

УДК 532.5, 621.4

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАЗЕРНЫМ ВРЕМЯПРОЛЁТНЫМ МЕТОДОМ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ФОРСУНОК В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ НАПОРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

© А. С. Лебедев<sup>1</sup>, А. Г. Савицкий<sup>1</sup>, А. С. Северин<sup>1</sup>, В. М. Дулин<sup>1</sup>,  
С. В. Скрябиков<sup>2</sup>, А. В. Вишев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1

<sup>2</sup>ООО «Сигма-Про»,  
630090, г. Новосибирск, ул. Инженерная, 28

<sup>3</sup>Опытное конструкторское бюро «Мотор», ПАО «ОДК-УМПО»,  
450039, г. Уфа, ул. Ферина, 2  
E-mail: anatolylebedev1994@gmail.com

Апробирован лазерный времяпролётный метод для регистрации скоростей и размеров капель в широком диапазоне напорных характеристик пневматических форсунок. Нахождение размеров основано на высокоскоростной регистрации задержки порядков рассеяния при пересечении каплей лазерного луча. Определение скоростей осуществляется по времени пролёта капель между двумя лазерными лучами. В качестве примера рассмотрены две форсунки с соосной подачей жидкости и под углом к воздушному потоку. Особенностью режима таких форсунок является требование высокого напора воздушного потока относительно напора распыливаемой жидкости. Определялись особенности работы пневматических форсунок различной конфигурации при распыливании жидкости в условиях низкого воздушного напора. Регистрация параметров капель проводилась с помощью прибора Spray Spy® (AOM-Systems GmbH), предназначенного для измерений в условиях низкого напора, когда качество распыливания неоптимально из-за присутствия в потоке как низкоинерционных капель малого размера, так и высокоинерционных капель большого размера. Установлено, что прибор позволяет одновременно регистрировать сферические капли размером от 5 до 200 мкм при скоростях от 2 до 120 м/с. Наибольший разброс капель по размерам и скоростям наблюдался при подаче жидкости в воздушный поток под углом. Методом визуализации в контролевом свете выявлена струйная структура факела распыла исследуемых форсунок.

**Ключевые слова:** спрей, пневматическая форсунка, оптические методы исследования потоков, анализ задержки порядков рассеяния сферической капли, time-shift.

DOI: 10.15372/AUT20250310

EDN: WSPMSH

**Введение.** В настоящее время основным источником энергии для человечества остаётся сжигание ископаемых видов топлива. Современные энергетические системы и двигатели внутреннего сгорания достигли высокого уровня надёжности, эффективности и сравнительно низкого уровня выбросов. Однако ужесточение экологических стандартов, предъявляемых к двигателям внутреннего сгорания, требует разработки и внедрения инновационных технологий, направленных на оптимизацию процессов распыла и сжигания топлива. Как показывают исследования [1–3], повышение эффективности сгорания жидкого топлива напрямую связано с увеличением эффективной площади поверхности топливных капель. Пневматические форсунки получили широкое распространение в различных промышленных и инженерных приложениях, включая распыливание краски, распыл и сжигание топлива, сушку эмульсий. Эффективная работа этих форсунок критически важна для достижения желаемых результатов, оптимизации использования ресурсов и

обеспечения качества продукции. Особенностью режима работы таких форсунок является требование высокого напора воздушного потока относительно напора распыливающей жидкости. Анализ работы пневматических форсунок представляет собой значительный вызов для исследователей и инженеров, стремящихся понять и улучшить производительность и качество распыла топлива. Проведение подобных исследований невозможно без применения современных оптических методов диагностики, развитие которых играет ключевую роль в создании инновационных технологий распыливания топлива.

Выбор наиболее подходящей методики для конкретного применения зависит от множества факторов, включая требуемое пространственное и временное разрешения, динамический диапазон измеряемых параметров, наличие оптического доступа и концентрацию частиц [4–7]. Кроме того, в большинстве задач, связанных с механикой жидкости, необходима оценка плотности потока и/или концентрации частиц, что, в свою очередь, требует измерения их скорости. Это ограничивает применение некоторых методов диагностики. Наиболее широко используемыми оптическими методами исследования являются методы, основанные на прямой съемке потока, такие как анемометрия по изображениям частиц (PIV, particle image velocimetry) [8, 9], цифровая трассерная визуализация (PTV, particle tracking velocimetry) и визуализация в контролируемом свете [10]. Эти методы позволяют одновременно определять размеры, форму и скорость частиц в широком диапазоне, а также практически не предъявляют требований к составу исследуемого потока. Однако, несмотря на свои преимущества, реализация данных методов на практике требует использования дорогостоящего оборудования, интегрированного в сложную оптическую схему.

Также широкое распространение получили методы, основанные на принципе интерферометрии, среди которых фазовый доплеровский метод (PDA, phase Doppler anemometry) [11, 12] фактически стал стандартом для точечных измерений скорости и размеров однородных сферических частиц. Фазовый доплеровский метод обладает рядом значительных преимуществ, которые делают его одним из наиболее востребованных инструментов для исследования частиц в потоках. Одним из главных достоинств метода является его высокая точность в определении размеров сферических частиц, таких как капли или пузырьки, в широком диапазоне размеров — от нескольких микрометров до нескольких миллиметров. Это достигается благодаря анализу фазового сдвига между сигналами, рассеянными на частице, что позволяет определять размеры с высокой разрешающей способностью. Кроме того, метод одновременно предоставляет информацию о скорости частиц, что делает его универсальным инструментом для изучения динамики многофазных потоков.

