ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2025, № 3, с. 87–91

ЛАБОРАТОРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 543.275

ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА СЛАБОПОГЛОЩАЮЩИХ КАПЕЛЬ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ ПОТОКАХ

© 2025 г. А. Е. Варфоломеев[a], *, В. В. Пименов[a], **, А. А. Сабельников[a], Е. В. Черненко[a], А. О. Александров[a], Н. П. Зарецкий[a]

[a] Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт"
Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

** e-mail: Varfolomeev_AE@nrcki.ru*

*** e-mail: Pimenov_VV@nrcki.ru*

Поступила в редакцию 17.07.2024 г.
После доработки 25.02.2025 г.
Принята к публикации 03.03.2025 г.

Предложен простой бесконтактный оптический способ измерения основных параметров слабопоглощающих капель в нестационарных аэрозольных потоках с малым временным разрешением. Он позволяет измерять одновременно размеры капель, их скорости и концентрацию в зависимости от времени.

DOI: 10.31857/S0032816225030131

1. ВВЕДЕНИЕ

Бесконтактные методы измерения различных параметров нестационарных аэрозольных потоков требуются для диагностики параметров взрывоопасных аэрозольных облаков в аварийных ситуациях на объектах топливно-энергетического комплекса, а также в различных областях науки и промышленности, экологии. В настоящее время известно несколько бесконтактных оптических методов определения различных параметров дисперсной фазы в аэрозольных потоках. Например, для измерения скоростей используются методы цифровой трассерной визуализации частиц (Particle Image Velocimetry, PIV) и лазерной доплеровской анемометрии, для определения размеров частиц дисперсной фазы – дифракционные методы [1–5].

Однако устройства на основе этих методов имеют достаточно сложную конструкцию, используют дорогие скоростные видеокамеры, лазеры и другое оборудование, позволяют измерять только один-два параметра, их применение в полевых условиях невозможно или ограниченно. В полевых условиях желательно одновременно измерять сразу несколько параметров аэрозольного потока в зависимости от времени, особенно для нестационарных аэрозольных потоков. При этом желательно использовать сравнительно недорогие и простые в эксплуатации приборы и устройства.

В нашей статье предложен бесконтактный оптический способ, который позволяет проводить диагностику с малым временным разрешением параметров слабопоглощающих капель в нестационарных аэрозольных потоках с одновременным определением скоростей, размеров и концентрации капель в зависимости от времени [6].

2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Принципиальная схема установки показана на рис. 1, она включает в себя маломощный полупроводниковый лазер *1*, систему линз *2*, поток аэрозоля *3* и цифровой видеомикроскоп *4*. Сбор, обработка данных и визуализация результатов измерений проводятся с помощью компьютера *5* и специальной программы. Излучение маломощного полупроводникового лазера *1*, работающего в импульсно-периодическом режиме, проходит

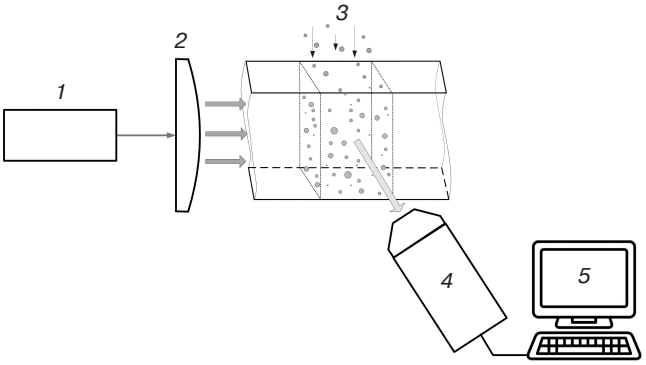

Рис. 1. Принципиальная схема установки: *1* – полупроводниковый лазер; *2* – линзы; *3* – поток аэрозоля; *4* – цифровой видеомикроскоп; *5* – компьютер.

