

УДК 62-643; 536.46

Анализ влияния перегретого водяного пара на содержание твердых углеродных частиц при диффузионном горении жидкого углеводородного топлива*

Е.П. Копьев

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

Email: kopyeve@itp.nsc.ru

Исследование направлено на уточнение и выявление основных принципов влияния перегретого водяного пара и его параметров на содержание твердых углеродных частиц (сажи) в промежуточных и конечных продуктах сгорания при сжигании жидкого углеводородного топлива. На лабораторном образце распылительного атмосферного горелочного устройства установлено, что в основании пламени горелки присутствует значительное количество твердых углеродных частиц. В случае использования вместо пара нагретого воздуха наблюдается увеличение содержания сажи на ~ 75 %. Анализ интенсивности свечения пламени в узкой полосе ультрафиолетового диапазона также показал, что на воздухе значения свечения на ~ 75 % выше, чем при использовании перегретого водяного пара. В то же время установлено, что на содержание сажи в конечных продуктах сгорания влияет только параметр динамического воздействия струи, определяющий эжекцию воздуха из окружающей среды как в камеру газогенерации, так и в область внешнего пламени.

Ключевые слова: горение, твердые углеродные частицы, сажевое число, перегретый пар.

Введение

Одной из ключевых отраслей промышленности является энергетический комплекс, который зачастую является определяющим при оценке и расчете себестоимости производимых товаров и услуг. Несмотря на значительный прогресс в развитии альтернативных энергетических систем, теплоэнергетика до сих пор вносит основной вклад в область выработки тепла и электричества [1]. Развитие и применение в данном направлении новых технологий и сопряженного с ними оборудования позволяет не только повысить эффективность энергетического сектора, но и оказывает положительное влияние на окружающую среду. Одна из серьезных проблем теплоэнергетики связана с образованием и выбросом твердых углеродных частиц (сажи). В большинстве случаев они являются нежелательным побочным продуктом, образующимся во время неполного сгорания или пиролиза углеводородов, и оказывают серьезное негативное воздействие на окру-

* Исследование светимости пламени проведено в рамках государственного задания ИТ СО РАН (АААА-121031800229-1); анализ дымовых газов при различных режимах работы устройств выполнен при поддержке РНФ (проект № 19-79-30075).

жающую среду [2] и здоровье человека [3]. Мелкие частицы, диаметр которых, в частности, меньше 2,5 мкм (PM_{2.5}), могут проникать в легкие человека и вызывать различные респираторные и сердечно-сосудистые проблемы [4]. Помимо этого, образование твердых углеродных частиц в процессе горения снижает надежность и эффективность работы горелочных устройств и энергетического оборудования.

В диффузионном пламени зародыши сажи образуются за счет пиролиза в условиях отсутствия радикалов ОН, таким образом, скорость образования твердых углеродных частиц зависит от температуры [5]: чем ниже температура, тем ниже скорость. При сжигании предварительно перемешанной смеси снижение содержания сажи в продуктах сгорания зачастую обеспечивается за счет окисления радикалами гидроксила, увеличение концентрации которых возможно при повышении температуры пламени, например, при условиях, близких к стехиометрическим [5–7].

В литературных источниках указывается, что одним из подходов к снижению образования твердых углеродных частиц в продуктах сгорания является добавление воды или пара в процесс горения [5, 8, 9]. Однако в настоящее время представление о влиянии воды или пара на сжигание углеводородных топлив имеет ряд неопределенностей. Так, в работе [8] было показано, что при добавлении воды в область горения ее влияние на выбросы сажи может быть двояким: во-первых, обеспечивается понижение температуры пламени, вследствие чего при диффузионном горении снижается скорость пиролиза топлива и, соответственно, образования частиц; во-вторых, имеют место химические процессы, приводящие, в частности, к образованию дополнительных радикалов ОН, активно вступающих в реакцию. В то же время, авторы работы [5] показали, что вода не оказывает химического влияния на тенденцию диффузионного пламени к сажеобразованию, а наблюдаемый эффект имеет только тепловую природу и его наличие обусловлено тем, что образование твердых углеродных частиц в диффузионном пламени в основном зависит от условий начального пиролиза топлива. Таким образом, тенденция к сажеобразованию определяется температурой пламени и структурой топлива. В работе [10] авторы обнаружили связь снижения содержания сажи с эффектами разбавления и тепловыми механизмами, однако они отметили, что в присутствии воды происходит ускорение реакции с образованием менее активного гидропероксильного радикала, что приводит к уменьшению количества водорода и кислорода в области сгорания и, как следствие, снижению температуры пламени. На зависимость уменьшения образования твердых углеродных частиц от снижения температуры также указывалось в работе [11]. В то же время, в численных расчетах сжигания углеводородных топлив [12, 13] было показано, что обнаруживается влияние пара на процесс горения через химические процессы — начинают преобладать реакции, связанные с ОН-радикалом. Однако в работе [12] было проведено сопоставление концентрации радикала ОН в пламени с паром и с подачей вместо пара нагретого воздуха. Было установлено, что в случае с паром присутствует меньшее количество радикалов гидроксила, чем с нагретым воздухом, однако при этом в случае с паром было получено значительное снижение содержания сажи и оксидов азота. Авторы работ [12, 13] отметили, что необходимы дальнейшие исследования, в частности, проведение детального химико-кинетического анализа, для понимания роли разбавления пара на образование твердых углеродных частиц и их окисление.

