горение жидкого углеводородного топлива в горелочном устройстве: а) режим горения в отсутствие струи водяного пара; б) установившийся «бессажевый» режим горения



а)



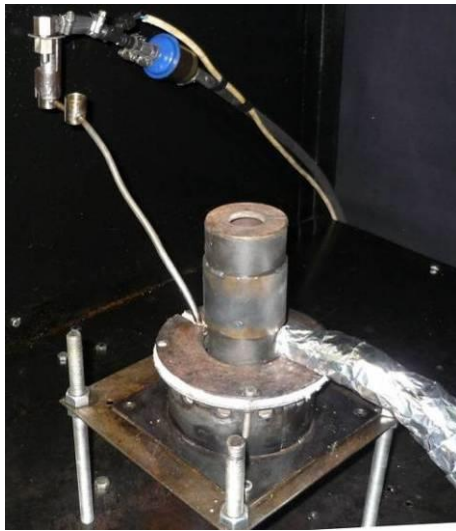
б)

Рисунок 5. Горение жидкого углеводородного топлива: а) в автономном горелочном устройстве длительного действия; б) в пусковом горелочном устройстве

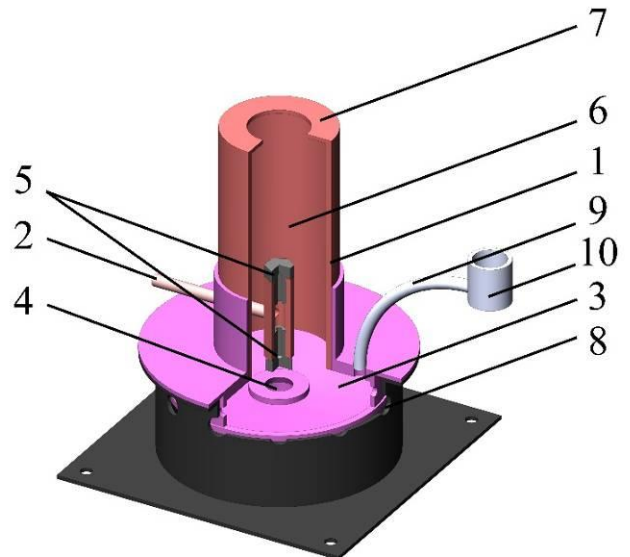
Другим изучаемым объектом является горелочное устройство, изображенное на рисунке 6. Основными элементами горелочного устройства являются: цилиндрический корпус, топочная камера с форкамерой, паровые форсунки,

камера газогенерации и выходное сопло [43-46]. 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 используемого горелочного устройства предусмотрен естественный приток воздуха из атмосферы в зону реакции – через отверстия в нижней части топочной камеры. Имеющие выход на внешний парогенератор две паровые форсунки (угол раскрытия  $17^\circ$ ) установлены соосно над топочной камерой у основания камеры газогенерации и ориентированы вертикально (выходной диаметр 0.5 мм). Нижняя 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. Подача струи пара в топочную камеру позволяет повысить температуру элементов топки и предотвращает коксование поверхностей. Верхняя форсунка направлена вверх – в камеру газогенерации.

Схема процесса сжигания в данном горелочном устройстве аналогична ранее описанной для лабораторного образца автономного горелочного устройства. А именно, испаряющиеся компоненты топлива воспламеняются в топочной камере, и продукты реакции поступают в камеру газогенерации, при перемешивании с направленной вверх струей перегретого водяного пара происходит газификация продуктов термического разложения и неполного сгорания горючего. Образующаяся горючая смесь CO и H<sub>2</sub> догорает в факеле, смешиваясь с кислородом из внешней атмосферы (см. рисунок 7). Конструкция данного горелочного устройства отличается от предыдущей тем, что пар (или воздух) подается к форсунке от электрического парогенератора.



а)



б)

1 – корпус, 2 – место подачи пара, 3 – топка, 4 – форкамера, 5 – паровая форсунка, 6 – камера газогенерации, 7 – выходное сопло, 8 – воздуховоды, 9 – топливопровод, 10 – топливоприемник

Рисунок 6. Горелочное устройство для сжигания жидких углеводородов с принудительной подачей перегретого водяного пара: а) фотография; б) схема

