

УДК 62-643;536.463

**ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАМЕНИ ГОРЕЛОЧНОГО
УСТРОЙСТВА ПРИ РАСПЫЛЕНИИ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ
ПАРОВОЙ СТРУЕЙ****Е.П. Копьев¹, И.С. Ануфриев^{1,2}, Е.Ю. Шадрин¹,
Е.Л. Лобода^{3,4}, М.В. Агафонцев^{3,4}, М.А. Мухина¹**¹*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН*²*Новосибирский государственный технический университет*³*Томский государственный университет*⁴*Институт оптики атмосферы СО РАН*

В данной работе на примере дизельного топлива проведены тепловизионные и термодинамические измерения во внешнем факеле перспективного горелочного устройства с распылением струей перегретого водяного пара. Эксперименты проведены в широком диапазоне изменения режимных параметров (расход и температура пара и расход топлива). В измерениях использовалась тепловизионная камера фирмы FLIR специальной серии JADE J530SB и платиноводородно-платиноводородная термопара типа В. Получены мгновенные и средние поля температуры. Установлена зависимость эффективного коэффициента излучения пламени от расхода перегретого водяного пара и топлива. Выявлено влияние параметров работы устройства на температуру во внешнем факеле горелки. С увеличением расхода пара температура факела понижается, что препятствует образованию термических оксидов азота. И наоборот, с повышением расхода топлива увеличиваются размеры факела, что приводит к образованию высокотемпературных областей в факеле, способствующих образованию NO_x. Получено хорошее согласование результатов тепловизионных измерений с термодинамическими данными. Полученные данные могут быть использованы для численного моделирования исследуемого процесса горения.

Ключевые слова: горелочное устройство, горение жидких углеводородов, распыление топлива, сжигание в присутствии перегретого водяного пара, температура пламени, ИК-термография, термодинамические измерения.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-2-38-55

Введение

Вода (или пар) уже давно используется в целях снижения тепловой нагрузки и подавления детонации в камерах сгорания, обеспечения диспергирования тяжелых топлив [1] и создания водо-топливных эмульсий [2–4]. Использование воды является известным способом снижения концентрации NO_x [5–7]. В некоторых работах [8–10] считают, что такое снижение эмиссии NO_x заключается в снижении температуры и ламинарной скорости пламени благодаря увеличению теплоемкости горючей смеси при наличии водяного пара. К тому же при добавлении воды наблюдается увеличение времени задержки воспламенения [11]. Несмотря на очевидные достоинства применения воды и водяного пара на практике в тепловых машинах [12], некоторые авторы также утверждают, что помимо тепловой нагрузки присутствие водяного пара может оказывать эффект на протекание химических реакций в процессе горения [11, 13]. В частности, отмечается, что при-

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-38-50001-мол_нр).

© 2019 Е.П. Копьев, И.С. Ануфриев, Е.Ю. Шадрин, Е.Л. Лобода,
М.В. Агафонцев, М.А. Мухина

существование воды способствует образованию дополнительных радикалов ОН [14, 15], которые активно участвуют в окислении как частиц сажи [16], так и монооксида углерода [17].

Основываясь на данных преимуществах, нами предложен способ сжигания жидкого углеводородного топлива в потоке перегретого водяного пара [18–20], при котором происходит газификация углеродсодержащих частиц неполного сгорания жидких углеводородов. На горелочных устройствах испарительного типа было показано [18, 20] существенное влияние водяного пара на основные характеристики процесса. Указанный способ сжигания обеспечивает устойчивое воспламенение, высокую полноту сгорания топлива и низкое содержание токсичных компонентов в продуктах сгорания. Этот подход является перспективным для экологически безопасной утилизации низкокачественных жидких углеводородных топлив и горючих производственных отходов с получением тепловой энергии.

На основе данного принципа предложено горелочное устройство, реализующее перспективный способ распыла жидкого углеводородного топлива струей перегретого водяного пара [21]. Преимуществом данного способа является то, что топливо и распыляющая среда (несущая фаза) – водяной пар предварительно не смешаны друг с другом: пар подается из форсунки в виде струи, на которую натекает распыляемое жидкое топливо [22]. Такой способ исключает проблему коксования и засорения каналов подачи топлива, что улучшает эксплуатационные характеристики и надежность горелочного устройства, и позволяет сжигать загрязненное топливо и горючие жидкие отходы. При этом водяной пар играет и роль окислителя в реагирующей смеси, замещающего кислород воздуха. Для обоснования закономерностей влияния параметров струи водяного пара на основные характеристики процесса горения жидких углеводородов (состав продуктов сгорания и удельная мощность тепловыделения) необходимы экспериментальные исследования, в частности температура факела.

Наиболее распространенным средством измерения температуры пламени является термопара. Однако она позволяет получить лишь локальные, усредненные по времени значения температуры, чего во многих случаях недостаточно для понимания отдельных процессов. В работе [23] для расширения пространственного и временного диапазона измерений предлагается использовать инфракрасные камеры. Такие камеры (тепловизоры) могут использоваться для решения различных задач, например, для изучения разрушения материала под действием температуры [24–28], определения *jet fire radiation* [29–30], *pool fire radiation* [31–32], *thermal radiation of fire whirl* [33], *fireballs* [34], определения скорости испарения топливных капель [35] и т. п. Следует отметить, что 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 [31]. Для получения значения этого параметра можно использовать различные процедуры, при этом само значение в дальнейшем обычно принимают за постоянное по всей поверхности пламени [29]. Одним из таких методов является измерение температуры в точке пламени любым контактным методом, например, при помощи термопары [31]. 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, отно-

сительную влажность, так как все они связаны с передачей излучения через окружающую среду, которая разделяет излучающий объект и измерительное оборудование (ИК-камеру) [23, 36].

Следует отметить, что в работе [29] не указаны ни модель применяемой ИК-камеры, ни рабочий спектральный интервал, но делается вывод о том, что в vertical jet fires имеется зависимость коэффициента излучения пламени от расстояния между ИК-камерой и пламенем и от зоны горения, при этом пламя условно разделено на три участка. В работах [31, 34] для измерений применяются ИК-камеры длинноволнового ИК-диапазона, выбор которых может быть обусловлен наличием большой концентрацией сажи в объекте исследования [34]. В [33] приведены результаты исследования процесса горения в средневолновом ИК-диапазоне с рабочим спектральным интервалом ИК-камеры 3–5 мкм, это привело к тому, что у авторов получился существенный разброс коэффициента излучения по высоте пламени (различие более 60 %), что обусловлено разной толщиной пламени, которая влияла на вклад излучения сажи, а также в этот спектральный интервал попадает излучение СО и СО₂, интенсивность излучения которых превышает интенсивность излучения абсолютно черного тела, по которому калибруются ИК-камеры [37].

Основной вклад в излучение пламени вносят горячие газы СО₂ и Н₂О, а также твердые частицы сажи [38–39]. Горячие газы испускают излучение в определенных полосах инфракрасного спектра. Наиболее предпочтительные спектральные интервалы для измерения поля температуры в пламени с применением термографии на основе анализа спектров излучения пламени представлены в [37], а в [40] представлены некоторые практические результаты измерения характеристик пламени в ряде узких спектральных интервалов средневолнового ИК-диапазона.

В данной работе проведены исследования температуры факела перспективного горелочного устройства при сжигании дизельного топлива с распылением топлива струей перегретого водяного пара в широком диапазоне изменения режимных параметров. Измерения произведены в узком спектральном интервале средневолнового ИК-диапазона.

1. Экспериментальный стенд и методика измерений

Для изучения тепловых характеристик пламени использовалось горелочное устройство, которое показано на рис. 1. Горелка реализует предложенный способ диспергирования и сжигания, при котором происходит паровая газификация продуктов термического разложения и неполного сгорания жидкого топлива [20]. Конструкция лабораторного образца прямоточной горелки выбрана из соображений устойчивого воспламенения распыленного топлива в камере сгорания с последующей газификацией и дожиганием во внешнем факеле.

