УДК 620.9, 502.171

Горение н-гептана со впрыском пара в лабораторной распылительной горелке^{*}

И.С. Ануфриев^{1,2}, Е.П. Копьев¹, И.С. Садкин^{1,2}, М.А. Мухина¹, А.В. Минаков¹, В.А. Кузнецов¹

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск ²Новосибирский государственный технический университет

E-mail: kopyeve@itp.nsc.ru

Представленная работа является продолжением цикла исследований авторов, направленных на изучение закономерностей горения жидких углеводородов в условиях подачи пара применительно к разработке низкоэмиссионных горелочных устройств. При численном моделировании горения дизельного топлива в качестве однокомпонентного аналога используется н-гептан (формула C₇H₁₆). Для верификации полученных результатов необходимы достоверные экспериментальные данные. В настоящей работе впервые экспериментально исследованы показатели горения н-гептана при распыле перегретым водяным паром в новом лабораторном атмосферном горелочном устройстве с принудительной подачей воздуха в камеру газогенерации. Проводится сопоставление результатов расчетов с данными по дизельному топливу. Выполненное сравнение показывает, что характер зависимостей газовых компонент внутри факела для дизеля и гептана отличается. Это связано в первую очередь с разной плотностью, вязкостью топлив, их воспламеняемостью и скоростью горения (зависящей, в том числе от принудительной подачи воздуха (окислителя)). При этом количественное сравнение показывает, что на границе факела значения газовых компонент довольно близки друг к другу. На состав конечных продуктов горения большее влияние оказывает комплекс протекающих физико-химических процессов в присутствии пара (газификация, расщепление углеводородов, разбавление горючей смеси, образование активных радикалов ОН), чем свойства топлива. Показано, что при сжигании н-гептана с распылением паровой струей сохраняются все основные особенности, характерные для горения дизеля с подачей водяного пара. Обеспечивается высокая полнота сгорания топлива и низкий уровень токсичных выбросов в атмосферу, удовлетворяющий европейскому нормативу EN:267. С увеличением доли пара в горючей смеси сохраняется тенденция к снижению CO и NO_x. Управление расходом воздуха в камере газогенерации горелки позволяет дополнительно регулировать уровень токсичных продуктов сгорания в атмосферу. Динамика зависимостей выбросов СО и NO_x повторяется для гептана и дизеля с некоторыми локальными отличиями. Также в работе выполнен анализ корректности применимости н-гептана для задач численного моделирования горения дизеля в струе пара с указанными допущениями.

Ключевые слова: горелочное устройство, перегретый водяной пар, н-гептан, дизельное топливо, управление режимами, снижение NO_x.

© Ануфриев И.С., Копьев Е.П., Садкин И.С., Мухина М.А., Минаков А.В., Кузнецов В.А., 2023

^{*} Измерения показателей сжигания в факеле горелки выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 18-79-10134; измерения в охлажденных продуктах сгорания проведены за счет гранта Российского научного фонда № 19-19-00443.

Введение

Использование воды и пара положительно влияет на процесс горения жидких углеводородов, улучшая теплотехнические и экологические показатели [1-5]. Одним из направлений применения пара в теплоэнергетике является утилизация жидких горючих отходов [6]. Использование пара для сжигания отходов при производстве энергии имеет ряд преимуществ [7, 8]: генерация пара осуществляется за счет тепловыделения от сжигания и не требует использования компрессоров, электронагревателей и других внешних устройств и источников энергии [9]; пар расщепляет сложные органические соединения, интенсифицируя процессы окисления [10]; воздействие струи пара на каплю топлива обеспечивает мелкодисперсную атомизацию, ускоряя процессы испарения топлива, при этом отсутствие топливных форсунок обеспечивает топливную гибкость при сжигании отходов [11]; паровая газификация топлива дополнительно повышает полноту выгорания топлива [12]; подача пара в зону горения снижает температуру пламени за счет разбавления горючей смеси более теплоемкой средой [13], тем самым сокращая образование термических оксидов азота и СО [14].

Авторами разработано новое горелочное устройство для сжигания жидких углеводородов, в котором топливо распыляется струей перегретого водяного пара [15]. На протяжении нескольких лет проводились экспериментальные исследования процессов сжигания разных типов жидкого топлива: дизель [13, 14], отработанное масло [10], сырая нефть [8], мазут [16], керосин [17]. Были получены теплотехнические и экологические показатели сжигания при варьировании режимных параметров (расход пара, мощность горелки) [13] и установлены закономерности влияния пара на выбросы токсичных оксидов азота (NO_x) и угарного газа (CO) [14]. Также был показан эффект снижения вредных выбросов при сжигании жидкого топлива в потоке водяного пара до 50 % [10].