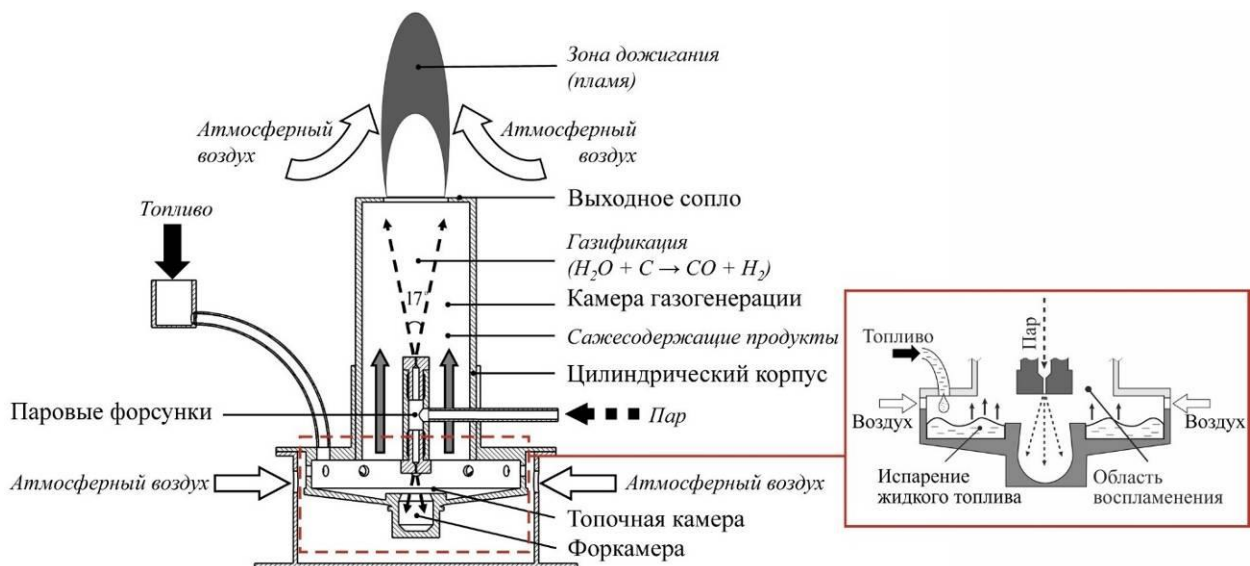


Рисунок 7. Схема работы горелочного устройства

## Методология и методы исследования

Для оптической диагностики газодинамической структуры пламени использовалась двухкомпонентная PIV-система «Полис», разработанная в ИТ СО РАН (рисунок 8) и включающая импульсный лазер, цифровую камеру со светофильтром. В качестве трассеров применялись продукты термического разложения силиконового масла, добавляемого в топливо (50 г на 1 кг топлива).

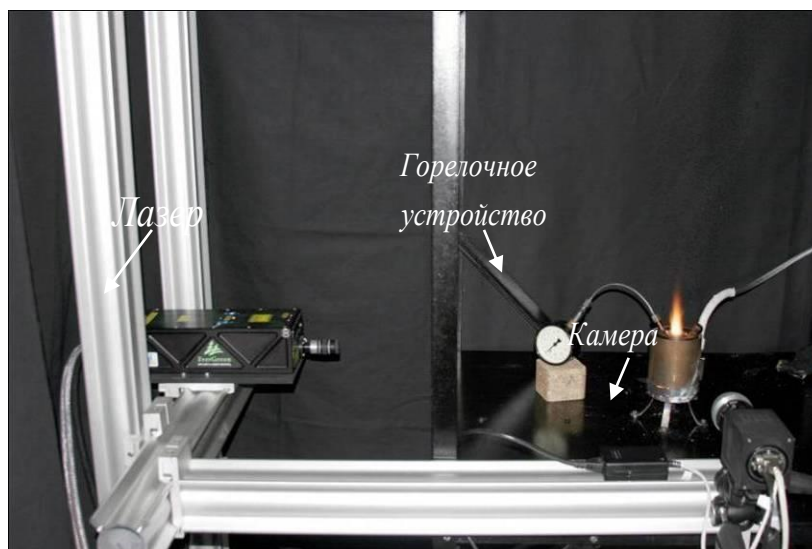
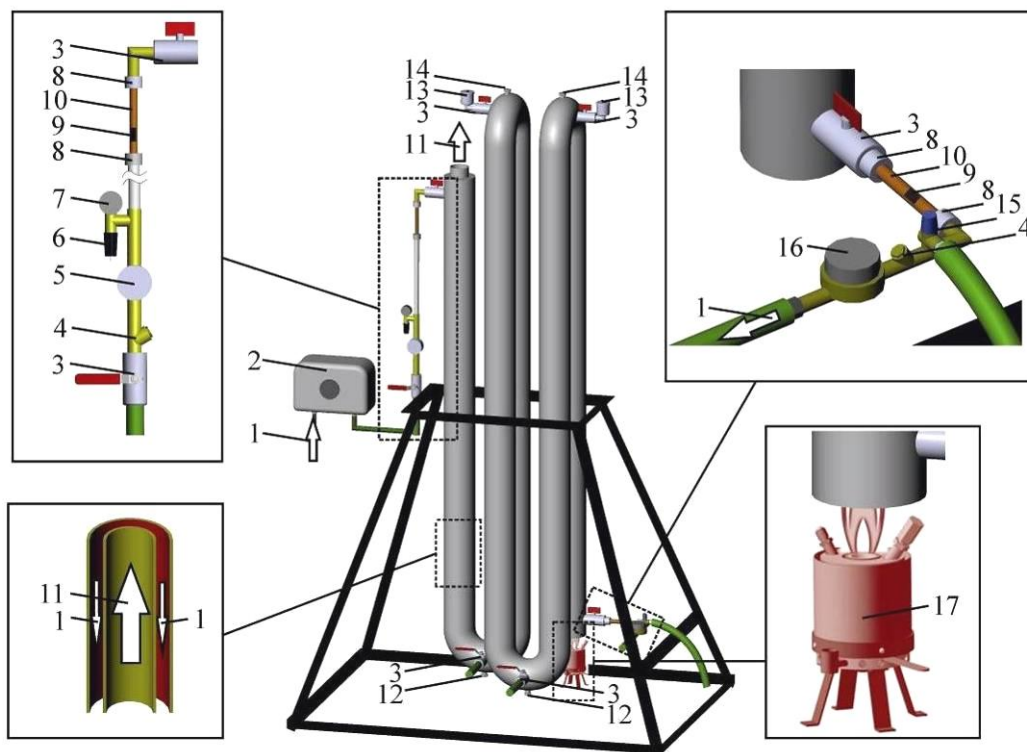