Однако, несмотря на свои преимущества, фазовый доплеровский метод имеет и ряд ограничений. Одним из основных недостатков является его применимость только к сферическим частицам. Для частиц сложной формы или неоднородных по составу метод может давать значительные погрешности [13]. Кроме того, он требует высокой оптической доступности исследуемой области одновременно для источника излучения и детектора, расположенного от него под некоторым углом. В случае работы в режиме прямого рассеяния это может быть затруднительно в условиях сложных промышленных установок или при работе с плотными потоками, где высокая концентрация частиц приводит к многократному рассеянию света и ухудшению качества сигнала. Фазовый доплеровский метод требует использования высокоточных лазеров, детекторов и сложной оптической схемы, что делает его дорогостоящим и труднодоступным [14]. Кроме того, настройка и калибровка системы могут быть трудоёмкими и требовать высокой квалификации оператора.

Одним из активно развивающихся в настоящий момент методов для точечных измерений скорости и размеров однородных сферических частиц является метод анализа времени задержки между порядками рассеяния (TS, time-shift) [15]. Этот метод основан на анализе временной задержки между сигналами, зарегистрированными на нескольких детекторах,

когда частица пересекает лазерный луч. В отличие от фазового доплеровского метода, который использует интерференцию световых волн, метод TS опирается на временные характеристики сигналов при регистрации лазерного излучения, отражённого от внешней и внутренней (после рефракции) поверхностей капли под углом каустики, что делает его более универсальным и применимым к частицам различной формы. Метод TS обладает рядом преимуществ. В отличие от фазового доплеровского метода, который требует строгой сферичности частиц, метод TS может быть использован для определения размеров и скорости частиц даже неправильной формы [16]. Это делает его более универсальным в исследованиях, где частицы могут быть неоднородными или деформированными. В ходе применения данный метод менее зависим от оптических свойств частиц, таких как коэффициент преломления, что упрощает его использование в случаях, когда частицы состоят из разных материалов или имеют сложную внутреннюю структуру. Кроме того, данный метод позволяет регистрировать сигнал обратного отражения, что позволяет значительно упростить оптическую схему, разместив излучатель и детектор в одном приборе [17, 18].

Целью данного исследования является определение особенностей работы пневматических форсунок различной конфигурации при распыливании жидкости в условиях низкого воздушного напора. В исследовании рассмотрены две форсунки с соосной подачей жидкости и под углом к воздушному потоку, для которых характерно требование высокого напора воздушного потока относительно напора распыливаемой жидкости. Установлено, что прибор производства AOM-Systems GmbH (Германия) позволяет регистрировать сферические капли в диапазоне размеров от 5 до 200 мкм при их скоростях от 2 до 120 м/с. Наибольший разброс капель по размерам и скоростям наблюдался при подаче жидкости в воздушный поток под углом. Полученные данные имеют важное значение для анализа качества распыла в условиях, когда в потоке присутствуют как низкоинерционные капли малого размера, так и высокоинерционные капли большого размера, а также при наличии значительной струйности. Результаты исследования позволяют определить границы применимости метода time-shift для диагностики характеристик капель в неоптимальных режимах распыливания.

**Теоретические основы метода TS.** Метод измерения TS впервые был описан Н. В. Семидетновым [19–21], а коммерческая система измерений, основанная на этом методе, была разработана в 2012 г. [22]. Суть метода заключается в регистрации различных порядков рассеяния света при прохождении сферической капли через лазерный луч. Высокоскоростной детектор позволяет оценить задержку различных порядков рассеяния, напрямую связанную со скоростью и диаметром капли. Применение двух лазерных лучей позволяет определить скорость частицы на основе времени пролёта между лучами.

Свет гауссова пучка, рассеянный на сферической частице, представляет собой сумму света, отражённого от поверхности, и света, прошедшего через частицу и отражённого внутри неё. Упрощённое описание временной зависимости интенсивности сигнала рассеяния для гауссова пучка приведено в [23]:

$$S(t) = A_{p=0} \exp\left(-\frac{2(t-t_{p=0})^2}{\sigma^2}\right) + A_{p=1} \exp\left(-\frac{2(t-t_{p=1})^2}{\sigma^2}\right) + \dots + A_{p=2,1} \exp\left(-\frac{2(t-t_{p=2,1})^2}{\sigma^2}\right) = \sum_{p=0;1;2,1\dots} A_p \exp\left(-\frac{2(t-t_p)^2}{\sigma^2}\right), \quad (1)$$

где  $p_n$  — порядок рассеяния;  $A_p$  — амплитуда  $p$  порядка рассеяния;  $t_p$  — временнéе положение пика рассеяния  $p$  порядка;  $\sigma$  — ширина гауссова пика, одинаковая для каждого порядка рассеяния.

Порядок рассеяния отражает количество переотражений, которые претерпел свет до попадания на детектор. Так, порядок ( $p = 0$ ) соответствует отражению от поверхности, ( $p = 1$ ) — прохождению через частицу с преломлением, а ( $p = 2$ ) — отражению от внутренней поверхности перед выходом из частицы. Начиная со второго порядка рассеяния ( $p = 2$ ), могут существовать несколько мод ( $p = 2,1; 2,2; \dots$ ), соответствующих выходу света под одним углом, но с разными точками входа и выхода. Таким образом, набор мод, регистрируемых детектором, зависит от коэффициента преломления жидкости и взаимного расположения источника излучения и детектора, т. е. от угла между ними. В конкретной реализации метода в приборе SpraySpy® компании AOM-Systems GmbH [24] любые скопления жидкости несферической формы зарегистрированы не будут, однако дальнейшее развитие методики позволит регистрировать и их.