Вместе с экспериментальными работами авторами проводятся численные исследования процессов горения жидкого углеводородного топлива в присутствии пара [18], необходимые для дальнейшей разработки промышленных образцов горелок. Неопределенность состава большинства видов энергетического топлива (дизель, мазут, керосин), в том числе отходов, создает большую трудность для его детального описания при моделировании. В качестве приближения для CFD-моделирования, например, дизельного топлива, используются такие аналоги, как н-додекан, смеси н-гептана и толуола и др. [19–23]. Однокомпонентный аналог н-гептан (формула C₇H₁₆) часто применяется для численного моделирования горения дизельного топлива [18, 24, 25]. Массовая доля углерода в н-гептане равна 84 %, что очень близко к значению массовой доли углерода — ~ 85,9 % в образце товарного дизельного топлива [13]. Ранее авторы успешно провели численное моделирование горения н-гептана в атмосферной испарительной [18] и вихревой [25] горелках, где было достигнуто хорошее согласование с экспериментальными данными.

Актуальность проведения настоящей работы вызвана потребностью в получении экспериментальных данных при сжигании модельного топлива для верификации результатов численных расчетов применительно к исследованию новой атмосферной горелки [26], в которой распыление и горение топлива осуществляется непосредственно в высокоскоростной паровой струе. Ранее были получены результаты измерений при горении н-гептана с паром в похожей конструкции горелки с естественным притоком воздуха в камеру газогенерации [27, 28], успешно примененные для верификации расчетов [18]. Новизной исследуемой горелки, в сравнении с ранее изученной авторами [13, 14, 26, 29],

является принудительная управляемая подача воздуха для горения в камеру газогенерации. Конструкция горелки прошла успешное испытание на дизельном топливе [26]. Она позволяет получать экспериментальные данные для изучения закономерностей горения жидких углеводородов в струе пара. В работе [26] было показано, что совместное управление расходом топлива, пара и воздуха в камере газогенерации в такой горелке позволяет снизить оксиды азота до 70 % при сжигании дизеля.

Целью настоящей работы является получение экспериментальных данных по тепловым и экологическим показателям при сжигании н-гептана в струе перегретого водяного пара в новой атмосферной горелке и сопоставление полученных результатов с дизельным топливом для дальнейшей верификации математической модели горения дизеля в струе пара при изменении количества подаваемого воздуха в камеру газогенерации. Экспериментальные исследования процессов горения н-гептана при распылении струей перегретого водяного пара в лабораторной горелке с принудительной подачей воздуха в зону горения проводятся впервые, этим определяется новизна работы.

1. Горелочное устройство

Эксперименты проводились на распылительной лабораторной горелке [26], в которой топливо распыляется струей перегретого водяного пара (рис. 1). Основными частями атмосферного горелочного устройства являются: камера газогенерации, состоящая из цилиндрического корпуса (высота 140 мм, диаметр 60 мм) и выходного сопла (диаметр отверстия 25 мм); топливоподводящая трубка с внутренним диаметром 2 мм, расположенная под углом к горизонту и имеющая скос на конце; паровая форсунка, вмонтированная в основание горелки (диаметр отверстия 0,6 мм, угол раскрытия 20°). В нижней части корпуса по периметру равномерно расположены три отверстия диаметром 4 мм для принудительной подачи воздуха в камеру газогенерации. Конец топливной трубки размещается вблизи отверстия паровой форсунки (на расстоянии 2 мм), без контакта топлива с паровой форсункой. Последнее предотвращает коксование и засорение подающих каналов.

Запуск горелки происходит следующим образом. Струя перегретого водяного пара истекает из паровой форсунки со сверхзвуковой скоростью и нагревает корпус горелочного устройства. Жидкое топливо натекает в основание паровой струи и при взаимодействии



Рис. 1. Схема работы горелочного устройства.

образует мелкодисперсный газокапельный поток. В камеру газогенерации подается воздух для инициализации горения. Топливный спрей поджигается снаружи с помощью внешней газовой горелки. За счет того, что раскрытие струи газокапельного потока в области сопла горелочного устройства шире диаметра выходного отверстия, образуется зона рециркуляции, способствующая воспламенению горючей смеси.