Рисунок 8. PIV-измерения поля скорости в факеле

Изучение распределения температуры во внешнем факеле проводилось при помощи тепловизионной камеры FLIR серии JADE, обладающей широким диапазоном параметров как по скорости съемки (до 18 000 кадров/с), так и по измеряемому спектру излучения. Использовался узкополосный оптический фильтр в диапазоне 2.5–2.7 мкм, соответствующем излучению паров воды и углекислого газа – основных продуктов сгорания. Для согласования и контроля результатов использовалась платинородий-платинородиевая термопара, установленная на координатно-перемещающем устройстве, синхронизированном с системой сбора данных, включающей 24-битный АЦП.

Исследование тепловыделения и состава продуктов сгорания осуществлялось на проточном калориметре, оснащенный газоанализатором (рисунок 9). Термопарами измерялась разность температуры теплоносителя (воды) на входе и

выходе калориметра, контролировались объемный расход теплоносителя и массовый расход топлива, по этим данным рассчитывалось удельное тепловыделение и тепловая мощность.



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

Рисунок 9. Схема проточного калориметра

Для измерения газового состава уходящих газов использовался газоанализатор TESTO 350, зонд забора пробы которого устанавливался на выходе уходящих газов из калориметра. Газоанализатор позволяет измерять



содержание компонентов, таких как O<sub>2</sub> (до 25% об.), CO (до 500 ppm), CO<sub>2</sub> (до 50% об.), NO (до 300 ppm), NO<sub>2</sub> (до 500 ppm) и SO<sub>2</sub>. (до 5000 ppm).

### **Результаты исследований. Автономное горелочное устройство.**

Для автономного ГУ при различных режимных параметрах получены распределения осредненной температуры, осевой и радиальной компонент осредненной скорости в факеле (Рисунок 10), измерены пульсационные характеристики скорости потока. Результаты измерений демонстрируют существенное влияние водяного пара на характеристики режима горения дизельного топлива. Подача в зону реакции струи перегретого пара приводит к резкой интенсификации горения, что выражается в формировании высокотемпературного короткого внешнего факела (Рисунок 10-а), скорость в котором достигает 30 м/с (Рисунок 10-г). Зарегистрированы высокочастотные пульсации давления в факеле (~100 Гц), свидетельствующие о нестационарности процесса смесеобразования и воспламенения в ГУ. На основании сопоставления результатов термопарных и оптических измерений температуры определено значение коэффициента излучения пламени. Показано, что максимальная температура (до 1500°C) достигается на некотором расстоянии от среза горелки (Рисунок 10-в), т.е. догорание смеси происходит во внешнем факеле при поступлении окислителя из атмосферы.

На проточном калориметре в различных режимах проведены измерения количества тепла, получаемого от продуктов сгорания дизельного топлива в автономном ГУ. С учетом погрешности (2.5%) удельное тепловыделение ( $q$ ) составило 99.6–94.7% от высшей теплотворной способности (44.9 МДж/кг), что свидетельствует о высокой полноте сгорания топлива. Мощность тепловыделения ( $W$ ), относительный массовый расход пара или воздуха ( $\gamma = F/F_f$ , где  $F$  – массовый расход пара или воздуха,  $F_f = 0.65$  кг/ч – массовый расход топлива) и объемный расход уходящих газов ( $G_{fg}$ ) приведены в Таблице 1. Сравнение показателей в режимах горения с подачей пара и воздуха производилось при сопоставимых

значениях  $W$  (с учетом погрешности). При этом давление в бачке-испарителе в режиме с паром составляло 7 атм, а с воздухом – 5 атм.

