

УДК 536.46: 621.43.056

## Дисперсность капель в факеле распыла форсунок

В.А. Архипов<sup>1,2</sup>, Н.Н. Золоторев<sup>1</sup>, С.А. Басалаев<sup>1</sup>, С.С. Бондарчук<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

<sup>2</sup> Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН  
659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 13

<sup>3</sup> Томский государственный педагогический университет  
634061, г. Томск, ул. Киевская, 60а

Поступила в редакцию 26.01.2018 г.

Представлены результаты экспериментального исследования дисперсного состава жидко-капельного аэрозоля в факеле распыла центробежных форсунок. Для определения размеров капель в факеле распыла с помощью метода измерения малоугловой индикатрисы рассеяния использована новая схема экспериментальной установки. Проведен параметрический анализ, по результатам которого получено критериальное соотношение для максимального размера капель в факеле распыла центробежной форсунки. Показано, что спектр размеров капель в факеле распыла соответствует гамма-распределению.

**Ключевые слова:** жидко-капельный аэрозоль, центробежная форсунка, факел распыла, индикатриса рассеяния, метод малых углов, гамма-распределение, экспериментальное исследование; liquid-drop aerosols, centrifugal nozzle, spray cone, scattering phase function, small-angles method, gamma-distribution, experimental study.

### Введение

Определение дисперсного состава капель при распыле жидкости форсунками является актуальной задачей для расчета процессов горения топливных смесей в двигательных установках, в порошковой металлургии и ряде других отраслей техники и технологий [1].

Для диагностики дисперсности капель в факеле распыла наиболее перспективно применение бесконтактных оптических методов, в частности метода малоугловой индикатрисы рассеяния [2]. Метод обладает рядом преимуществ, к числу которых относятся минимальный объем необходимой априорной информации, возможность измерения параметров капель в факеле распыла и определения функции распределения их по размерам.

В настоящей работе предложена новая схема экспериментальной установки, обеспечивающая существенное увеличение точности измерения угла рассеяния и соответственно результатов идентификации функции распределения капель по размерам [3].

### Экспериментальная установка и методика измерения

Для определения дисперсного состава капель при распыле слутным потоком газа в испытаниях

на лазерно-диагностическом комплексе применен метод измерения угловой индикатрисы рассеяния лазерного излучения (рис. 1).

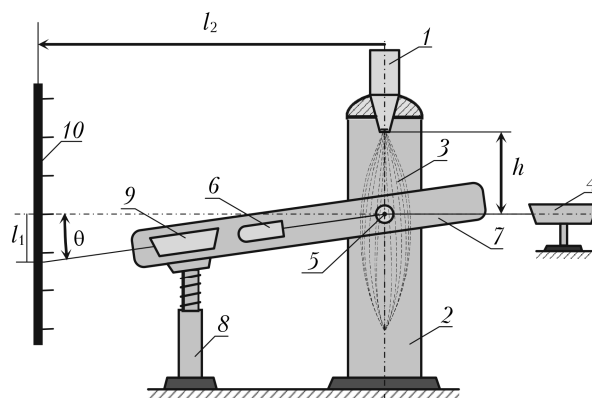


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для определения дисперсности капель в факеле распыла

Исследуемая форсунка 1 смонтирована на штативе, закрепленном на массивной станине 2. Зондирующий луч лазера 4 направлен горизонтально в измерительный объем 5, расположенный на оси симметрии факела распыла 3. Рассеянное в измерительном объеме 5 излучение регистрируется приемной системой 6, которая размещена на консоли 7, шарнирно закрепленной на станине 2 с возможностью вращения в вертикальной плоскости с помощью подшипника. Поворот консоли 7 на угол  $\theta = \pm 10^\circ$  относительно направления зондирующего

\* Владимир Афанасьевич Архипов (leva@niipmm.tsu.ru); Николай Николаевич Золоторев (Nikzolotorev@mail.ru); Сергей Александрович Басалаев (tarm@niipmm.tsu.ru); Сергей Сергеевич Бондарчук (isbs@mail.ru).