2. Экспериментальная установка и методики

Для проведения экспериментов использовался экспериментальный стенд, являющийся частью уникальной научной установки УСУ «Крупномасштабный термогидродинамический стенд для исследования тепловых и газодинамических характеристик энергоустановок» [30]. Основными частями экспериментального стенда являются система подачи топлива, система подачи воды, электрический парогенератор, воздушный компрессор, проточный калориметр и измерительное оборудование (газоанализаторы, датчики давления и температуры, расходомеры, регуляторы расходов). В системе подачи топлива стабильный расход обеспечивается топливным насосом и топливной форсункой ZMZ6354. Массы топлива и воды контролируются с помощью электронных весов Асот PC-100W. Через плунжерный дозировочный насос вода под давлением до 15 Бар с расходом до 1,6 л/ч подается на электрический парогенератор (производительность пара составляет до 1,6 кг/ч, нагрев пара — до 550 °C, потребляемая мощность — до 2,2 кВт), позволяющий получить пар с заданными параметрами. Воздух в воздушный коллектор поступает из компрессора. Расход воздуха, подаваемого в камеру газогенерации, регулируется массовым расходомером MASS-VIEW Bronkhorst. Воздух имеет комнатную температуру.

В ходе исследования измерялись температура факела горелки, газовый состав промежуточных и конечных продуктов горения и теплота сгорания топлива. Для определения тепловыделения при сжигании топлива использовался проточный калориметр (рис. 2). Теплота сгорания в нем определяется по измерениям температуры теплоносителя (воды) на выходе и входе калориметра. В работе [12] было определено, что суммарная погрешность такого измерения полноты сгорания составляет ± 2,5 %.

Температура факела измерялась с помощью Pt-Rh/Pt-Rh-термопары типа В (диаметр 300 мкм). Её рабочий спай помещался в нужную точку внешнего пламени горелочного устройства с помощью координатно-перемещающего устройства. Измерения выполнялись вдоль вертикальной оси горелки на расстоянии 200 мм от края сопла с шагом 10 мм в течение 20 с в каждой точке с частотой 10 Гц с последующим осреднением.

Газовый анализ продуктов горения в пламени проводился с использованием двух газоанализаторов: «Тест-1» и «Testo 350», предел допускаемой относительной погрешности показаний приборов составлял 5 %. Забор пробы осуществлялся через водоохлаждаемый зонд для «заморозки» протекающих химических процессов. Регистрировались следующие газовые компоненты: «Тест-1» — CO (0–10 % об.), H₂ (0–40 % об.), CH (0–20 % об.), CO₂ (0–20 % об.), O₂ (0–21 % об.); «Testo 350» — NO_x (0–300 ppm).

Газовый анализ конечных продуктов сгорания топлива выполнялся с использованием газоанализатора «Testo 350». Для этого зонд газоанализатора размещался на выходе из калориметра, где продукты сгорания имеют температуру, близкую к комнатной.

Для уменьшения случайных погрешностей, в том числе вызванных пульсацией пламени, газовый анализ конечных продуктов сгорания проводился на протяжении всего периода калориметрических измерений — 15 мин. с частотой 1 Гц; газовый анализ промежуточных компонентов проводился в течение 90 с в каждой точке с частотой 1 Гц.

Таблица 1

Более детальное описание измерительных методик и погрешностей измерений приведено в ранних работах авторов [12, 26].

При анализе концентраций оксидов азота NO_x и монооксида углерода CO, значения их объемного содержания, определяемые газоанализатором [ppm], пересчитывались в удельные величины выбросов [мг/кВтч] для возможности сопоставления полученных параметров с нормативными документами и мировыми аналогами. При пересчете концентраций NO_x и CO использовались формулы, рекомендованные в европейском стандарте для горелочных устройств EN:267 [31]:

$$NO_x = NO_{x(ppm)} \cdot 2,056 \left(\frac{21}{21 - O_{meas}}\right) \left(\frac{V_0}{Q_{lhv}}\right),$$
(1)

$$CO = CO_{ppm} \cdot 1,25 \left(\frac{21}{21 - O_{meas}}\right) \left(\frac{V_0}{Q_{hv}}\right),$$
(2)

где 2,056 и 1,25 — соответственно плотность NO_x и CO при нормальных условиях, кг/м³; NO_{x(ppm)} и CO_{ppm} — измеренное содержание соответствующих соединений в уходящих газах, ppm, O_{meas} — измеренное содержание кислорода в уходящих газах, oб. %, V_0 — теоретический требуемый для полного сгорания 1 кг топлива объем сухого воздуха, м³/кг (для гептана ~ 11,7, для дизеля ~ 10,46), $Q_{\rm lhv}$ — низшая удельная теплота сгорания топлива, кВтч/кг (для гептана ~ 12,5, для дизеля ~ 11,86).