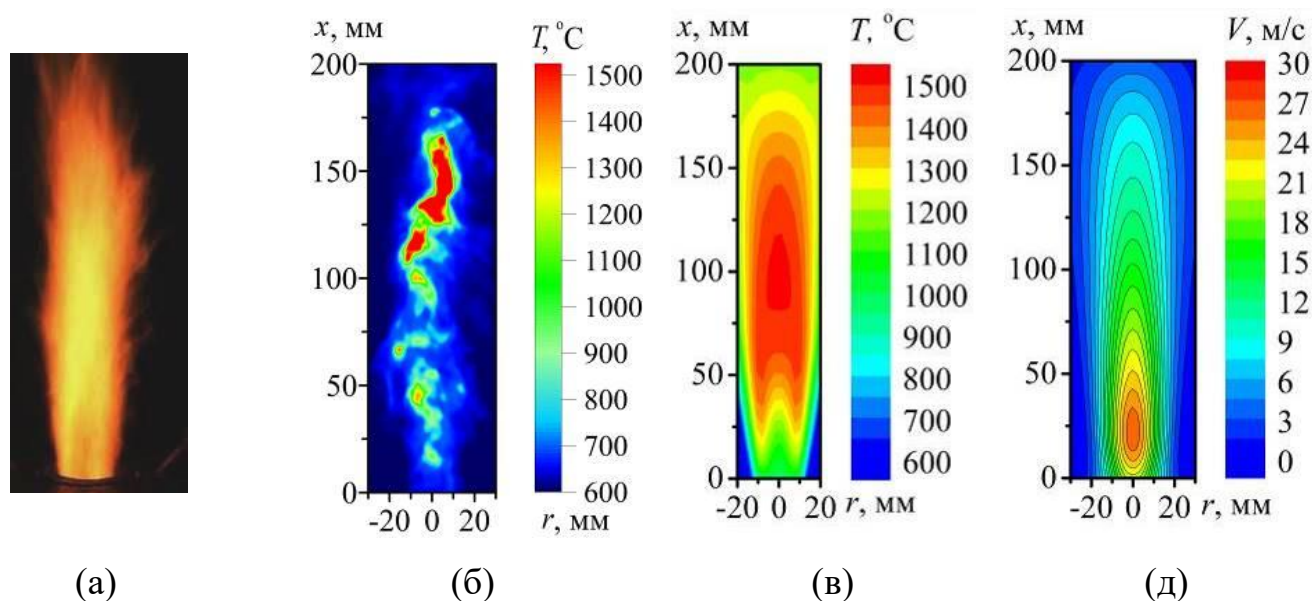


Рисунок 10. Фотография факела (а); «мгновенное» распределение температуры в факеле, измеренной тепловизором (б); распределение средней во времени температуры в факеле, измеренной термопарой (в); распределение аксиальной компоненты средней скорости (г)

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

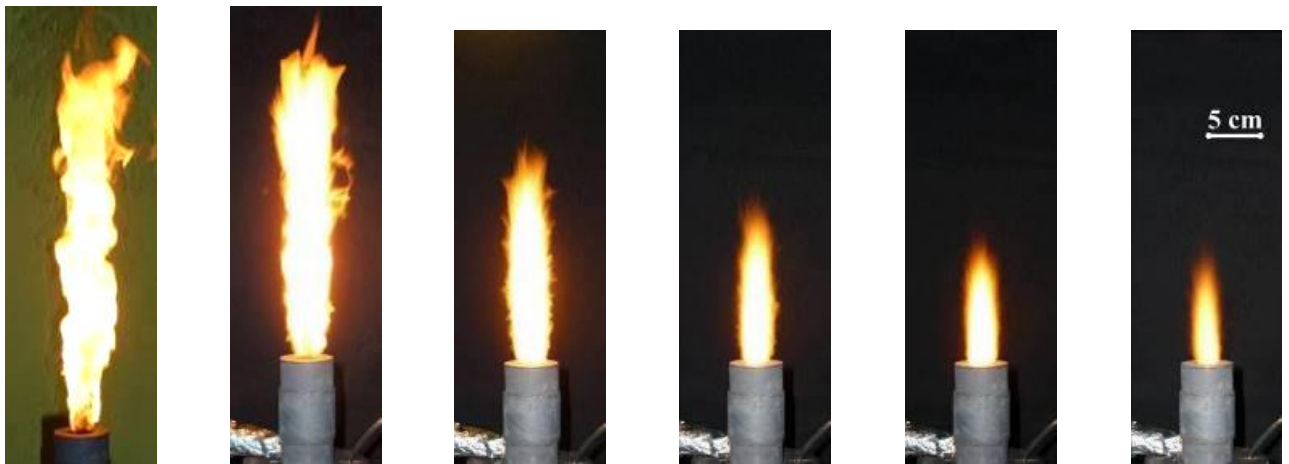
Режим горения	$\gamma$	$q$ , МДж/кг	$W$ , кВт	$G_{fg}$ , м <sup>3</sup> /ч	Содержание веществ в газообразных продуктах сгорания			
					O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>
с подачей пара	0.4	43.6	7.9	17.8	% об.		ppm	
					12.5	6.4	20±8	17±6
					±2.1	±1.6	г / кг топлива	
							0.6	0.9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