Основными элементами горелки являются: камера газогенерации; паровая форсунка, соединенная с внешним парогенератором; трубка для подачи топлива, расположенная вблизи выходного отверстия паровой форсунки; выходное сопло. Внешний диаметр горелки 60 мм, высота 140 мм, диаметр выходного отверстия горелки 25 мм. Размеры обеспечивают мощность горелочного устройства, необходимую и достаточную для проведения исследований в лабораторных условиях. В камере газогенерации имеются отверстия для притока воздуха из атмосферы. Паровая форсунка (выходной диаметр 0,6 мм) установлена вертикально в основании камеры газогенерации. Отличительной особенностью данного способа является то, что топливо и распыляющая среда (несущая фаза) – водяной пар предварительно не смешаны друг с другом, что на практике является важным преимуществом, поскольку нет контакта топлива с форсункой, не происходит коксование ее

поверхностей и засорение каналов с последующими сбоями в работе горелочного устройства. Кроме того, на верхнем торце корпуса установлено сопло в виде крышки с отверстием по центру для образования зоны рециркуляции, формируемой парами легкоиспаряющихся фракций жидкого топлива, способных легко воспламениться при пуске и стабилизировать воспламенение паромасляной струи при работе устройства. Топливо подается в топливоприемник через топливопровод, по которому стекает естественным способом в основание газовой струи тонкой струей. Стабильный расход топлива задается топливной форсункой и насосом и контролируется при помощи электронных весов.

Рис. 1 – Горелочное устройство:

1 – цилиндрический корпус; 2 – паровая форсунка; 3 – воздухоподводящие отверстия; 4 – паропровод; 5 – топливоподающая трубка; 6 – скос; 7 – сопло; 8 – факел; 9 – зона рециркуляции

Fig. 1 – Burner:

1 – cylindrical casing; 2 – steam nozzle; 3 – air-supplying holes; 4 – steam line; 5 – fuel pipeline; 6 – chamfer; 7 – nozzle; 8 – flame; 9 – recirculation zone



Схема процесса в горелочном устройстве следующая. В паровую форсунку из парогенератора поступает перегретый водяной пар, который истекает из форсунки и формирует высокоскоростную струю. В основание паровой струи из топливоподающей трубки натекает тонкой струей жидкое топливо, которое при взаимодействии фаз распыляется и формируется устойчивый мелкодисперсный газожидкий поток. Кроме диспергирования топлива, обеспечивается его нагрев и испарение с последующей газификацией и сжиганием образующихся продуктов реакции во внешнем факеле устройства. Предложенная конструкция горелочного устройства обеспечивает возможность сжигания загрязненных, в том числе механическими примесями и водой, некондиционных жидких углеводородов, таких как отработанное масло, отходы нефтедобычи и нефтепереработки, с высокой энергоэффективностью и низкими показателями токсичных выбросов в атмосферу.

Измерение температуры в высокотемпературном факеле горелочного устройства при сжигании дизельного топлива с распылением струей перегретого водяного пара проводилось на основе ИК-метода диагностики пламени. Данный метод является бесконтактным и обладает, как отмечалось выше, 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 исследованиях нестационарных процессов; в-третьих, позволяет проводить измерения с высоким временным разрешением, что обеспечивает возможность регистрации пульсаций температуры в турбулентном факеле.

Для измерения температуры использовалась тепловизионная камера фирмы FLIR специальной серии JADE J530SB. Данный прибор имеет высокое временное разрешение: частота кадров до 177 Гц при максимальном разрешении 320×240 пикселей и до 18 кГц при разрешении 320×4 пикселей. Минимальное время экспозиции кадра 6 мкс. Рабочий диапазон тепловизора находится в среднем ИК-диапазоне 2,5–5,0 мкм. В этом же спектральном диапазоне находятся мощные линии излучения пламени, обусловленные излучением горячих продуктов горения (в том числе – паров воды, CO_2 , CO). Для работы был выбран узкополосный дисперсионный оптический фильтр F0616 с полосой пропускания 2,5–2,7 мкм. Выбор фильтра обусловлен наличием мощных линий излучения продуктов горения в этом спектральном интервале [37]. Диапазон измерения температур тепловизора определяется калибровками и составляет 583–1773 К для выбранного фильтра. Для получения среднего значения температуры в данной работе измерения проводились с частотой 60 Гц в течение 20 с.

Для определения эффективного коэффициента излучения одновременно с измерениями тепловизором в контрольных точках (на оси горелочного устройства $r = 0$, на высоте $x = 100$ мм от среза горелки) регистрировалась температура с помощью платинородий-платинородиевой термопары типа В (Pt – 30 %, Rh / Pt – 6 %, Rh), диапазон измеряемых температур 600–1600 °С (кратковременно до 1800 °С), диаметр проволоки 300 мкм, длина термоэлектродов 70 см. Характерное время релаксации 5 с. Термоэлектроды защищены газонепроницаемым керамическим чехлом TRA-116316 (Al_2O_3 99 %, до 1900 °С) с диаметром 5 мм. Пределы допускаемых отклонений ТЭДС от номинальных статических характеристик преобразователя 0,5 % от значения измеряемой температуры. По полученным данным на средней по времени термограмме определялось среднее значение температуры в области расположения спая.

Следует отметить, что факел представляет собой полупрозрачную трехмерную оптическую среду, поэтому тепловизор регистрирует интегральное излучение от всех внутренних слоев среды, по значению которого, с использованием калибровок и эффективного коэффициента излучения, определяется температура в плоскости наблюдений (в плоскости симметрии горелочного устройства).

Для оценки достоверности полученных тепловизионных данных были проведены измерения средней температуры в высокотемпературном факеле горелочного устройства вдоль его оси при помощи термопары, используемой для определения эффективного коэффициента излучения. Рабочий конец термопары помещался в различные точки внутри факела при помощи координатно-перемещающего устройства (КПУ).

2. Результаты измерений и их анализ

Экспериментальные исследования проведены для различных режимов работы горелочного устройства: расход топлива F_f менялся в диапазоне от 0,4 до 2,2 кг/ч, а расход пара F_v – от 0,2 до 1,4 кг/ч. Также варьировалась и температура перегретого водяного пара T_s в диапазоне 150...550 °С. При этом относительный массовый расход пара $\gamma = F_v/F_f$ изменялся от 0,2 до 1,0. Выбранный диапазон режимных параметров соответствует проведенным ранее исследованиям тепловыделения и экологических характеристик горения [21].

Для характерного режима горения при постоянных расходах пара $F_v = 0,6$ кг/ч и топлива $F_f = 1,0$ кг/ч изучено влияние температуры пара на распределение температуры в факеле (рис. 2).

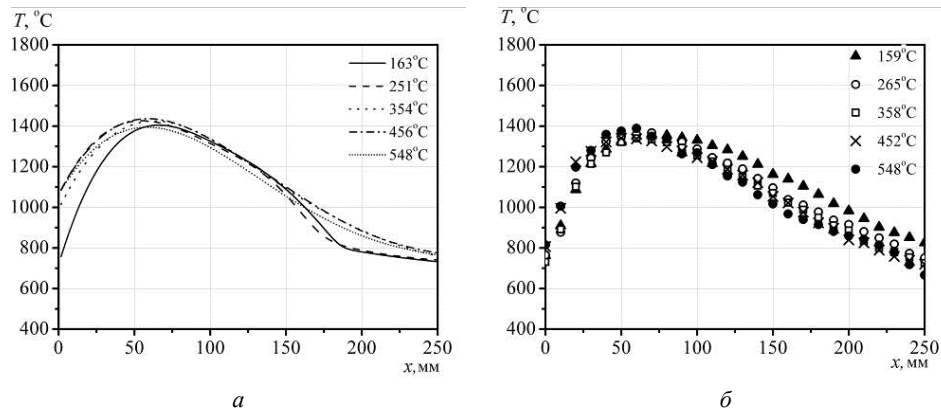


Рис. 2 – Распределение средней во времени температуры T в факеле вдоль вертикальной оси горелки при различной температуре пара T_s ($^{\circ}\text{C}$) и постоянных расходах пара $F_v = 0,6$ кг/ч и топлива $F_f = 1,0$ кг/ч:

a – измерения тепловизором; b – термопарные измерения

Fig. 2 – Distribution of the time-average flame temperature T over the burner vertical axis at different steam temperature T_s ($^{\circ}\text{C}$) and constant steam and fuel mass flow rates $F_v = 0,6$ kg/h and $F_f = 1.0$ kg/h according to measurements with:

a – thermal imaging camera and b – thermocouple

Анализ результатов (рис. 2) показывает, что температура перегретого водяного пара слабо влияет на распределение средней температуры в факеле. По мнению авторов, это может быть связано с тем, что при адиабатическом расширении паровой струи, истекающей из форсунки, ее температура в камере газогенерации резко снижается и при прохождении расстояния от среза паровой форсунки до зоны воспламенения (~ 60 мм) достигает примерно одного значения для разной начальной температуры пара. Другим объяснением этого может быть то, что температура в камере газогенерации намного больше температуры пара. Поэтому за счет конвективного и лучистого теплопереноса температура паровой струи в зоне воспламенения зависит уже от граничных условий. Наблюдается хорошее соответствие полученных результатов при помощи тепловизора (рис. 2, a) и термопары (рис. 2, b), что указывает на правильный выбор коэффициента излучения для тепловизионных исследований. Максимальная температура в факеле достигает 1400°C .