3. Условия экспериментов

Актуальность проведения лабораторных исследований связана с получением экспериментальных данных для верификации математических моделей и оценкой корректности применения н-гептана при численном моделировании горения дизеля в струе пара. Гептан — это углеводород группы алканов (С₇Н₁₆), который представляет собой бесцветную прозрачную жидкость. Выбор топлива обусловлен однородностью состава гептана и отсутствием в нем сложных цепочек углеводородов, присущих дизельному топливу или керосину. Это позволяет выявить основные механизмы горения углеводородов со впрыском водяного пара и использовать полученные экспериментальные данные для верификации расчетов. В ходе эксперимента использовался нормальный эталонный гептан (н-гептан) с массовым содержанием основного вещества не менее 99 % [32]. Свойства и химический состав н-гептана и дизельного топлива [26] приведены в табл. 1.

Свойства	n-гептан	Дизельное топливо [26]						
Плотность, кг/м ³	684	840						
Вязкость, сСт	0,6	4,1						
Теплота сгорания низшая, МДж/кг	48,6	42,3						
Высшая теплота сгорания HHV, МДж/кг	45,0	44,9						
Хил	мический анализ							
С, масс. %	84	84,6						
Н, масс. %	16	13,6						
S, масс. %	_	0,4						
N, масс. %	-	0,6						
О, масс. %	_	0,7						
Н₂О, масс. %	-	-						

Свойства и химический состав топлив

Обозначение режима		<i>F</i> _f , кг/ч	<i>F</i> ₈ , кг/ч	<i>Р</i> , Бар	<i>F</i> _a , кг/ч	α камеры газогенерации	α камеры газогенерации
Гептан	Дизель [26]					при сжигании гептана	при сжигании дизеля [26]
S8H12A2.75	S8D12A2.75	1,2	0,8	7,3	2,75	0,16	0,18
S8H12A7	S8D12A7				7	0,41	0,45
S8H12A12	S8D12A12				12	0,7	0,78
S10H12A2.75	S10D12A2.75		1	8,8	2,75	0,16	0,18
S10H12A7	S10D12A7				7	0,41	0,45
S10H12A12	S10D12A12				12	0,7	0,78

Режимы работы горелочного устройства

Таблица 2

Измерения тепловых и экологических показателей сжигания н-гептана в лабораторной горелке проведены при различном расходе воздуха в камеру газогенерации F_a . Для этого были выбраны режимы с фиксированными расходами пара $F_s = 0,8$ и 1,0 кг/ч и его температурой $T_s = 250 \pm 10$ °C (перегрев пара составлял 75 – 85 градусов) и расходом топлива $F_f = 1,2$ кг/ч (см. табл. 2). Выбор этих режимов основывался на результатах исследований [13], проведенных в горелочном устройстве с естественным притоком воздуха в камеру газогенерации при сжигании дизельного топлива (расход воздуха, поступающего в камеру газогенерации, в такой конструкции горелки измерить проблематично). Отношения расхода подаваемого пара к топливу γ для выбранных режимов составляют 0,66 и 0,83 соответственно. В этих режимах обеспечиваются лучшие экологические показатели сжигания [14]: СО — до 0,4 г/кг и NO_x — до 1,25 г/кг. Расход воздуха в камеру газогенерации F_a варьировался от 2,75 до 15 кг/ч. Выбор диапазона расхода



Рис. 2. Схема экспериментальной установки для определения экологических и теплотехнических показателей сжигания топлива.

воздуха основывался на результатах измерений при сжигании дизельного топлива в исследуемой горелке (рис. 1) [26]. В указанном диапазоне расхода воздуха происходит устойчивое горение дизельного топлива для выбранных параметров пара и топлива в исследуемой конструкции горелки. При расходе воздуха в камеру газогенерации $F_a < 2,75$ кг/ч и $F_a > 12$ кг/ч наблюдается нестабильность горения и срыв пламени, связанные с переобогащением или обеднением смеси. Значения коэффициента избытка воздуха $\alpha = 0,16 \div 0,78$ (см. табл. 2) рассчитывались как отношение фактической принудительной подачи воздуха внутрь горелки к теоретически необходимому объему по стехиометрическому соотношению с учетом фактического расхода топлива и без учета воздуха, увлекаемого из окружающей среды внешним факелом. Во всех режимах α меньше стехиометрического значения (для сгорания 1 кг н-гептана требуется ~ 14,33 кг воздуха). При вычислении этих значений кислород, содержащийся в подаваемом перегретом паре, не учитывался, так как степень его диссоциации в камере газогенерации неизвестна.

Для сравнения результатов с дизельным топливом использованы данные работы [26].