Результаты газового анализа показали, что режим горения дизельного топлива в автономном ГУ с подачей пара обеспечивает более низкую объемную концентрацию контролируемых токсичных компонентов продуктов сгорания по сравнению с режимом горения с подачей воздуха ( $\text{NO}_x$  – до 30%,  $\text{CO}$  – в два с половиной раза).

### **Результаты исследований. Горелочное устройство с принудительной подачей перегретого водяного пара.**

На ГУ с принудительной подачей перегретого водяного пара исследовано влияние параметров пара (расход и температура) на характеристики горения дизельного топлива и отработанного масла. При заданном массовом расходе топлива (0.8 кг/ч) исследованы режимы с различными значениями отношения массового расхода пара и воздуха к расходу топлива ( $\gamma$ ) при разной температуре в парогенераторе (150–565°C), перегрев пара достигал 425°C. Отработанное масло предварительно нагревалось до 50°C для снижения вязкости. Представленные на Рисунке 11 фотографии факела и карта режимов демонстрируют определяющее влияние  $\gamma$  на характер процесса.

По результатам термопарных измерений для режимов с паром и с воздухом, область с максимальной температурой приближается к срезу горелки по мере увеличения  $\gamma$  (Рисунок 12). При этом согласно видеорегистрации, длина факела уменьшается. С уменьшением  $\gamma$  максимальное значение температуры при горении дизельного топлива снижается от 1500°C до 1400°C. При подаче, вместо перегретого пара, струи воздуха максимальное значение температуры достигает 1600°C. При горении отработанного масла с подачей пара максимальная температура достигает 1400°C, а в случае подачи воздуха – 1600°C.



$\gamma = 0.2$

$\gamma = 0.3$

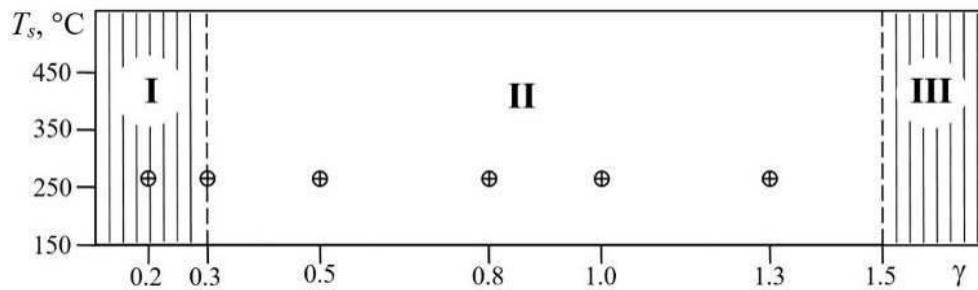
$\gamma = 0.5$

$\gamma = 0.8$

$\gamma = 1.0$

$\gamma = 1.3$

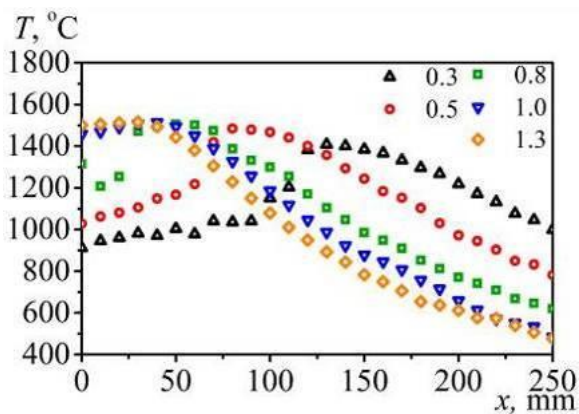
(а)



