

УДК 662.944.2, 66.069.832

## Распыление жидкого топлива высокоскоростной струей водяного пара\*

И.С. Ануфриев<sup>1</sup>, Е.Ю. Шадрин<sup>1</sup>, Е.П. Копьев<sup>1</sup>, О.В. Шарыпов<sup>1</sup>,  
В.В. Лещевич<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАНБ, Минск

E-mail: anufriev@itp.nsc.ru

С помощью метода теневой фотографии исследован дисперсный состав капель, образующихся при распылении жидкого топлива высокоскоростной струей перегретого водяного пара. Такой способ распыления исключает засорение топливных каналов и распылительных устройств при сжигании некондиционных жидких углеводородов. В работе использован длиннофокусный макроскопический объектив, создающий оптическое увеличение 7:1 и обеспечивающий возможность регистрации частиц размерами от 1 мкм. Установлено, что преимущественный размер идентифицированных капель топливного спрея составляет 1–2 мкм.

**Ключевые слова:** жидкое топливо, водяной пар, распыление, теневой метод, дисперсный состав.

Для эффективного использования жидкого топлива в горелочных устройствах необходимо его подготовить к сжиганию, мелко и равномерно распылив и хорошо смешав с окислителем [1]. Увеличение удельной площади межфазной поверхности при диспергировании повышает скорость испарения топлива и интенсивность межфазного обмена энергией и импульсом. Качество диспергирования топлива определяет эффективность смесеобразования, стабильность воспламенения, скорость химической реакции и полноту выгорания топлива, тепловыделение и состав продуктов сгорания (в том числе эмиссию токсичных компонентов). Для диспергирования жидкого топлива, как правило, применяют распылительные форсунки [1, 2]. Они эффективны для сжигания качественных видов топлива (керосина, бензина, дизеля) [3, 4]. Для сжигания некондиционных жидких топлив и отходов применение форсунок малопродуктивно, так как возникают проблемы, связанные с очисткой топлива, засорением каналов форсунки и коксованием, которые обуславливаются налипанием топлива на внешние поверхности форсунки, что приводит со временем к сбою в работе горелочных устройств [5, 6]. Для предотвращения засорения из-за возможного присутствия твердых частиц при распылении отработанных жидкостей и суспензий необходимо наличие больших поперечных сечений потока [1]. Другим решением проблемы является распыление жидкости струей газа без использования распылительной форсунки [7, 8].

---

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и БРФФИ в рамках проекта № 20-58-00046.

В работе [9] авторами был предложен перспективный способ сжигания жидкого топлива при распылении его струей перегретого водяного пара. При этом подача пара в зону горения обеспечивает паровую газификацию продуктов термического разложения с образованием водяного газа ( $\text{CO}+\text{H}_2$ ), повышая степень выгорания углерода [10]. Распыление жидкого топлива осуществляется высокоскоростной струей перегретого водяного пара ( $M \approx 1,33$ ) [11], что обеспечивает образование мелкодисперсного потока при отдельной подаче топлива и окислителя в камеру сгорания (рис. 1) [8]. Такой способ распыления препятствует засорению топливных каналов и распылительных устройств и позволяет эффективно сжигать некондиционные жидкие углеводороды, решая одновременно проблему их утилизации. Вместе с тем, пар способствует расщеплению сложных органических соединений и углеводородов, ускоряя процессы испарения и горения. подача пара в зону горения позволяет снизить температуру пламени и в несколько раз уменьшить образование  $\text{NO}_x$  при высокой полноте выгорания топлива [10]. Эффективность сжигания топлива и экологические характеристики зависят, в том числе, от размеров капель. Поэтому для управления процессом горения необходимо установить зависимости дисперсного состава от динамических и тепловых условий.