Как было отмечено ранее, важным параметром экспериментальной конфигурации является угол рассеяния  $\theta_s$  между лучом и детектором. В случае используемого в данной работе прибора угол  $\theta_s = 162^\circ$ , что позволяет наблюдать три пика рассеяния: ( $p = 0$ ) — отражение от поверхности, ( $p = 2,1$ ) и ( $p = 2,2$ ), соответствующие отражению луча от внутренней поверхности капли.

### Описание эксперимента.

**Объект исследования.** Для атомизации рабочей жидкости использовались две пневматические форсунки (№ 1 и № 2), в каждой из которых была реализована независимая подача воздуха и жидкости. Данные форсунки идентичны, за исключением числа и расположения их выходных отверстий (рис. 1, 2). Конструкция внутренней части форсунки включает в себя коническую сужающуюся и обрезанную плоскостью цилиндрическую камеру. Водный поток направляется в форсунку через приточный канал, расположенный вдоль оси цилиндрической камеры. Внешняя часть форсунки обрамлена металлическим кожухом. Воздушный поток подаётся в зазор между кожухом и телом форсунки через канал, ось которого расположена параллельно основанию цилиндрической камеры форсунки. Отличительной особенностью исследуемых форсунок является число и расположение выходных отверстий относительно корпуса. Форсунка № 1 оснащена тремя выходными отверстиями, размещёнными симметрично на конической поверхности корпуса с шагом  $120^\circ$  относительно горизонтального вращения. Форсунка № 2, в свою очередь, содержит единственное выходное отверстие, центрированное на плоскости среза конуса, что придаёт ей осевую симметрию.

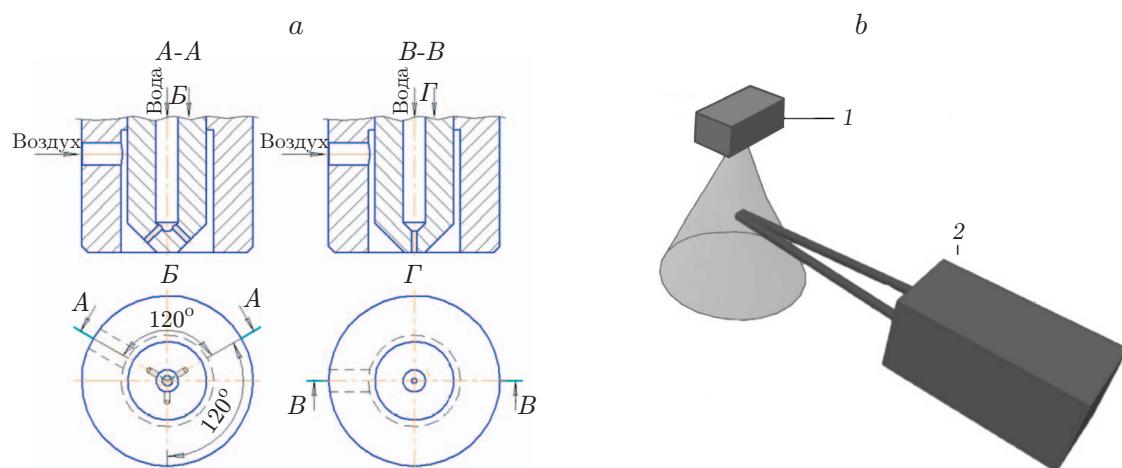


Рис. 1. Эскиз внутренней геометрии исследуемых пневматических форсунок: *a* — вихревая камера, выходные отверстия, приточные каналы; *b* — схема эксперимента: 1 — форсунка, 2 — прибор SpraySpy®