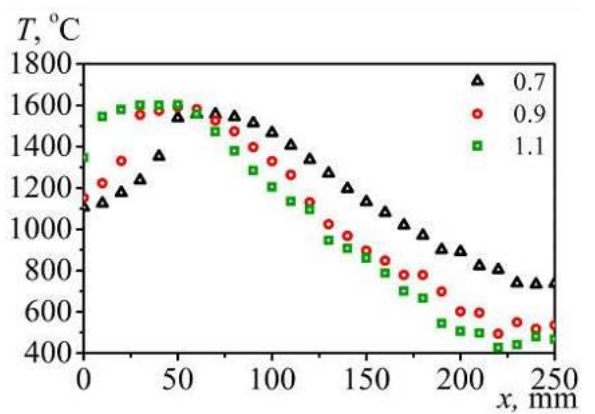
(б)

Рисунок 11. Вид факела (а) и карта режимов (б) в зависимости от  $\gamma$ .

Характерные режимы: пламя с высоким содержанием сажи (I); устойчивое интенсивное горение (II); срыв горения (III). Символами  $\oplus$  отмечены режимы, соответствующие фотографиям



(а)



(б)

Рисунок 12. Распределение средней во времени температуры вдоль оси внешнего факела при различном значении  $\gamma$  в режимах горения дизельного топлива: с паром (а); с воздухом (б)

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

По результатам газового анализа состава уходящих газов при сжигании дизельного топлива и отработанного масла в ГУ с принудительной подачей перегретого водяного пара определен диапазон режимов ( $0.8 < \gamma < 1.0$ ), обеспечивающих низкое содержание токсичных продуктов сгорания. На Рисунке 13 представлена объемная концентрация CO и NO<sub>x</sub> для режимов горения с подачей пара и воздуха, а на Рисунке 14 – данные по количеству этих компонентов в расчете на единицу массы топлива в уходящих газах.

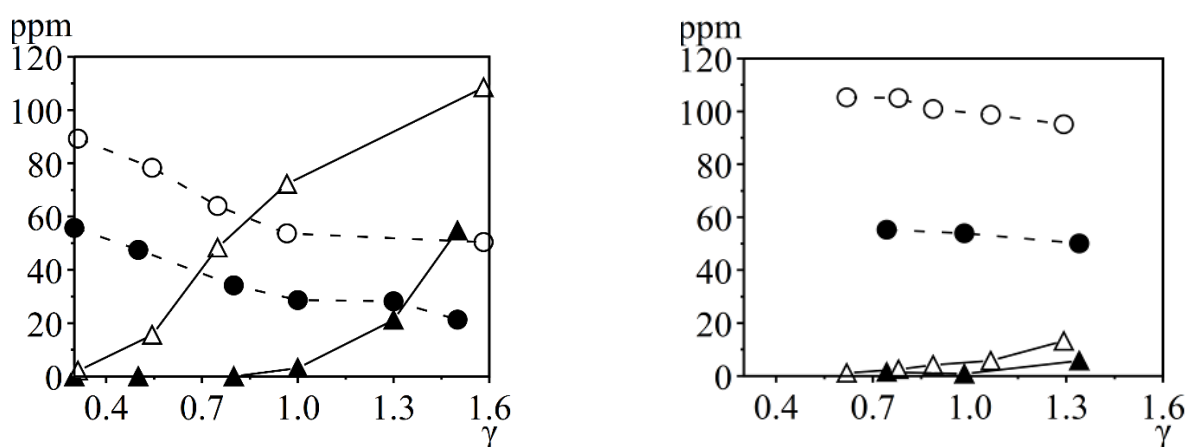


Рисунок 13. Концентрация CO (▲,△) и NO<sub>x</sub> (●,○) для дизельного топлива (▲,●) и отработанного масла (△,○) в режиме: (а) с паром;(б) с воздухом