Похожая закономерность установлена и авторами в [21], где обнаружено, что температура пара не влияет на состав отработанных газов в исследуемом горелочном устройстве, поэтому дальнейшие исследования проведены при постоянной температуре пара $T_s = (260 \pm 10)^{\circ}\text{C}$, обеспечивающей достаточный перегрев пара для протекания реакции и в то же время с минимальными затратами энергии на перегрев.

На рис. 3 показаны зависимости давления пара и мощности горелки от режимных параметров. С увеличением расхода пара наблюдается увеличение давления в парогенераторе при одновременном снижении степени перегрева пара $T_s - T_b$ (рис. 3, a). Рассчитанная мощность горелочного устройства зависит только от расхода топлива, за исключением отдельных режимов, связанных с неполным сгоранием топлива (рис. 3, b).

На рис. 4, a показана зависимость высоты факела горелки от режимов подачи топлива и перегретого пара. Длина факела (характерный продольный размер светящейся зоны) в каждом режиме измерялась визуально по серии фотографий

в последовательные моменты времени. Средняя по времени длина факела изменяется от 0,1 до 0,5 м при увеличении F_f от 0,4 до 2,2 кг/ч. С ростом расхода пара (при постоянном расходе топлива) размер факела уменьшается, что связано с увеличением импульса струи (силой реакции струи) при повышении давления в парогенераторе. С увеличением расхода топлива (при постоянном расходе пара), наоборот, размер факела увеличивается.

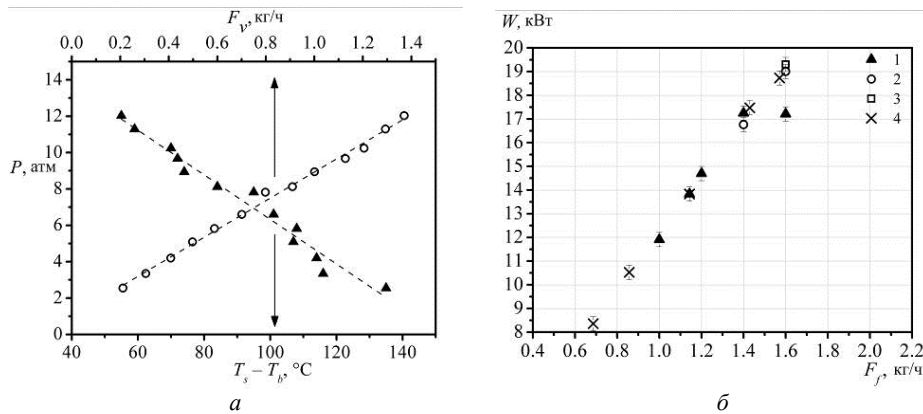


Рис. 3 – Зависимость давления в парогенераторе P от степени перегрева пара ($T_s - T_b$) и от расхода воды (пара) F_v (а); измеренная тепловая мощность горелочного устройства для разных расходов топлива (б):

$$1 - F_v = 0,8 \text{ кг/ч}; 2 - F_v = 1,2 \text{ кг/ч}; 3 - F_v = 1,4 \text{ кг/ч}; 4 - \gamma = 0,7; T_s = (260 \pm 10) ^\circ\text{C}$$

Fig. 3 – Pressure in the steam generator P as a function of the degree of steam superheat ($T_s - T_b$) and water (vapor) mass flow rate F_v (a); thermal power of the burner measured at different fuel mass flow rate (b):

$$1 - F_v = 0,8 \text{ kg/h}; 2 - F_v = 1,2 \text{ kg/h}; 3 - F_v = 1,4 \text{ kg/h}; 4 - \gamma = 0,7; T_s = (260 \pm 10) ^\circ\text{C}$$

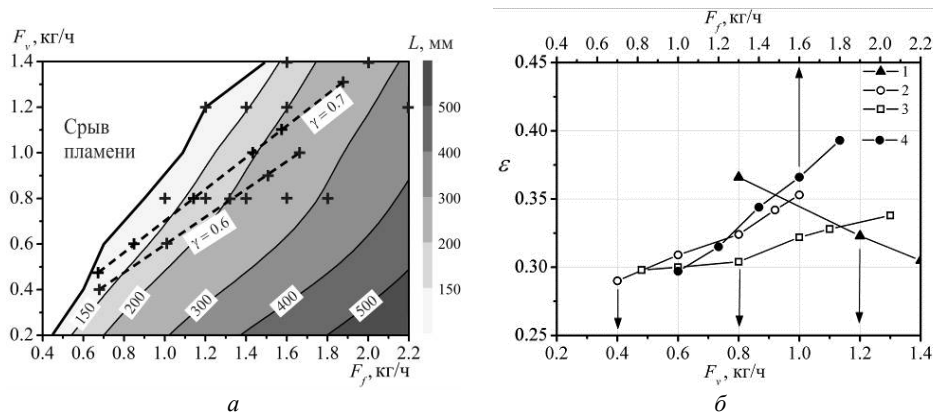


Рис. 4 – Зависимость высоты (мм) факела горелки от режимов подачи топлива и перегретого пара при сжигании дизельного топлива; символами «+» отмечены режимы, рассматриваемые в настоящей работе (а); коэффициент излучения пламени ϵ (б):

$$1 - F_f = 1,6 \text{ кг/ч}; 2 - \gamma = 0,6; 3 - \gamma = 0,7; 4 - F_v = 0,8 \text{ кг/ч}; T_s = (260 \pm 10) ^\circ\text{C}$$

Fig. 4 – Burner flame height (mm) versus fuel and superheated steam supply modes during diesel fuel combustion; «+» designates the modes considered in this work (a); flame emissivity ϵ (b):

$$1 - F_f = 1,6 \text{ kg/h}; 2 - \gamma = 0,6; 3 - \gamma = 0,7; 4 - F_v = 0,8 \text{ kg/h}; T_s = (260 \pm 10) ^\circ\text{C}$$

На рис. 4, б показаны зависимости коэффициента излучения пламени ϵ от режимных параметров горелки, который находится в диапазоне $\epsilon = 0,3\text{--}0,4$. Видно, что при увеличении расхода пара (для постоянного расхода топлива) значение ϵ снижается, в то же время с увеличением расхода топлива (при постоянном расходе пара) коэффициент излучения увеличивается. С одной стороны, это может быть связано с режимами работы горелки и зависит от концентрации перегретого водяного пара в смеси с топливом – при большем содержании пара, коэффициент излучения ниже. С другой стороны, незначительное изменение коэффициента излучения ($\epsilon = 0,3\text{--}0,4$) связано с тем, что в рабочем спектральном интервале $2,5\text{--}2,7$ мкм помимо газообразных продуктов горения присутствуют частицы сажи, концентрация которых напрямую зависит от полноты сгорания топлива. Влияние концентрации частиц сажи на коэффициент излучения пламени рассматривается в работах [33, 39], а в предельных случаях, когда для измерений используется широкий спектральный интервал или ИК-камеры длинноволнового спектрального диапазона, для пламен с большим содержанием твердых углеродных частиц, коэффициент излучения приближается к единице [34]. Следует отметить, что в условиях экспериментов, представленных в данной статье, увеличение расхода перегретого пара приводит к увеличению полноты сгорания топлива и соответственно снижению концентрации сажи, а увеличение расхода топлива приводит к снижению полноты сгорания и увеличению концентрации частиц сажи в пламени [21]. Это является объяснением полученной зависимости коэффициента излучения от режимов работы горелки. При постоянном относительном расходе пара γ коэффициент излучения ϵ почти не зависит от расхода пара и топлива ($\Delta\epsilon \sim 0,03$).