излучения осуществляется штативом 8 с микрометрическим винтом, что позволяет измерять индикатрису в данном диапазоне углов рассеяния. С помощью луча лазерной указки 9 фиксируется расстояние  $l_1$  на измерительной шкале 10, расположенной на расстоянии  $l_2 = 2180$  мм от центра измерительного объема 5 [2, 3]. Угол рассеяния определяется соотношением  $\theta = \text{arctg}(l_1/l_2)$  [4].

Теоретической основой метода определения дисперсного состава капель в факеле распыла является аналитическое описание рассеяния света частицами, более крупными по сравнению с длиной волны излучения, под малыми углами к направлению падающего излучения. При выполнении условий однократности рассеяния и рассеяния независимыми частицами полидисперсная индикатриса определяется уравнением [5]:

$$I(\theta) = \frac{I_0}{\theta^2} \int_0^{\infty} r^2 f(r) J_1^2(\beta\theta) dr, \quad (1)$$

где  $I_0$  — интенсивность прямого пучка, падающего на частицы излучения;  $\beta = 2\pi r/\lambda$  — параметр дифракции;  $\lambda$  — длина волны излучения;  $r$  — радиус частицы;  $f(r)$  — дифференциальная функция счетного распределения частиц по размерам;  $J_1$  — функции Бесселя первого рода первого порядка.

Восстановление функции распределения  $f(r)$  по измеренной индикатрисе рассеяния  $I(\theta)$  проводилось численно с помощью метода и алгоритма расчета, основанных на концепции подбора при решении серии прямых задач для уравнения (1) — методе прямого поиска [5].

В качестве аппроксимирующей функции в (1) использовалось гамма-распределение [6]:

$$f(r) = ar^\alpha \exp(-br), \quad (2)$$

где  $a$ ,  $\alpha$ ,  $b$  — параметры распределения.

### Анализ результатов экспериментальных исследований для центробежной форсунки

Для оценки дисперсного состава капель в факеле распыла центробежной форсунки использовались соотношения, полученные обработкой результатов измерения функции распределения (2) методом малых углов индикатрисы рассеяния лазерного излучения.

В соответствии с теорией размерностей уравнение для определения размеров капель в факеле распыла центробежной форсунки можно представить в виде

$$r_{cp}/\delta = \varphi(\rho_g/\rho, \mu_g/\mu, Re, Oh), \quad (3)$$

где  $r_{cp}$  — некоторый средний радиус капель;  $\delta$  — толщина пленки жидкости, вытекающей из центробежной форсунки;  $\rho_g, \rho$  — плотность газовой и жидкой фазы;  $\mu_g, \mu$  — коэффициент динамической вязкости газа и жидкости.

Первые два критерия подобия (симплексы) в зависимости (3) характеризуют физические свойства жидкости и газа;  $Re = \rho_g u \delta / \mu_g$  — число Рейнольдса для пленки жидкости;  $Oh = \rho_g \sigma \delta / \mu_g^2$  — число Онезорге, где  $u$  — скорость истечения жидкости из сопла форсунки;  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения жидкости. Значения  $\delta$  и  $u$  определялись по теории центробежной форсунки Абрамовича—Клячко [7].

Анализ экспериментальных данных показал, что значения симплексов  $(\rho_g/\rho)$  и  $(\mu_g/\mu)$  относительно слабо влияют на дисперсность капель в факеле. Поэтому соотношение для оценки дисперсности капель упрощается:  $r_{cp}/\delta = \varphi(Re, Oh)$ .

Результаты проведенных экспериментов совместно с известными аппроксимационными формулами позволили рекомендовать следующее соотношение:

$$r_{max}/\delta = (34 + 1,8 \cdot 10^{-3} Oh) / Re^{0,7}, \quad (4)$$

где  $r_{max}$  — максимальный радиус капель (соответствует ординате 0,95 на интегральной кривой функции массового распределения капель по размерам). Графики зависимости максимального диаметра капель  $D_{max}/\delta = 2r_{max}/\delta$  от чисел  $Re, Oh$ , рассчитанные по (4), приведены на рис. 2.