4. Результаты измерений и их анализ

Получены экспериментальные данные по тепловым и экологическим показателям при сжигании н-гептана с распылением струей перегретого водяного пара в атмосферном горелочном устройстве с принудительной подачей воздуха в камеру газогенерации и проведено сопоставление полученных результатов с данными при сжигании дизельного топлива [26].

На рис. 3 представлены профили средней температуры пламени вдоль вертикальной оси сопла горелочного устройства, полученные с использованием термопары. Для исследуемых режимов профили температуры имеют схожий вид. Максимальное значение температуры для гептана достигает 1700 °С и находится на некотором расстоянии от сопла горелочного устройства, что указывает на догорание смеси после выхода в открытое пространство и смешения с воздухом из окружающей среды. С увеличением расхода первичного воздуха, подаваемого в камеру газогенерации, температурный максимум смещается ближе к основанию факела за счет сокращения времени выгорания топлива при подаче бо́льшего количества окислителя. Также видно, что в сравнении с дизелем



Рис. 3. Средняя температура в факеле вдоль оси симметрии горелки при разном расходе воздуха в камеру сгорания (кг/ч) при сжигании гептана (*a*) и дизельного топлива (*b*) [26].

при сжигании гептана температура пламени имеет более низкое значение. Разница между значениями максимальной температуры различных топлив достигает 100 °C.

Газовый состав промежуточных компонентов горения в пламени вдоль вертикальной оси сопла горелки представлен на рис. 4. Для каждого из рассматриваемых топлив (гептан и дизель) в отдельности профили газовых компонент факела при изменении



параметров подачи воздуха в камеру газогенерации на графике имеют схожий вид. Однако при сопоставлении графиков для эквивалентных параметров работы устройства, но при использовании различных топлив заметно, что поведение кривых отличается. Так, при сжигании дизельного топлива минимумы О₂ и максимумы СО₂ наблюдаются в зоне максимальной температуры факела, что связано с догоранием смеси при поступлении внешнего воздуха. Далее вниз по потоку происходит рост концентрации кислорода и снижение доли углекислого газа в результате разбавления факела атмосферным воздухом. При сжигании гептана по мере увеличения подачи воздуха в горелочное устройство наблюдается снижение концентраций CO, $C_n H_m$ и H_2 и рост значений O₂. Вероятнее всего, такое поведение связано с воспламенением большей части топлива еще внутри горелки за счет легколетучести гептана. Для обоих топлив концентрация С_nH_m у основания пламени уменьшается при увеличении расхода первичного воздуха, подаваемого в горелку. Это указывает на сокращение времени выгорания топлива при подаче большего количества окислителя. На верхней границе факела показания газовых компонент гептана и дизеля сходятся к единым значениям. Можно предположить, что в конечных продуктах сгорания показания по газовому составу будут совпадать. Следует отметить, что для горелочных устройств с естественным притоком воздуха в камеру газогенерации отличий между профилями газовых компонент внутри факела при сжигании дизельного топлива и гептана не отмечалось [28]. Вероятнее всего, это связано в первую очередь с разницами по плотности и вязкости топлив, их воспламеняемостью и скоростью горения (зависящей в том числе от принудительной подачи воздуха (окислителя)). При этом количественное сравнение показывает, что на границе факела значения газовых компонент довольно близки друг к другу. Таким образом, на состав конечных продуктов сгорания большее влияние оказывает комплекс протекающих физико-химических процессов в присутствии пара (газификация [12], расщепление углеводородов [3, 33], разбавление горючей смеси [34, 35], образование активных радикалов ОН [36]), чем свойства топлива.

Полученные экспериментальные результаты могут быть применимы для тестирования математических моделей исследуемого процесса горения с впрыском пара. С учетом указанных отличий следует очень внимательно моделировать горение дизеля его однокомпонентным аналогом н-гептаном.

На рис. 5 представлены фотографии пламени при горении дизельного топлива и гептана в различных соотношениях пар/топливо при изменяемом количестве подаваемого внутрь горелочного устройства воздуха. Внешний вид факела при горении гептана и дизеля почти одинаков, в обоих случаях наблюдается пламя голубого цвета. В случае с гептаном пламя выглядит более «чистым» и имеет ярко-синий оттенок. При горении дизеля на периферии факела присутствуют красно-желтые языки — это свечения догорающего углерода топлива. Отметим, что во всех случаях увеличение подачи окислителя внутрь горелочного устройства приводит к сокращению длины пламени. Это может быть связано с увеличением коэффициента избытка воздуха внутри горелки и скорости потока в факеле, что ведет к интенсификации процессов окисления топлива и более быстрому выгоранию. Эффект уменьшения размеров факела наиболее выражен в случае с гептаном.