На рис. 5 представлены результаты экспериментов в факеле горелочного устройства для характерного режима при $F_v = 0,8$ кг/ч и $F_f = 1,2$ кг/ч. Фотография факела (рис. 5, а) и поле мгновенной температуры (рис. 5, б) демонстрируют существенно турбулентную структуру факела. Осредненное по 1200 мгновенным термограммам поле температуры показано на рис. 5, в. Видно, что изотермы имеют коническую форму характерную для диффузионного режима горения. Это означает, что выходящий из горелки поток содержит непрореагировавшие компоненты, которые догорают по мере поступления окислителя из окружающей атмосферы. На рис. 5, д показаны профили температуры в поперечном сечении факела на разной высоте. Видно хорошее согласование результатов тепловизионных измерений с термопарными данными.

Увеличение расхода пара (при постоянном расходе топлива) приводит к снижению температуры пламени (рис. 6), максимальная температура снижается более чем на 200°C . Данный эффект является по мнению авторов основной из причин подавления производства NO_x в присутствии перегретого водяного пара благодаря увеличению теплоемкости горючей смеси [21].

С увеличением расхода топлива (при постоянном расходе пара) область максимальной температуры сдвигается от среза горелки (рис. 7), что связано с увеличением мощности и, следовательно, размеров факела (рис. 4, а). Помимо этого увеличиваются и размеры высокотемпературной области внутри факела (профиль температуры становится шире), способствующей производству термических оксидов азота [21]. В среднем для исследуемых режимов максимальная температура в факеле находится на уровне 1350°C .

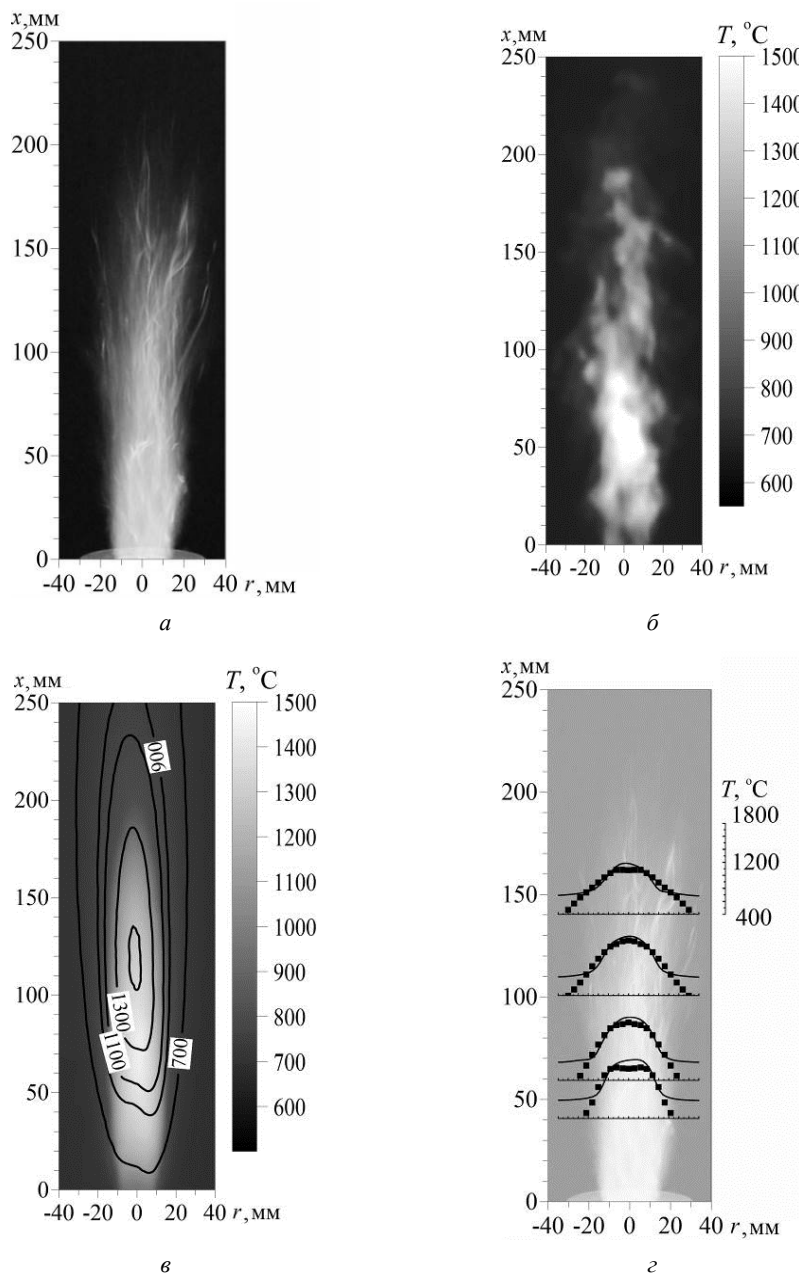


Рис. 5 – Результаты экспериментов при $F_v = 0,8 \text{ кг/ч}$ и $F_f = 1,2 \text{ кг/ч}$
 $(T_s = (260 \pm 10) ^\circ\text{C})$:

a – фотография внешнего факела; $б$ – поле мгновенной температуры; $в$ – поле средней температуры; $г$ – профили средней температуры на различной высоте факела («—» – измерения тепловизором, \square – измерения термопарой)

Fig. 5 – Experimental results at $F_v = 0,8 \text{ kg/h}$ and $F_f = 1,2 \text{ kg/h}$ and
 $T_s = (260 \pm 10) ^\circ\text{C}$:

a – external flame; b – instantaneous temperature field; c – average temperature field;
 d – average temperature profiles at different flame altitude («—» corresponds to the IR thermography data, and \square , to thermocouple measurements)

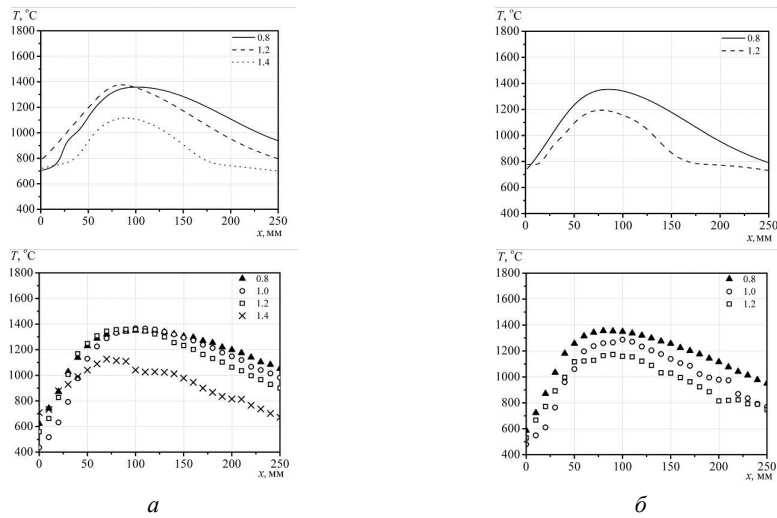


Рис. 6 – Распределение средней во времени температуры T в факеле вдоль вертикальной оси горелки ($T_s = (260 \pm 10)^\circ\text{C}$) для различных расходов пара F_v (кг/ч) при постоянном расходе топлива $F_f = 1,6$ кг/ч (а) и $F_f = 1,4$ кг/ч (б); сверху – тепловизионные измерения; снизу – термопарные

Fig. 6 – Distribution of the time-average temperature T in the flame over the burner vertical axis ($T_s = (260 \pm 10)^\circ\text{C}$) at different steam mass flow rates F_v (kg/h) and the constant fuel mass flow rate (a) $F_f = 1.6$ and 1.4 kg/h(b); the IR thermography results are on the top, and thermocouple data, at the bottom