Целью настоящей работы является уточнение и выявление основных принципов влияния перегретого водяного пара и его параметров на содержание сажи как в продуктах сгорания, так и внутри пламени при сжигании жидких углеводородных топлив. Ранее на лабораторном образце атмосферного горелочного устройства распылительного

типа, а также горелке с регулируемым количеством подаваемого воздуха в камеру газогенерации было получено, что способ сжигания жидких углеводородных топлив в присутствии перегретого водяного пара позволяет значительно снизить содержание вредных веществ в уходящих газах, в частности, монооксида углерода и оксидов азота [14–16]. Однако анализ влияния пара на содержание твердых углеродных частиц не был проведен.

В представленной работе экспериментально исследуется влияние параметров потока подаваемого пара, а также нагретого воздуха, подаваемого вместо пара, на содержание сажи в конечных и промежуточных продуктах сгорания при диффузионном горении жидких углеводородов в лабораторном образце атмосферного горелочного устройства распылительного типа и горелке с регулируемым количеством подаваемого воздуха в камеру газогенерации. Проведен качественный анализ распределения радикала OH в пламени при сжигании топлива в присутствии перегретого водяного пара и сравнение полученных показателей при замещении пара нагретым воздухом.

Экспериментальный стенд и методики измерения

Описание горелочных устройств

Лабораторный образец горелочного устройства с естественным притоком воздуха в камеру газогенерации показан на рис. 1а. Горелка реализует способ диспергирования и сжигания, при котором происходит частичная газификация продуктов термического разложения и неполного сгорания жидкого топлива [17]. Конструкцией предусмотрен естественный приток воздуха из атмосферы в зону реакции через отверстия в нижней части корпуса. Атмосферный воздух необходим для воспламенения жидкого топлива. Полное техническое описание и характеристики работы горелочного устройства приведены в работе [14], где устройство использовалось для экспериментального исследования зависимостей влияния перегретого водяного пара на тепловые и экологические характеристики сжигания жидких углеводородов при их распылении высокоскоростной паровой струей. Еще одна конструкция горелки с управляемым коэффициентом избытка воздуха, поступающего в камеру газогенерации, показана на рис. 1б. Горелка имеет

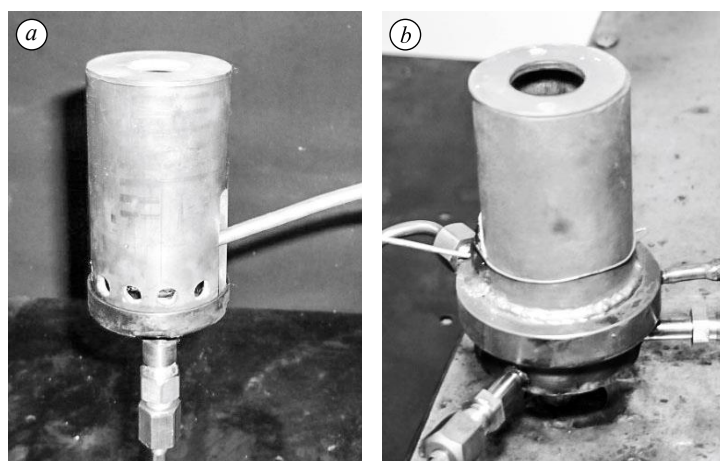


Рис. 1. Лабораторный образец горелочного устройства с естественным притоком воздуха в камеру газогенерации (а) и с управляемым коэффициентом избытка воздуха, поступающего в камеру газогенерации (б).

следующие размеры: внешний диаметр горелки — 60 мм, высота — 140 мм, диаметр выходного отверстия — 25 мм. Конструкцией предусмотрена принудительная подача воздуха в камеру сгорания через три отверстия диаметром 6 мм, выполненных по периметру нижней части корпуса горелки, что является отличительной особенностью конструкции горелки. Данное устройство было использовано при изучении влияния избытка воздуха в камере газогенерации на тепловые и экологические характеристики сжигания жидких углеводородов при их распылении высокоскоростной паровой струей в работе [16].

Оба горелочных устройства обладают схожим принципом работы [14, 16]. Перегретый водяной пар или нагретый (вместо него) воздух подается в горелочное устройство из электрического парогенератора (нагревателя) через форсунку, установленную в основании горелки. Высокоскоростная струя пара истекает из форсунки в камеру газогенерации и нагревает элементы горелочного устройства. Через топливоподающую трубку в основание паровой или воздушной струи подается жидкое топливо с заданным расходом. В результате взаимодействия газовой и жидкостной сред формируется однородный мелкодисперсный газокпельный поток [18]. Одновременно естественным путем или принудительно поступает воздух в зону горения. На выходе из горелки формируется устойчивый факел.

