

Отзыв

официального оппонента

о диссертации **Ануфриева Игоря Сергеевича** «ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРИ СЖИГАНИИ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВАХ С ПОДАЧЕЙ ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА», представленной на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

В настоящее время *актуальной задачей* является утилизация накопленных на промышленных предприятиях огромных количеств жидких углеводородных отходов: отработанные моторные и трансмиссионные масла, смазочные жидкости, нефтяные шламы, отходы нефтедобычи и нефтепереработки. Значительная часть этих отходов может подвергаться сжиганию. Технологии утилизации этих дешевых энергоносителей с производством тепловой энергии, должны иметь низкий уровень выбросов NOx и CO. Известные технологии сжигания жидкого топлива не всегда соответствуют этим требованиям. Поэтому *стоит задача* в создании технологий, обеспечивающих высокую полноту сгорания и относительную безвредность продуктов. Для этого *необходимо глубокое понимание закономерностей физико-химических процессов горения* в зависимости от их состава и, в связи с этим, *создание устройств*, обеспечивающих оптимальный учёт этих закономерностей.

Например, разработка перспективных горелочных устройств для сжигания жидких углеводородов требует изучения ряда взаимосвязанных процессов, таких как диспергирование топлива, формирование пространственной структуры двухфазного реагирующего потока, межфазный тепло- и массообмен, образование частиц сажи, смесеобразование, воспламенение, газификация и выгорание топлива, производство продуктов сгорания без нарушения нормативов по вредным выбросам. Эти процессы служат предметом многочисленных современных исследований, одним из которых является метод впрыска пара при сжигании низкокачественных видов жидкого углеводородного топлива и опасных промышленных отходов. Этот метод давно используется в дизельных двигателях, в газотурбинных установках, при газификации твердого топлива и биотоплива. Однако на сегодняшний день упомянутые процессы недостаточно хорошо изучены.

Диссертационная работа Ануфриева И.С. *соответствует приоритетному направлению* Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации «Переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии». Она ставит своей *целью* исследование экспериментальных и теоретических доказательств энергоэффективности и экологической чистоты продуктов *при сжигании дизельного и некондиционных топлив при впрыскивании водяного пара*. Для достижения поставленной цели разработан и научно обоснован новый тип горелочного устройства с подачей перегретого водяного пара. Полученные характеристики процессов в этих горелочных устройствах показали своё преимущество по сравнению с применяемыми технологиями. Результаты исследований вносят вклад в развитие научных основ по решению задач экологически чистой и ресурсосберегающей теплоэнергетики.

Представленная на отзыв диссертация изложена на 254 страницах, содержит 70 рисунков и 34 таблицы, состоит из введения, 4-х разделов, заключения и 5-и приложений.

Список литературы составляет 201 источник, из них 31 – публикации автора по теме диссертационной работы.

Во введении обоснована *актуальность темы диссертации*, определены основные цели и задачи работы и используемые методы исследования. Коротко описаны основные научные результаты, их научная новизна и приведены основные положения, выносимые на защиту.

В разделе 1 представлен *обзор научно-технической литературы*, проанализированы отечественные и зарубежные источники по теме диссертации. Описаны основные особенности сжигания жидкого топлива. Выполнен анализ работ по использованию воды (пара) в процессе горения углеводородов, описаны основные эффекты, достигаемые при таком способе сжигания. Показано, что использование водяного пара является эффективным способом снижения содержания NOx и CO в продуктах сгорания широкого спектра углеводородов. Проведены патентные исследования жидкотопливных горелочных устройств, показаны основные недостатки аналогов, сделан вывод о том, что исследуемое горелочное устройство обладает новизной и изобретательским уровнем, соответствует условию промышленной применимости. Проведен обзор рынка горелочных устройств до 100 кВт на жидком топливе, который показал перспективы вывода новой продукции на рынок котельного оборудования и горелочных устройств в России.