Ранее авторами было установлено [8], что при распылении жидких углеводородов высокоскоростной паровой струей преимущественный размер капель составляет 10–20 мкм. Однако применяемая при этом измерительная аппаратура и методики ограничивали минимальный размер регистрируемых капель 10 мкм. В настоящей работе продолжены исследования характеристик топливного спрея с применением длиннофокусного макрообъектива Infinity K2 Distamax-CF-2-2x NTX tube, позволяющего добиться большего по сравнению с исследованиями [8] оптического увеличения (7:1) для идентификации частиц размерами < 10 мкм. Для измерения дисперсного состава и структуры газочапельного потока применялся метод теневой фотографии [12] (рис. 2). Регистрация изображений капель осуществлялась с использованием CCD камеры ImperX B6620 (разрешение 29 Мпикс, частота съемки 1 Гц). Получение контрастного изображения обеспечивалось применением импульсного лазера Nd:YAG QuantelEVG-145 с длительностью импульса 10 нс. Для повышения контрастности теневой фотографии использовался пороговый светофильтр (560 нм), полоса пропускания которого соответствует длине волны света, переизлучаемого родамином. Плоскость фокусировки объектива камеры расположена в непосредственной близости к объекту исследования, что позволяет получать теневые фотографии с наибольшей четкостью.

В представленной работе для отладки измерительной методики использовалось качественное жидкое топливо (дизель), которое при взаимодействии со струей пара формирует однородный спрей (рис. 1). Схема паровой форсунки подробно описана в работе [11]. Диаметр ее выходного отверстия составляет 0,6 мм, полный угол раскрытия —  $17^\circ$ .

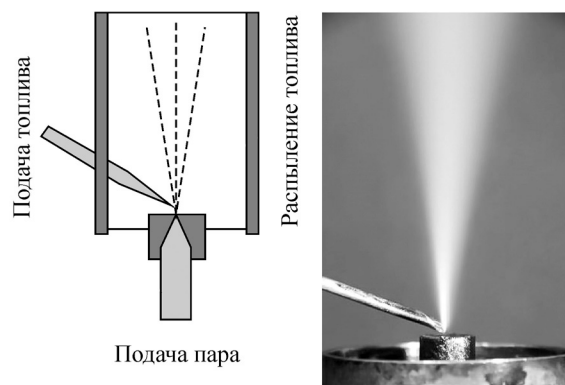


Рис. 1. Схема распыления жидкого топлива паровой струей.

Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

Подача топлива осуществлялась вблизи основания паровой струи на расстоянии 2 мм от форсунки. Температура пара была постоянной — 250 °С, при этом перегрев пара составлял ~ 100 градусов. Измерения проводились для расходов пара и топлива, соответствующих характерному режиму работы экспериментальной горелки мощностью 20 кВт [10].

На рис. 3а приведено характерное изображение регистрируемых капель. Исследуемая область располагалась на оси форсунки на расстоянии 35 мм от среза, где находится зона воспламенения при горении топлива [10].

На этом расстоянии диаметр струи спрея составляет ~11 мм, а скорость капель ~ 85 м/с [8]. Применяемая аппаратура с указанными параметрами позволяет получать фотографии размером 4,4×6,6 мм, при этом 1 пиксель соответствует 1 мкм. Таким образом, обеспечена возможность регистрации капель размерами 1 мкм, что в 10 раз меньше, чем в предыдущей работе авторов [8].

Для цифровой обработки полученных теневых изображений использовался алгоритм «Bubbles Identification», реализованный в программном обеспечении ActualFlow, включающий в себя: алгоритм высокочастотной фильтрации (high-pass), необходимый для выделения границ образов зарегистрированных на изображении объектов; алгоритм бинаризации по пороговому значению; алгоритм определения положения и диаметра сферических капель. Для каждого исследованного режима была проведена серия из 200 пар измерений. Основным источником ошибки при измерении диаметра капель теневым методом является погрешность определения границы образа капли при цифровой обработке, которая оценивается на уровне 0,5 пикс, что соответствует 0,5 мкм при имеющемся оптическом увеличении.