Экспериментальный стенд и методики измерения

При проведении исследований горелочные устройства устанавливались на экспериментальный огневой стенд, который состоит из открытой части и проточного калориметра (см. рис. 2). Стенд укомплектован автоматизированными системами генерации

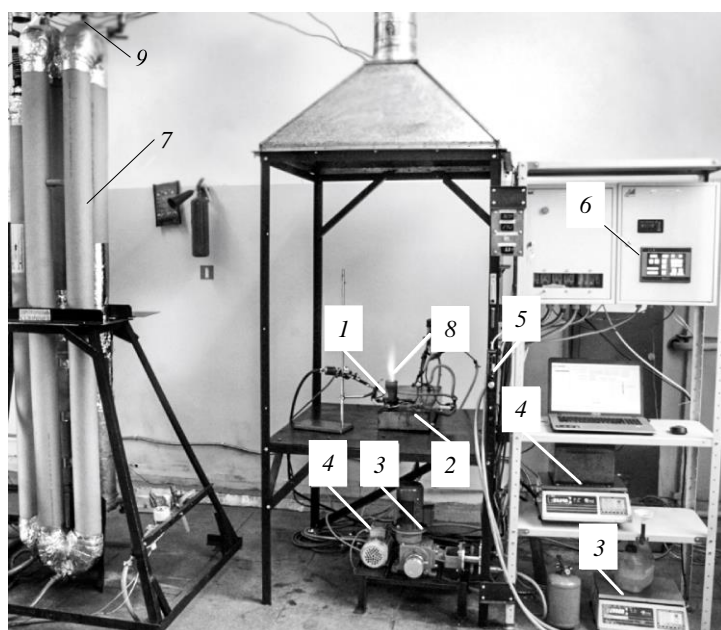


Рис. 2. Фотография экспериментального огневого стенда ИТ СО РАН.

- 1 — горелочное устройство, 2 — электрический парогенератор,
- 3 — система подачи питательной воды, 4 — система подачи топлива,
- 5 — система подачи и управления воздухом (для управления коэффициентом избытка воздуха, поступающего в камеру газогенерации),
- 6 — шкаф управления, 7 — проточный калориметр,
- 8 — место отбора пробы в пламени горелочного устройства,
- 9 — место отбора пробы в проточном калориметре.

и подачи перегретого водяного пара (и сжатого воздуха вместо пара), а также жидкого топлива. Перегретый водяной пар генерируется лабораторным электрическим парогенератором (нагревателем), который позволяет на выходе получать перегретый водяной пар со следующими параметрами [19]: температура — до 550 °С, давление — до 2 МПа, массовый расход — до 1,4 кг/ч. Давление контролируется с помощью цифрового датчика давления «ОВЕН ПД-100» (погрешность 1 кПа). Стабильная подача воды в парогенератор обеспечивается плунжерным дозировочным насосом НД 0,5Р 1,6/100 К14А (класс точности — 0,5), расход составляет до 1,6 л/ч. Масса воды контролируется при помощи электронных весов Асот PC-100W-5 (предел допускаемой погрешности — 0,5 г). Массовый расход топлива (до 2 кг/ч) контролируется с помощью электронных весов Асот PC-100W-10Н (предел допускаемой погрешности — 1 г). Регулировка расхода топлива осуществляется за счет управления скважностью электромагнитного клапана, частота работы клапана составляет 40 Гц. Частота была выбрана экспериментально, исходя из того, что при указанных параметрах визуально наблюдается стабильное пламя при работе устройства на различных видах топлива (дизельное топливо, отработанное масло, сырая нефть, мазут и др.) [14, 20–22]. Массовый расход воздуха задавался и регулировался регулятором-расходомером MASS-VIEW (Bronkhorst).

Для исследования содержания твердых углеродных частиц при помощи анализатора уровня дымности Testo 338 определялось сажевое число [23, 24] (рис. 3). Анализатор уровня дымности Testo 338 позволяет регистрировать сажевое число FSN и концентрацию сажи в диапазоне 0–2 (0–50 мг/м³) с абсолютной погрешностью 0,03 (0,5 мг/м³) или относительной 6 % (9 % — для мг/м³); для определения приборной погрешности выбирается наибольшее значение [25]. Прибор работает следующим образом: анализируемый состав проходит через эталонную колонку длиной 405 мм и попадает на фильтрующую бумагу, установленную в приборе. При наличии сажевых частиц бумага начинает темнеть. Внутренний оптический сенсор определяет коэффициент отражения бумажного фильтра, потемневшего вследствие контакта с дымовым газом (загрузка фильтра). Это означает, что отражение 100 % соответствует нулю (белая бумага), а полное поглощение — отражению 0 % (абсолютно черная бумага), что соответствует коэффициенту 10. Данные вычисляются согласно эмпирической кривой [25]. Сажевая концентрация также определяется по загрузке фильтра в результате прохождения через него определенного объема газа, вызвавшего потемнение. Эта единица измерения рассчитывается по значению измерения загрузки фильтра и эффективной длине колонки. Все расчеты выполняются прибором автоматически.

