

Научная статья
УДК 621.45.022.2
URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=184999>
EDN: <https://www.elibrary.ru/EMTGYT>



Исследование методом теневой анемометрии характеристик формируемого аэродинамической системой распыливания двухфазного газожидкостного потока

Игорь Александрович Лепешинский¹, Иван Андреевич Батенин^{2✉}, Полина Викторовна Зотикова³,
Никита Александрович Кучеров⁴

^{1, 3, 4} Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

¹ igorlepehsh@yandex.ru

² ivanabatenin@gmail.com ✉

³ chekmenevapolina024@gmail.com

⁴ n.kutcherov@bk.ru

Аннотация. Приведены результаты экспериментального исследования методом теневой анемометрии частиц PSV (Particle Shadow Velocimetry) характеристик факела распыла капель воды, формируемого аэродинамической системой распыливания. Такие системы применяются в прямоточных камерах сгорания, где они выполняют функции фронтального устройства. По аналогии с карбюраторами, в аэродинамической системе распыливания жидкость впрыскивается в воздушный поток, проходящий через внутренний канал распылителя, и уже в виде воздушно-капельной смеси подается в камеру сгорания. Представлено описание экспериментальной установки, обеспечивающей подачу в аэродинамическую систему распыливания воды и воздуха с заданными параметрами. Методом PSV получены распределения по высоте распылителя средней скорости (V_{cp} , м/с) и среднего заутеровского диаметра (d_{32} , мкм) капель в факеле распыла. Дополнительно для качественной оценки равномерности распыливания выполнена скоростная фотосъемка факела.

Ключевые слова: аэродинамическая системы распыливания, факел распыла капель, прямоточная камера сгорания, метод теневой анемометрии частиц, метод PSV, среднезаутеровский диаметр капель, струйная форсунка

Для цитирования: Лепешинский И.А., Батенин И.А., Зотикова П.В., Кучеров Н.А. Исследование методом теневой анемометрии характеристик формируемого аэродинамической системой распыливания двухфазного газожидкостного потока // Вестник Московского авиационного института. 2025. Т. 32. № 2. С. 138–146. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=184999>

Original article

Studying Characteristics of the Two-Phase Gas-Liquid Flow, Formed by the Aerodynamic Spraying System, by the Shadow Anemometry Method

Igor' A. Lepeshinskii¹, Ivan A. Batenin^{2✉}, Polina V. Zotikova³, Nikita A. Kuchеров⁴

^{1, 3, 4} Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

² Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), Moscow, Russian Federation

¹ igorlepush@yandex.ru

² ivanabatenin@gmail.com✉

³ chekmenevapolina024@gmail.com

⁴ n.kuchеров@bk.ru

Abstract

The article presents the results of the experimental study of the water droplets spray jet, formed by an aerodynamic spraying system, characteristics by the PSV (Particle Shadow Velocimetry).

One of the urgent tasks facing the design of direct-flow combustion chambers as a part of modern power plants consists in improving the quality of mixing fuel components, which directly affects the combustion process efficiency in combustion chambers and the product performance characteristics as a whole.

Structurally, the fuel supply to the combustion chambers can be realized either by single jets or centrifugal injectors, or by their combination, such as in the injector heads of the liquid rocket engines. One of the fuel supply systems varieties is the aerodynamic spraying system, which functioning has not been sufficiently studied and described in publications. It is this system operation that is being discussed in the presented article.

Such systems are used in direct-flow combustion chambers, where they perform the functions of a front-end device. By analogy with carburetors in an aerodynamic spraying system, liquid is injected into the air stream passing through the internal channel of the atomizer, and is already supplied to the combustion chamber in the form of an air-droplet mixture.

Thus, to increase the evaporation, mixing, ignition and combustion processes stability in combustion chambers, the required fineness of the fuel droplets spraying with a high total evaporation surface area should be ensured by the fuel supply elements. In addition to this, the uniformity control of the finely dispersed air-droplet mixture distribution in the the combustion chamber volume is necessary. Implementation of the above-said requirements is being achieved by the fine-tuning of both operating mode and design parameters of the fuel supply system, which forms a spray torch of the fuel droplets.