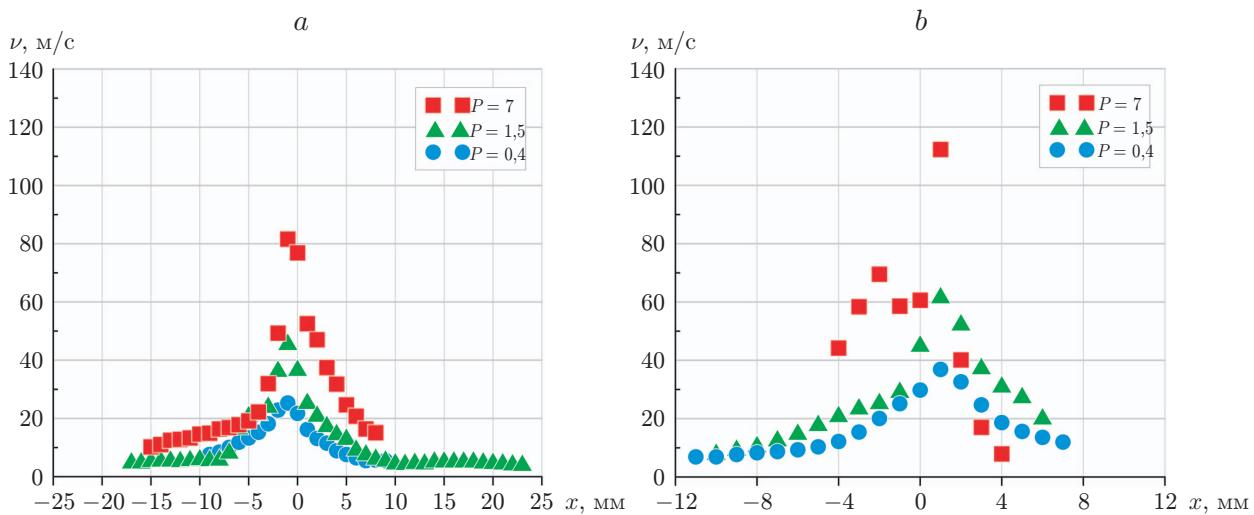


Рис. 2. Пространственная зависимость скорости капель исследуемого течения, полученная методом анализа времени задержки между порядками рассеяния при распыливании воды вдоль сечения  $z = 15$  мм при трёх различных режимах давления подачи рабочей жидкости для форсунок № 1 (а) и № 2 (б)

Таблица  
Режимы подачи воды и воздуха на форсунку

Номер режима	Перепад давления воды $\Delta P_{\text{water}}$ , бар	Перепад давления воздуха $\Delta P_{\text{air}}$ , бар
1	0,40	0,25
2	0,80	0,40
3	1,00	0,46
4	1,20	0,55
5	1,50	0,65
6	2,00	0,75
7	3,00	1,00
8	5,00	2,00
9	7,00	2,50

*Описание установки и оборудования.* В рамках экспериментального исследования проводилось диспергирование смеси воды и воздуха с использованием двух пневматических форсунок, имеющих различную конструкцию. Данные операции осуществлялись при различных условиях, связанных с разницей давлений воды и воздуха, что подробно представлено в таблице. Давление подаваемого на форсунку воздуха составляло от 30 до 40 % относительно давления воды. Система подачи воды функционировала на основе вытеснительной системы, включая элементы в виде баллона со сжатым воздухом и ресивера, содержащего дистиллированную воду. Данная система работала при абсолютном давлении до 10 бар и обеспечивала массовый расход воды до 15 кг/ч. Воздух подавался из сети сжатого воздуха, при этом массовый расход составлял 40 кг/ч, а абсолютное давление в сети достигало 17 бар. Экспериментальная установка была оснащена рядом датчиков давления, включая модели СДВ-И-М(1,6) с максимальным пределом измерений 16 и 25 бар соответственно и основной погрешностью  $\pm 0,5\%$  от избыточного давления, а также Danfoss MBS 3000 и ОВЕН ПД100 ДИ1,0-111-0,5 с верхними пределами измерений 6 и 1 бар с той же основной погрешностью.

Полученная на выходе из пневматической форсунки дисперсная смесь подвергалась анализу с использованием метода анализа времени задержки между порядками рассеяния, реализованного в устройстве SpraySpy® с диапазоном измеряемых размеров капель  $1\text{--}10^3$  мкм, с указанной производителем повторяемостью измерений  $\pm 1,7\%$  диапазоном продольной скорости капель  $1\text{--}170$  м/с и с указанной производителем повторяемостью измерений  $\pm 0,6\%$  размером области измерения  $0,6 \times 0,6 \times 0,6$  мм<sup>3</sup>.

Для выбора области измерения методом TS была проведена визуализация в контролевом свете. Для исследуемых форсунок на удалении 15 мм от среза сопла наблюдается полностью сформировавшийся спрей для всех отобранных режимов распыла. Измерения проводились вдоль сечения  $x \in [-25 \text{ мм}; 25 \text{ мм}]$  с шагом в 1 мм,  $y = \text{const}_1 = 0$  мм (сечение конуса распыла, проходящее через ось форсунки),  $z = 15$  мм, где  $z = 0$  мм соответствует плоскости среза выходного сопла форсунки. Позиционирование измерительного оборудования и лазерного луча осуществлялось с помощью координатного устройства. Выбор диапазона по оси  $x$  обусловлен тем, что за его пределами частота регистрации капель чрезвычайно низкая, и поэтому для таких областей течения информация о дисперсном составе и продольной скорости частиц является недостоверной. Таким образом, границы диапазона измерений соответствуют границам конуса распыливания в данном сечении  $z = \text{const}$ , а частицы, находящиеся за его пределами, являются случайными, вылетевшими под большим углом из сопла.

Визуальный анализ исследуемого течения проводился с помощью метода визуализации в контролевом свете. Реализация данного метода аналогична представленной в [25], для осуществления которого использовалось следующее оборудование: скоростная камера Photron Fastcam NOVA S12, объектив Infinity Photo-Optical K2 DistaMax, обеспечивающий кратность увеличения 2,67–0,34, светодиодный осветитель мощностью 100 Вт (рис. 3). Визуализация в контролевом свете проводилась в режиме 12800 кадр/с с общим разрешением кадра  $1024 \times 1024$  пикселя, физическим размером пикселя  $20 \times 20$  мкм, пространственным разрешением 42,5 пкс/мм, выдержка составила 1/800000 с. Для каждого течения получено 5000 кадров визуализации.