Анализ содержания сажи в промежуточных продуктах сгорания осуществлялся при установке горелочного устройства на открытом огневом стенде

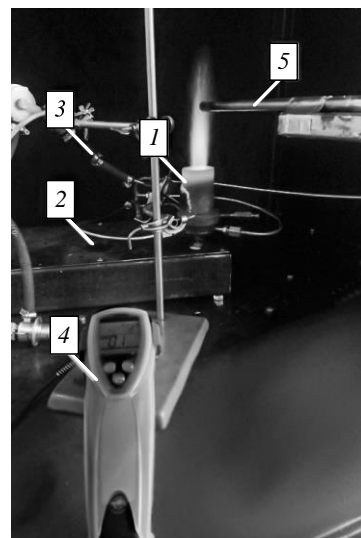


Рис. 3. Измерение анализатором testo 338 дымовых газов в пламени горелочного устройства с естественным притоком воздуха в камеру газогенерации.

- 1 — горелочное устройство, 2 — электрический парогенератор,
3 — система подачи топлива,
4 — анализатор дымовых газов testo 338,
5 — водоохлаждаемый зонд.

(см. рис. 3). Забор пробы осуществлялся через водоохлаждаемый зонд с диаметром внутреннего канала 2 мм, который помещался в пламя устройства на оси симметрии пламени на различной высоте от сопла горелочного устройства: 20, 60, 100, 140 и 180 мм. Исследование содержания твердых углеродных частиц в конечных продуктах сгорания осуществлялось путем отбора дымовых газов через патрубок первого верхнего колена тракта дымовой трубы калориметра, что позволяло охладить продукты сгорания и ограничить разбавления дымовых газов воздухом из окружающей среды. Установка представляет собой пять последовательно соединенных секций общей длиной 12 м (см. рис. 2). Каждая секция состоит из двух коаксиальных стальных труб (толщина стенок — 4 мм). Внутренний канал диаметром 68 мм предназначен для потока воздуха и продуктов сгорания, а кольцевой канал шириной 10 мм — для подачи теплоносителя (воды). В верхних коленах предусмотрены патрубки, отведенные к внутреннему каналу, для установки датчиков измерительных приборов. Внешняя поверхность секций калориметра теплоизолирована. При измерениях факел горелочного устройства вводился во внутренний калориметр.

Для осуществления дополнительного анализа в процессах, влияющих на содержание твердых углеродных частиц при впрыске перегретого водяного пара или нагретого воздуха, было проведено исследование содержания ОН-радикала при помощи оптического метода. А именно: была использована система, состоящая из цифровой камеры Videoscan panogate-2 (с разрешением 1380×1024 точек, спектральным диапазоном чувствительности фотокатода — 240–850 нм) с установленным на нее кварцевым объективом с фокусным расстоянием 100 мм. На объективе были размещены узкополосные светофильтры с длиной волны 300–320 нм, что соответствует диапазону длин волн, в которых регистрируется свечение радикала ОН [26, 27]. Обработка изображений осуществлялась программным обеспечением Videogate.

Результаты и анализ

Исследование влияния параметров потока подаваемого пара на содержание твердых углеродных частиц в конечных и промежуточных продуктах сгорания при диффузионном горении жидких углеводородов проводилось на примере сжигания дизельного топлива.

Для различных режимов подачи пара или воздуха и топлива на проточном калориметре были получены режимные карты содержания сажи в продуктах сгорания (см. рис. 4а и 4б соответственно) для лабораторного образца атмосферного горелочного устройства распылительного типа.

Ранее в работах [15, 28] для сопоставления параметров работы горелочного устройства при подаче пара или нагретого воздуха исследовались режимы, при которых обеспечивалось одинаковое динамическое воздействие Γ исходящей струи пара или воздуха, за счет чего создавались эквивалентные характеристики по внутренней структуре потока в камере газогенерации горелочного устройства. На рис. 5 представлена карта режимов, где расходы пара или воздуха сопоставляются с размерностью воздействия струи, и карты наложены друг на друга. Видно, что работы устройства в режиме с подачей перегретого водяного пара, а также в режиме использования нагретого воздуха для распыления топлива имеют схожие диапазоны, где обеспечивается низкое содержание сажи в продуктах сгорания. По полученным результатам можно сделать вывод о том, что при сжигании дизельного топлива на лабораторном образце распылительного атмосферного горелочного устройства на содержание твердых углеродных частиц

