УДК 662.944.2, 66.069.832

Характеристики топливного спрея при распылении паровой струей^{*}

Е.Ю. Шадрин¹, И.С. Садкин^{1,2}, Е.П. Копьев¹, И.С. Ануфриев^{1,2}, В.В. Лещевич³, С.Ю. Шимченко³

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный технический университет

³Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАНБ, Минск, Беларусь

E-mail: evgen_zavita@mail.ru

С помощью метода теневой фотографии изучены характеристики топливного спрея при распылении паровой струей. Исследуемый способ формирования двухфазного потока для диспергирования жидкого топлива обеспечивает возможность использования широкой гаммы углеводородов и повышает ресурс работы топочного оборудования за счет отсутствия в нем топливных распыляющих форсунок. С использованием длиннофокусного макроскопического объектива измерен дисперсный состав отработанного машинного масла при различных частотах подачи топлива: 10, 25 и 40 Гц. С использованием PIV-алгоритмов определена скорость дисперсной фазы, которая составила 60 м/с для всех исследованных режимов. Показано, что частота подачи жидкого топлива не оказывает влияния на размеры и скорость формируемых капель топлива.

Ключевые слова: перегретый пар, распылительная горелка, жидкое топливо, водяной пар, распыление, теневой метод, дисперсный состав.

Введение

Теплотехнические и экологические показатели сжигания жидкого топлива определяются в первую очередь качеством его диспергирования [1-3]. Эффективное распыление топлива определяет смесеобразование, стабильность воспламенения, повышает скорость испарения, горения и полноту сгорания топлива, влияет на уровень эмиссии токсичных продуктов [4]. Согласно [5], уменьшение размеров топливных капель является важным фактором для обеспечения высокой полноты сгорания жидкого топлива. Это особенно существенно при сжигании тяжелых и низкокачественных видов жидких топлив и горючих

^{*} Исследование дисперсного состава топливного спрея выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-58-00046) и БРФФИ (проект № Т20Р-344) в рамках совместного научного проекта. Скоростная визуализация выполнена за счет средств РНФ (проект № 19-79-30075).

[©] Шадрин Е.Ю., Садкин И.С., Копьев Е.П., Ануфриев И.С., Лещевич В.В., Шимченко С.Ю., 2022

отходов, разработка методов управления горением которых сегодня вызывает широкий интерес в мире [6–9]. В настоящее время для генерации качественного топливного спрея наиболее востребованы форсунки высокого давления [10] и пневматические форсунки [11]. Однако такие устройства чувствительны к загрязненным топливам и могут засоряться, закоксовываться и вызывать сбои в работе оборудования.

В Институте теплофизики СО РАН был предложен способ сжигания жидкого углеводородного топлива в струе перегретого водяного пара [12], при котором топливо через подающую трубку попадает в паровую струю. Взаимодействие с паровой струей обеспечивает эффективное распыление [13], а величина образующихся частиц топлива способствует более легкому воспламенению. Кроме того, в генерируемом двухфазном потоке имеет место паровая газификация компонентов топлива [14]. Благодаря особым физикохимическим процессам, протекающим в присутствии пара, данный способ сжигания отличается низкой эмиссией вредных веществ (таких как монооксид углерода, несгоревшие углеводороды, оксиды азота [15-17]) при высокой степени полноты сгорания. Кроме того, в исследуемом горелочном устройстве отсутствует прямой контакт топлива с поверхностями форсунки. В совокупности это обеспечивает возможность сжигания не только качественного жидкого топлива (дизель, бензины, керосин), но и тяжелых и низкокачественных углеводородов (мазут, отработанное масло) в горелках малой мощности (от 15-20 кВт) [15, 18, 19] с возможностью масштабирования до 200 кВт и более. Сегодня маломощные горелочные устройства особенно перспективны в условиях развития малой распределенной энергетики и при решении задач теплоснабжения отдельных промышленных и жилых объектов, в которых требуется оборудование ограниченной мощности.