The state-of-the-art optical measurement methods allow determining experimentally the dispersed composition and velocity of droplets in the spray torch. Measurement methods can be roughly divided into several groups. The first group includes direct measurement methods, such as the particle shadow anemometry method PSV (Particle Shadow Velocimetry), based on processing the shadow images of the droplets; digital tracer imaging methods such as PIV (Particle Image Velocimetry) and PTV (Particle Tracking Velocimetry), which process images of droplets illuminated by a laser knife, and methods based on the analysis of the glare on the droplets surface. The second group are indirect measurement methods based on the intensity estimation of the light scattered by the droplets. The third group includes as usual interferometric methods such as laser Doppler anemometry, PDA (Planar Doppler Analyzer), IPI (Interferometric Particle Imaging) and holographic methods.

The article presents the description of the experimental installation that supplies water and air with specified parameters to an aerodynamic spraying system. Distributions by the height of the sprayer of average speed and the average Sauter diameter (d_{32} , μm) of droplets in the spray torch were obtained by the PSV method. Additionally, high-speed photography of the flare was performed for a qualitative assessment of the spraying uniformity by the aerodynamic spraying system.

Keywords: aerodynamic spraying system, droplet spray torch, direct-flow combustion chamber, particle shadow anemometry method, PSV method, Sauter mean diameter, plain-orifice injector

For citation: Lepeshinskii I.A., Batenin I.A., Zotikova P.V., Kuchеров N.A. Studying Characteristics of the Two-Phase Gas-Liquid Flow, Formed by the Aerodynamic Spraying System, by the Shadow Anemometry Method. *Aerospace MAI Journal*. 2025;32(2):138-146. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=184999>

List of Figures

- Fig. 1. Schematic diagram of the aerodynamic spraying system
Fig. 2. Pneumohydraulic scheme of the experimental installation
Fig. 3. Measurement scheme by the PSV method
Fig. 4. Consumption characteristic of the plain-orifice injector
Fig. 5. Flow coefficient through the plain-orifice injector
Fig. 6. Spray flow of the aerodynamic spraying system
Fig. 7. Shadow image of the drop
Fig. 8. The spray flow characteristics measurement scheme and obtained results

List of Tables

Table. Sensor readings of the experimental facility

Введение

Одной из актуальных задач при проектировании прямоточных камер сгорания (КС) в составе современных энергосиловых установок является повышение качества смешения компонентов топлива, что непосредственно влияет на эффективность процесса горения в КС и тактико-технические характеристики изделия в целом.

Конструктивно подача горючего в КС может быть реализована либо одиночными струйными или центробежными форсунками, либо их комбинацией, как, например, в форсуночных головках жидкостных ракетных двигателей. Одной из разновидностей систем подачи горючего является аэродинамическая система распыливания (АСР), закономерности функционирования которой недостаточно изучены и описаны в публикациях. Именно работа этой системы рассматривается в настоящей статье.

Для повышения стабильности процессов испарения, смешения, воспламенения и горения в КС должна быть обеспечена элементами топливopодачи требуемая тонкость распыла капель горючего с большой суммарной площадью поверхности испарения. В дополнение к этому необходимо контролировать равномерность распределения мелкодисперсной воздушно-капельной смеси в объеме КС. Указанные требования удовлетворяются путем тонкой настройки рабочего режима и конструктивных параметров системы топливopодачи, формирующей факел распыла капель горючего [1–3].