через систему линз *2*, которая формирует световую плоскость (конфигурация "световой нож"), пересечение которой с областью аэрозольного потока *3* и глубиной резко изображаемого пространства видеомикроскопа *4* формирует детектируемый объем необходимого размера в аэрозольном потоке. Цифровой видеомикроскоп расположен под определенным углом к световой плоскости. Капли аэрозоля пролетают в области детектируемого объема и детектируются видеомикроскопом с определенной частотой следования кадров.

При достаточно больших размерах капель в приближении геометрической оптики излучение лазера фокусируется каплей как шаровой линзой (рис. 2). Эффективное фокусное расстояние шаровой линзы F и расстояние X между задней поверхностью шара и фокусом определяются формулами

$$F \approx \frac{nD}{4(n-1)},$$

$$\frac{X}{D} \approx \frac{1}{4}\left(\frac{1}{n-1}-1\right),$$

где D – диаметр капли, n – показатель преломления. При $n = 2$ излучение фокусируется непосредственно на поверхности капли. При $n < 2$ излучение лазера фокусируется вне капли вблизи поверхности и за счет малого диаметра сфокусированного лазерного пучка на задней поверхности капли образуется яркое светящееся пятно.

В качестве примера на рис. 2 приведена фотография реальной капли воды со светящейся точкой на ее поверхности за счет фокусировки лазерного излучения. В данном случае капля воды для лучшей видимости была дополнительно подсвечена слабым внешним источником света. Цифровой видеомикроскоп регистрирует изображения светящихся фокусных точек на каплях, при этом изображения самих капель на кадрах не наблюдаются, так как при малой мощности излучения интенсивность рассеянного и отраженного от поверхности капель света слишком слабая и этот свет не детектируется видеомикроскопом.

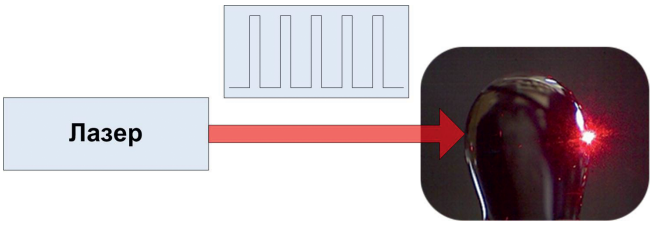

Рис. 2. Фотография фокусного пятна лазерного излучения на поверхности капли при фокусировке лазерного излучения каплей воды.

На матрице видеомикроскопа яркое светящееся пятно на поверхности капли отображается в виде точки размером несколько пикселей матрицы. Заметим, что угол наблюдения в принципе можно изменять в достаточно широких пределах, исключая при этом прямое попадание излучения лазера, вплоть до 90° в зависимости от чувствительности видеокамеры и желаемого динамического диапазона яркостей.

В установке использовался дешевый диодный лазер с длиной волны 650 нм и средней мощностью около 0.7 мВт, работающий в импульсно-периодическом режиме с длительностью импульса 10 мкс и периодом 70 мкс. При этом на кадре видеомикроскопа из-за малой длительности импульсов лазера каждая пролетевшая капля детектируется в виде прерывистого трека, состоящего из отдельных ярких точек, которые соответствуют импульсам лазера.

На рис. 3 приведен пример зарегистрированных треков в виде ярких точек от пролетевших капель воды в течение одного кадра видеомикроскопа, а также распределение яркости пикселей матрицы вдоль одного трека. Регистрация треков пролетевших капель проводилась цифровым видеомикроскопом Miview MV200UM с 8-битовой градацией яркости при скорости съемки 15 кадров в секунду, соединенным с компьютером через USB-разъем.