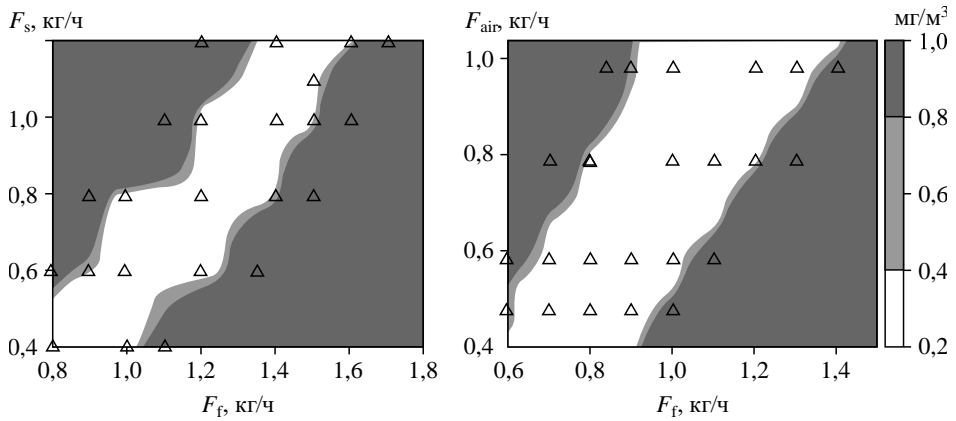


Рис. 4. Карта рабочих режимов содержания твердых углеродных частиц в продуктах сгорания при горении дизельного топлива в присутствии перегретого водяного пара (а), а также нагретого воздуха (б), подаваемого вместо пара, в горелочном устройстве распылительного типа с естественным притоком воздуха в камеру газогенерации.

в конечных продуктах сгорания влияет только параметр динамического воздействия струи Γ , определяющий эжекцию воздуха из окружающей среды как в камеру газогенерации, так и в область внешнего пламени.

Для анализа содержания промежуточных продуктов сгорания на открытом огневом стенде по полученным режимным картам был выбран режим с фиксированными расходом пара $F_s = 0,8$ кг/ч и расходом топлива $F_f = 1,0$ кг/ч (далее S8D10), а для сопоставления характеристик работы устройства — режим нагретого воздуха с расходом $F_{air} = 1,0$ кг/ч и расходом топлива $F_f = 1,0$ кг/ч (далее A10D10), аналогично выбору в работе [15] (см. таблицу). Было проведено исследование для выбранного режима при подаче перегретого водяного пара для горелочного устройства с управляемым коэффициентом избытка воздуха. Расход воздуха в камеру сгорания устанавливался ниже теоретически оцененного для горелки с естественной подачей [29] — $F_a = 4,5$ кг/ч (далее S8D10A4.5). Полученные экспериментальные данные по содержанию твердых углеродных частиц

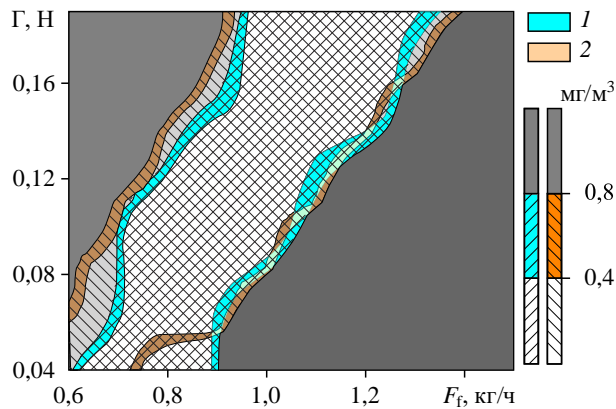


Рис. 5. Обобщенная карта рабочих режимов, демонстрирующая содержание твердых углеродных частиц в продуктах сгорания в зависимости от динамического воздействия струи пара (1) или нагретого воздуха (2).

Таблица

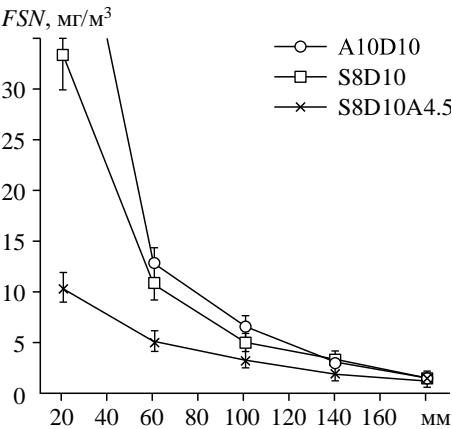
Режимные параметры работы горелочных устройств

Номер режима Вид устройства и параметры	S8D10	A10D10	S8D10A4.5
Горелочное устройство	Атмосферное		С принудительной подачей воздуха
Расход топлива, кг/ч	1,0		
Распылитель	Пар	Нагретый воздух	Пар
Температура распылителя, °С	250		
Расход распылителя, кг/ч	0,8	1,0	0,8
Давление в форсунке, атм	6,4	6,7	6,4
Расход воздуха, подаваемого в газогенератор, кг/ч	—	—	4,5

в промежуточных продуктах сгорания дизельного топлива при его распыле перегретым водяным паром в горелочном устройстве с естественным притоком воздуха в камеру газогенерации S8D10, а также в горелке с управляемым коэффициентом избытка воздуха S8D10A4.5 представлены на рис. 6.