Современные оптические методы измерения позволяют экспериментально определять дисперсный состав и скорость капель в факеле распыла. Методы измерения можно условно разделить на несколько групп [4]. Первая группа – методы прямого измерения. К ним относятся метод теневой анемометрии частиц PSV (Particle Shadow Velocimetry), основанный на обработке теневых изображений капель, методы цифровой трассерной визуализации, такие как PIV (Particle Image Velocimetry) и PTV (Particle Tracking Velocimetry), при использовании

которых обрабатываются изображения капель, подсвеченных лазерным ножом [5–9], и методы, основанные на анализе бликов на поверхности капель [10, 11]. Вторая группа – методы непрямого измерения, основанные на оценке интенсивности рассеянного каплями света [12–14]. В третью группу обычно включают интерферометрические методы: метод лазерной доплеровской анемометрии [15], методы PDA (Planar Doppler Analyzer) [16], IPI (Interferometric Particle Imaging) [17] и голографические методы [18]. Возможна также комбинация оптических и зондовых методов исследования характеристик двухфазных потоков [19].

Целью настоящего исследования является определение характеристик формируемого АСР факела распыла методом PSV [20, 21].

Описание объекта исследования и постановка задачи

Объектом исследования является АСР (рис. 1) [22], которая конструктивно выполнена в виде сужающегося патрубка с изгибом на 90°. При этом вертикальная часть патрубка заглушена, а через горизонтальную осуществляется аэродинамический забор воздуха 1. В патрубке воздух смешивается с горючим, подаваемым через две струйные форсунки 2 с диаметром отверстия $d = 0,5$ мм, расположенные одна напротив другой. Особенностью исследуемой АСР является наличие металлической пластинки между струйными форсунками, обеспечивающей ударное дробление струй жидкости. Полученная воздушно-капельная смесь через два ряда выходных отверстий 3, симметрично расположенных по длине вертикального патрубка, в виде двух факелов распыла 4 впрыскивается в КС.

АСР, как правило, применяется в прямоточных КС, поскольку для ее функционирования необходим высокоскоростной набегающий воздушный поток [23–25]. Основным функциональным отличием АСР от других систем топливopодачи является возможность равномерного распределения малых расходов горючего по сечению крупногабаритных КС.

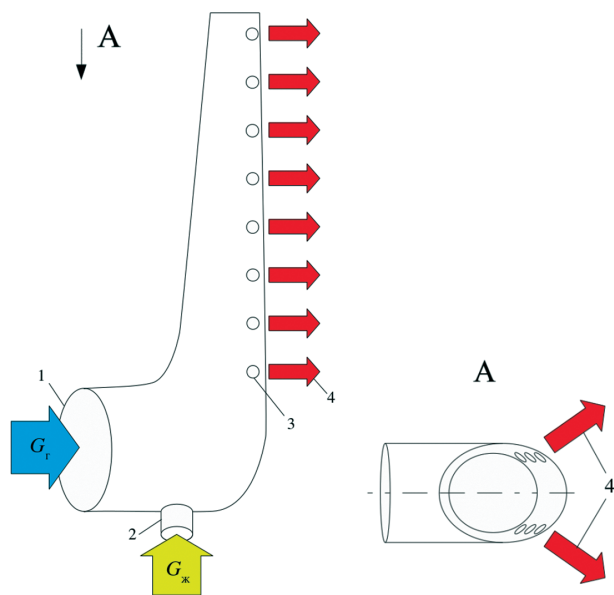


Рис. 1. Принципиальная схема АСР

На базе проведенного предварительного исследования для детального анализа выбран наиболее характерный для данной конфигурации АСР режим с расходами жидкости (воды) $G_{\text{ж}} = 0,015$ кг/с и газа (воздуха) $G_{\text{г}} = 0,011$ кг/с. На предварительном этапе рассматривались диапазоны $G_{\text{ж}} = 0,006 \dots 0,015$ кг/с и $G_{\text{г}} = 0,0045 \dots 0,011$ кг/с.