При разработке и создании горелочных устройств необходимо обеспечить точную регулировку подачи топлива в горелочное устройство для его устойчивой работы. На практике для решения таких задач применяются дозирующие форсунки, пропускная и регулирующая способность которых характеризуются частотой и скважностью открытия дозирующего клапана [20]. В связи с нестандартным способом распыления и сжигания топлива, реализуемым в горелках ИТ СО РАН, возникает потребность изучения влияния частоты дозирования топлива при взаимодействии со струей пара на характеристики спрея. Ранее авторами было обнаружено, что частота открытия затвора топливной форсунки сказывается на стабильности работы горелочного устройства и обуславливает срыв пламени [17]. Исследование этого феномена послужило мотивацией для настоящей работы при начальном предположении, что частота подачи топлива может определять изменение дисперсного состава формируемого спрея.

Цель представленной работы заключается в исследовании влияния частоты подачи жидкого топлива через дозирующую форсунку на эффективность распыла топлива высокоскоростной струей перегретого водяного пара.

Экспериментальная установка

Для проведения экспериментальных исследований влияния частоты подачи жидкого топлива на эффективность его распыла высокоскоростной струей перегретого водяного пара использовался вертикальный блок распыла (рис. 1), устанавливаемый в лабораторный образец распылительного горелочного устройства [17]. Топливо подавалось через топливоподающую трубку к основанию паровой струи на расстоянии 2 мм от паровой форсунки. Диаметр выходного отверстия форсунки составлял 0,6 мм.

Для исследования характеристик топливного спрея при распылении топлива паровой струей использовался открытый огневой стенд [14], основными элементами которого являются: горелочное устройство с исследуемым блоком распыла, автоматизированная система подачи топлива и пара, измерительные приборы, вентиляция. Дозирующая топливная форсунка (типовая автомобильная форсунка BOSCH 0280158502) устанавливалась непосредственно перед топливоподающей трубкой, по которой топливо натекает на паровую струю.

Исследование дисперсного состава топливного спрея в зависимости от частоты подачи топлива проводилось при помощи теневого метода (Shadow Photography — SP [13, 21]). Для этого использовался измерительный комплекс «Полис» в составе следующего оборудования: цифровая CCD-камера, источник света, блок синхронизации. Принципиальная схема установки представлена на рис. 1.

В эксперименте использовалась цифровая ССД-камера ImperX B6620 (разрешение 6600×4400 пикс., частота съемки 2 Гц) с длиннофокусным объективом Infinity K2 Distamax с насадкой CF-2. Такая конфигурация объектива позволяет получать изображение с высоким оптическим увеличением (3,5:1), что дает возможность различать капли размером от 2 мкм. В качестве источника света использовался фоновый экран с люминесцентным покрытием на основе родамина 6G, который освещался расфокусированным лучом импульсного лазера Nd:YAG QuantelEVG с длиной волны, равной 532 нм, энергией в импульсе до 145 мДж, длительностью импульса 10 нс. Для повышения контрастности теневой фотографии использовался пороговый светофильтр (560 нм), полоса пропускания которого соответствует длине волны света, переизлучаемого родамином. Для обеспечения наибольшей четкости фотографии плоскость фокусировки объектива камеры располагалась в непосредственной близости к объекту исследования. Съемка проводилась в двухкадровом режиме с задержкой 10 мкс между кадрами. Это позволяло вычислять скорость дисперсной фазы путем определения скорости каждой идентифицированной капли на всех изображениях (серия из 100 изображений для каждого режима) с применением алгоритма Particle Tracking Velocimetry (PTV). После чего проводилось осреднение по элементарным ячейкам 128×128 пикселей.

При использовании метода теневой фотографии (SP) возможная ошибка измерения диаметра капель определяется главным образом погрешностью определения границы образа капли при цифровой обработке, которая оценивается на уровне 0,5 пикс., что соответствует 1 мкм в случае используемого объектива Infinity.



