

УДК 62.643

## Влияние параметров перегретого водяного пара на процесс горения жидких углеводородов\*

С.В. Алексеенко<sup>1</sup>, И.С. Ануфриев<sup>1,3</sup>, С.С. Арсентьев<sup>1,2</sup>,  
М.С. Вигриянов<sup>1</sup>, Е.П. Копьев<sup>1</sup>, О.В. Шарыпов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет

<sup>3</sup>Новосибирский государственный технический университет

E-mail: anufriev@itp.nsc.ru

Исследованы характеристики процесса горения жидких углеводородов в струе перегретого водяного пара. Определено влияние физических параметров пара на распределение температуры в факеле, тепловую мощность и состав продуктов сгорания в разработанном горелочном устройстве.

**Ключевые слова:** горелочное устройство, жидкое топливо, струя перегретого водяного пара, состав продуктов, калориметрические измерения.

Высокие требования, предъявляемые к эффективности и безопасности современных технологий использования жидких углеводородов при производстве энергии, переработке сырья и утилизации отходов производства, стимулируют поиск принципиально новых физико-технических подходов при разработке горелочных устройств [1, 2]. Одним из перспективных направлений развития таких технологий является сжигание жидких углеводородов в струе перегретого водяного пара [2–5], который интенсифицирует процесс (обеспечивает устойчивое воспламенение и высокую скорость реакции) и положительно влияет на состав продуктов сгорания. На примере сжигания дизельного топлива в горелочных устройствах с подачей в зону горения струи перегретого водяного пара [6] было показано, что скорость потока в факеле, измеренная на основе метода цифровой трассерной визуализации, может достигать 30 м/с [7]. Наблюдалась высокая концентрация таких промежуточных компонентов как CO, H<sub>2</sub> (продукты паровой газификации), был зафиксирован низкий уровень содержания сажи в продуктах сгорания — 35 мг/м<sup>3</sup> [8], а также существенное улучшение экологических показателей по сравнению с полученным по технологиям интенсификации горения, основанным на увеличении расхода воздуха: снижении концентраций NO<sub>x</sub> (в 1,8 раза) и CO (10,4 раза) [3].

---

\* Работа выполнена за счет гранта РФФИ (проект № 18-79-10134).

Результаты исследований [2, 3, 6–8] были получены на автономных горелочных устройствах (10–50 кВт) испарительного типа. Под автономностью здесь подразумевается отсутствие специального внешнего устройства для получения и подачи перегретого пара. Применение автономных горелочных устройств при проведении экспериментов обеспечивает постоянные значения расхода и параметров состояния пара [6], но не позволяет получать данные о закономерностях при полностью контролируемых режимных параметрах, необходимых для физического обоснования эффективных способов управления процессом. В настоящей работе экспериментально исследуется горение отработанного трансмиссионного автомобильного масла при регулируемой принудительной подаче струи перегретого водяного пара в зону горения. Целью работы является изучение влияния физических параметров потока пара, таких как расход и температура, на процесс горения жидких углеводородов в разработанном горелочном устройстве.

Исследования выполнялись на автоматизированном огневом стенде, оснащенный прямоточным горелочным устройством испарительного типа мощностью до 10 кВт, электрическим парогенератором со средней потребляемой мощностью 1,5 кВт (см. схему на рис. 1), плунжерным дозирующим насосом с расходом до 1,6 л/ч, автоматизированными системами управления парогенератором, контролем расхода воды и топлива, подогрева и подачи топлива, а также проточным калориметром и необходимыми контрольно-измерительными приборами. Основными элементами прямоточного горелочного устройства оригинальной конструкции являются: цилиндрический корпус, топочная камера, паровые форсунки и камера газогенерации (материал — сталь 12Х18Н10Т). Габаритные размеры устройства составляют: внешний диаметр топочной камеры — 130 мм, внешний диаметр камеры газогенерации — 56 мм, высота — 180 мм, диаметр выходного отверстия — 32 мм. Естественный приток воздуха из атмосферы в зону реакции происходит через отверстия в нижней части топочной камеры. Предварительно нагретое до 60 °С масло подается в топочную камеру через топливопровод. Стабильный расход топлива задается топливной форсункой и насосом, масса горючего контролируется при помощи электронных весов Аcom РС-100W-10Н с пределом допускаемой погрешности 1 г. Соединенные с внешним парогенератором паровые форсунки с выходным диаметром 0,5 мм установлены соосно над топочной камерой у основания камеры газогенерации и ориентированы вертикально: нижняя направлена вниз, в форкамеру, расположенную в дне топочной камеры, что, согласно данным работы [6], позволяет повысить температуру горения в объеме топки и предотвращает сажеотложение на внутренних деталях, а верхняя направлена вверх, в камеру газогенерации. Парогенератор позволяет на выходе получать перегретый водяной пар со следующими параметрами: температура  $T_s$  — до 550 °С, давление — до 10 атм, средний массовый расход  $F$  — до 1,5 кг/ч. Температура