Применительно к прямоточной КС, где в качестве топливной пары применяется керосин – воздух (стехиометрический коэффициент $K_{m0} = 14,73$), в патрубке АСР на выбранном режиме работы формируется воздушно-капельная смесь с избытком горючего, а коэффициент избытка окислителя составляет $\alpha = 0,05$:

$$\alpha = \frac{G_{\text{г}}}{G_{\text{ж}} K_{m0}}. \quad (1)$$

Описание экспериментальной установки и метода исследования

Исследование распыла жидкости проводилось на экспериментальной установке МАИ. С ее помощью задаются требуемые массовые расходы

жидкости и газа на входе в АСР, а также измеряются характеристик факела распыла воздушно-капельной смеси. Пневмогидравлическая схема (ПГС) экспериментальной установки приведена на рис. 2.

При проведении экспериментального исследования принят ряд допущений. Компонентами воздушно-капельной смеси, формируемой АСР, являются воздух и вода. Не моделируется внешнее обтекание АСР воздухом. Ввиду симметричности конструкции АСР выполняется регистрация параметров одного из двух факелов распыла. АСР распыляет жидкости в открытое пространство в условиях стандартной атмосферы.

Как было указано выше, для измерения характеристик факела распыла применяется метод PSV, базирующийся на технологии обработки предварительно полученных изображений каплей в высоком разрешении с фоновой подсветкой. Схема измерений методом PSV на оборудовании LaVision из состава экспериментальной установки представлена на рис. 3. Источником излучения является импульсный неодимовый лазер на иттрий-алюминиевом гранате фирмы Litron Lasers, излучение от которого проходит через диффузор и подсвечивает капли в факеле распыла. При этом источник света располагается напротив объектива высокоскоростной цифровой камеры FASTCAM SA5. Таким образом, на изображении, зафиксированном камерой, формируется теневая картина каплей. Помимо размера каплей, метод PSV позволяет измерить и их скорость (компоненты X и Y). Для этого необходимо получить пару изображений с известной задержкой по времени.

Камера и лазер жестко зафиксированы, поэтому регистрируемая камерой область измерения размером 7×7 мм статична в пространстве. Таким образом, для измерения характеристик факела распыла по всей высоте АСР система электронного позиционирования изменяет положение АСР по осям X и Y в фокальной плоскости принимающей оптики.

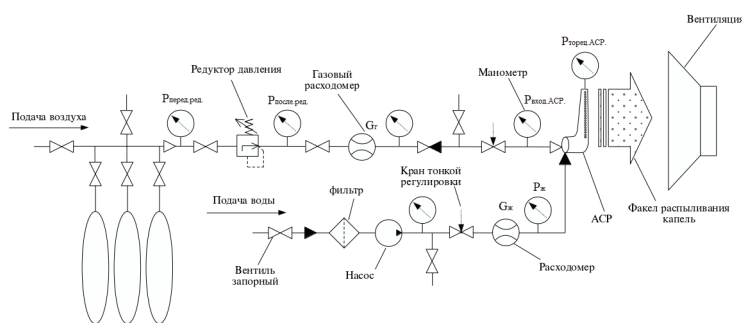


Рис. 2. ПГС экспериментальной установки

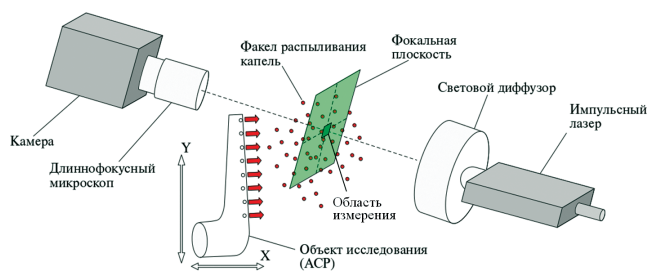


Рис. 3. Схема измерений методом PSV

Расходная характеристика струйных форсунок

Перед проведением экспериментального исследования получена зависимость массового расхода жидкости $G_{\text{ж}}$, подаваемой в АСР, от давления $p_{\text{ф}}$ перед струйными форсунками. Массовый расход жидкости определялся расходомером GTIMEASURE GF04, а избыточное давление определялось манометром РОСМА ТМ6. Полученная зависимость приведена на рис. 4.