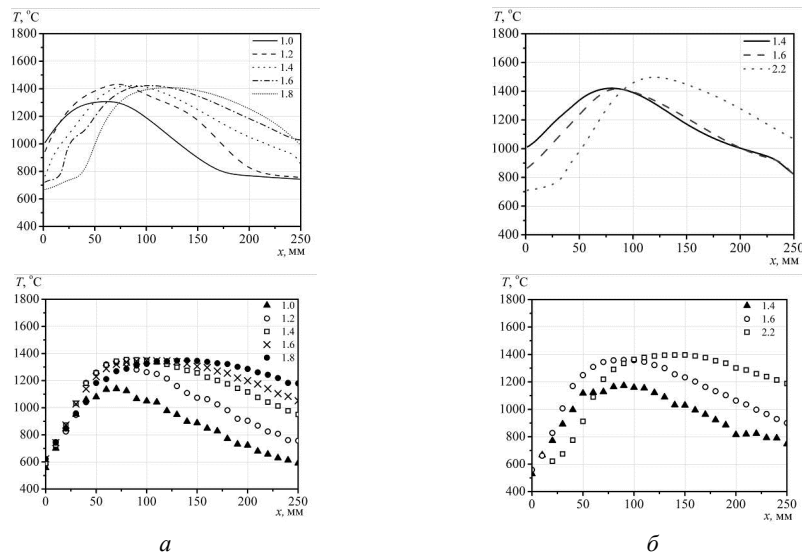


Рис. 7 – Распределение средней во времени температуры T в факеле вдоль вертикальной оси горелки ($T_s = (260 \pm 10)^\circ\text{C}$) для различных расходов топлива F_f (кг/ч) при постоянном расходе пара $F_v = 0,8$ кг/ч (а) и $F_v = 1,2$ кг/ч (б), сверху – тепловизионные измерения, снизу – термопарные

Fig. 7 – Distribution of the time-average flame temperature T over the burner vertical axis ($T_s = (260 \pm 10)^\circ\text{C}$) at different fuel mass flow rate F_f under the constant steam mass flow rate (a) $F_v = 0,8$ and 1,2 kg/h (b); the IR thermography results are on the top, and thermocouple data, at the bottom

Похожие зависимости температуры внешнего факела наблюдаются при постоянном параметре γ : с изменением расхода пара изменяются и размеры факела (рис. 4, а), и профиль температуры, максимальная температура факела, достигающая 1420 °С (рис. 8). Для всех исследованных режимов наблюдается хорошее согласование результатов тепловизионных измерений с термопарными данными.

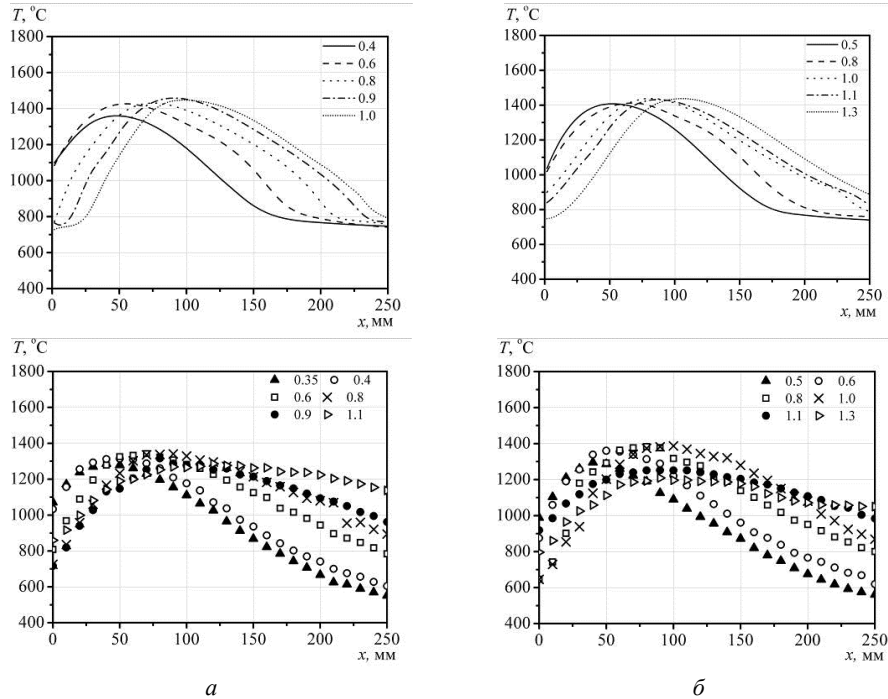


Рис. 8 – Распределение средней во времени температуры T в факеле вдоль вертикальной оси горелки ($T_s = (260 \pm 10)^\circ\text{C}$) для различных расходов пара F_v (кг/ч) при постоянном относительном расходе пара $\gamma = 0,6$ (а) и $\gamma = 0,7$ (б), сверху – тепловизионные измерения, снизу – термопарные

Fig. 8 – Distribution of the time-average flame temperature T over the burner vertical axis ($T_s = (260 \pm 10)^\circ\text{C}$) at different steam mass flow rate F_v , under the constant steam mass-flow ratio: (a) $\gamma = 0,6$ and (b) $0,7$; the IR thermography results are on the top, and thermocouple data, at the bottom

Заключение

В данной работе на примере дизельного топлива проведены тепловизионные и термопарные измерения температуры во внешнем факеле перспективного горелочного устройства с распылением жидкого топлива струей перегретого водяного пара. Эксперименты проведены для различных режимов работы горелочного устройства: расход топлива изменялся в диапазоне 0,4–2,2 кг/ч, расход пара – в диапазоне 0,2–1,4 кг/ч, температура перегретого водяного пара – в диапазоне 150–550 °С. При этом мощность горелки варьировалась в диапазоне 8–10 кВт. Длина факела в исследуемых режимах составляла 0,1–0,5 м

В экспериментах использовалась тепловизионная камера фирмы FLIR специальной серии JADE J530SB с оптическим фильтром 2,5–2,7 мкм и заданной частотой съемки 60 Гц. Получены поля мгновенной температуры, демонстрирующие существенно турбулентную структуру факела. Поля средней скорости имеют изо-

термы конической формы, характерные для диффузионного режима горения. Это означает, что выходящий из горелки поток содержит непрореагировавшие компоненты, которые догорают по мере поступления окислителя из окружающей атмосферы. С помощью платинородий-платинородиевой термопары получены профили средней во времени температуры вдоль вертикальной оси горелки.

Установлено, что температура перегретого водяного пара слабо влияет на изменение средней температуры в факеле, поэтому результаты получены для постоянной температуры перегретого пара 260 °С. Получены зависимости коэффициента излучения, который находится в диапазоне $\epsilon = 0,3\text{--}0,4$ и зависит от полноты сгорания топлива и концентрации сажи в пламени. Увеличение расхода пара (при постоянном расходе топлива) приводит к снижению температуры пламени, максимальная температура снижается более чем на 200 градусов. Данный эффект является по мнению авторов основной причиной подавления производства NO_x в присутствии перегретого водяного пара благодаря увеличению теплоемкости горючей смеси. И наоборот, с повышением расхода топлива увеличиваются размеры факела, что приводит к образованию высокотемпературных областей в факеле, способствующих образованию NO_x . Максимальная температура в факеле достигает 1440 °С.

Получено хорошее согласование результатов тепловизионных измерений с термопарными данными. Полученные результаты востребованы для анализа результатов измерений газового состава продуктов сгорания и тепловыделения с целью научного обоснования энергоэффективных и экологически безопасных способов утилизации некондиционных жидких углеводородов с получением тепловой энергии, а также верификации математической модели и численного моделирования процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ballester J.M., Fueyo N., Dopazo C.** Combustion characteristics of heavy oil-water // *Fuel*. – 1996. – Vol. 75. – P. 695–705. – DOI: 10.1016/0016-2361(95)00309-6.
2. 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*. – 2016. – Vol. 85. – P. 2111–2119. – DOI: 10.1016/j.fuel.2006.03.013.
3. **Samec N., Kegl B., Dibble R.W.** Numerical and experimental study of water/oil emulsified fuel combustion in a diesel engine // *Fuel*. – 2002. – Vol. 81. – P. 2035–2044. – DOI: 10.1016/S0016-2361(02)00135-7.
4. Characterization of light duty Diesel engine pollutant emissions using water-emulsified fuel / O. Armas, R. Ballesteros, F.J. Martos, J.R. Agudelo // *Fuel*. – 2005. – Vol. 84. – P. 1011–1018. – DOI: 10.1016/j.fuel.2004.11.015.
5. **Dryer F.L.** Water addition to practical combustion systems – Concepts and applications // *Symposium (International) on Combustion*. – 1977. – Vol. 16, iss. 1. – P. 279–295. – DOI: 10.1016/S0082-0784(77)80332-9.
6. **Watanabe H., Okazaki K.** Visualization of secondary atomization in emulsified-fuel spray flow by shadow imaging // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2013. – Vol. 34. – P. 1651–1658. – DOI: 10.1016/j.proci.2012.07.005.
7. Dissociative influence of H_2O vapour/spray on lean blowoff and NO_x reduction for heavily carbonaceous syngas swirling flames / D.G. Pugh, P.J. Bowen, R. March, A.P. Crayford, J. Runyon, S. Morris, A. Valera-Medina, A. Giles // *Combustion and Flame*. – 2017. – Vol. 177. – P. 37–38. – DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.11.010.
8. **Fells I., Rutherford G.** Burning velocity of methane-air flames // *Combustion and Flame*. – 1969. – Vol. 13. – P. 130–138. – DOI: 10.1016/0010-2180(69)90043-1.
9. **Babkin B.S., Vyun A.V.** Effect of water vapor on the normal burning velocity of a methane–air mixture at high pressures // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 1971. – Vol. 7, N. 3 – P. 339–341. – DOI: 10.1007/BF00742820.