Величина яркости точки на треке в видеокадре определяется сфокусированным излучением, которое прошло через сечение капли в течение одного импульса лазера и однозначно зависит от размера капли, что позволяет определять диаметры капель по яркости точек. Заме-

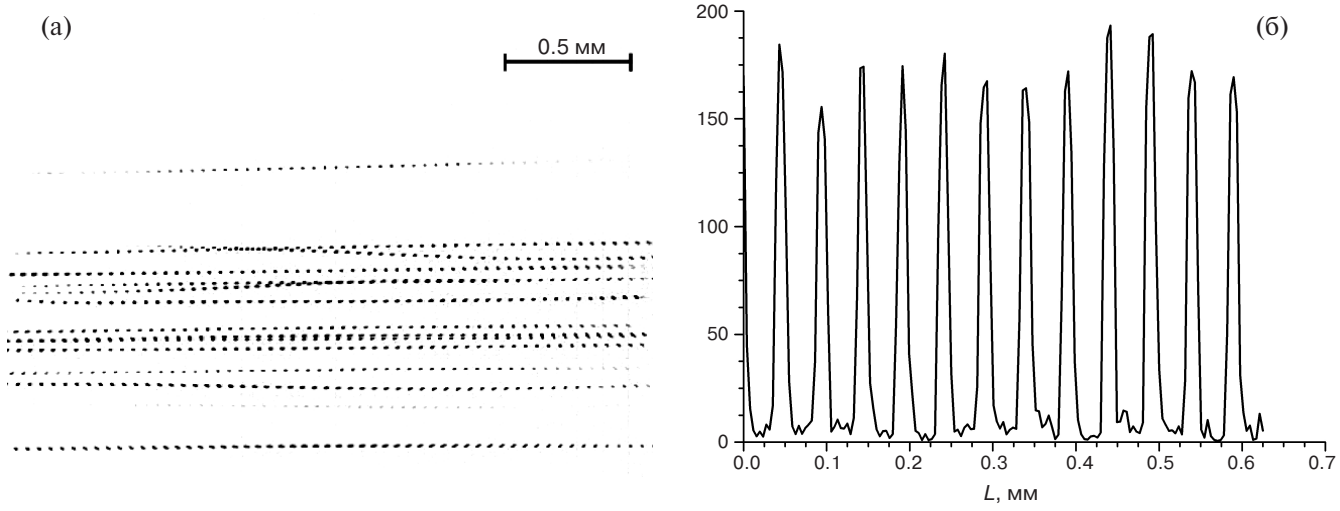

Рис. 3. Пример видеокадра длительностью 1/15 с с треками в виде ярких точек от пролетевших капель воды в импульсном аэрозольном потоке (**а**), распределение яркости пикселей вдоль трека (**б**).

тим, что фокусировка излучения капель зависит от коэффициента преломления среды в каплях и, соответственно, каждый раз желательна предварительная калибровка на соответствующих аэрозолях во всем измеряемом диапазоне размеров капель.

Аэрозоли для калибровки были получены путем использования набора различных источников – как аэрозольных распылителей, так и сопел разного диаметра. Аэрозоли осаждались на подложку, изображения капель обрабатывались в программе ImageJ с учетом поправок, и строились гистограммы размеров капель для каждого источника.

Для определения размеров капель на подложке использовались микроскоп и стандартная процедура, которая принимала во внимание поправочный коэффициент с учетом угла смачивания жидкости на подложке [7]. В качестве подложки использовалась гидрофобная полимерная пленка с известным углом смачивания, например тефлоновая.

Для каждого источника аэрозоля после осаждения капель на подложку с помощью микроскопа и стандартной процедуры определялись размеры капель с учетом поправочного коэффициента и угла смачивания, строились гистограмма и функция распределения капель по размерам. Полученная гистограмма сопоставлялась с гистограммой и функцией распределения яркости капель, полученной на установке. Сопоставив обе функции распределения для каждого из источников аэрозоля с разным размером капель, мы получили калибровочные зависимости яркости точек от диаметра капель для различных жидкостей.

На рис. 4 приведен пример гистограммы размера капель воды, полученной для импульсного аэрозольного потока длительностью 0.8 с, и соответствующее подогнанное логнормальное распределение диаметров капель. Заметим, что путем обработки отдельных кадров можно регистрировать изменение размеров капель в нестационарном потоке в зависимости от времени.