Результаты эксперимента позволили рассчитать коэффициент расхода $\mu_{\text{ф}}$ через две струйные форсунки по формуле [26]:

$$\mu_{\text{ф}} = \frac{G_{\text{ж}}}{G_{\text{ж.ид}}}; \quad (2)$$

$$G_{\text{ж.ид}} = 2F_{\text{ф}}\sqrt{2\rho\Delta p_{\text{ф}}}, \quad (3)$$

где $F_{\text{ф}}$ — площадь проходного сечения струйной форсунки, ρ — плотность воды, $\Delta p_{\text{ф}}$ — перепад давления на форсунке.

Зависимость $\mu_{\text{ф}}(p_{\text{ф}})$ для реального режима работы АСР представлена на рис. 5.

Результаты измерений

Значения массовых расходов воды и воздуха на входе в АСР, а также давления в магистралях экс-

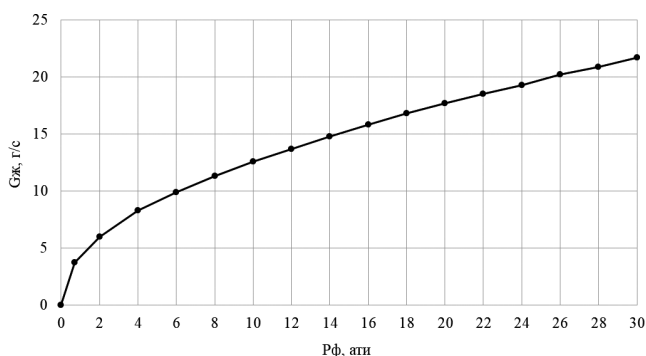


Рис. 4. Расходная характеристика струйных форсунок

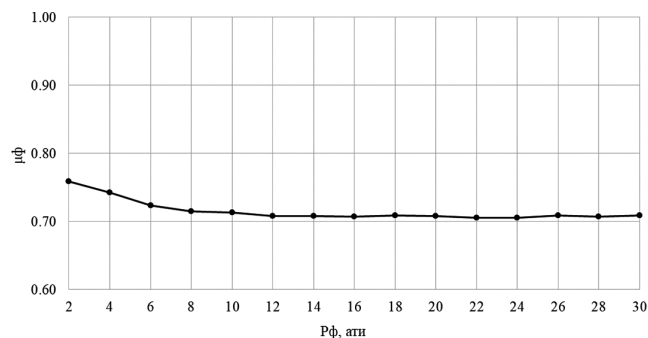


Рис. 5. Коэффициент расхода через струйные форсунки

периментальной установки, измеренные в ходе исследования, представлены в таблице.

В процессе эксперимента проводилось фотографирование факела распыла. Характерный вид факела распыла приведен на рис. 6.

Как видно на рис. 6, факел распыла имеет достаточно равномерную структуру по высоте, с некоторым уменьшением плотности потока капель в верхней зоне. При этом стоит учитывать тот факт, что полученное изображение не отражает динамики изменения профиля факела распыла во времени. Наибольшая плотность потока капель наблюдается в нижней части АСР, так как в этой зоне в патрубке АСР, из-за торможения воздушного потока при повороте на 90° , происходит локальное повышение давления.

Измерение характеристик факела распыла методом PSV выполнено в 16 точках, распределенных по всей высоте факела, на удалении $x = 35 \text{ мм}$ от АСР в плоскости, соответствующей ядру потока капель.