Рис. 1. Принципиальная схема лабораторной установки и системы распыла топлива.

Результаты

Изучение влияния частоты подачи топлива на характеристики распыла проводилось на примере отработанного масла как одного из наиболее распространенных видов жидких горючих отходов (плотность 863 кг/м³, вязкость 69 сСт при 40 °C). Была проведена серия экспериментов при различных значениях частоты подачи топлива через дозирующую форсунку: 40, 25 и 10 Гц. Задавались фиксированный расход топлива 1200 г/ч и расход пара 800 г/ч. Расходы топлива и пара были выбраны исходя из условий стабильного горения отработанного масла в низкоэмиссионном распылительном горелочном устройстве мощностью 10–20 кВт, разработанном в ИТ СО РАН [15, 22]. Температура пара поддерживалась постоянной — 250 ± 10 °C — и обеспечивала перегрев пара на ~ 100 градусов. При давлении пара свыше 5 атм число Маха на выходе из форсунки превышает единицу [23].

На рис. 2 представлены характерные теневые фотографии в области на срезе форсунки в последовательные моменты времени (5 мс) при частоте подачи 40 Гц, полученные в результате высокоскоростной съемки. Отработанное масло имеет высокое поверхностное натяжение, поэтому на снимках можно видеть, как при столкновении с паром струя топлива сначала вытягивается в виде одной тонкой нити на периферии паровой струи. Распыление топлива носит нестационарный характер, что связано со скважностью используемой топливной форсунки [17]. По мере перемешивания и дробления паром образовавшаяся нить распадается на множество более мелких нитей (рис. 3), а впоследствии на отдельные капли. Анализ рис. 3 показывает, что частота подачи топлива не оказывает заметного влияния на качественную структуру формируемого топливного спрея.

Возможности используемой в работе измерительной системы имеют ограничения, не позволяющие получать полную картину о всем исследуемом газокапельном потоке. Алгоритм дает возможность идентифицировать частицы только сферической формы, поэтому не удается определить размеры нитевидных структур, присутствующих в потоке. В связи с этим часть капель топлива не анализируется в работе. Визуальные оценки



Рис. 2. Теневые фотографии распыляемого топлива на уровне паровой форсунки в последовательные моменты времени (5 мс) при частоте подачи топлива 40 Гц.



Рис. 3. Характерные теневые фотографии дробления топлива струей пара на расстоянии 30 мм выше форсунки в зоне воспламенения топлива.

показывают, что в области воспламенения топлива в горелочном устройстве (см. рис. 3) топливный спрей содержит преимущественно одиночные капли. Распределение частиц по размерам (рис. 4*a*) и по массе (рис. 4*b*) получено для идентифицированных алгоритмом сферических капель в измерительной плоскости.

На рис. 4 представлены зависимости дисперсного состава топлива от частоты его подачи, полученные в результате обработки и осреднения серий из 100 фотографий. На рис. 4*a* представлена гистограмма, показывающая отношение количества идентифицированных капель из заданного диапазона по размерам n_d (2–4 мкм, 4–6 мкм и т.д.) к общему числу зарегистрированных капель *N*. На рис. 4*b* представлено суммарное массовое содержание топлива в каплях меньше заданного размера, отнесенное к общему количеству топлива, содержащемуся во всех идентифицированных на снимках каплях.

Наибольшее количество идентифицированных частиц (~ 90 %) имеют размер менее 20 мкм (рис. 4*a*). Результаты обработки полученных снимков показывают (рис. 4*b*), что частицы такого размера в потоке содержат около 10 % массы идентифицированного



Рис. 4. Дисперсный состав топлива (а) и массовая доля топлива, содержащаяся в каплях топлива размером меньше заданного (b)
в зависимости от частоты подачи топлива через дозирующую форсунку.
1 — 40 Гц, 2 — 25 Гц, 3 — 10 Гц.