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

Дисперсный состав сажи фиксировался диффузионным спектрометром аэрозолей (ДСА), разработанным в ИХКГ СО РАН. В результате найдены преимущественные размеры *первичных* частиц в потоке, получены распределения частиц по размерам во время горения в начале и конце факела, а также охлаждённых продуктов. При этом с подачей струи пара основное количество частиц на выходе из горелки ($h = 0$) имеет размер 40 ± 15 нм и частицы не агрегированы. С подачей струи воздуха спектр распределения частиц по размерам шире, и наибольший размер частиц оказывается в пределах 100 нм. Концентрация частиц сажи в факеле горелочного устройства достигает 10^8 см⁻³. Вследствие перемешивания потока с воздухом из окружающей атмосферы концентрация быстро понижается с удалением от основания факела и в продуктах сгорания составляет $5 \cdot 10^6$ см⁻³.

С использованием просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) изучена морфология *агрегатов*, образующихся при коагуляции первичных частиц сажи. В факеле агрегаты имеют цепочно-разветвлённую структуру, в продуктах сгорания они имеют более компактную форму с характерными размерами 200–500 нм. Первичные наночастицы в агрегатах характеризуются квази-сферической формой и луковичной структурой, с диаметром около 40 нм, который соответствует характерному размеру первичных частиц, определенному ДСА. При температуре пара 400 °С масса сажи в продуктах составляет ~0,1 %. Это показатель высокой степени сгорания топлива.

Отмечены *достоинства и недостатки* используемого горелочного устройства. В частности, *достоинством* является создание потока перегретого водяного пара без использования внешних устройств и источников энергии – пар генерируется за счёт нагрева воды от продуктов сгорания горелки; *недостаток* – трудно регулировать параметры пара, что отражается на неустойчивости воспламенения, высокой нестабильности горения в топочной камере, относительно быстрого коксования поверхностей горелок. Поэтому для сжигания тяжёлых и грязных топлив необходима разработка специальных способов подачи топлива и смешения его с паром.

В разделе 3 исследуются диспергирование и сжигание дизельного и некондиционного жидкого топлива (масла) в струе перегретого водяного пара или воздуха в перспективном прямоточном горелочном устройстве. Отличительной особенностью данного способа является то, что топливо и распыляющая среда – водяной пар или воздух – предварительно не смешаны друг с другом. Для производства пара используется автономный парогенератор, а горючее поступает тонкой струей к форсунке для пара, чем обеспечивается более устойчивая работа горелки. В результате не происходит коксование поверхностей горелки и засорение каналов подачи топлива. Предложенная конструкция горелочного устройства обеспечивает возможность распыления загрязненных, в том числе, механическими примесями и водой, некондиционных жидких углеводородов, таких как отработанное масло, отходы нефтедобычи и нефтепереработки. Строятся характеристики газокапельного потока и анализируются продукты сгорания.

Для диагностики потоков используются современные оптические методы: цифровой трассерной визуализации (particle image velocimetry, PIV и particle tracking velocimetry, PTV, теневой фотографии (shadow photography, SP), а также интерферометрический метод измерения размеров капель (interferometric particle imaging, IPI). С помощью этих методов проведены исследования основных параметров газокапельного потока (размеры капель, дисперсный состав, скорость несущей и дисперсной фазы, угол раскрытия струи) при распылении жидкого топлива струей газа при различных режимных параметрах (расход и температура пара/воздуха, расход и температура топлива).