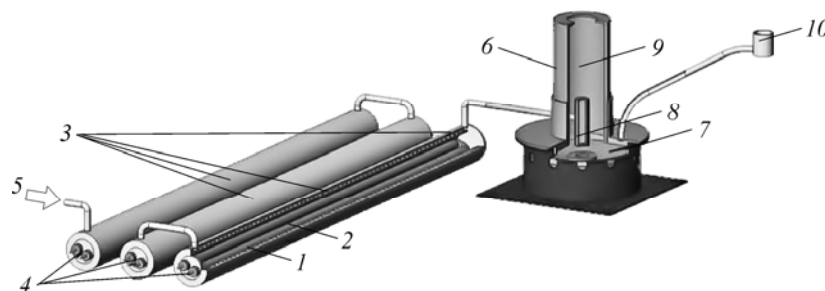


Рис. 1. Схема парогенератора и горелочного устройства.

- 1 — парогенератор, 2 — тепловые электрические нагреватели (ТЭНы), 3 — датчики температуры,  
4 — питание ТЭНов, 5 — подача воды, 6 — горелочное устройство, 7 — топочная камера,  
8 — паровые форсунки, 9 — камера газогенерации, 10 — топливоприемник.

пара измеряется хромель-алюмелевыми термопарами, размещенными на стенках парогенератора. Давление контролируется с использованием цифрового датчика давления ОВЕН ПД-100, погрешность которого составляет 1 кПа. Стабильная подача воды в парогенератор обеспечивается плунжерным дозировочным насосом НД 0,5Р 1,6/100 К14А с классом точности 0,5. Масса воды контролируется при помощи электронных весов Асом РС-100W-5 с пределом допускаемой погрешности 0,5 г.

Химический состав используемого топлива, определенный по результатам компонентного химического анализа, включал в себя в пределах указанной относительной погрешности до 9 % по методике гравиметрического анализа массовых долей углерода в количестве 84,2 %, водорода — 13,5 %, кислорода — 1,6 %, азота — 0,7 %, серы и др. элементов — менее 0,1 %. Схема процесса аналогична описанной в работе [3]: испаряющиеся компоненты смеси воспламеняются в топочной камере в условиях недостатка окислителя (кислорода воздуха). Образующиеся первичные сажевые частицы с характерным размером 20–40 нм имеют квази-сферическую форму с луковичной структурой и расстоянием между слоями менее 1 нм, они формируют агрегаты с цепочно-разветвленной структурой [8]. При турбулентном перемешивании с перегретым водяным паром происходит газификация продуктов термического разложения и неполного сгорания горючего. Образующийся синтез-газ ( $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ ) догорает в факеле, смешиваясь с кислородом из внешней атмосферы.

Результаты исследований показали слабую зависимость характеристик процесса, к которым относятся распределение температуры в факеле, тепловая мощность и состав продуктов сгорания, от температуры пара (в пределах погрешности измерений). Гораздо большее влияние оказывает расход пара. Эксперименты проводились при заданном постоянном расходе горючего  $F_f = 0,675$  кг/ч для разных значений относительного расхода пара  $\gamma = F/F_f$ . В диапазоне  $\gamma = 0,3–1,4$  наблюдалось устойчивое горение. При  $\gamma < 0,3$  формируется сажистое пламя, топливо выгорает не полностью, а при  $\gamma > 1,4$  наблюдается нестабильность процесса, высокий расход пара приводит к срыву горения.