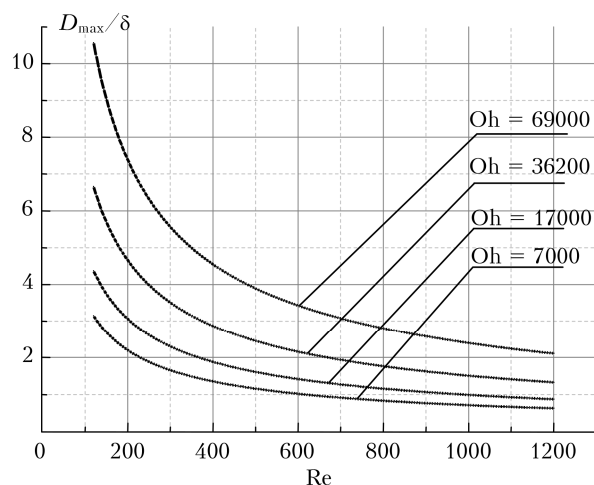


Рис. 2. Зависимость  $D_{max}/\delta$  от значений критериев  $Re$  и  $Oh$

Соотношение (4) выполняется в следующих диапазонах изменения критериев подобия:  $Re = (100 \div 1200)$ ,  $Oh = (7 \div 70) \cdot 10^3$ .

### Заключение

Предложена новая схема экспериментальной установки для реализации метода малых углов индикатрисы рассеяния, обеспечивающая существенное повышение точности измерения угла рассеяния и в конечном счете функции распределения капель по размерам.

Показано, что дисперсный состав капель в факеле распыла центробежной форсунки соответствует унимодальному гамма-распределению.

Обобщением результатов измерения дисперсности капель в факеле распыла центробежной форсунки получена аппроксимирующая формула для зависимости максимального размера капель от определяющих критериев подобия — чисел Рейнольдса и Онезорге.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-19-10014).

1. *Пажи Д.Г., Галустов В.С.* Основы техники распыливания жидкостей. М.: Химия, 1984. 324 с
2. *Трофимов В.Ф., Архипов В.А., Жарова И.К.* Диагностика дисперсного состава жидкокапельных аэрозолей методом малоуглового рассеяния // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 12. С. 1102–1106.
3. *Устройство* для измерения малоугловой индикатрисы рассеяния: Пат. 2612199. Россия, МПК G01N 21/47. Трофимов В.Ф., Архипов В.А., Жарова И.К., Ор-

лов С.Е., Усанина А.С., Астахов А.Л.; Том. гос. ун-т. № 2015151547; Заявл. 01.12.2015; Оpubл. 03.03.2017. Бюл. № 7.

4. *Архипов В.А., Басалаев С.А., Трофимов В.Ф., Золоторев Н.Н.* Лазерная диагностика структуры факела распыла при диспергировании жидкости форсунками // Инженер.-физ. журн. 2017. Т. 90, № 6. С. 1499–1506.
5. *Архипов В.А., Бондарчук С.С.* Оптические методы диагностики гетерогенной плазмы продуктов сгорания. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2012. 265 с.
6. *Архипов В.А., Бондарчук С.С., Квеско Н.Г., Росляк А.Т., Трофимов В.Ф.* Идентификация унимодальных распределений частиц по размерам // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17, № 5–6. С. 513–516.
7. *Васильев А.П., Кудрявцев А.М., Кузнецов В.А., Курпатенков В.Д., Обельницкий А.М., Поляев В.М., Полуян Б.Я.* Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей. М.: Высш. шк., 1967. 675 с.

*V.A. Arkhipov, N.N. Zolotarev, S.A. Basalaeв, S.S. Bondarchuk.* **Dispersion of droplets in the nozzle spray cone.**

The technique and results of an experimental study of the disperse composition of a liquid-drop aerosol in the nozzle spray cone are presented. To determine the particle size in the spray cone using the method of measuring the small-angle scattering phase function a new experimental setup was used. The parametric analysis is carried out. The criterion relations for the maximum diameter of the particles in the spray of the centrifugal nozzle are presented. It is shown that the particle size spectrum in the spray cone corresponds to the gamma distribution.