На рис. 6 показано содержание СО в зависимости от значений соотношений пар/топливо и величины коэффициента избытка воздуха внутри горелочного устройства. В случае с гептаном содержание монооксида углерода в конечных продуктах сгорания оказывается выше, чем с дизелем, что, вероятно, связано с тем, что при горении гептана образуется меньшее количество сажных частиц, в результате чего снижается влияние пара



Рис. 5. Горение гептана и дизельного топлива в различных режимах.



Рис. 6. Содержание СО в продуктах сгорания в пересчете на кВтч выделяющейся энергии.

Загрязнитель	Класс	1	2	3
СО, мг/(кВт·ч)		≤110	≤110	≤ 60
NO _x , мг/(кВт·ч)		≤ 250	≤ 185	≤ 120

Таблица 3 Европейские нормативы выбросов жидкотопливных горелочных устройств по DIN EN 267

на интенсификацию процесса. При варьировании расхода воздуха внутри горелки для обоих топлив наблюдается тенденция к росту СО. С увеличением доли пара уровень СО снижается как для гептана, так и для дизеля. Объяснение снижению оксида углерода при наличии пара в зоне горения приводилось ранее в работах [13, 14, 26, 29], оно связано с двумя основными эффектами: физическим (разбавление горючей смеси паром) и химическим (газификация углерода топлива). При этом для исследуемого диапазона расходов воздуха $F_a = 2,75 \div 12$ кг/ч показатели по выбросам СО соответствуют самому жесткому — третьему классу европейского норматива для маломощных (до 100 кВт) горелочных устройств DIN EN 267 (см. табл. 3).

На рис. 7 показано содержание оксидов азота в охлажденных продуктах сгорания на выходе из проточного калориметра. Как и для оксида углерода, содержание NO_x растет с увеличением коэффициента избытка воздуха в горелочном устройстве. При этом для гептана уровень NO_x ниже, чем для дизеля. С увеличением доли пара и для гептана, и для дизеля также сохраняется тенденция к снижению оксидов азота (как было показано ранее на примере других видов топлива и горелочных устройствах [13, 14, 26, 29]). Для рассматриваемого диапазона режимных параметров значения NO_x удовлетворяют нормативу DIN EN 267 (табл. 3). Управление расходом воздуха в новом горелочном устройстве позволяет дополнительно регулировать уровень выброса токсичных продуктов сгорания в атмосферу.



Рис. 7. Содержание NO_x в продуктах сгорания в пересчете на кВт-ч выделяющейся энергии.



Рис. 8. Теплота сгорания топлива, полученная на проточном калориметре.

Результаты калориметрических измерений при сжигании гептана и дизеля показывают высокую полноту сгорания топлива (рис. 8), близкую к высшей теплоте сгорания (см. табл. 1). Полученные результаты свидетельствуют о высокой полноте сгорания топлива в режиме с подачей пара.

Таким образом, установлено, что при сжигании н-гептана в новом горелочном устройстве с управляемым коэффициентом избытка воздуха сохраняются основные особенности горения жидких углеводородов с подачей пара. Обеспечивается высокая полнота сгорания топлива и низкий уровень токсичных выбросов в атмосферу, удовлетворяющий европейскому нормативу EN 267. Полученные экспериментальные результаты могут быть применимы для тестирования математических моделей исследуемого процесса горения со впрыском пара с учетом указанных локальных отличий между гептаном и дизелем.

Заключение

Проведено экспериментальное исследование тепловых и экологических показателей при сжигании н-гептана с распылением струей перегретого водяного пара в новом горелочном устройстве с принудительной подачей воздуха в камеру газогенерации. Выполнено сопоставление полученных результатов с данными для дизельного топлива.