На рис. 3б показаны результаты обработки измерений. На гистограмме представлено распределение частиц по размерам от 1 до 20 мкм: частицы размером меньше 1 мкм

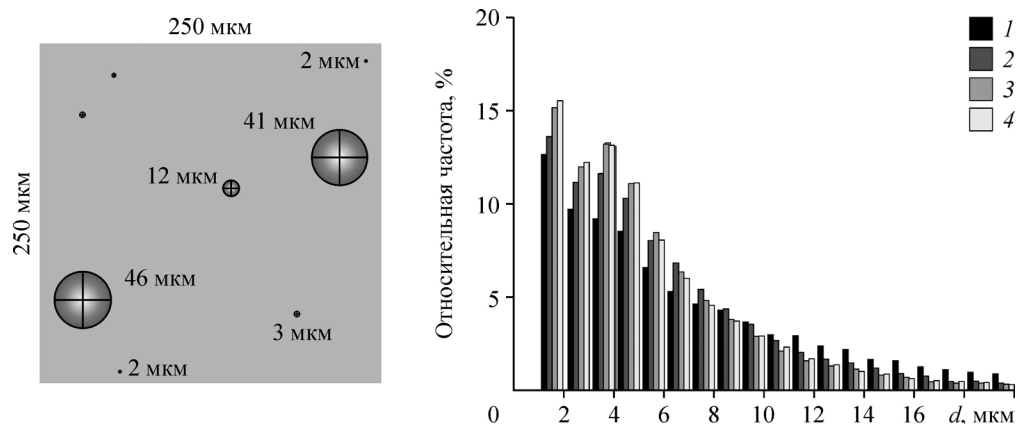
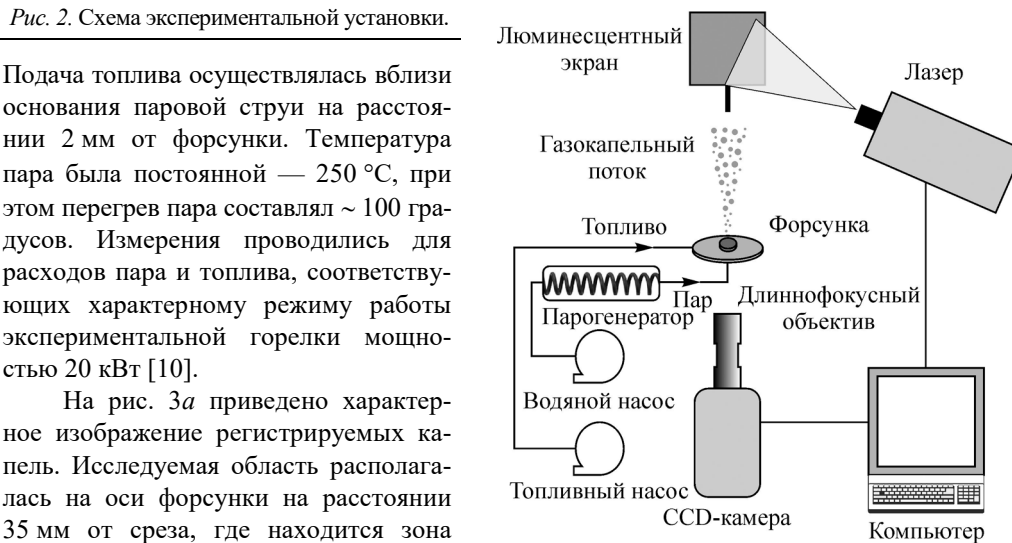


Рис. 3. Фрагмент характерной теневой фотографии топливного спрея в измерительной области (а) и дисперсный состав дизельного топлива на разных расстояниях от форсунки (расход топлива 1,4 кг/ч и расход пара 0,6 кг/ч) (б). Расстояния от форсунки: 35–36 (1), 36–37 (2), 37–38 (3), 38–39 (4) мм.