Шадрин Е.Ю., Садкин И.С., Копьев Е.П., Ануфриев И.С., Лещевич В.В., Шимченко С.Ю.



Рис. 5. Поля скорости дисперсной фазы в области воспламенения. a - 40 Гц, b - 25 Гц, c - 10 Гц.

на снимках топлива. В то же время наибольшую относительную массу имеют идентифицированные частицы размером от 30 до 110 мкм. Такое распыление жидкого топлива с использованием пара оказывается достаточным для качественного сжигания в разработанной горелке [15–17, 23]. Анализ результатов показывает, что с учетом описанных выше ограничений измерительной системы размер сферических капель в потоке слабо зависит от частоты подачи топлива в рассматриваемом диапазоне частот.

В работе также проводилось измерение скорости дисперсной фазы в области воспламенения (рис. 3). Для этого теневые фотографии были инвертированы и обработаны с использованием алгоритма PTV аналогично тому, как это делалось в работе [13]. На рис. 5 представлены поля осредненной скорости дисперсной фазы топливного спрея. Характерная скорость капель масла в потоке в области воспламенения (30–40 мм) составляет 60 м/с, что ниже, например, скорости капель дизельного топлива (~80 м/с) на 25 % [13] и скорости несущей (газовой) фазы (~100 м/с) на 40 % [23]. Это связано с большей инерционностью образующихся капель масла по причине его более высокой плотности и вязкости. В то же время для всех исследованных в работе частот дозирования топлива скорость капель оставалась постоянной.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что частота подачи топлива не влияет на характеристики спрея (размер и скорость капель). Следовательно, можно сделать вывод о том, что частота подачи топлива влияет на пределы воспламенения (срыв пламени, вынос несгоревших частиц топлива за границы факела) распыляемого перегретым водяным паром топлива в исследуемых горелочных устройствах преимущественно за счет скорости подачи топлива.

Заключение

Исследовано распыление отработанного машинного масла высокоскоростной струей перегретого водяного пара при изменении частоты подачи последнего через дозирующую

форсунку (10, 25 и 40 Гц) применительно к исследуемому образцу лабораторного паромасляного горелочного устройства. С помощью метода теневой фотографии определен дисперсный состав сферических капель топлива. Обработка пар кадров теневых фотографий алгоритмом PTV продемонстрировала, что характерная скорость капель масла равна 60 м/с. Это ниже установленной скорости капель при распыле дизельного топлива на 25 % и несущей фазы на 40 %. Показано, что изменение частоты подачи топлива не приводит к изменению структуры топливного спрея, дисперсного состава топлива и скорости капель для исследуемого блока распыла горелочного устройства. Пределы воспламенения распыляемого перегретым водяным паром топлива в исследуемых горелочных устройствах зависят от изменения частоты подачи топлива преимущественно за счет скорости подачи топлива. Полученные результаты позволяют оценить пределы режимов работы исследуемых паромасляных горелочных устройств и могут применяться при разработке низкоэмиссионных горелок для сжигания жидких горючих отходов.