Результаты сравнения показателей горения в факеле исследуемого паромасляного горелочного устройства показали, что характер зависимостей газовых компонент внутри факела для дизеля и гептана отличается. Это связано в первую очередь с разной плотностью, вязкостью топлив, их воспламеняемостью и скоростью горения, зависящей в том числе от принудительной подачи воздуха (окислителя). При этом количественное сравнение показывает, что на границе факела значения газовых компонент довольно близки друг к другу. На состав конечных продуктов горения большее влияние оказывает комплекс протекающих физико-химических процессов в присутствии пара (газификация, расщепление углеводородов, разбавление горючей смеси, образование активных радикалов OH), чем свойства топлива. При горении гептана и дизеля факел имеет почти одинаковый внешний вид, в обоих случаях пламя голубого цвета. Увеличение подачи окислителя внутрь горелочного устройства ведет к сокращению длины пламени. Профили температуры в факеле при сжигании гептана и дизеля демонстрируют схожий вид. Установлено, что при сжигании н-гептана в новом горелочном устройстве с управляемым коэффициентом избытка воздуха сохраняются основные особенности горения жидких углеводородов с подачей пара. Обеспечивается высокая полнота сгорания топлива и низкий уровень токсичных выбросов в атмосферу, удовлетворяющий европейскому нормативу EN 267. С увеличением доли пара в горючей смеси сохраняется тенденция к снижению CO и NO_x. Управление расходом воздуха в камере газогенерации горелки позволяет дополнительно регулировать уровень выброса токсичных продуктов сгорания в атмосферу. Динамика зависимостей выбросов CO и NO_x повторяется для гептана и дизеля с некоторыми локальными отличиями.

Полученные экспериментальные результаты могут быть применимы для тестирования математических моделей процесса горения со впрыском пара. С учетом указанных допущений следует очень внимательно моделировать горение дизеля его однокомпонентным аналогом н-гептаном.

Список литературы

- Bello O.W., Zamani M., Abbasi-Atibeh E., Kostiuk L.W., Olfert J.S. Comparison of emissions from steamand water-assisted lab-scale flames // Fuel. 2021. Vol. 302. P. 121107-1–121107-12.
- Fan Y., Wu T., Xiao D., Xu H., Li X., Xu M. Effect of port water injection on the characteristics of combustion and emissions in a spark ignition direct injection engine // Fuel. 2021. Vol. 283. P. 119271-1–119271-12.
- 3. 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.
- 4. Xue R., Hu C., Sethi V., Nikolaidis T., Pilidis P. Effect of steam addition on gas turbine combustor design and performance // Applied Thermal Engng. 2016. Vol. 104. P. 249–257.
- 5. Sehat A., Ommi F., Saboohi Z. Effects of steam addition and/or injection on the combustion characteristics: A review // Thermal Sci. 2021. Vol. 25, Iss. 3. Part A. P. 1625–1652.
- 6. Anufriev I.S. Review of water/steam addition in liquid-fuel combustion systems for NO_x reduction: Waste-toenergy trends // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. Vol. 138. P. 110665-1–110665-13.
- Anufriev I.S., Alekseenko S.V., Kopyev E.P., Sharypov O.V. Combustion of substandard liquid hydrocarbons in atmosphere burners with steam gasification // J. Engng Thermophysics. 2019. Vol. 28, Iss. 3. P. 324–331.
- Anufriev I., Kovyev E., Alekseenko S., Sharypov O., Butakov E., Vigriyanov M., Sadkin I. Cleaner crude oil combustion during superheated steam atomization // Thermal Sci. 2021. Vol. 25, Iss. 1. Part A. P. 331–345.
- 9. Anufriev I.S., Shadrin E.Y., Kopyev E.P., Alekseenko S.V., Sharypov O.V. Study of liquid hydrocarbons atomization by supersonic air or steam jet // Applied Thermal Engng. 2019. Vol. 163. P. 114400-1–114400-12.
- Anufriev I.S., Kopyev E.P., Sadkin I.S., Mukhina M.A. Diesel and waste oil combustion in a new steam burner with low NO_x emission // Fuel. 2021. Vol. 290. P. 120100-1–120100-9.
- Anufriev I.S., Shadrin E.Y., Kopyev E.P., Sharypov O.V. Experimental investigation of size of fuel droplets formed by steam jet impact // Fuel. 2021. Vol. 303. P. 121183-1–121183-7.
- 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.
- 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.
- 14. 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.
- 15. Пат. № 2684300 РФ, МПК⁵¹ F23L 7/100, F23D 5/04. Паромасляное горелочное устройство / Ануфриев И.С., Вигриянов М.С., Алексеенко С.В., Шарыпов О.В., Копьев Е.П.; патентообладатель ИТ СО РАН. № 2018105056; заявл. 09.02.2018; опубл. 05.04.2019, Бюл. № 10.
- 16. Алексеенко С.В., Ануфриев И.С., Вигриянов М.С., Копьев Е.П., Садкин И.С., Шарыпов О.В. Сжигание мазута в струе водяного пара в новом горелочном устройстве // Прикл. механика и техн. физика. 2000. Т. 58, № 3. С. 11–18.
- Kopyev E.P., Anufriev I.S., Mukhina M.A., Sadkin I.S. Combustion of kerosene sprayed with a jet of superheated steam // J. Physics: Conf. Series. 2021. Vol. 2119, Iss. 1. P. 012040-1–012040-6.