**Результаты исследования и их обсуждение.** При помощи метода анализа времени задержки между порядками рассеяния получена информация о среднем диаметре капель  $D_{\text{капл}}$  и средней продольной скорости капель  $v_{\text{капл}}$  вдоль линии  $y = \text{const}_1 = 0$ ,  $z = \text{const}_2 = 15$  мм (обозначено шкалой на рис. 3, *b*). На рис. 2, 4, 5 представлено сравнение результатов измерений средней продольной скорости капель  $v_{\text{капл}}$  (см. рис. 2), среднего

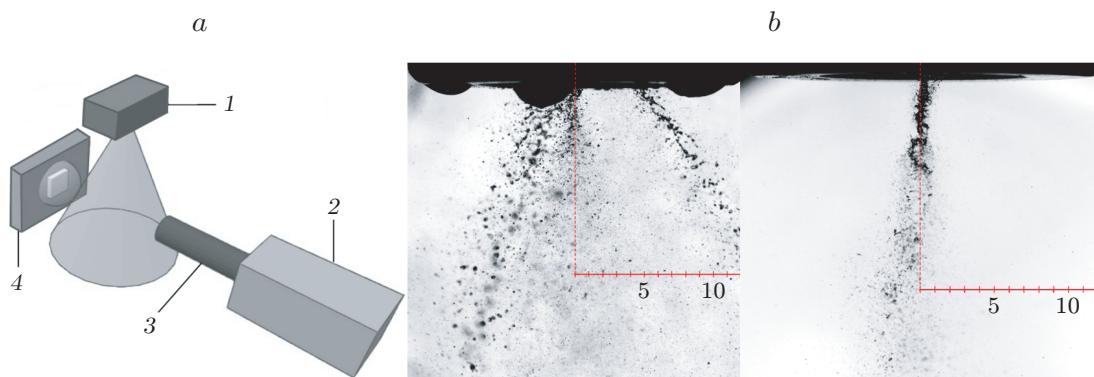


Рис. 3. Схема эксперимента и визуализация распыла двухкомпонентной смеси воды и воздуха при помощи форсунок № 1 (*a*) и № 2 (*b*) для режима  $\Delta P_{\text{water}} = 1,5$  (по таблице): 1 — форсунка, 2 — камера Photron Fastcam NOVA S12, 3 — объектив Infinity Photo-Optical K2 DistaMax, 4 — светодиодный осветитель

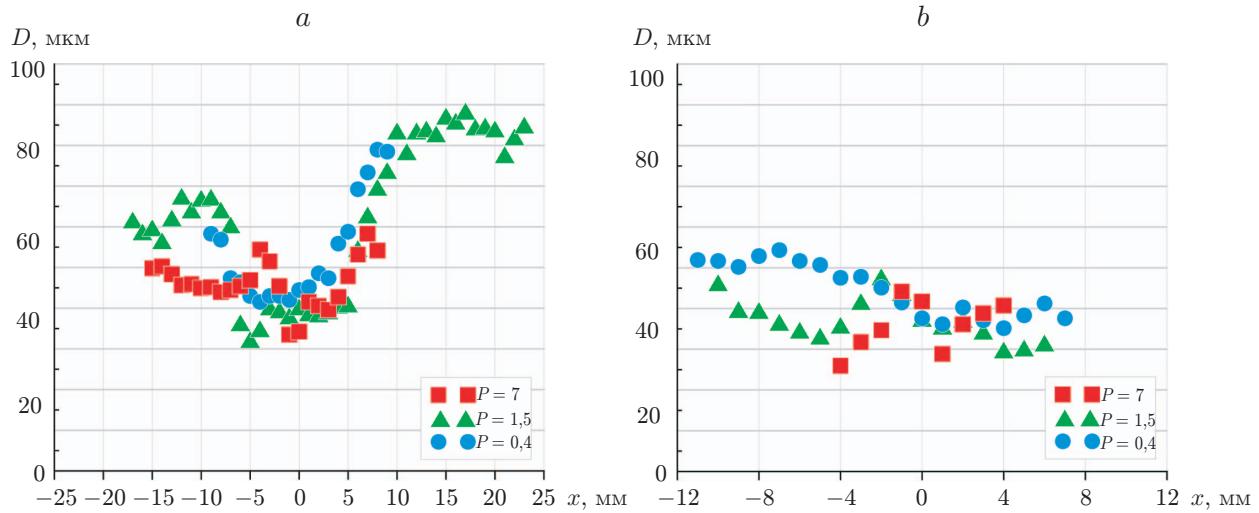


Рис. 4. Пространственная зависимость размера капель  $D_{10}$  исследуемого течения, полученная методом анализа времени задержки между порядками расстояния при распыливании воды вдоль сечения  $z = 15$  мм при трёх различных режимах давления подачи рабочей жидкости для форсунок № 1 (а) и № 2 (б)