С помощью платинородий-платинородиевой термопары получены профили температуры во внешнем факеле вдоль вертикальной оси горелки (рис. 2). Максимальное значение температуры достигает  $1400^\circ\text{C}$  и понижается с уменьшением  $\gamma$ . Характерный продольный размер светящейся зоны, называемой длиной факела, изменяется от 0,27 до 0,1 м при увеличении  $\gamma$  от 0,31 до 1,38. По мере увеличения  $\gamma$  и уменьшения длины факела область с максимальной температурой приближается к срезу горелки.

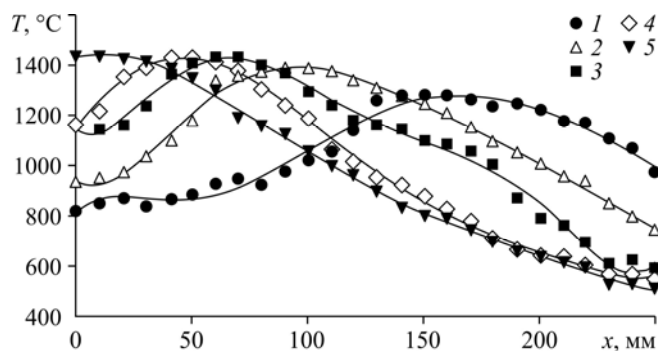


Рис. 2. Распределение средней во времени температуры во внешнем факеле вдоль вертикальной оси горелки при различном расходе перегретого водяного пара при  $T_s = 250^\circ\text{C}$ .

$\gamma = 0,31$  (1), 0,54 (2), 0,75 (3), 0,97 (4), 1,38 (5).

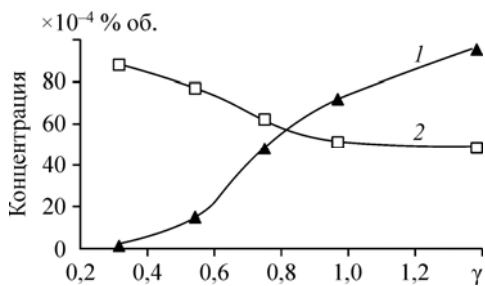


Рис. 3. Концентрация CO и NO<sub>x</sub> при различном соотношении расходов пара и топлива при  $T_s = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ .  
1 — CO, 2 — NO<sub>x</sub>.

С помощью проточного калориметра [3] измерялось количество тепла, получаемое при охлаждении продуктов сгорания до температуры окружающей среды. Температура теплоносителя, в данном случае воды, измерялась на входе и на выходе калориметра с помощью хромель-алюмелевых термопар. Объемный расход воды регулировался краном и регистрировался водосчетчиком с импульсным выходом ВСХд-20, пределы относительной погрешности которого составляли 2 %, а цена одного импульса — 1 л. Объемный расход и температура газов, выходящих из калориметра, определялись с помощью цифрового термоанемометра AV9201 с погрешностью измерения скорости и температуры  $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$  и 2 % соответственно и электронного термометра Теттех ЛТ-300 с погрешностью 0,05. Факел горелочного устройства вводился во внутренний канал калориметра после установления постоянной разности температуры воды на входе и выходе. Измерения проводились при установлении в калориметре стационарного теплового режима. Характерное время тепловой релаксации калориметра составляло 6,5 мин. Результаты показали, что удельное тепловыделение на 1 кг горючего не зависит от расхода пара и составляет  $q = 45 \text{ МДж/кг}$  при тепловой мощности горелочного устройства 8,5 кВт. Указанное значение  $q$ , определенное за вычетом получаемой в парогенераторе тепловой энергии, близко к значению высшей теплоты сгорания.

