

УДК 535.8

## ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ГАЗОКАПЕЛЬНЫХ ПОТОКОВ

А. П. Белоусов, П. Я. Белоусов

*Учреждение Российской академии наук  
Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1  
E-mail: abelousov@ngs.ru*

Оптическими методами исследован газокапельный поток, создаваемый пневматической форсункой внутреннего смешения. Измерены дисперсный состав, пространственное распределение капель жидкости для различных фракций и поле их средней скорости.

*Ключевые слова:* форсунки, оптические методы, дисперсный состав, пространственное распределение капель жидкости.

**Введение.** Распыливание — тонкое измельчение жидкостей, приводящее к образованию дисперсного газокапельного потока, — широко применяется в современной технике. Важность параметров процесса требует детального изучения динамики газокапельных течений [1, 2].

При экспериментальном исследовании процесса распыливания жидкости основными величинами являются: коэффициент расхода форсунки, распределение диспергированной жидкости по сечению струи, угол конусности струи, распределение капель по размеру, их средний диаметр и скорость. Существует ряд способов определения числа и размеров капель в газокапельном потоке. Наиболее распространены контактные методы улавливания капель и отпечатков (следов, оставляемых каплями на специально подготовленной поверхности). Часто проводится анализ отвердевших в полёте капель (используется вещество с низкой температурой плавления). В настоящее время широко применяются бесконтактные полевые и точечные оптические методы, использующие отражение, преломление, рассеяние, дифракцию и интерференцию (отражённого от внешней и внутренней поверхности капли излучения) взаимодействующего с каплями излучения [2–6]. Каждый из приведённых методов обладает рядом недостатков. Контактные методы искажают поток, инерционны (между отбором и обработкой проходит некоторое время) и нелокальны (большая область выборки). Оптические методы ограничены небольшой концентрацией дисперсной фазы, требуют использования сложного диагностического оборудования и неоднозначных алгоритмов обработки. На этом фоне перспективным выглядит метод [7], позволяющий сравнительно просто с высокой точностью определять размер и пространственное положение дисперсной фракции в газокапельных и пузырьковых течениях.

Цель данной работы — исследование влияния процессов испарения, конденсации, слияния и дробления капель на дисперсный состав потока, формируемого пневматическими форсунками. Пространственное положение и размер дисперсной фазы определялись на основе [7]. Поле средних скоростей измерялось методом трассерной визуализации PIV (Particle Image Velocimetry) [8].

**Описание экспериментальной установки и методов измерения.** Схема эксперимента представлена на рис. 1. Излучение Nd:YAG-лазера (532 нм) аноморфотной оптической системой преобразовывалось в световой нож толщиной  $h = 1$  мм, который с помощью поворотного зеркала направлялся в исследуемую область потока (срез сопла). Регистрация изображения осуществлялась CCD-камерой с разрешением  $2048 \times 2048$  пикселей ( $18,6 \times 18,6$  мм). При измерении поля скорости физический размер области составлял



Рис. 1

11,34 × 11,34 см. Газокапельный поток формировался пневматической форсункой внутреннего смещения фирмы "Paasche" (США). Давление воздуха на входе 1 атм, диспергируемая жидкость — дистиллированная вода ( $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), средняя скорость капель жидкости на выходе из сопла 50 м/с.

За счёт высокой численной концентрации мелкодисперсной фракции (рассеивающей лазерное излучение изотропно) внешние границы капель в изучаемом потоке визуализируются полностью [7]. Параметры дисперсной фракции могут быть определены следующим образом. После предварительной обработки (бинаризация изображения, заполнение области внутри границы) находится положение центра капли и число пикселей, входящих в её состав. Приведение информации к реальным физическим масштабам осуществляется введением нормировочного коэффициента. По известной площади рассчитывается диаметр капли.

Локальное содержание жидкой фазы определяется отношением площадей:

$$\varphi_S = S_d/S_A,$$

где  $S_A$  — площадь исследуемой области, а  $S_d$  — площадь находящихся в ней капель.

Переход к объёмной концентрации осуществляется при помощи нормировочных коэффициентов. Предположим, что капли представляют собой сферы радиуса  $R_j$ , тогда отношение концентраций  $\varphi_V/\varphi_S$  запишется как

$$\varphi_V/\varphi_S = \left( \left( \frac{4}{3} \pi \sum_{j=1}^n R_j^3 \right) S_A \right) / \left( \left( \pi \sum_{j=1}^n R_j^2 \right) S_A h \right) = \frac{4}{3h} \left( \sum_{j=1}^n R_j^3 / \sum_{j=1}^n R_j^2 \right),$$

где  $n$  — число капель, принадлежащих исследуемой области. Как видно из формулы, нормировочный коэффициент определяется толщиной лазерного ножа и дисперсным составом жидкой фазы [9].