Результаты экспериментов показали, что большее количество сажи содержится в основании факела, которая догорает по мере ее прохождения в высокотемпературной области. При этом в случае использования вместо пара нагретого воздуха наблюдается значительное увеличение количества твердых углеродных частиц в этой области — до 57 мг/м³. При использовании перегретого водяного пара эти значения снижаются до 33 мг/м³. Такое различие в содержании сажи, составляющее 75 %, может указывать на паровую газификацию продуктов неполного окисления топлива. В то же время, снижение количества подаваемого воздуха в камеру газогенерации позволяет дополнительно снизить концентрацию твердых углеродных частиц в области максимальных значений на 70 %, что может указывать на преобладание изменения механизма термического преобразования углеводородных соединений топлива в начальной стадии за счет уменьшения температуры внутри камеры газогенерации, а также усиления паровой газификации за счет увеличения доли перегретого водяного пара к подаваемому воздуху [30].

В проведенном исследовании получены результаты оптического анализа распределения ОН-радикала в пламени атмосферного горелочного устройства при подаче как перегретого водяного пара, так и нагретого воздуха в режимах S8D10 и A10D10



(см. таблицу). На рис. 7 представлены фотографии внешнего пламени, а также усредненное по 100 фотографиям изображение факела с применением ультрафиолетового оптического фильтра.

Рис. 6. Профиль содержания твердых углеродных частиц в промежуточных продуктах сгорания при сжигании дизельного топлива в горелочном устройстве с естественным притоком воздуха в камеру газогенерации с подачей перегретого пара S8D10 или нагретого воздуха A10D10 (вместо пара), а также в горелке с управляемым коэффициентом избытка воздуха S8D10A4.5.

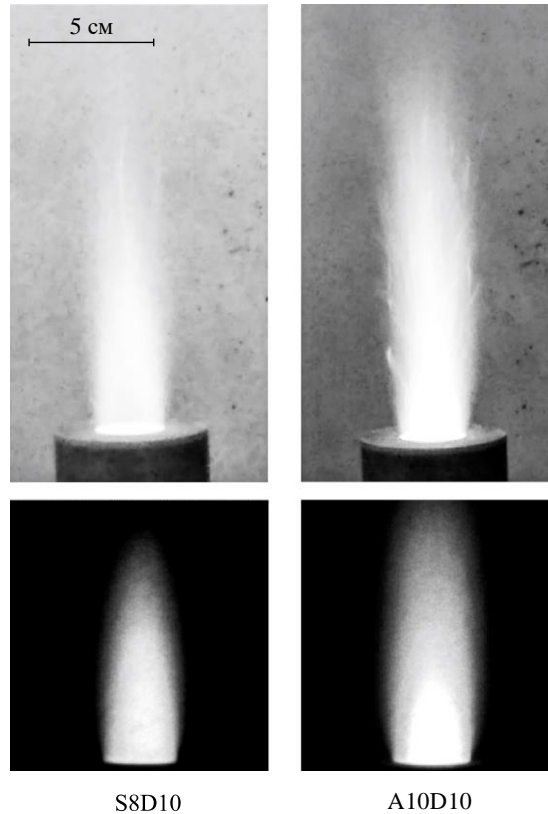
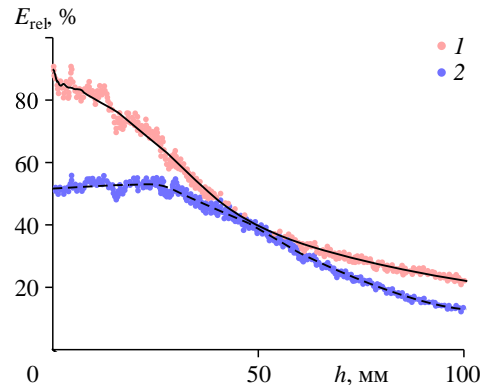


Рис. 7. Фотографии внешнего пламени в видимом диапазоне (сверху) и в ультрафиолетовом (снизу) при сжигании дизельного топлива в присутствии перегретого водяного пара и нагретого воздуха (вместо пара) в режимах, приведенных в таблице.

По средним распределениям, полученным для исследуемых режимов, видно, что в основании пламени при распыле топлива нагретым воздухом наблюдается большая интенсивность свечения, что качественно может указывать на большую концентрацию радикала OH в данной области. Профили интенсивности свечения, построенные по изображениям вдоль оси симметрии сопла горелочного устройства (рис. 8), свидетельствуют о том, что на воздухе интенсивность свечения выше на $\sim 75\%$, чем при использовании перегретого водяного пара, что схоже с данными по содержанию твердых углеродных частиц в области основания внешнего факела. Указанное распределение хорошо

Рис. 8. Профиль интенсивности свечения внешнего пламени в ультрафиолетовом диапазоне при сжигании дизельного топлива в присутствии перегретого водяного пара и нагретого воздуха в режимах, приведенных в таблице.