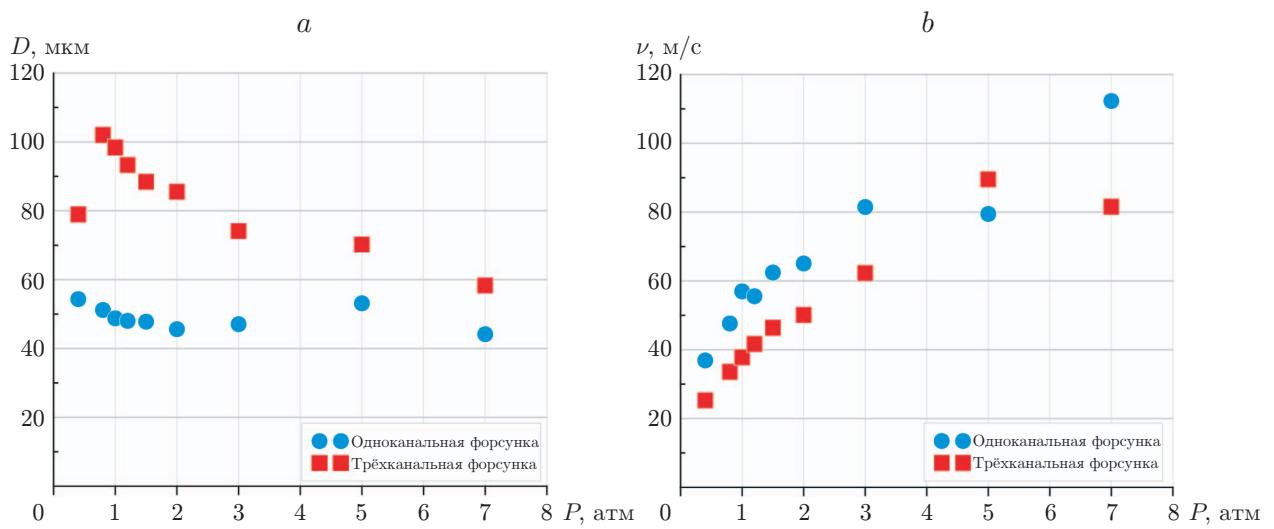


Рис. 5. Зависимость максимального размера капель  $D_{10}$  (а) и максимальной скорости капель (б) в сечении при различном давлении подачи рабочей жидкости для трёхканальной и одноканальной форсунок

диаметра капель  $D_{\text{капл}}$  (см. рис. 4) и максимального размера и скорости капель в зависимости от давления (см. рис. 5) при различных перепадах давления воды и воздуха (см. таблицу).

Обнаружено, что для всех представленных режимов форсунка № 2 позволяет добиться значительно более эффективного распыливания. Средний размер капель при распыливании водовоздушной смеси с помощью форсунки № 2 варьируется в пределах 30–50 мкм, в то время как для форсунки № 1 средний размер капель варьируется в значительно более широком диапазоне (40–90 мкм) и локально может достигать 100 мкм (см. рис. 4). Максимальный зарегистрированный размер капель для форсунки с одним выходным отверстием оставался в диапазоне от 40 до 55 мкм на всём диапазоне измерений, в то время как для случая форсунки с тремя выходными отверстиями максимальный размер капель уменьшался с увеличением давления подаваемой воды (см. рис. 5). При этом при распыливании водовоздушной смеси с помощью форсунки № 1 факел распыливания довольно широкий с шириной конуса на расстоянии  $z = 15$  мм, превышающей 40 мм, при распыливании водовоздушной смеси с помощью форсунки № 2 при тех же перепадах давления воды и воздуха факел распыливания становится значительно уже и не превышает 30 мм. За счёт более