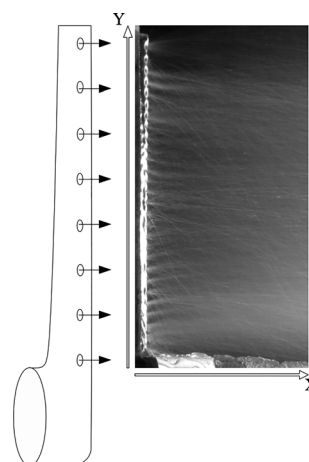


Рис. 6. Факел распыла АСР

Таблица. Показания датчиков экспериментальной установки

$G_{\text{ж}}, \text{ кг/с}$	$G_{\text{г}}, \text{ кг/с}$	$p_{\text{ж}}, \text{ атм}$	$p_{\text{перед ред}}, \text{ атм}$	$p_{\text{после ред}}, \text{ атм}$	$p_{\text{вход АСР}}, \text{ атм}$	$p_{\text{торец АСР}}, \text{ атм}$
0,0153	0,0111	15,2	90	26	0,055	0,030

В каждой точке измерения камера с частотой 1 Гц регистрирует 100 парных теневых изображений капель. Далее, с использованием специализированного программного обеспечения фирмы LaVision, выполняется обработка изображений и генерация списка обнаруженных капель, который содержит информацию о каждой отдельной капле: положение центра, диаметр, эксцентриситет и компоненты скорости. В результате обработки и фильтрации полученного объема информации для конкретной точки измерения рассчитываются среднезауэтеровский диаметр d_{32} и средняя скорость V_{cp} капель:

$$d_{32} = \frac{\sum d_i^3}{\sum d_i^2}; \tag{4}$$

$$V_{cp} = \frac{\sum V_i}{N}, \tag{5}$$

где d_i – диаметр i -й капли, V_i – скорость i -й капли, N – общее число капель, зарегистрированных в серии снимков.

Пример обработанного теневое изображения капель представлен на рис. 7.

На рис. 8 показаны схема и результаты измерения среднезауэтеровского диаметра d_{32} и средней скорости V_{cp} капель.

Полученные результаты свидетельствуют о сложности газодинамической картины течения во внутреннем объеме АСР. Именно с этим связан определенный разброс значений диаметров и скоростей капель на выходе из отверстий, расположенных на разной высоте.

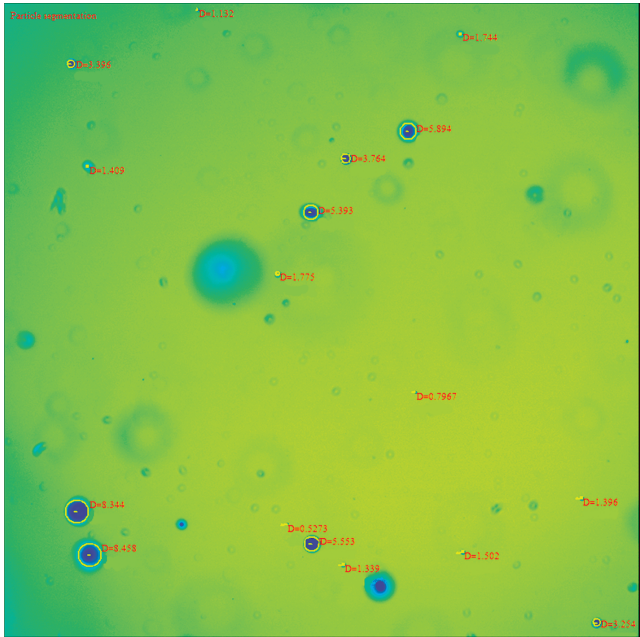


Рис. 7. Теневое изображение капель

Визуально зафиксировано, что на краях выходных отверстий в процессе распыла АСР формируется водяная пленка, периодически срываема со стенки воздушным потоком в виде отдельных крупных капель, что, в свою очередь, влияет на средние значения измеряемых величин. Можно выделить три слабовыраженных пика с повышением значений d_{32} в области точек измерений под номерами 5, 11 и 16. Размер капель в диапазоне d_{32} 183 ... 379 мкм, скорость – V_{cp} 5,6...9,2 м/с.