Сначала на отдельной установке были проведены отдельные исследования диспергирования топлив струй воздуха и пара, а затем структура течения непосредственно в горелке при горении стандартного дизельного топлива и смеси отработанных моторных и трансмиссионных машинных масел. При этом массовая доля пара в смеси с топливом $\omega_v = F_v / (F_f + F_v) \cdot 100\%$ варьировалась от 17 до 48%. Температура пара выбиралась в диапазоне от насыщенного пара до условий, соответствующих промышленным, и варьировалась в диапазоне 150-550 °С с шагом около 100 °С, при этом максимальный перегрев пара достигал 400 градусов. Для сопоставления режимов с подачей пара и воздуха в качестве определяющего параметра выбрана интенсивность динамического воздействия газовой струи на каплю распыляемого топлива (влияющего на дисперсный состав и процессы переноса), связанная с потоком импульса и имеющая размерность силы: $F \cdot V$ (F – массовый расход газа, V – скорость газа на выходе из форсунки). Сопоставление режимов производилось при условии равенства указанного параметра. В координатах F_f / F_v построены карты режимов горения дизельного топлива и масла. Показано, что область горения для дизельного топлива более широкая.

Выяснилось, что вязкость топлива сильно влияет на структуру потока в ближней области газокапельной струи. При распылении дизельного топлива уже на начальном участке формируется густой однородный туман, а при распылении масла вблизи форсунки помимо капель наблюдаются нити и плёнки жидкости, которые дробятся на капли ниже по потоку в его высокотемпературной части. Характерный диаметр капель во всех исследованных режимах составляет в зоне воспламенения 10-20 мкм. Расход и температура газа, соотношение расходов газа и топлива в исследуемом диапазоне не оказывают заметного влияния на дисперсный состав. Также размер капель в зоне воспламенения не зависит от типа используемых жидких углеводородов. Выбор несущей фазы (пар или воздух) тоже не приводит к изменению характерного диаметра капель.

В разделе 4 описаны экспериментальные исследования теплотехнических и экологических характеристик сжигания дизельного топлива и отработанного масла при распылении струей перегретого водяного пара (или воздуха) в зависимости от режимных параметров работы горелочного устройства проточного типа.

Для определения теплотехнических характеристик использовался проточный калориметр, а химического анализа продуктов – газоанализатор TESTO 350 (погрешность $\pm 5\%$). Приведены расчёты калориметра, которые гарантируют определение тепловой мощности и удельного количества тепла (мощность на единицу массы топлива) с точностью $\pm 2,5\%$, основной вклад в которую вносит дискретность импульсов прибора, регистрирующего расход теплоносителя в калориметре. Для измерения температуры в факеле использовалась тепловизионная камера фирмы FLIR специальной серии JADE J530SB (минимальное время экспозиции кадра 6 мкс). Диапазон измерения температур тепловизора определяется калибровками и составляет $583\div 1773$ К для выбранного фильтра. Для получения среднего значения температуры в данной работе измерения проводились с частотой 60 Гц в течение 20 с. Кроме этого, измерение температуры в высокотемпературном факеле горелочного устройства проводилось с помощью платинородий-платинородиевой термопары типа В (Pt-30%, Rh / Pt-6%, Rh). Диапазон измеряемых температур - $600\div 1600$ °С, а характерное время релаксации - 5 с.

В первую очередь, изучалось влияние температуры перегретого водяного пара на характеристики горения дизельного топлива. Оказалось, что температура перегретого водяного пара слабо влияет (в пределах погрешности измерений) на основные показатели сжигания топлива: удельное количество тепла, тепловую мощность, температуру факела, содержание NOx. Поэтому измерения проведены при постоянной температуре пара $T_s = (260\pm 10)$ °С, обеспечивающей достаточный перегрев пара и в то же время – невысокие затраты энергии на нагрев пара.

На основе визуальных наблюдений построены карты режимов горения в координатах F_f/F_v . С повышением расхода пара (при постоянном расходе топлива) размер факела уменьшается. С увеличением расхода топлива (при постоянном расходе пара), наоборот, размер факела увеличивается. Обозначена граница срыва пламени (I), область II, где предполагается хорошее горение с присутствием CO+H₂, и область III, где неполное сгорание с присутствием сажевых частиц. Границы области III построены на основе результатов газового анализа, в ней концентрации [CO] > 500 ppm. Для области II приведены распределения основных характеристик режимов сжигания: (а) высота внешнего факела горелки (мм), (б) удельное количество тепла, полученное от продуктов сгорания в калориметре q (МДж/кг) – верхнее значение, и тепловая мощность горелочного устройства W (кВт) – нижнее значение; (в) концентрация CO в продуктах сгорания (ppm); (г) концентрация NOx в продуктах сгорания (ppm); (д) {CO} (мг/кВт ч); (е) {NOx} (мг/кВт ч).