регистрируются алгоритмом ошибочно, поскольку они занимают на изображении 1 пиксель и определить их границы невозможно; доля частиц размером более 20 мкм составляет менее 1 %. Преимущественный размер частиц в измерительной области составляет 1–2 мкм. По мере удаления от среза горелки (на расстояние более 4 мм) количество более мелких частиц топлива (1–2 мкм) увеличивается на 20 % за счет увеличения времени нахождения в потоке пара, а более крупных (> 10 мкм) — начинает уменьшаться. Это указывает на эффективное испарение жидкого топлива при распылении высокоскоростной паровой струей. Дальнейшие исследования будут направлены на изучение влияния параметров водяного пара на дисперсный состав разных видов топлива.

Стоит отметить, что в потоке присутствуют частицы размером < 1 мкм. Измерение наноразмерных частиц оптическими методами пока еще представляет определенную трудность, связанную с ограничением возможностей приборов. Вместе с тем, для эффективного сгорания жидкого топлива достаточно, чтобы размер частиц составлял 30–50 мкм. Проведенные исследования показали, что предложенный способ распыления топлива с запасом удовлетворяет данному условию и обеспечивает при этом принципиальное практическое преимущество при сжигании некондиционного топлива по сравнению с другими форсунками, исключая их засорение.

### Список литературы

1. Jedelský J., Jícha M. Spray characteristics and liquid distribution of multi-hole effervescent atomisers for industrial burners // *Applied Thermal Engng.* 2016. Vol. 96, No. 5. P. 286–296.
2. Gad H.M., Ibrahim I.A., Abdel-Baky M.E., Abd El-Samed A.K., Farag T.M. Experimental study of diesel fuel atomization performance of air blast atomizer // *Experim. Thermal and Fluid Sci.* 2018. Vol. 99. P. 211–218.
3. Suh H.K., Lee Ch.S. A review on atomization and exhaust emissions of a biodiesel-fueled compression ignition engine // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2016. Vol. 58. P. 1601–1620.
4. Pandey R.K., Rehman A., Sarviya R.M. Impact of alternative fuel properties on fuel spray behavior and atomization // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2012. Vol. 16, No. 3. P. 1762–1778.
5. Badawy T., Attar M.A., Hutchins P., Xu H., Venus J.K., Cracknell R. Investigation of injector coking effects on spray characteristic and engine performance in gasoline direct injection engines // *Applied Energy.* 2018. Vol. 220, No. 15. P. 375–394.
6. Mikaniki P., Ali Najafi S. M., Ghassemi H. Experimental study of a heavy fuel oil atomization by pressure-swirl injector in the application of entrained flow gasifier // *Chinese J. Chemical Engineering.* 2019. Vol. 27, No. 4. P. 765–771.
7. Hia Y., Khezzer L., Alshehhi M., Hardalupas Y. Atomization of impinging opposed water jets interacting with an air jet // *Experim. Thermal and Fluid Sci.* 2018. Vol. 93. P. 11–22.
8. 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, No. 25. Art. No. 114400.
9. Пат. 2684300 РФ, МПК<sup>С1</sup> F23L 7/100, F23D 5/04. Паромасляное горелочное устройство / Ануфриев И.С., Вигриянов М.С., Алексеенко С.В., Шарьпов О.В., Копьев Е.П.; патентообладатель ИТ СО РАН. № 2018105056; заявл. 09.02.2018; опубли. 05.04.2019, Бюл. № 10.
10. 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.
11. Ануфриев И.С., Красинский Д.В., Шадрин Е.Ю., Копьев Е.П., Шарьпов О.В. Исследование структуры газового потока, истекающего из форсунки горелочного устройства распылительного типа // *Теплофизика и аэромеханика.* 2019. Т. 26, № 5. С. 703–718.
12. Бойко В.М., Нестеров А.Ю., Поплавский С.В. Диспергирование жидкости в высокоскоростных коаксиальных газовых струях // *Теплофизика и аэромеханика.* 2019. Т. 26, № 3. С. 417–431.

*Статья поступила в редакцию 12 мая 2020 г.,  
после доработки — 24 июня 2020 г.,  
принята в печать 26 июня 2020 г.*