10. 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. – DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.03.037.
11. **Cong L., Dagaut P.** Experimental and detailed modeling study of the effect of water vapor on the kinetics of combustion of hydrogen and natural gas, impact on NOx // *Energy and Fuels*. – 2009. – Vol. 23. – P. 725–734. – DOI: 10.1021/ef800832q.
12. Analysis of water-fuel ratio variation in a gas turbine with a wet-compressor system by change in fuel composition / Y. Cadavid, A. Amell, J. Alzate, G. Bermejo, G.A. Ebratt // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. – 2018. – Vol. 140, iss. 5. – Art. 052602. – DOI: 10.1115/1.4038137.
13. 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. – DOI: 10.1007/s10573-009-0078-5.
14. Numerical study on flame structure and NO formation in CH₄-O₂-N₂ counter flow 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. – DOI: 10.1002/er.1028.
15. 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*. – Orléans, France, 2003. – P. 221.
16. **Dryer F.L., Glassman I.** Combustion chemistry of chain hydrocarbons // *Alternative Hydrocarbon Fuels: Combustion and Chemical Kinetics*. – 1978. – Vol. 65, iss. 5. – P. 255–306. – DOI: 10.2514/5.9781600865367.0255.0306.
17. **Gottuk G.T., Roby R.J., Beyler C.L.** The role of temperature on carbon monoxide production in compartment fires // *Fire Safety Journal*. – 1995. – Vol. 24, iss. 4. – P. 315–331. – DOI: 10.1016/0379-7112(95)00027-5.
18. Характеристики сжигания дизельного топлива в горелочном устройстве с подачей струи перегретого водяного пара / С.В. Алексеенко, И.С. Ануфриев, М.С. Вигриянов, Е.П. Копьев, О.В. Шарыпов // *Физика горения и взрыва*. – 2016. – Т. 52, № 3. – С. 37–44.
19. Исследование наночастиц сажи при горении жидких углеводородов с подачей в зону горения струи перегретого водяного пара / И.С. Ануфриев, А.М. Бакланов, О.В. Боровкова, М.С. Вигриянов, В.В. Лещевич, О.В. Шарыпов // *Физика горения и взрыва*. – 2017. – Т. 53, № 2. – С. 22–30.
20. Burning of substandard liquid hydrocarbons with steam gasification / I. Anufriev, S. Arsentyev, M. Vigriyanov, E. Kopyev, O. Sharypov // *MATEC Web of Conferences*. – 2017. – Vol. 115. – Art. 03013. – DOI: 10.1051/mateconf/201711503013.
21. Combustion of sub-standard liquid hydrocarbons dispersed by a superheated steam jet / I.S. Anufriev, E.P. Kopyev, O.V. Sharypov, S.S. Arsentyev, Ya.A. Osintsev // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1128. – Art. 012059. – DOI: 10.1088/1742-6596/1128/1/012059.
22. **Kopyev E.P., Shadrin E.Yu.** Investigation of a promising method for liquid hydrocarbons spraying // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1105. – Art. 012092. – DOI: 10.1088/1742-6596/1105/1/012092.
23. **Rinieri F., Balbi J.-H., Santoni P.-A.** On the use of an infrared camera for the measurement of temperature in fires of vegetative fuels [Electronic resource] // *QIRT 2006. 8th Conference on Quantitative InfraRed Thermography*. – Padova, Italy, 2006. – URL: <http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2006/papers/011.pdf> (accessed: 06.08.2019).
24. Infrared thermography for condition monitoring – a review / S. Bagavathiappan, B.B. Lahiri, T. Saravanan, J. Philip, T. Jayakumar // *Infrared Physics and Technology*. – 2013. – Vol. 60. – P. 35–55. – DOI: 10.1016/j.infrared.2013.03.006.
25. **Švantner M., Vacíková P., Honner M.** IR thermography heat flux measurement in fire safety applications // *Infrared Physics and Technology*. – 2012. – Vol. 55. – P. 292–298. – DOI: 10.1016/j.infrared.2012.03.008.
26. 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 Physics and Technology*. – 2017. – Vol. 81. – P. 166–169. – DOI: 10.1016/j.infrared.2016.12.017.

27. Prediction of depth model for cracks in steel using infrared thermography / M. Rodríguez-Martín, S. Lagüela, D. González-Aguilera, J. Martinez // *Infrared Physics and Technology*. – 2015. – Vol. 1. – P. 492–500. – DOI: 10.1016/j.infrared.2015.06.013.
28. Comparison of ultrasonic velocity and IR thermography for the characterisation of stones / E. Grinzato, S. Marinetti, P.G. Bison, M. Concas, S. Fais // *Infrared Physics and Technology*. – 2004. – Vol. 46, iss. 1–2. – P. 63–68. – DOI: 10.1016/j.infrared.2004.03.009.
29. Thermal radiation from vertical jet fires / A. Palacios, M. Munoz, R.M. Darbra, J. Casal // *Fire Safety Journal*. – 2012. – Vol. 51. – P. 93–101. – DOI: 10.1016/j.firesaf.2012.03.006.
30. Experimental study on propane jet fire hazards: thermal radiation / B. Zhang, Y. Liu, D. Laboureur, M.S. Mannan // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. – 2015. – Vol. 54. – P. 9251–9256. – DOI: 10.1021/acs.iecr.5b02064.
31. Determination of flame emissivity in hydrocarbon pool fires using infrared thermography / E. Planas-Cuchi, J.M. Chatris, C. Lopez, J. Arnaldos // *Fire Technology*. – 2003. – Vol. 39. – P. 261–273. – DOI: 10.1023/A:1024193515227.
32. **Sudheer S., Prabhu S.V.** Measurement of flame emissivity of gasoline pool fires // *Nuclear Engineering and Design*. – 2010. – Vol. 240, iss. 10. – P. 3474–3480. – DOI: 10.1016/j.nucengdes.2010.04.043.
33. An experimental study on thermal radiation of fire whirl / P. Wang, N. Liu, Y. Bai, L. Zhang, K. Satoh, X. Liu // *International Journal of Wildland Fire*. – 2017. – Vol. 26. – P. 693–705. – DOI: 10.1071/WF17010.
34. Thermal radiation assessment of fireballs using infrared camera / P. Blankenhagela, K.-D. Wehrstedta, K.B. Mishrab, J. Steinbach // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. – 2018. – Vol. 54. – P. 246–253. – DOI: 10.1016/j.jlp.2018.04.008.
35. **Saha A., Kumar R., Basu S.** Infrared thermography and numerical study of vaporization characteristics of pure and blended bio-fuel droplets // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2010. – Vol. 53. – P. 3862–3873. – DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.05.003.
36. **Singh P., Chander S.** Heat transfer and fluid flow characteristics of a pair of interacting dual swirling flame jets impinging on a flat surface // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – Vol. 124. – P. 90–108. – DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.03.034.
37. **Лобода Е.Л., Рейно В.В., Агафонцев М.В.** Выбор спектрального интервала для измерения полей температуры в пламени и регистрации экранированных пламенем высокотемпературных объектов с применением методов ИК-диагностики // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2015. – Т. 58, № 2. – С. 124–128.
38. **Невский А.С.** Лучистый теплообмен в печах и топках. – М.: Металлургия, 1971. – 440 с.
39. Experimental methodology for characterizing flame emissivity of small scale forest fires using infrared thermography techniques / E. Pastor, A. Rigueiro, L. Zárate, A. Giménez, J. Arnaldos, E. Planas // *Forest Fire Research & Wildland Fire Safety*. – Rotterdam, 2002. – P. 1–11.
40. **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*. – 2014. – Vol. 67. – P. 566–573. – DOI: 10.1016/j.infrared.2014.09.041.