Рис. 8. Схема и результаты измерения характеристик факела распыла

Выводы

В рамках данного исследования на экспериментальной установке МАИ впервые определены характеристики факела распыла АСР методом PSV. В результате качественной оценки выявлена существенная зависимость структуры факела распыла от рабочего режима АСР. Для рассмотренного режима работы получены распределения средних значений размера и скорости капель по высоте распылителя.

Представленный в настоящей статье метод PSV может быть скомбинирован с методикой обработки экспериментальных данных, примененной специалистами АО «ТМКБ «Союз» при исследовании закономерностей функционирования эмульсионного распылителя [27], для получения распределения относительного расхода жидкости по высоте АСР.

Экспериментальные данные могут быть использованы для дальнейшего исследования особенностей функционирования АСР, в частности при сравнении с результатами измерения характеристик факела распыла другими оптическими методами и при валидации результатов численного моделирования двухфазных газодинамических течений в специализированных программных комплексах.

Список источников

1. Лепешинский И.А., Антоновский И.В., Гузенко А.А. и др. Влияние граничных условий системы «сопло—струя» на распространение двухфазных газокapельных струй // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 4. С. 75–84.
2. Силуанова М.В., Челябин О.Г. Пневматический способ подготовки равномерной смеси жидкого топлива с воздухом в камере сгорания ГТД // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 4. С. 86–94.
3. Силуанова М.В., Челябин О.Г. Применение альтернативных топлив в авиационных газотурбинных двигателях // Труды МАИ. 2016. № 87. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=69695>
4. Tropea C. Optical particle characterization in flows // Annual Review of Fluid Mechanics. 2011. Vol. 43. No. 1, pp. 399–426. DOI: 10.1146/annurev-fluid-122109-160721
5. Adrian R.J., Westerweel J. Particle Image Velocimetry. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2011. 586 p.
6. Hofeldt D.L., Hanson R.K. Instantaneous imaging of particle size and spatial distribution in two-phase flows // Applied Optics. 1991. Vol. 30. No. 33, pp. 4936–4948. DOI: 10.1364/AO.30.004936
7. Bongiovanni C., Chevaillier J., Fabre J. Sizing of bubbles by incoherent imaging: defocus bias // Experiments in Fluids. 1997. Vol. 23. No. 3, pp. 209–216. DOI: 10.1007/s003480050104
8. Rohacs D., Yasar O., Kale U., et al. Past and current components-based detailing of particle image velocimetry: A

comprehensive review // Heliyon. 2023. Vol. 9. No. 3. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e14404