В области II выявлены подобласти режимов с предельно низкой концентрацией оксида углерода в продуктах сгорания [CO] < 50 ppm (синий цвет пламени) и {CO} (мг/кВт ч) = 5 мг/кВт ч. Также выявлены подобласти концентраций NOx и удельного количества {NOx} (суммарно NO и NO₂). Они примерно совпадают. Концентрация [NOx] не превышает 80 ppm, что соответствует уровню {NOx} = 90 мг/кВт ч. Минимальные значения {NOx} наблюдаются у левой границы области II, вблизи срыва пламени, и составляют около 40 мг/кВт ч и соответствует максимальной массовой доли пара в соотношении с топливом ω_v , близкой к 50 %. Однако вдоль линии минимальных значений {CO} (у правой границы) уровень {NOx} является максимальным, но не превышает 90 мг/кВт ч. Основная причина подавления производства NOx связана с понижением температуры пламени благодаря увеличению теплоемкости горючей смеси при наличии водяного пара. Наибольшее понижение максимальной температуры в факеле при этом зафиксировано на 180 градусов (понижается до 1173 °С). Исследуемая горелка по концентрациям CO и NOx, согласно стандарту DIN EN 267, удовлетворяет самому жесткому 3 классу, а в некоторых режимах имеет более улучшенные показатели по CO – в 12 раз, а по NOx – в 3 раза.

Приведены характерные результаты температурных измерений в пламени горелки на разной высоте, которые показали хорошее согласование результатов тепловизионных и

термопарных измерений. Зафиксирована турбулентная структура факела и диффузионный режим горения – догорание происходит за счёт окружающего воздуха.

Для оценки эффективности использования перегретого водяного пара проведены сопоставления результатов с данными при распылении дизельного топлива струей сжатого воздуха в координатах F_{air}/F_f . Карты $\{CO\}$, $\{NO_x\}$ имеют схожий вид с результатами при подаче пара. Минимальные значения $\{CO\}$ наблюдаются вдоль правой границы области II и достигают 6 мг/кВт ч. Режимы с минимальным уровнем $\{NO_x\} = 60$ мг/кВт ч соответствуют области максимального отношения массовых расходов воздуха и топлива, близкого к 50%. Таким образом, при сжигании дизельного топлива в струе с воздухом минимальное количество оксидов азота на единицу производимой тепловой энергии в полтора раза превышает значение $\{NO_x\}$ в режиме горения с паром, но при этом в обоих случаях наблюдаются высокие значения $\{CO\}$. А в области минимальных $\{CO\}$ значения $\{NO_x\}$ оказываются на 30 % выше в режиме с воздухом, что подтверждает преимущества технологии сжигания с использованием пара.

Важнейший результат испытаний – предложен, реализован и экспериментально изучен перспективный способ сжигания некондиционных жидких углеводородов в горелочном устройстве с распылением струей перегретого водяного пара. Показано, что в оптимальных режимах работы происходит практически полное сгорание топлива (до 98% дизельного и 97% отработанного масла). При этом количество сажевых частиц не превышает 0.1% от состава продуктов. Показано, что исследуемый способ сжигания жидкого топлива с запасом удовлетворяет наиболее жестким существующим нормативам по выбросу в атмосферу окислов CO и NO_x (третий класс по классификации EN 267).

Все экспериментальные исследования выполнены на высоком научном уровне с использованием самых передовых оптических методов и традиционных контактных методов диагностики. Полученные экспериментальные результаты имеют перспективы применения при создании экологически безопасных теплоэнергетических технологий утилизации горючих отходов, а также при численном моделировании.