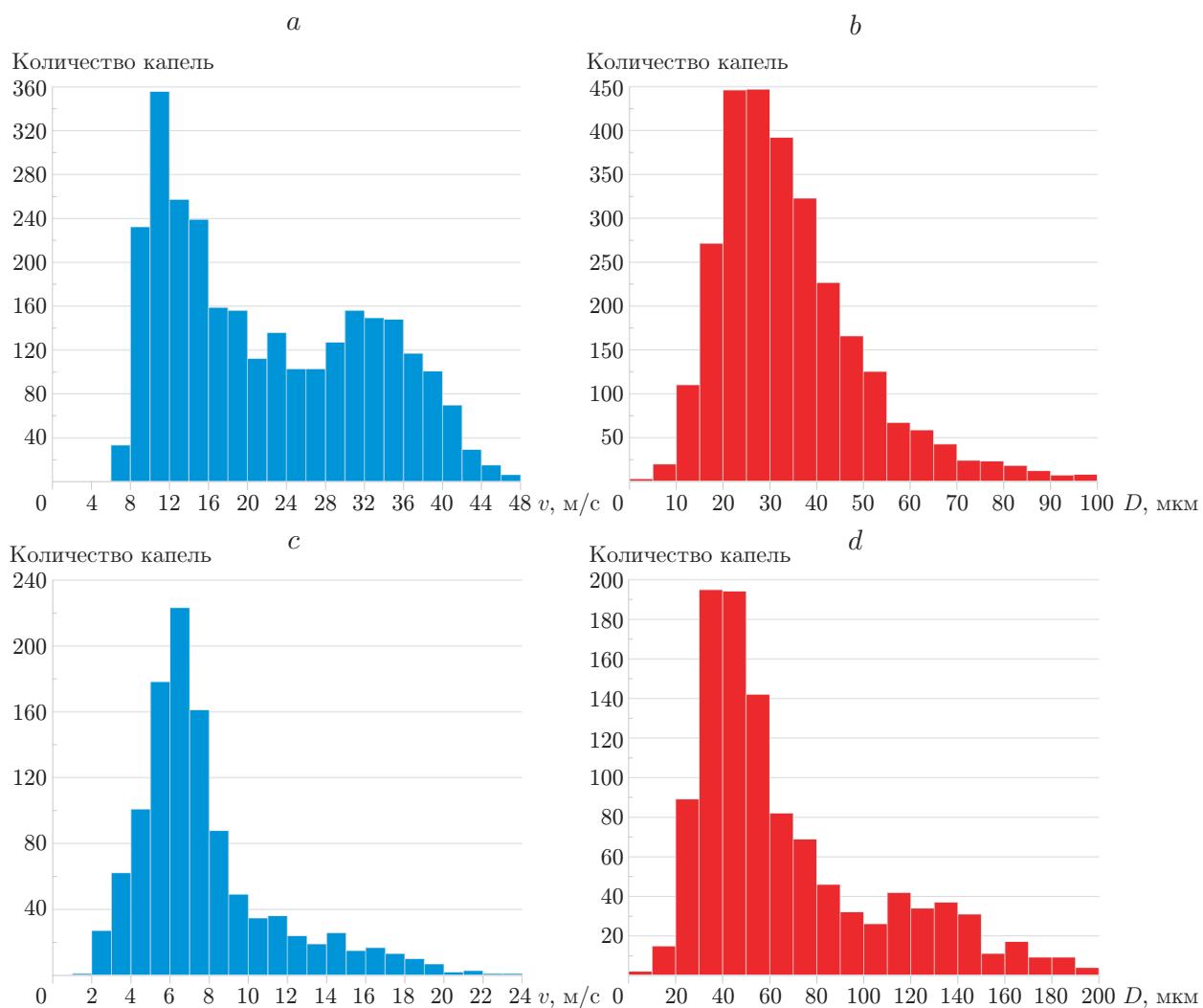


Рис. 6. Гистограмма распределения скорости капель в точках  $x = -4$  (*a*, *b*) и  $x = 9$  (*c*, *d*) для режима  $\Delta P_{\text{water}} = 1,5$  трёхканальной форсунки

узкого факела распыливания и мелкодисперсного состава исследуемой смеси удаётся достичь более эффективной площади, тем самым увеличивая эффективность распыливания смеси.

Кроме того, для некоторых режимов распыливания с помощью форсунки № 1 (имеющей три инжекционных отверстия), например для режима  $\Delta P_{\text{water}} = 1,5$ , для точек, соответствующих ядру струи (левая часть относительно положения оси форсунки) наблюдалось бимодальное распределение по скорости с максимумами при  $v = 12 \text{ м/с}$  и  $V = 33 \text{ м/с}$  в точке  $x = -4$  и бимодальное распределение размера капель при максимуме  $D = 34 \text{ мкм}$  и  $D = 118 \text{ мкм}$  в точке  $x = 9$  (рис. 6). Причина асимметричности и бимодальности данных распределений распыливания с помощью форсунки с тремя инжекционными отверстиями обусловлена геометрической конструкцией исследуемой форсунки, а именно положением инжекционных отверстий относительно плоскости измерения. Пример визуализации распыла представлен на рис. 3.

**Заключение.** В данной работе исследовано распыливание воды пневматическими форсунками с одним и тремя выходными каналами, расположенными соосно и под углом к основному воздушному потоку соответственно. Конструкция форсунок включала в себя цилиндрическую камеру с коническим сужением, обрезанным плоскостью, при этом вода подавалась через осевой приточный канал, а внешняя часть форсунки была обрамлена металлическим кожухом с зазором между ним и корпусом устройства, к тому же основное отличие заключалось в конфигурации выходных отверстий: форсунка № 1 имела три отверстия, симметрично расположенных на конической поверхности с шагом  $120^\circ$ , тогда как форсунка № 2 обладала единственным осесимметричным отверстием в центре срезанного конуса.

Исследования проводились в широком диапазоне перепада давлений воды (0,4–7 бар) при давлении воздуха, составляющем 30–40 % от давления воды. Метод TS, реализованный в системе оптической диагностики SpraySpy®, позволил определить зависимости среднего размера капель (погрешность  $\pm 1,7 \%$ ) и их продольной скорости (погрешность  $\pm 0,6 \%$ ) в поперечном сечении факела распыла. Результаты показали, что форсунка № 2 обеспечивает более однородный распыл со средним размером капель 30–50 мкм, тогда как для форсунки № 1 этот параметр варьировался в диапазоне 40–90 мкм с локальными зонами до 100 мкм; измеренные скорости капель находились в пределах 5–120 м/с. Кроме того, при помощи метода визуализации в контролируемом свете были получены изображения факелов распыла форсунок с целью визуализации возможной струйности потока. Исследование демонстрирует необходимость оптической диагностики влияния геометрии форсунок и напорных характеристик для оптимизации эффективности распыла жидкости как определённого компромисса между максимальной производительностью форсунки разброса капель по скоростям и размерам. Также в результате комбинированного применения метода визуализации в контролируемом свете и локального метода анализа времени задержки между порядками рассеяния можно глубже понять сложные многомасштабные динамические процессы в двухфазном потоке при работе пневматических форсунок с целью выработки стратегии оптимизации конструкции форсунок для повышения производительности и эффективности. Следует также отметить, что полученные данные могут быть использованы для верификации методов математического моделирования диспергирования жидкого топлива пневматическими форсунками.