**Экспериментальные результаты.** Дисперсный состав потока приведён на рис. 2. Размер выборки  $\approx 500$  тыс. капель. Средний размер капли 24 мкм, что совпадает с данными, полученными интерферометрическим методом в [10]. Пространственное распределение

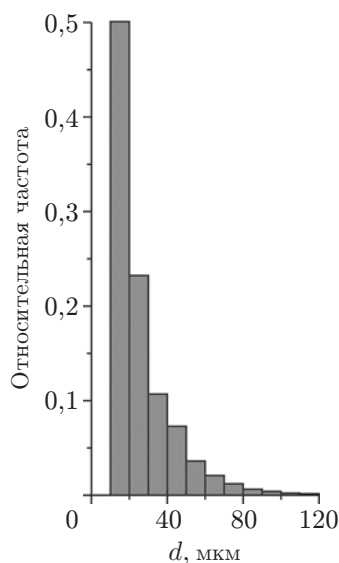


Рис. 2

капель жидкости для различных фракций представлено на рис. 3, *a, b*. Использовались интервалы размеров капель 0–20 мкм и выше 80 мкм. Площадь исследуемой области  $S_A$   $32 \times 32$  пиксела. Строилось поле средней концентрации  $128 \times 128$  пикселей при выборке 2000 изображений. Из рисунка видно, что основной вклад в объёмную концентрацию вносят крупные капли (диаметром больше 80 мкм). Мелкие капли (диаметр меньше 20 мкм) быстро испаряются (концентрация на расстоянии 20 мм от среза сопла существенно снижена). Качественно пространственное распределение дисперсной фазы совпадает с характерными распределениями для пневматических форсунок, приведёнными в работе [11].

Поле средних скоростей в факеле форсунки, полученное методом PIV, показано на рис. 4. Проводилась съёмка двух последовательных кадров с задержкой 20 мкс. При помощи корреляционных алгоритмов [8], реализованных в системе «ПОЛИС» на базе программы ActualFlow v2.1, изображения обрабатывались (размер области  $64 \times 64$  пиксела, перекрытие 50 %) и рассчитывались мгновенные поля скоростей. Полученные данные усреднялись. Размер выборки составлял 200 полей скорости. Из рисунка видно, что газокапельная струя симметрична относительно оси  $y$ . Область с максимальными абсолютными значениями скорости локализована в пределах  $10 < x < 55$  мм,  $-4 < y < 4$  мм.

Зависимость продольной компоненты скорости на оси струи от расстояния между срезом сопла и точкой измерения представлена на рис. 5. Скорость достигает максимума на