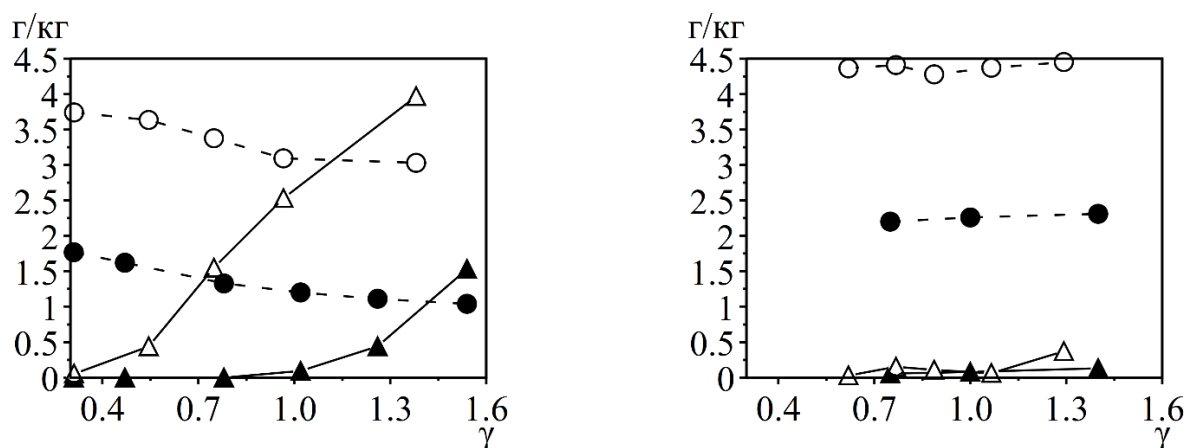


Рисунок 14. Количество CO (▲,Δ) и NO<sub>x</sub> (●,○) для дизельного топлива (▲,●) и отработанного масла (Δ,○) в режиме: (а) с паром; (б) с воздухом

Концентрации NO<sub>x</sub> в продуктах сгорания дизельного топлива снижается от 60 до 20 ppm с ростом относительного расхода пара от 0.3 до 1.5; концентрация CO ниже предела чувствительности прибора (2 ppm) при  $\gamma < 0.8$ , но резко возрастает при  $\gamma > 0.8$ . При горении отработанного масла концентрации NO<sub>x</sub> и CO существенно выше. Влияния температуры пара и воздуха на концентрацию NO<sub>x</sub> и CO не обнаружено.

При использовании воздушной струи (вместо пара) концентрации NO<sub>x</sub> и CO слабо зависят от расхода и температуры воздуха. При низкой концентрации CO в продуктах сгорания дизельного топлива и отработанного масла концентрация NO<sub>x</sub> соответствует худшим показателям режима горения с паром. Тем самым, подача воздуха (в отличие от подачи пара) не позволяет управлять экологическими показателями сжигания жидких углеводородов. Использование пара обеспечивает возможность выбора режима с низкой эмиссией как CO, так и NO<sub>x</sub> при достаточно высокой полноте сгорания топлива, причем основным управляющим параметром служит отношение массовых расходов пара и топлива.

Согласно данным, приведенным в Таблице 2, экологические показатели разработанных ГУ испарительного типа при сжигании дизельного топлива с подачей перегретого водяного пара значительно ниже предельно допустимых концентраций и удовлетворяют наиболее жестким требованиям, предъявляемым к

жидкотопливным ГУ (третий класс Стандарта DIN EN 267:2011-11), превосходят удельные показатели (на кг топлива) сопоставимых по мощности горелочных устройств ведущих производителей.

Таблица 2. Классификация горелочных устройств Weishaupt по удельным выбросам NO<sub>x</sub> и CO и показатели исследуемых ГУ

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

## **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: 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 работы горелочного устройства;

в) доказано, что паровая газификация продуктов термического разложения и испарения топлива по сравнению с воздушной газификацией обеспечивает значительно более низкий уровень производства 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. 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.

3. 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).

## Список использованной литературы

1. Хитрин, Л.Н. Физика горения и взрыва. – М.: Изд-во Московского университета, 1957.
2. Частухин, В.И. Топливо и теория горения / В.И. Частухин, В.В. Частухин. – Киев: Выща школа, 1989.
3. Ентус, Н.Р., Шарихин В.В. Трубчатые печи в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности / Н.Р. Ентус, В.В. Шарихин. – М.: Химия, 1987.
4. Рабинович, О.М. Котельные установки. – Л.: Машгиз, 1963.
5. Карабин, А.И. Сжигание жидкого топлива в промышленных установках. – М.: Metallurgizdat, 1957.
6. Хзмалян, Д.М. Теория горения и топочные устройства / Д.М. Хзмалян, Я.А. Каган. – М.: Энергия, 1976.
7. Спейшер, В.А. Повышение эффективности использования газа и мазута в энергетических установках / В.А. Спейшер, А.Д. Горбаненко. – М.: Энергоиздат, 1982.
8. Furimsky, E. Gasification in petroleum refinery of 21st century // Oil & Gas Science and Technology. – 1999. – Vol. 54. – No. 5. – P. 597-618.
9. 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.
10. Dryer, F. L. Water addition to practical combustion systems — Concepts and applications // Symposium on Combustion. – 1977. – Vol. 16. – P. 279–295.
11. Зельдович, Я.Б. Окисление азота при горении / Я.Б. Зельдович, П.Я. Садовников, Д.А. Франк-Каменецкий. – М. ; Л.: АН СССР, 1947. – 150 с.
12. 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: NASA, 1944; Restricted Bulletin E4127. – 14 с.