**Финансирование.** Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 22-79-10246 (<https://rscf.ru/project/22-79-10246/>). Использованное оборудование обеспечено в рамках государственного задания Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. McDonell V. G., Samuelsen G. S. Measurement of fuel mixing and transport processes in gas turbine combustion // *Meas. Sci. and Technol.* 2000. **11**, N 7. P. 870–886.
2. Tropea C. Optical Particle Characterization in Flows // *Ann. Rev. Fluid Mechan.* 2011. **43**. P. 399–426.
3. Fansler T. D., Parrish S. E. Spray measurement technology: A review // *Meas. Sci. and Technol.* 2014. **26**. 012002.
4. Black D. L., McQuay M. Q., Bonin M. P. Laser-based techniques for particle-size measurement: A review of sizing methods and their industrial applications // *Prog. Energy Combust. Sci.* 1996. **22**. P. 267–306.
5. Damaschke N., Wedd M., Whybrew A., Blondel D. Particle sizing // *Handbook of Laser Technology and Applications* / Eds. by C. Webb, J. Jones. Ch. 98. Boca Raton: CRC Press, 2003. P. 1931–1951.
6. Бильский А. В., Ложкин Ю. А., Маркович Д. М. Интерферометрический метод измерения диаметров капель // *Теплофизика и аэромеханика*. 2011. **18**, № 1. С. 1–13.
7. Данилов П. А., Лебедев А. С., Толстогузов Р. В. и др. Экспериментальное исследование возможности диспергирования двухкомпонентной эмульсии форсункой центробежного типа // *Прикладная механика и техническая физика*. 2024. **65**, вып. 4. С. 219–227. DOI: 10.15372/PMTF202315441.
8. Токарев М. П., Маркович Д. М., Бильский А. В. Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчёта мгновенных полей скорости // *Вычислительные технологии*. 2007. **12**, № 3. С. 109–131.
9. Белоусов А. П., Белоусов П. Я. Оптическая диагностика газокапельных потоков // *Автометрия*. 2011. **47**, № 1. С. 110–114.
10. Глазырин Ф. Н., Знаменская И. А., Мурсенкова И. В. и др. Исследования ударно-волнового течения в канале теневым и теневым фоновым методами // *Автометрия*. 2012. **48**, № 3. С. 101–110.
11. Соболев В. С., Кащеева Г. А. Потенциальная точность методов лазерной допплеровской анемометрии в режиме одночастичного рассеяния // *Автометрия*. 2017. **53**, № 3. С. 74–80. DOI: 10.15372/AUT20170310.
12. Белоусов А. П., Белоусов П. Я., Борыняк Л. А. Измерение диаметров пузырьков и капель методом допплеровской анемометрии // *Автометрия*. 2013. **49**, № 2. С. 106–114.
13. Sankar S. V., Inenaga A., Bachalo W. D. Trajectory Dependent Scattering in Phase Doppler Interferometry: Minimizing and Eliminating Sizing Errors / Eds. by R. J. Adrian, D. Durao, F. Durst, M. V. Heitor, M. Maeda, J. H. Whitelaw. Berlin—Heidelberg: Springer-Verlag, 1992. Proc. of the 6th Int. Symp. Ch. 2. Two-Phase Flow Instrumentation. P. 75–89.
14. Qiu H., Hsu C. T. Method of phase-Doppler anemometry free from the measurement-volume effect // *Appl. Opt.* 1999. **38**, Iss. 13. P. 2737–2742.
15. Albrecht H.-E., Borys M., Hübner K. Generalized Theory for the Simultaneous Measurement of Particle Size and Velocity using laser doppler and laser two-focus methods // *Particle & Particle Syst. Characterization*. 1993. **10**, Iss. 3. P. 99–156.
16. Damaschke N., Nobach H., Semidetnov N., Tropea C. Optical particle sizing in backscatter // *Appl. Opt.* 2002. **41**, Iss. 27. P. 5713–5727.
17. Albrecht H.-E., Borys M., Damaschke N., Tropea C. Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques / Eds. by C. Tropea, D. Rival // *Experimental Fluid Mechanics*. Berlin—Heidelberg: Springer-Verlag, 2003. 738 p.

18. **Semidetnov N. V.** Particle diagnostics in a flow using the delays of signals of various scattering orders // *Meas. Techniques*. 2009. **52**, Iss. 6. P. 636–645.
19. **Семидетнов Н. В.** Исследование лазерного доплеровского анемометра применительно к диагностике двухфазных потоков: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1985. 18 с.
20. **Павловский Б. А., Семидетнов Н. В.** Комбинированное измерение скорости, разме-ра и концентрации частиц в двухфазном потоке // *Техника*. 1991. **34**, № 9. С. 917–921. DOI: 10.1007/BF00980803.
21. **Семидетнов Н. В.** Границные эффекты рассеяния света в лазерной диагностике двухфаз-ных потоков // *Автометрия*. 2012. **48**, № 3. С. 46–53.
22. **Schäfer W.** Time-Shift Technique for Particle Characterization in Sprays. Berlin: epubli GmbH, 2013. 128 p.
23. **Schaefer W., Li L.** Particle characterization by analyzing light scattering signals with a machine learning approach // *Appl. Opt.* 2024. **63**, Iss. 29. P. 7701–7707. DOI: 10.1364/AO.531346.
24. **AOM-Systems.** SpraySpy® — Analysis, Monitoring & Digitization for Sprays. URL: <https://www.aom-systems.com/en/> (дата обращения: 05.03.2025).
25. **Veron F., Hopkins C., Harrison E. L., Mueller J. A.** Sea spray spume droplet production in high wind speeds // *Geophys. Res. Lett.* 2012. **39**, Iss. 16. L16602.

Поступила в редакцию 18.02.2025

После доработки 21.04.2025

Принята к публикации 29.04.2025

---