Список литературы

- Hummel S., Berner H.J., Altenschmidt F., Schenk M., Bargende M. Investigations on the spray-atomization of various fuels for an outwardly opening piezo injector for the application to a pilot injection passenger car gas engine // SAE Technical Papers. 2020. Art. No. 2020-01-2117.
- Manipurath S. Experimental study of superheated kerosene jet fuel sprays from a pressure-swirl nozzle // Proc. ASME Turbo Expo 2017. Paper No. G-T2017-64846. 15 p.
- Jedelsrý J., Jícha M. Spray characteristics and liquid distribution of multi-hole effervescent atomizers for industrial burners // Applied Thermal Engng. 2016. Vol. 96. P. 286–296.
- Mlkvik M., Jedelsky J., Karbstein H.P., Gaukel V. Spraying of viscous liquids: influence of fluid-mixing mechanism on the performance of internal-mixing twin-fluid atomizers // Appl. Sci. 2020. Vol. 10. P. 5249.
- Danis A.M., Namer I., Cernansky N.P. Droplet size and equivalence ratio effects on spark ignition of monodisperse N-heptane and methanol sprays // Combustion and Flame. 1988. Vol. 74, Iss. 3. P. 285–294.
- 6. Ağbulut U., Yeşilyurt M.K., Sarıdemir S. Wastes to energy: Improving the poor properties of waste tire pyrolysis oil with waste cooking oil methyl ester and waste fusel alcohol a detailed assessment on the combustion, emission, and performance characteristics of a CI engine // Energy. 2021. Vol. 222. P. 119942-1–119942-15.
- Nyashina G.S., Kurgankina M.A., Strizhak P.A. Environmental, economic and energetic benefits of using coal and oil processing waste instead of coal to produce the same amount of energy // Energy Conversion and Management. 2018. Vol. 174. P. 175–187.
- 8. Kalinci Y., Dincer I. Waste energy management // Comprehensive Energy Systems. 2018. Vol. 5. P. 91–133.
- Tainaka K., Fan Y., Hashimoto N., Nishida H. Effects of blending crude Jatropha oil and heavy fuel oil on the soot behavior of a steam atomizing burner // Renewable Energy. 2019. Vol. 136. P. 358–364.
- Pereira G.G., Cleary P.W., Serizawa Y. Prediction of fluid flow through and jet formation from a high pressure nozzle using Smoothed Particle Hydrodynamics // Chem. Eng. Sci. 2018. Vol. 178. P. 12–26.
- Hede P.D., Bach P., Jensen A.D. Two-fluid spray atomisation and pneumatic nozzles for fluid bed coating / agglomeration purposes: a review // Chem. Eng. Sci. 2008. Vol. 63, Iss. 14. P. 3821–3842.
- 12. Пат. 2219455 РФ МПК⁵¹ F23C 11/00, F23L 7/00. Способ бессажного сжигания топлива / Вигриянов М.С., Саломатов В.В., Алексеенко С.В.; патентообладатель ИТ СО РАН, Вигриянов М.С., Саломатов В.В., Алексеенко С.В. № 202103813/06; заявл. 11.02.2002; опубл. 20.12.2003, Бюл. № 35.
- 13. Anufriev I.S., Shadrin E.Yu., 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. Diesel fuel combustion by spraying in a superheated steam jet // Fuel Processing Technology. 2019. Vol. 192. P. 154–169.
- 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, No. 1. Part A. P. 331–345.
- 16. Anufriev I.S., Kopyev E.P., Sadkin I.S., Mukhina M.A. Diesel and waste oil combustion in a new steam burner with low NOX emission // Fuel. 2021. Vol. 290. P. 120100-1–120100-9.
- Anufriev I.S., Kopyev E.P., Sadkin I.S., Mukhina M.A. NOx reduction by steam injection method during liquid fuel and waste burning // Process Safety and Environmental Protection. 2021. Vol. 152. P. 240–248.
- 18. 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. 2020. Т. 61, № 3. С. 11–18.

- 19. Ануфриев И.С., Красинский Д.В., Шадрин Е.Ю., Копьев 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.
- Osipowicz T., Prajwowski K. Possibilities of research electromagnetic fuel injectors // J. of KONES Powertrain and Transport. 2017. Vol. 24, No. 2. P. 167–175.
- 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.
- 22. Пат. 2740722 РФ МПК⁵¹ F23D 11/20, F23L 7/00. Паромасляное горелочное устройство / Вигриянов М.С., Ануфриев И.С., Копьев Е.П., Садкин И.С., Шарыпов О.В.; № 2020119233; патентообладатель ИТ СО РАН; заявл. 03.06.2020; опубл. 20.01.2021, Бюл. 2.
- 23. 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 Eng. Thermophysics. 2019. Vol. 28. P. 324–331.

Статья поступила в редакцию 17 января 2022 г., после доработки — 14 марта 2022 г., принята в печать 22 марта 2022 г.