Сплошная линия — сглаженная линия для режима A10D10 (1),
пунктирная — для режима S8D10 (2).



согласуется с представленными результатами математического моделирования процесса горения н-гептана в горелочном устройстве испарительного типа в присутствии перегретого водяного пара [12].

Заключение

В настоящей работе на примере дизельного топлива проведено исследование влияния параметров потока перегретого водяного пара на содержание твердых углеродных частиц в промежуточных и конечных продуктах сгорания при диффузионном горении жидких углеводов.

С помощью анализатора уровня дымности было получено, что при сжигании жидкого углеводородного топлива на лабораторном образце распылительного атмосферного горелочного устройства при различных режимных параметрах на содержание сажи в конечных продуктах сгорания влияет только параметр динамического воздействия струи, определяющий эжекцию воздуха из окружающей среды как в камеру газогенерации, так и в область внешнего пламени. В результате анализа содержания твердых углеродных частиц в пламени получено, что их большее количество содержится в основании факела и догорает оно по мере прохождения в высокотемпературной области. При этом в случае использования вместо пара нагретого воздуха наблюдается значительное увеличение количества твердых углеродных частиц, составляющее ~ 75 %. Профили интенсивности свечения пламени в узкой полосе ультрафиолетового диапазона, построенные вдоль оси симметрии сопла горелочного устройства, демонстрируют, что в случае использования воздуха интенсивность свечения на ~ 75 % выше, чем в случае перегретого водяного пара, что качественно может указывать на большую концентрацию радикала ОН в данной области. В то же время, снижение количества подаваемого воздуха в камеру газогенерации за счет использования модернизированной конструкции горелки позволяет обеспечить дополнительное снижение твердых углеродных частиц в области основания пламени.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о значительном влиянии как перегретого водяного пара для распыла топлива, так и количества подаваемого воздуха в камеру газогенерации на характеристики работы горелочного устройства, что может быть связано с изменениями механизма термического преобразования углеводородных соединений топлива в начальной стадии за счет уменьшения температуры внутри камеры газогенерации, а также усиления паровой газификации при увеличении доли перегретого водяного пара к подаваемому воздуху. Полученные данные дополняют информацию о влиянии перегретого водяного пара на процесс горения жидких углеводородных топлив, необходимую при проектировании и создании устройств такого типа.

Список литературы

1. Xu L., Wang Y., Liu D. Effects of oxygenated biofuel additives on soot formation: a comprehensive review of laboratory-scale studies // *Fuel*. 2022. Vol. 313. P. 122635-1–122635-46.
2. Bond T.C., Doherty S.J., Fahey D.W., Forster P.M., Berntsen T., Deangelo B.J., Flanner M.G., Ghan S., Kärcher B., Koch D., Kinne S., Kondo Y., Quinn P.K., Sarofim M.C., Schultz M.G., Schulz M., Venkataraman C., Zhang H., Zhang S., Bellouin N., Guttikunda S.K., Hopke P.K., Jacobson M.Z., Kaiser J.W., Klimont Z., Lohmann U., Schwarz J.P., Shindell D., Storelmo T., Warren S.G., Zender C.S. Bounding the role of black carbon in the climate system: a scientific assessment // *J. of Geophysical Research: Atmospheres*. 2013. Vol. 118, No. 11. P. 5380–5552.
3. Kennedy I.M. The health effects of combustion-generated aerosols // *Proceedings of the Combustion Institute*. 2007. Vol. 31, No. 2. P. 2757–2770.
4. Lighty J.A.S., Veranth J.M., Sarofim A.F. Combustion aerosols: factors governing their size and composition and implications to human health // *J. of the Air & Waste Management Association*. 2011. Vol. 50, No. 9. P. 1565–1618.