Состав охлажденных газообразных продуктов горения контролировался газоанализатором TESTO 350, позволяющим измерять следующие компоненты: CO ( $0 \div 500 \text{ мг/кг}$ )  $\pm 5 \%$ , NO ( $0 \div 300 \text{ мг/кг}$ )  $\pm 5 \%$ , NO<sub>2</sub> ( $0 \div 500 \text{ мг/кг}$ )  $\pm 5 \%$ . Забор проб продуктов реакции проводился на выходе калориметра. Для всех исследуемых режимов содержание токсичных компонентов CO и NO<sub>x</sub> в уходящих газах было существенно ниже предельно допустимой концентрации [9] (см. рис. 3). Было определено, что с увеличением расхода пара концентрация CO растет, а концентрация NO<sub>x</sub> убывает. Следует отметить, что в диапазоне  $\gamma = 0,5 \text{--} 0,8$  реализуются режимы сгорания с уменьшенными выбросами как по NO<sub>x</sub>, так и по CO. Полученные зависимости позволяют прогнозировать содержание токсичных продуктов сгорания.

В результате проведенных экспериментальных исследований получены данные о влиянии физических параметров подаваемого в зону реакции перегретого водяного пара, таких как расход и температура, на основные физико-технические характеристики процесса горения жидкого углеводородного топлива в рассматриваемом горелочном устройстве. Впервые получены данные, характеризующие влияние относительного расхода пара на состав продуктов сгорания, что важно для обоснования нового способа управления процессом горения жидких углеводородов. На примере отработанного трансмиссионного автомобильного масла показано, что стабильный режим интенсивного горения существует в широком диапазоне изменения температуры и расхода пара, причем эти параметры не оказывают заметного влияния на тепловые характеристики процесса. В то же время содержание токсичных веществ в продуктах сгорания сильно зависит от относительного расхода пара. Это позволяет управлять характеристиками процесса, прогнозируя режим сгорания, обеспечивающий высокие показатели как по тепловой эффективности, так и по экологической безопасности.

Список литературы

1. Левко Д.С., Цымбалюк А.Н. Конверсия этанола в барьерном разряде // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41, вып. 5. С. 42–49.
2. Алексеенко С.В., Пашенко С.Э., Саломатов В.В. Нанокластерное инициирование горения неконденсированных углеводородных топлив // Инж.-физич. журнал. 2010. Т. 83, № 4. С. 682–693.
3. Алексеенко С.В., Ануфриев И.С., Вигриянов М.С., Копьев Е.П., Шарыпов О.В. Характеристики процесса сжигания дизельного топлива в горелочном устройстве с подачей струи перегретого водяного пара // Физика горения и взрыва. 2016. Т. 52, № 3. С. 37–44.
4. Furuhashi T., Kawata T., Mizukoshi N., Arai M. Effect of steam addition pathways on NO reduction characteristics in a can-type spray combustor // Fuel. 2010. Vol. 89, No. 10. P. 3119–3126.
5. Jozsa V., Sztanko K. Flame emission spectroscopy measurement of a steam blast and air blast burner // Thermal Sci. 2017. Vol. 21, No. 2. P. 1021–1030.
6. Пат. 2579298 РФ, МПК<sup>С1</sup> F23D 5/04, F23C 99/00. Горелочное устройство / Вигриянов М.С., Алексеенко С.В., Ануфриев И.С., Шарыпов О.В.; заявитель и патентообладатель Ин-т теплофизики СО РАН. № 215105632/06; заявл. 18.02.2015; опубл. 10.04.2016, Бюл. 10.
7. Алексеенко С.В., Ануфриев И.С., Вигриянов М.С., Дулин В.М., Копьев Е.П., Шарыпов О.В. Сажепаровый режим горения жидких углеводородов: распределение скорости в факеле горелки // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21, № 3. С. 411–414.
8. Ануфриев И.С., Бакланов А.М., Боровкова О.В., Вигриянов М.С., Лещевич В.В., Шарыпов О.В. Исследование наночастиц сажи при горении жидких углеводородов с подачей в зону горения струи перегретого водяного пара // Физика горения и взрыва. 2017. Т. 53, № 2. С. 22–30.
9. ГОСТ 20548–87. Котлы отопительные водогрейные теплопроизводительностью до 100 кВт. Общие технические условия. М.: Изд-во стандартов, 2000.

*Статья поступила в редакцию 3 сентября 2018 г.,  
после доработки — 6 октября 2018 г.,  
принята к публикации 11 декабря 2018 г.*