По диссертации имеется ряд замечаний. Вот некоторые из них.

1. Несоизмеримо раздут раздел 1 по сравнению с другими разделами (стр. 22÷93 – 1/3 диссертации!). Для сравнения, раздел 2, 3 и 4, непосредственно связанные с работой занимают 93-107 стр., 108-145 стр. и 146-202 стр., соответственно. Всё, что написано в разделе 1 можно сократить в 2, 3, в 5 раз без ущерба качеству работы, чтобы отметить обоснование цели и задачи собственной работы. Производится совершенно излишний патентный поиск, который необходимо выполнять в текущей работе, но не описывать в диссертации. Обзор рынка горелочных устройств до 100 кВт можно было выразить в более компактной форме.

2. В работе рассмотрены только два важных параметра, влияющие на процесс горения: доля пара относительно горючего и его температура. Однако во всех процессах горения необходимо учитывать ещё один важный параметр, а именно, коэффициент избытка горючего или его обратную величину – коэффициент избытка воздуха. От соотношения компонентов горючей смеси зависит кинетика горения и состав продуктов. При создании физико-математической модели процессов горения в горелке без этого параметра не обойтись. Тогда более наглядным будет представление процесса горения в топочном устройстве, а также при полном сгорании топлива можно определить и соотношение расходов воздуха в топочное устройство и на догорание в наружном факеле.

3. В работе приведены распределения частиц сажи (рис. 2.5) и капель (рис. 3.18÷3.25) по размерам. Полезно было бы привести распределение частиц по массе, так как масса частицы пропорциональна кубу её диаметра. Часто оно бывает противоположно

распределению по размерам. Тогда более понятна будет оценка полноты сгорания топлива.

4. Не хватает оценки применимости исследуемой горелки в промышленных масштабах. Поскольку в устройствах с химическими реакциями масштабный эффект не работает из-за определённого времени перемешивания компонентов топлива и времени реакции, то каким образом будет набираться необходимая мощность камеры сгорания?

5. На рисунках с необходимой русской транскрипцией часто приводятся надписи латиницей (рис. 2.4, 2.6, 2.7, 3.6, 3.7, 3.8, 3.14, 4.8).

6. Оппоненту кажется излишним помещение в диссертацию фотографий патентов и благодарственных писем. Патенты упомянуты в списке литературы, а благодарности нужно принимать при успешном использовании защищаемого метода сжигания в промышленных масштабах.

Приведенные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации. Все результаты получены при комплексном подходе – взаимопроверкой расчётных и экспериментальных данных. Основные результаты, отмеченные в диссертации, доложены на научных международных и российских конференциях, опубликованы в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК России. Полученные И.С. Ануфриевым результаты можно квалифицировать как новое крупное достижение в области теплофизики. Несомненно, дальнейшие исследования найдут практическое использование в области теплофизики и энергетики. Диссертационная работа И.С. Ануфриева по своим целям, задачам, содержанию, методикам исследования и научной новизне соответствует паспорту специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника. Автореферат адекватно и достаточно полно отражает содержание диссертации.

Считаю, что диссертация И.С. Ануфриева соответствует требованиям пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 (ред. от 01.10.2018), а ее автор И.С. Ануфриев достоин присуждения ученой степени доктора технических наук по научной специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент

доктор технических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН.

Почтовый адрес: 630090, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева 15, e-mail: bykovskii@hydro.nsc.ru, тел. (383) 333-24-02

« 07 » ноя

Учёный секретарь

Подпись Быков

Заверяю

Поступила в Совет 7.11.19
Уч. секр. ИС Ануфриев / Любашевская И.В.

Быковский Федор Афанасьевич

Любашевская Ирина Васильевна

С отзывом ознакомлен  (Ануфриев И.С.) 07.11.2019г.