- 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.
- Lemaire R., Faccinetto A., Therssen E., Ziskind M., Focsa C., Desgroux P. Experimental comparison of soot formation in turbulent flames of diesel and surrogate diesel fuels // Proceedings of the Combustion Institute. 2009. Vol. 32, Iss. 1. P. 737–744.
- 20. Zhang K., Xin Q., Mu Z., Niu Z., Wang Z. Numerical simulation of diesel combustion based on n-heptane and toluene // Propulsion and Power Research. 2019. Vol. 8, Iss. 2. P. 121–127.
- Pitz W.J., Mueller C.J. Recent progress in the development of diesel surrogate fuels // Progress in Energy and Combustion Sci. 2011. Vol. 37, Iss. 3. P. 330–350.
- 22. Li B., Liu N., Zhao R., Egolfopoulos F.N., Zhang H. Extinction studies of flames of heavy neat hydrocarbons and practical fuels // J. Propulsion and Power. 2013. Vol. 29, Iss. 2. P. 352–361.
- Ra Y., Reitz R.D. A combustion model for IC engine combustion simulations with multi-component fuels // Combustion and Flame. 2011. Vol. 158, Iss. 1. P. 69–90.
- 24. Kolaitis D.I., Founti M.A. On the assumption of using n-heptane as a "surrogate fuel" for the description of the cool flame oxidation of diesel oil // Proceedings of the Combustion Institute. 2009. Vol. 32, Iss. 2. P. 3197–3205.
- 25. Minakov A.V., Kuznetsov V.A., Anufriev I.S., Kopyev E.P. Numerical analysis of a pre-chamber vortex burner with a steam blast atomizer // Fuel. 2022. Vol. 323. P. 124375-1–124375-14.
- 26. Anufriev I.S., Kopyev E.P., Alekseenko S.V., Sharypov O.V., Vigriyanov M.S. New ecology safe waste-toenergy technology of liquid fuel combustion with superheated steam // Energy. 2022. Vol. 250. P. 123849-1– 123849-17.
- Sadkin I.S., Kopyev E.P., Mukhina M.A., Anufriev I.S. Experimental study of the characteristics of heptane combustion in a high-speed steam jet // J. Physics: Conf. Series. 2022. Vol. 2233, Iss. 1. P. 012001-1–012001-6.
- Anufriev I.S., Kopyev E.P., Mukhina M.A., Sadkin I.S. Investigation into characteristics of combustion of n-heptane sprayed by jet of steam or air // J. Engng Thermophysics. 2022. Vol. 31, Vol. 3. P. 420–428.
- 29. Копьев Е.П., Шадрин Е.Ю., Садкин И.С., Мухина М.А., Шимченко С.Ю. Экспериментальное исследование горения жидких углеводородов в условиях паровой газификации в присутствии газа-разбавителя // Физика горения и взрыва. 2022. Т. 58, № 4. С. 71–78.
- 30. Уникальная научная установка УСУ «Крупномасштабный термогидродинамический стенд для исследования тепловых и газодинамических характеристик энергоустановок». Дата обращения 16.02.2023 г. [Электронный ресурс]. URL: http://ckp-rf.ru/usu/73570.
- 31. DIN EN 267:2011-11. Automatic forced draught burners for liquid fuels. 2011.
- 32. ГОСТ 25828-83. Гептан нормальный эталонный. 2009.
- 33. De Joannon M., Sabia P., Cozzolino G., Sorrentino G., Cavaliere A. Pyrolitic and oxidative structures in hot oxidant diluted oxidant (HODO) MILD combustion // Combustion Sci. and Technology. 2012. Vol. 184, Iss. 7–8. P. 1207–1218.
- 34. Lellek S., Barfuß C., Sattelmayer T. Experimental study of the interaction of water sprays with swirling premixed natural gas flames // J. Engng for Gas Turbines and Power. 2017. Vol. 139, Iss. 2. P. 021506-1–021506-9.
- 35. Cavaliere A., De Joannon M. Mild combustion // Progress in Energy and Combustion Sci. 2004. Vol. 4, Iss. 30. P. 329–366.
- 36. Donohoe N., Heufer K.A., Aul C.J., Petersen E.L., Bourque G., Gordon R., Curran H.J. Influence of steam dilution on the ignition of hydrogen, syngas and natural gas blends at elevated pressures // Combustion and Flame. 2015. Vol. 162, Iss. 4. P. 1126–1135.

Статья поступила в редакцию 20 сентября 2022 г.,

после доработки — 5 декабря 2022 г.,

принята к публикации 8 декабря 2022 г.