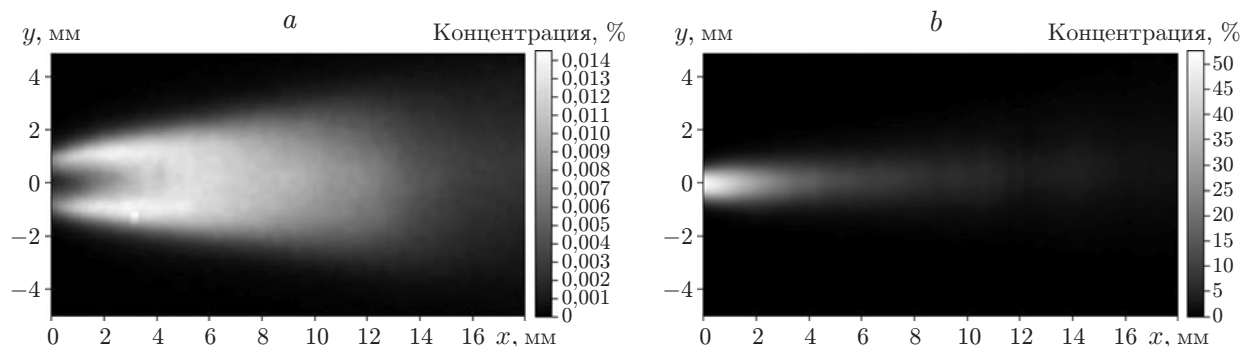


Рис. 3

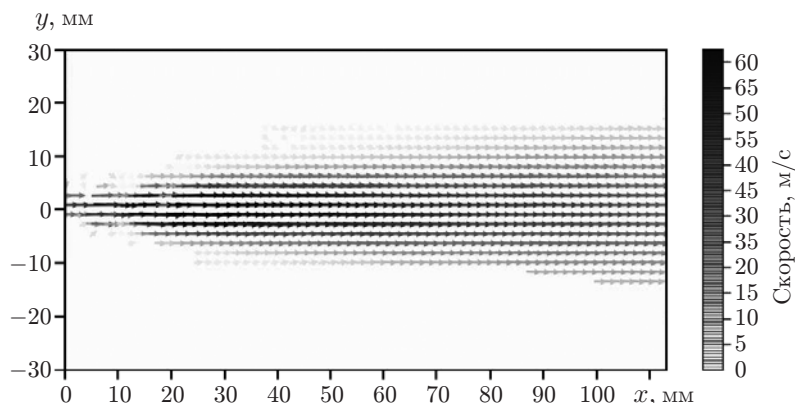


Рис. 4

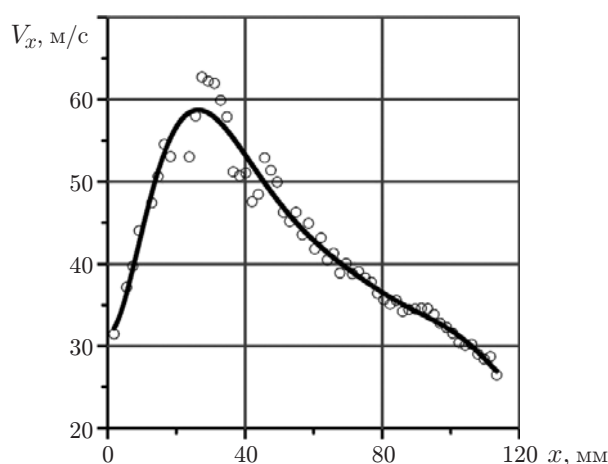


Рис. 5

расстоянии 33 мм от среза сопла и далее плавно уменьшается, что качественно согласуется с данными, приведёнными в [11, 12].

На основании пространственного распределения капель диаметром меньше 20 мкм (см. рис. 3, а) и профиля скорости (см. рис. 5) можно заключить, что время жизни малых капель  $\tau$  составляет величину  $\tau < 0,02 \text{ м}/40 \text{ м/с} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ . В то же время для неподвижных капель того же диаметра согласно [12] время жизни  $\tau \approx 10^{-1} \text{ с}$ .

**Заключение.** Таким образом, метод определения размера дисперсной фазы [7] является эффективным при диагностике газочапельных потоков. Он позволяет получать данные о размерах и пространственном положении мелкодисперсной фазы ( $d < 20 \text{ мкм}$ ) в высокоскоростном ( $> 50 \text{ м/с}$ ) потоке, что чрезвычайно важно при использовании и разработке распыливающих устройств. В сочетании с методом PIV (тот же набор технических средств) может быть получена полная информация о характеристиках газочапельного потока.

Исследование динамики дисперсной фазы в факеле пневматической форсунки выявило важную роль процессов испарения, в частности существенное уменьшение времени жизни ( $\tau < 5 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ ) мелких капель в высокоскоростном потоке.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Физическая** энциклопедия. М.: Большая Российская энциклопедия, 1998. Т. I. 704 с.

2. **Витман Л. А., Кацнельсон Б. Д., Палеев И. И.** Распыливание жидкостей форсунками. Л.: Государственное энергетическое издательство, 1962. 265 с.
3. **Беляев С. П., Никифорова Н. К., Смирнов В. В. и др.** Оптико-электронные методы изучения аэрозолей. М.: Энергоатомиздат, 1981. 232 с.
4. **Шифрин К. С.** Рассеяние света в мутной среде. М.—Л.: ГИТТЛ, 1951. 288 с.
5. **Vauckhage K.** Gleichzeitige Erfassung von Partikelmerkmalen und Eigenschaften mehrphasiger Strömungen mit Hilfe der Phasen-Doppler-Anemometrie // Chemie Ingenieur Technik. 1996. **68**, N 3. S. 253–266.
6. **König G., Anders K., Frohn A.** A new light-scattering technique to measure the diameter of periodically generated moving droplets // Journ. Aerosol Sci. 1986. **17**, N 2. P. 157–167.
7. **Белоусов А. П., Белоусов П. Я.** Метод измерения дисперсного состава и локального газосодержания газожидкостных потоков // Автометрия. 2008. **44**, № 2. С. 50–55.
8. **Raffel M., Willert C., Kompenhans J.** Particle image velocimetry. A practical guide. Berlin: Springer, 1998. 253 p.
9. **Белоусов А. П.** Пространственное распределение газовой фазы в осесимметричной затопленной импактной струе // ПМТФ. 2009. **50**, № 4. С. 33–38.
10. **Бильский А. В., Ложкин Ю. А., Маркович Д. М.** IP1: интерференционный метод измерения диаметров частиц // Тр. X Междунар. науч.-техн. конф. «Оптические методы исследования потоков». М.: МЭИ, 2009. С. 260–263.
11. **Пажи Д. Г., Галустов В. С.** Основы техники распыливания жидкости. М.: Химия, 1984. 256 с.
12. **Лазерное доплеровское измерение скорости потоков жидкости и газов** /Под ред. Г. Л. Гродзовского. М.: ОНТИ ЦАГИ, 1976. № 481. 420 с.

*Поступила в редакцию 11 октября 2009 г.*

---