Расстояние между точками в треках определяется скоростью пролетевших капель и периодом следования импульсов лазера, что позволяет определять скорость каждой пролетевшей капли в аэрозольном потоке. Скорости капель вычис-

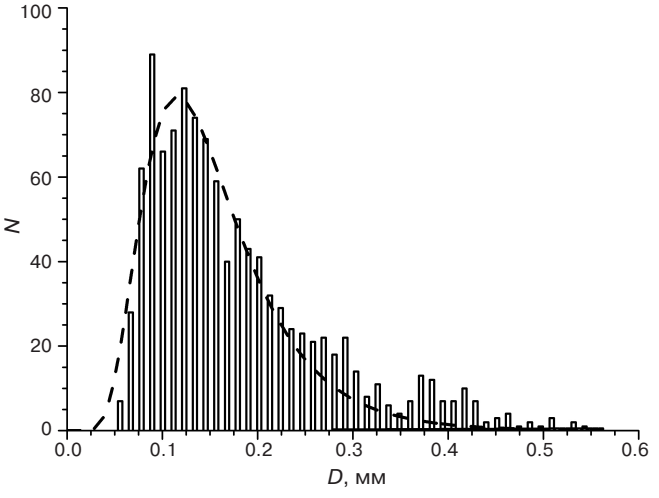

Рис. 4. Гистограмма диаметров капель воды D в импульсном аэрозольном потоке длительностью 0.8 с и соответствующее логнормальное распределение.

ляются для каждого трека из периода T лазерных импульсов, масштаба изображения M на кадре видеомикроскопа и расстояния L между точками в треке:

$$v = ML/T.$$

На рис. 5 приведены пример полученной гистограммы скоростей капель воды в импульсном аэрозольном потоке длительностью 0.8 с и соответствующее логнормальное распределение. Заметим, что таким образом определяются только проекции скоростей на плоскость, нормальную к линии зрения видеомикроскопа. При значительном угле наблюдения в расчет скоростей необходимо вносить поправку.

Концентрацию капель K в аэрозольном потоке определяют по известным геометрическим размерам области детектирования, скорости, числу пролетевших капель и времени экспозиции одного кадра согласно выражению

$$K = N/vSt,$$

где N – число капель, пролетевших через область детектирования за время одного кадра, которое равно числу треков на кадре, v – скорость потока, S – площадь области детектирования, t – длительность одного кадра. На рис. 6 приведен пример полученной концентрации капель воды в зависимости от времени для импульсного аэрозольного потока. Концентрация капель определялась для каждого кадра с учетом следующих параметров: площадь сечения детектируемой области $S = 70$ мм^2, средняя скорость капель в потоке $v = 1.5$ м/с.

Заметим, что предлагаемый способ, по нашему мнению, может быть пригоден в широкой области, и его преимуществом является то, что параметры оптической схемы можно изменять, тем самым адаптируя установку на основе данного способа к требуемым условиям (нужным размерам детектируемого объема, диапазону скоростей, коэффициенту увеличения оптической системы, видеокамере и др.).

Кадры видеомикроскопа с изображениями треков передаются на компьютер с последующей обработкой с помощью специально разработанной программы. Программа определяет максимальные значения яркости точек и вычисляет размеры капель с учетом соответствующей нелинейной калибровочной зависимости и нелинейности отклика матрицы видеомикроскопа. Программа находит также интервалы между точками для разных треков, количество зарегистрированных треков в единице объема за единицу времени, вычисляет скорости капель, строит соответствующие гистограммы по размерам и скоростям, вычисляет концентрацию капель.