13. 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.
14. 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. Poinot // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2012. – Vol. 37. – P. 9412–9422.
15. Lee, M.C. Experimental study on the effect of N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, and steam dilution on the combustion performance of H<sub>2</sub> 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.
16. Graus, W.H.J. Effects of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> control on energy-efficiency power generation / W.H.J. Graus, E. Worrell // *Energy Policy*. – 2007. – Vol. 35. – P. 3898–3908.
17. 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<sub>x</sub> / L. Cong, P. Dagaut // *Energy and Fuels*. – 2009. – Vol. 23. – P. 725–734.
18. Farokhipour, A. A numerical study of NO<sub>x</sub> reduction by water spray injection in gas turbine combustion chambers / A. Farokhipour, E. Hamidpour, E. Amani // *Fuel*. – 2018. – Vol. 212. – P. 173–186.
19. 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.
20. 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.
21. Integrated pollution prevention and control. Reference document on best available techniques for large combustion plants. – European Commission, 2006. – 580 c.

22. Skalska, K. Trends in NO<sub>x</sub> abatement: A review / K. Skalska, J.S. Miller, S. Ledakowicz // *Science of the Total Environment*. – 2010. – Vol. 408. – P. 3976–3989.
23. Correa, S.M. Power generation and aeropropulsion gas turbines: from combustion science to combustion technology // *Symposium on Combustion*. – 1998. – Vol. 27. – P. 1793–1807.
24. Matynia, A. Comparative study of the influence of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O 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.
25. Babkin, V.S. Effect of water vapor on the normal burning velocity of a methane–air mixture at high pressures / V.S. Babkin, A.V. Vyun // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 1971. – Vol. 7, N. 3 – P. 339–341.
26. 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.
27. 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.
28. 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.
29. Fells, I. Burning velocity of methane-air flames / I. Fells, A.G. Rutherford // *Combustion and Flame*. – 1969. – Vol. 13. – P. 130–138.
30. 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.
31. 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.
32. Cong, T.L. Oxidation of ethylene and propene in the presence of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O: experimental and detailed kinetic modeling study / T.L. Cong, E. Bedjanian, P. 49
33. Алексеенко, С.В. Нанокластерное инициирование горения неконденсированных углеводородных топлив / С.В. Алексеенко, С.Э. Пащенко, В.В. Саломатов // Инженерно-физический журнал. – 2010. – Т. 83, № 4. – С. 682-693.
34. 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.
35. 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.
36. 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.
37. 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 ; опубл. 20.07.2014, Бюл. № 20.
38. Алексеенко, С.В. Сажепаровый режим горения жидких углеводородов: распределение скорости в факеле горелки / С.В. Алексеенко, И.С. Ануфриев, М.С. Вигриянов, В.М. Дулин, Е.П. Копьев, О.В. Шарыпов // Теплофизика и аэромеханика. – 2014. – Т. 21, № 3. – С. 411-414.
  39. Anufriev, I.S. Study of flame characteristics during liquid hydrocarbons combustion with steam gasification / I.S. Anufriev, E.P. Kopyev, E.L. Loboda // Proc. SPIE 9292, 20th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – 2014. – 6 p.
  40. 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.
  41. Пат. РФ № 2705495, F23Q 13/00, F23C 99/00, F23L 7/00. Пусковое горелочное устройство / Алексеенко С.В., Вигриянов М.С., Копьев Е.П., Ануфриев И.С., Шарыпов О.В. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН). – № 2019101398; заявл. 17.01.2019 ; опубл. 07.11.2019, Бюл. № 31.
  42. Anufriev, I.S. Thermography of flame during diesel fuel combustion with steam gasification / I.S. Anufriev, S.S. Arsentyev, M.V. Agafontsev, E.P. Kopyev, E.L. Loboda, E.Yu. Shadrin, O.V. Sharypov // Journal of Physics: Conf. Series. – 2017. – Vol. 925. – Article No. 012014. – 6 p.
  43. Kopyev, E.P. Thermography of flame during combustion of diesel fuel in the vaporizing burner / E.P. Kopyev, M.V. Agafontsev, E.L. Loboda, E.Yu. Shadrin //

IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2018. – Vol. 1128. – Article No. 012067. – 7 p.

44. Алексеенко, С.В. Влияние параметров перегретого водяного пара на процесс горения жидких углеводородов / С.В. Алексеенко, И.С. Ануфриев, С.С. Арсентьев, М.С. Вигриянов, Е.П. Копьев, О.В. Шарыпов // Теплофизика и аэромеханика. – 2019. – Т. 26, № 1. – С. 109-113.
45. Anufriev, I.S. Diesel fuel combustion in a direct-flow evaporative burner with superheated steam supply / I.S. Anufriev, S.V. Alekseenko, O.V. Sharyпов, E.P. Kopyev // Fuel. – 2019. – № 115723.