STUDY OF FLAME CHARACTERISTICS OF BURNER WHEN SPRAYING LIQUID HYDROCARBONS WITH A STEAM JET

**Kopyev E.P.¹, Anufriev I.S.^{1,2}, Shadrin E.Yu.¹, Loboda E.L.^{3,4},
Agafontsev M.V.^{3,4}, Mukhina M.A.¹**

¹ *Kutateladze Institute of Thermophysics, SB RAS, Novosibirsk, Russia*

² *Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

³ *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia*

⁴ *Institute of Atmospheric Optics, SB RAS, Tomsk, Russia*

In this work, flame characteristics of combustion of liquid hydrocarbons sprayed by a superheated water vapor in the burner device are investigated. Diesel fuel has been chosen as an example of liquid fuel. Flame characteristics like temperature distribution, effective emissivity are

measured in a wide range of system parameters (fuel and steam flow rates, steam temperature) by using a FLIR JADE J530SB thermal imaging camera and a platinum-rhodium-platinum-rhodium type B thermocouple. It has been obtained that at a steam flow rate increasing the flame temperature decreases. Also, the systems influence on the effective emissivity of the flame. The thermal imaging measurements are in a good agreement with the thermocouple data. The results can be used for numerical simulation of the combustion process under study.

Keywords: burner device, liquid hydrocarbons combustion, spraying fuel, combustion in the presence of superheated water vapor, flame temperature, IR thermography, thermocouple measurements.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-2-38-55

REFERENCES

1. Ballester J.M., Fueyo N., Dopazo C. Combustion characteristics of heavy oil-water emulsions. *Fuel*, 1996, vol. 75, pp. 695–705. DOI: 10.1016/0016-2361(95)00309-6.
2. Nadeem M., Rangkuti C., Anuar K., Haq M.R.U., Tan I.B., Shah S.S. Diesel engine performance and emission evaluation using emulsified fuels stabilized by conventional and gemini surfactants. *Fuel*, 2016, vol. 85, pp. 2111–2119. DOI: 10.1016/j.fuel.2006.03.013.
3. Samec N., Kegl B., Dibble R.W. Numerical and experimental study of water/oil emulsified fuel combustion in a diesel engine. *Fuel*, 2002, vol. 81, pp. 2035–2044. DOI: 10.1016/S0016-2361(02)00135-7.
4. Armas O., Ballesteros R., Martos F.J., Agudelo J.R. Characterization of light duty Diesel engine pollutant emissions using water-emulsified fuel. *Fuel*, 2005, vol. 84, pp. 1011–1018. DOI: 10.1016/j.fuel.2004.11.015.
5. Dryer F.L. Water addition to practical combustion systems – Concepts and applications. *Symposium (International) on Combustion*, 1977, vol. 16, iss. 1, pp. 279–295. DOI: 10.1016/S0082-0784(77)80332-9.
6. Watanabe H., Okazaki K. Visualization of secondary atomization in emulsified-fuel spray flow by shadow imaging. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, vol. 34, pp. 1651–1658. DOI: 10.1016/j.proci.2012.07.005.
7. Pugh D.G., Bowen P.J., March R., Crayford A.P., Runyon J., Morris S., Valera-Medina A., Giles A. Dissociative influence of H₂O vapour/spray on lean blowoff and NO_x reduction for heavily carbonaceous syngas swirling flames. *Combustion*, 2017, vol. 177, pp. 37–38. DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.11.010.
8. Fells I., Rutherford A.G. Burning velocity of methane-air flames. *Combustion and Flame*, 1969, vol. 13, pp. 130–138. DOI: 10.1016/0010-2180(69)90043-1.
9. Babkin B.S., Vyun A.V. Effect of water vapor on the normal burning velocity of a methane–air mixture at high pressures. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1971, vol. 7, no. 3, pp. 339–341. DOI: 10.1007/BF00742820.
10. Boushaki T., Dhue Y., Selle L., Ferret B., Poinot T. Effects of hydrogen and steam addition on laminar burning velocity of methane air premixed flame: Experimental and numerical analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, vol. 37, pp. 9412–9422. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.03.037.
11. Cong L., Dagaut P. 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. *Energy and Fuels*, 2009, vol. 23, pp. 725–734. DOI: 10.1021/ef800832q.
12. Cadavid Y., Amell A., Alzate J., Bermejo G., Ebratt G.A. Analysis of water-fuel ratio variation in a gas turbine with a wet-compressor system by change in fuel composition. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2018, vol. 140, iss. 5, art. 052602. DOI: 10.1115/1.4038137.
13. Matynia A., Delfau J.-L., Pillier L., Vovelle C. Comparative study of the influence of CO₂ and H₂O on the chemical structure of lean and rich methane–air flames at atmospheric pressure. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2009, vol. 45, no. 6, pp. 635–645. DOI: 10.1007/s10573-009-0078-5.
14. Hwang D.-J., Choi J.-W., Park J., Keel S.-I., Ch C.-B., Noh D.-S. Numerical study on flame structure and NO formation in CH₄-O₂-N₂ counter flow diffusion flame diluted with H₂O. *International Journal of Energy Research*, 2004, vol. 28, pp. 1255–1267. DOI: 10.1002/er.1028.

15. Renard C., Musick M., Van Tiggelen P.J., Vandooren J. Effect of CO₂ or H₂O addition on hydrocarbon intermediates in rich C₂H₄/O₂/Ar flames. *Proceedings of European Combustion Meeting*, Orléans, France, 2003, p. 221.
16. Dryer F.L., Glassman I. Combustion chemistry of chain hydrocarbons. *Alternative Hydrocarbon Fuels: Combustion and Chemical Kinetics*, 1978, vol. 65, iss. 5, pp. 255–306. DOI: 10.2514/5.9781600865367.0255.0306.
17. Gottuk G.T., Roby R.J., Beyler C.L. The role of temperature on carbon monoxide production in compartment fires. *Fire Safety Journal*, 1995, vol. 24, iss. 4, pp. 315–331. DOI: 10.1016/0379-7112(95)00027-5.
18. Alekseenko S.V., Anufriev I.S., Vigriyanov M.S., Kopyev E.P., Sharypov O.V. Characteristics of diesel fuel combustion in a burner with injection of a superheated steam jet. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2016, vol. 52, iss. 3, pp. 286–293. DOI: 10.1134/S0010508216030059. Translated from *Fizika gorennya i vzryva*, 2016, vol. 52, no. 3, pp. 37–44.
19. Anufriev I.S., Baklanov A.M., Borovkova O.V., Vigriyanov M.S., Leshchevich V.V., Sharypov O.V. Investigation of soot nanoparticles during combustion of liquid hydrocarbons with injection of a superheated steam jet into the reaction zone. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2017, vol. 53, iss. 2, pp. 140–148. DOI: 10.1134/S0010508217020034. Translated from *Fizika gorennya i vzryva*, 2017, vol. 53, no. 2, pp. 22–30.
20. Anufriev I., Arsentyev S., Vigriyanov M., Kopyev E., Sharypov O. Burning of substandard liquid hydrocarbons with steam gasification. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 115, art. 03013. DOI: 10.1051/mateconf/201711503013.
21. Anufriev I.S., Kopyev E.P., Sharypov O.V., Arsentyev S.S., Osintsev Ya.A. Combustion of sub-standard liquid hydrocarbons dispersed by a superheated steam jet. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1128, art. 012059. DOI: 10.1088/1742-6596/1128/1/012059.
22. Kopyev E.P., Shadrin E.Yu. Investigation of a promising method for liquid hydrocarbons spraying. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1105, art. 012092. DOI: 10.1088/1742-6596/1105/1/012092.
23. Rinieri F., Balbi J.-H., Santoni P.-A. On the use of an infra-red camera for the measurement of temperature in fires of vegetative fuels. *QIRT 2006. 8th Conference on Quantitative InfraRed Thermography*, Padova, Italy, 2006. Available at: <http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2006/papers/011.pdf> (accessed 06.08.2019).
24. Bagavathiappan S., Lahiri. B.B., Saravanan T., Philip J., Jayakumar T. Infrared thermography for condition monitoring – a review. *Infrared Physics and Technology*, 2013, vol. 60, pp. 35–55. DOI: 10.1016/j.infrared.2013.03.006.
25. Švantner M., Vacíková P., Honner M. IR thermography heat flux measurement in fire safety applications. *Infrared Physics and Technology*, 2012, vol. 55, pp. 292–298. DOI: 10.1016/j.infrared.2012.03.008.
26. Ding X.P., Li H.M., Zhu J.Q., Wang G.Y., Cao H.Z., Zhang Q., Ma H.L. Application of infrared thermography for laser metal-wire additive manufacturing in vacuum. *Infrared Physics and Technology*, 2017, vol. 81, pp. 166–169. DOI: 10.1016/j.infrared.2016.12.017.
27. Rodríguez-Martín M., Lagüela S., González-Aguilera D., Martínez J. Prediction of depth model for cracks in steel using infrared thermography. *Infrared Physics and Technology*, 2015, vol. 71, pp. 492–500. DOI: 10.1016/j.infrared.2015.06.013.
28. Grinzato E., Marinetti S., Bison P.G., Concas M., Fais S. Comparison of ultrasonic velocity and IR thermography for the characterisation of stones. *Infrared Physics and Technology*, 2004, vol. 46, iss. 1–2, pp. 63–68. DOI: 10.1016/j.infrared.2004.03.009.
29. Palacios A., Muñoz M., Darbra R.M., Casal J. Thermal radiation from vertical jet fires. *Fire Safety Journal*, 2012, vol. 51, pp. 93–101. DOI: 10.1016/j.firesaf.2012.03.006.
30. Zhang B., Liu Y., Laboureur D., Mannan M.S. Experimental study on propane jet fire hazards: thermal radiation. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2015, vol. 54, pp. 9251–9256. DOI: 10.1021/acs.iecr.5b02064.
31. Planas-Cuchi E., Chatris J.M., Lopez C., Arnaldos J. Determination of flame emissivity in hydrocarbon pool fires using infrared thermography. *Fire Technology*, 2003, vol. 39, pp. 261–273. DOI: 10.1023/A:1024193515227.
32. Sudheer S., Prabhu S.V. Measurement of flame emissivity of gasoline pool fires. *Nuclear Engineering and Design*, 2010, vol. 240, iss. 10, pp. 3474–3480. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2010.04.043.