По полученным гистограммам скоростей и размеров частиц можно определить и соответствующие функции распределения. Обработка данных и построение соответствующих гистограмм могут проводиться как по всем кадрам, так и для каждого кадра видеомикроскопа по отдельности. Тем самым обеспечивается возможность измерения необходимых параметров нестационарного аэрозольного потока в зависимости от времени. Воспроизводимость резуль-

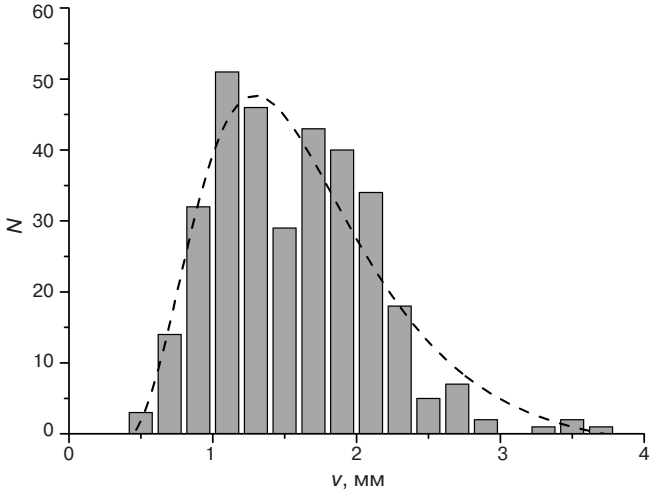

Рис. 5. Гистограмма скоростей капель v в импульсном аэрозольном потоке и соответствующее логнормальное распределение.

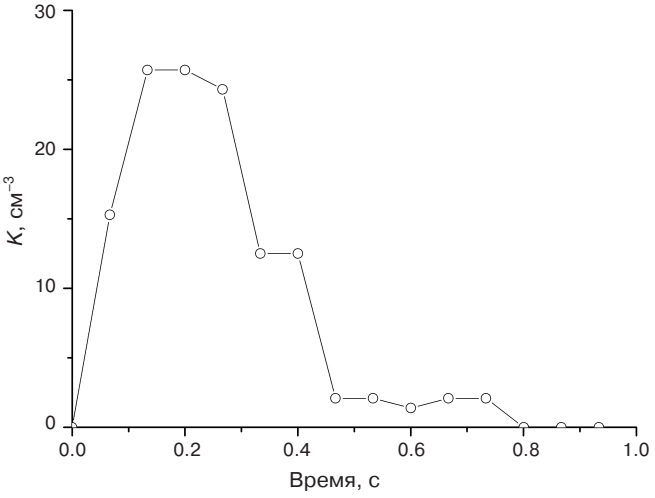

Рис. 6. Зависимость концентрации капель K от времени t для импульсного аэрозольного потока капель воды.

татов проверяли при разных скоростях аэрозольных потоков и температурах, а также на аэрозолях различных жидкостей.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан простой и дешевый бесконтактный оптический способ измерения одновременно нескольких параметров слабопоглощающих капель в нестационарных аэрозольных потоках с малым временным разрешением. Способ позволяет измерять гистограммы размеров и скоростей капель в зависимости от времени, а также их концентрацию в небольшом объеме в импульсных аэрозольных потоках в полевых условиях.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ “Курчатовский институт”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Raffel M., Willert C.E., Wereley S.T., Kompenhans J.* Particle Imaging Velocimetry. Berlin: Springer-Verlag, 2001.
2. *Zamboni R., Zaltron A., Chauvet M., Sada C.* // Sci. Rep. 2021. V. 11. P. 17987. https://doi.org/10.1038/s41598-021-97392-3
3. *Наумов И.В., Меледин В.Г.* РФ Патент 2523737RU, 2014.
4. Определение размеров частиц по дифракции лазерного излучения. ГОСТ Р 8.777-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Дисперсный состав аэрозолей и взвесей.
5. *Дроков В.Г., Дроков В.В., Скудаев Ю.Д., Яковлев В.А.* РФ Патент 2569926RU, 2015.
6. *Варфоломеев А.Е., Сабельников А.А., Пименов В.В., Черненко Е.В.* РФ Патент 2812314RU, 2024.
7. *Матюхин С.И., Фроленков К.Ю.* // Конденсированные среды и межфазные границы. 2013. Т. 15. № 3. С. 292.