5. Schug K.P., Manheimer-Timnat Y., Yaccarinc P., Glassman I. Sooting behavior of gaseous hydrocarbon diffusion flames and the influence of additives // *Combustion Sci. and Technology*. 2007. Vol. 22, No. 5–6. P. 235–250.
6. Millikan R.C. Non-equilibrium soot formation in premixed flames // *J. of Physical Chemistry*. 1962. Vol. 66, No. 5. P. 794–799.
7. Homann K.H. Carbon formation in premixed flames // *Combustion and Flame*. 1967. Vol. 11, No. 4. P. 265–287.
8. Dryer F.L. Water addition to practical combustion systems-concepts and applications // *Symp. (Intern.) on Combustion*. 1977. Vol. 16, No. 1. P. 279–295.
9. Graus W.H.J., Worrell E. Effects of SO₂ and NO_x control on energy-efficiency power generation // *Energy Policy*. 2007. Vol. 35, No. 7. P. 3898–3908.
10. Le Cong T., 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 & Fuels*. 2009. Vol. 23, No. 2. P. 725–734.
11. Mohapatra S., Garnayak S., Lee B.J., Elbaz A.M., Roberts W.L., Dash S.K., Reddy V.M. Numerical and chemical kinetic analysis to evaluate the effect of steam dilution and pressure on combustion of n-dodecane in a swirling flow environment // *Fuel*. 2021. Vol. 288. P. 119710-1–119710-17.
12. Minakov A.V., Anufriev I.S., Kuznetsov V.A., Dekterev A.A., Kopyev E.P., Sharypov O.V. Combustion of liquid hydrocarbon fuel in an evaporative burner with forced supply of superheated steam and air to the reaction zone // *Fuel*. 2022. Vol. 309. P. 122181-1–122181-15.
13. Mohapatra S., Mohapatro M.B.R., Pasha A.A., Alsulami R.A., Dash S.K., Reddy V.M. Adaptability of different mechanisms and kinetic study of methane combustion in steam diluted environments // *Sci. Reports*. 2022. Vol. 12, No. 1. P. 1–19.
14. Anufriev I.S., Kopyev E.P. Diesel fuel combustion by spraying in a superheated steam jet // *Fuel Processing Technology*. 2019. Vol. 192. P. 154–169.
15. Anufriev I.S., Kopyev E.P., Sadkin I.S., Mukhina M.A. NO_x reduction by steam injection method during liquid fuel and waste burning // *Process Safety and Environmental Protection*. 2021. Vol. 152. P. 240–248.
16. Anufriev I.S., Kopyev E.P., Alekseenko S.V., Sharypov O.V., Vigriyanov M.S. New ecology safe waste-to-energy technology of liquid fuel combustion with superheated steam // *Energy*. 2022. Vol. 250. P. 123849-1–123849-17.
17. Алексеев С.В., Пашенко С.Э., Саломатов В.В. Нанокластерное инициирование горения неконденсированных углеводородных топлив // *Инж.-физич. журнал*. 2010. Т. 83, № 4. С. 682–693.
18. Anufriev I.S.S., Shadrin E.Y.Y., Kopyev E.P.P., Alekseenko S.V.V., Sharypov O.V.V. Study of liquid hydrocarbons atomization by supersonic air or steam jet // *Applied Thermal Engng*. 2019. Vol. 163. P. 114400-1–114400-12.
19. Anufriev I.S., Alekseenko S.V., Sharypov O.V., Kopyev E.P. Diesel fuel combustion in a direct-flow evaporative burner with superheated steam supply // *Fuel*. 2019. Vol. 254. P. 115723-1–115723-8.
20. Anufriev I.S., Alekseenko S.V., Kopyev E.P., Sharypov O.V. Combustion of substandard liquid hydrocarbons in atmosphere burners with steam gasification // *J. of Engng Thermophysics*. 2019. Vol. 28, No. 3. P. 324–331.
21. Anufriev I., Kopyev E., Alekseenko S.S., Sharypov O., Butakov E., Vigriyanov M., Sadkin I. Cleaner crude oil combustion during superheated steam atomization // *Thermal Sci*. 2021. Vol. 25, No. 1. Part A. P. 331–345.
22. Алексеев С.В., Ануфриев И.С., Вигриянов М.С., Коньев Е.П., Садкин И.С., Шарыпов О.В. Сжигание мазута в струе водяного пара в новом горелочном устройстве // *Прикл. механика и технич. физика*. 2020. Т. 61, № 3. С. 11–18.
23. ГОСТ 17356-89. Горелки на газообразном и жидком топливах. 1990.
24. ГОСТ 27824-2000. Горелки промышленные на жидком топливе. 2003.
25. Testo 338 — анализатор уровня дымности. Руководство пользователя.
26. Warnatz J., Maas U., Dibble R.W. *Combustion: physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments, pollutant formation*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. 378 p.
27. Dandy D.S., Vosen S.R. Numerical and experimental studies of hydroxyl radical chemiluminescence in methane-air flames // *Combustion Sci. and Technology*. 2007. Vol. 82, No. 1–6. P. 131–150.
28. Ануфриев И.С., Красинский Д.В., Шадрин Е.Ю., Коньев Е.П., Шарыпов О.В. Исследование структуры газового потока, истекающего из форсунки горелочного устройства распылительного типа // *Теплофизика и аэромеханика*. 2019. Т. 26, № 5. С. 703–718.
29. Krasinsky D.V., Tsepenok A.I. Numerical study of combustion of the diesel fuel sprayed with a steam jet in a prospective burner device // *J. of Physics: Conf. Series*. 2019. Vol. 1369, No. 1. P. 012026-1–012026-6.
30. Glassman I., Yetter R.A. *Combustion*. Academic Press, 2008. 773 p.

*Статья поступила в редакцию 27 июня 2023 г.,
после доработки — 11 августа 2023 г.,
принята к публикации 21 ноября 2023 г.*