33. Wang P., Liu N., Bai Y., Zhang L., Satoh K., Liu X. An experimental study on thermal radiation of fire whirl. *International Journal of Wildland Fire*, 2017, vol. 26, pp. 693–705. DOI: 10.1071/WF17010.
34. Blankenhagela P., Wehrstedta K.-D., Mishrab K.B., Steinbach J. Thermal radiation assessment of fireballs using infrared camera. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2018, vol. 54, pp. 246–253. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.04.008.
35. Saha A., Kumar R., Basu S. Infrared thermography and numerical study of vaporization characteristics of pure and blended bio-fuel droplets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, vol. 53, pp. 3862–3873. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.05.003.
36. Singh P., Chander S. Heat transfer and fluid flow characteristics of a pair of interacting dual swirling flame jets impinging on a flat surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 24, pp. 90–108. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.03.034.
37. Loboda E.L., Reyno V.V., Agafontsev M.V. Choice of a spectral range for measuring temperature fields in a flame and recording high-temperature objects screened by the flame using IR diagnostic methods. *Russian Physics Journal*, 2015, vol. 2, pp. 278–282. DOI: 10.1007/s11182-015-0493-x. Translated from *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika*, 2015, vol. 58, no. 2, pp. 124–128.
38. Nevskii A.S. *Luchisty teploobmen v pechakh i topkakh* [Radiant heat transfer in furnaces and furnaces]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1971. 440 p.
39. Pastor E., Rigueiro A., Zárate L., Giménez A., Arnaldos J., Planas E. Experimental methodology for characterizing flame emissivity of small scale forest fires using infrared thermography techniques. *Forest Fire Research & Wildland Fire Safety*, Rotterdam, 2002, pp. 1–11.
40. 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*, 2014, vol. 67, pp. 566–573. DOI: 10.1016/j.infrared.2014.09.041.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Копьев Евгений Павлович – родился в 1991 году, аспирант, инженер-исследователь, ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (ИТ СО РАН). Область научных интересов: проблемы создания энергетического оборудования, газовая динамика, неравновесные процессы. Опубликовано 21 научная работа. (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск пр. Лаврентьева, 1. E-mail: kopyeve@itp.nsc.ru).

Kopyev Evgeny Pavlovich (b. 1991) – PhD student, research engineer, Kutateladze Institute of Thermophysics, SB RAS. His research interests are currently focused on problems of creating energy equipment, gas dynamics, non-equilibrium processes. He is author of 21 scientific papers. (Address: 1, Lavrentyev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: kopyeve@itp.nsc.ru).



Ануфриев Игорь Сергеевич – родился в 1984 году, канд. физ.-мат. наук, старший нач. сотрудник, ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (ИТ СО РАН). Область научных интересов: вихревые топки, лабораторное моделирование, проблемы создания энергетического оборудования. Опубликовано 67 научных работ. (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск пр. Лаврентьева, 1. E-mail: anufriev@itp.nsc.ru).

Anufriev Igor Sergeevich (b. 1984) – Candidate of Sciences (Phys.&Math), Senior Researcher, Kutateladze Institute of Thermophysics, SB RAS. His research interests are currently focused on vortex furnaces, laboratory modeling, problems of creating energy equipment. He is author of 67 scientific papers. (Address: 1, Lavrentyev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: anufriev@itp.nsc.ru).



Шадрин Евгений Юрьевич – родился в 1992 году, младший науч. сотрудник, лаборатория радиационного теплообмена, ИТ СО РАН. Область научных интересов: вихревые топки, лабораторное моделирование. Опубликовано 47 научных работ. (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1. E-mail: evgen_zavita@mail.ru).

Shadrin Evgeniy Yurievich (b. 1992) – no degree, no rank, Junior Researcher, laboratory of Radiation Heat Transfer, IT SB RAS. His research interests are currently focused on vortex furnaces laboratory modeling. He is author of 47 scientific papers. (Address: 1, Lavrentiev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: evgen_zavita@mail.ru).



Лобода Егор Леонидович – родился в 1977 году, д-р физ.-мат. наук, зав. кафедрой физической и вычислительной механики, Томский государственный университет. Область научных интересов: МЖТ, тепло-массообмен, горение, термография, ИК-диагностика. Опубликовано 69 научных работ. (Адрес: 634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: loboda@mail.tsu.ru).

Loboda Egor Leonidovich (b. 1977) – Doctor of Sciences (Phys.&Math), Head Department of Physical and Computational Mechanics, Tomsk State University. His research interests are currently focused on problems of heat and mass transfer, combustion, thermography, infrared diagnostics. He is author of 69 scientific papers. (Address: 36, Lenin Av., Tomsk, 634050, Russia. E-mail: loboda@mail.tsu.ru).



Агафонцев Михаил Владимирович – родился в 1992 году, инженер, учебная лаборатория кафедры физической и вычислительной механики ММФ, Национальный исследовательский Томский государственный университет. Область научных интересов: механика жидкости, газа и плазмы; инфракрасная термография; моделирование и прогноз катастроф. Опубликовано 26 научных работ. (Адрес: 634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: kim75mva@gmail.com).

Agafontsev Mikhail Vladimirovich (b. 1992) – no degree, no rank, engineer, department of physical and computational mechanics, National research Tomsk State University. His research interests are currently focused on: mechanics of liquids, gas and plasma; infrared thermography; simulation of catastrophe prediction. He is author of 26 scientific papers. (Address: 36, Lenin Av., Tomsk, 634050, Russia. E-mail: kim75mva@gmail.com).



Мухина Мария Андреевна – родилась в 1998 году, лаборант, лаборатория радиационного теплообмена, ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. Область научных интересов: теплоэнергетика. (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1. E-mail: Mary-Andr@yandex.ru).

Mukhina Mariia Andreyevna (b. 1998) – no degree, no rank, laboratory assistant, laboratory of radiation heat transfer, Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS. Her research interests are currently focused on heat power engineering. (Address: 1, Lavrentyev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: Mary-Andr@yandex.ru).

Статья поступила 19 апреля 2019 г.

Received April 19, 2019

To references:

Kopyev E.P., Anufriev I.S., Shadrin E.Yu., Loboda E.L., Agafontsev M.V., Mukhina M.A. Izuchenie kharakteristik plameni gorelochnogo ustroystva pri raspylenii zhidkikh uglevodorodov parovoi struei [Study of flame characteristics of burner when spraying liquid hydrocarbons with a steam jet]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2019, no. 2 (43), pp. 38–55. DOI: 10.17212/1727-2769-2019-2-38-55.