9. Арефьев К.Ю., Прохоров А.Н., Савельев А.С. Исследование деструкции капель жидкости в вихревом следе за пилоном при высоких скоростях набегающего воздушного потока // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25. № 1. С. 57–69.
10. Van de Hulst H.C., Wang R.T. Glare points // Applied Optics. 1991. Vol. 30. No. 33, pp. 4755–4763. DOI: 10.1364/AO.30.004755
11. Hess C.F., L'Esperance D. Droplet imaging velocimeter and sizer: A two-dimensional technique to measure droplet size // Experiments in Fluids. 2009. Vol. 47. No. 1, pp. 171–182. DOI: 10.1007/s00348-009-0645-2
12. Jermy M.C., Greenhalgh D.A. Planar dropsizing by elastic and fluorescence scattering in sprays too dense for phase Doppler measurement // Applied Physics B. 2000. Vol. 71. No. 5, pp. 703–710. DOI: 10.1007/s003400000404
13. Domann R., Hardalupas Y. Spatial distribution of fluorescence intensity within large droplets and its dependence on dye concentration // Applied Optics. 2001. Vol. 40. No. 21, pp. 3586–3597. DOI: 10.1364/AO.40.003586
14. Зуев Ю.В., Истомин Е.А., Лепешинский И.А. и др. Система лазерных измерений дисперсного состава двухфазных потоков // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 5. С. 80–87. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=56309>
15. Вараксин А.Ю., Полежаев Ю.В., Поляков А.Ф. Влияние концентрации частиц на интенсивность пульсаций их скоростей при турбулентном течении газозвеси в трубе // Теплофизика высоких температур. 1999. Т. 37. № 2. С. 343–346.
16. Aisa L., Garcia J.A., Cerecedo L.M., et al. Particle concentration and local mass flux measurements in two-phase flows with PDA. Application to a study on the dispersion of spherical particles in a turbulent air jet // International Journal of Multiphase Flow. 2002. Vol. 28. No. 2, pp. 301–324. DOI: 10.1016/S0301-9322(01)00071-4
17. Semidetnov N., Tropea C. Conversion relationships for multidimensional particle sizing techniques // Measurement Science and Technology. 2004. Vol. 15. No. 1, pp. 112–118. DOI: 10.1088/0957-0233/15/1/015
18. Kühn J., Charrière F., Colomb T., et al. Axial sub-nanometer accuracy in digital holographic microscopy // Measurement Science and Technology. 2008. Vol. 19. No. 7: 074007. DOI: 10.1088/0957-0233/19/7/074007
19. Лепешинский И.А., Ципенко А.В., Решетников В.А. и др. Совместное измерение газодинамических параметров двухфазных высоконцентрированных потоков лазерно-оптическими и зондовыми методами // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 3. С. 152–160.
20. Ливерко Е.А., Логинова А.А., Маслов В.П. и др. Применение метода PSV для исследования характеристик

- аэрозоля за фронтовым устройством камеры сгорания ГТД // Материалы III Отраслевой конференции по измерительной технике и метрологии для исследований летательных аппаратов (05–06 июня 2018; Жуковский). Жуковский: Изд-во ЦАГИ, 2018. С. 324–344.
21. Силуянова М.В., Челебян О.Г. Применение метода теневой анемометрии частиц для исследования характеристик аэрозоля за фронтовыми устройствами малоэмиссионных камер сгорания газотурбинных двигателей // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 1. С. 75–82.
 22. Нуазбаев К.Т., Ивченкова И.А., Кудрявцев В.А. и др. Экспериментально-аналитическое исследование возникновения выплеска топлива через воздухозаборный патрубок эмульсионного распылителя // Инженерный журнал: наука и инновации. 2022. № 7(127). DOI: 10.18698/2308-6033-2022-7-21
 23. Кудрявцев А.В., Кунцев Г.М. Устойчивость процесса горения в камере сгорания с раздельной подачей топлива // В сб.: Клячко Л.А. (ред.) Рабочий процесс в камерах сгорания ПВРД. Труды ЦИАМ № 1307. М.: Изд-во ЦИАМ, 2002. С. 6–27.
 24. Артемьев Е.В., Востоков В.Ю., Клячко Л.А. Экспериментальное исследование процесса горения в модели камеры сгорания ПВРД с эмульсионно-карбюраторной системой смесеобразования // В сб.: Клячко Л.А. (ред.) Рабочий процесс в камерах сгорания ПВРД. Труды ЦИАМ № 1307. М.: Изд-во ЦИАМ, 2002. С. 77–95.
 25. Minko A., Guskov O., Arefyev K., Saveliev A. Physical and mathematical modeling of the interaction of water droplets and high-speed gas flow // Applied sciences. 2021. Vol. 11. No. 23: 11146. DOI: 10.3390/app112311146
 26. Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования: Учебник / Под ред. Д.А. Ягодникова. 3-е изд., доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 461 с.
 27. Нуазбаев К.Т., Ивченкова И.А., Кудрявцев В.А. и др. Методика экспериментального исследования устройства подготовки двухфазной среды // Инженерный журнал: наука и инновации. 2022. № 1(121). DOI: 10.18698/2308-6033-2022-1-2145
- ## References
1. Lepeshinskii IA, Antonovskii IV, Guzenko AA, et al. Boundary conditions effect of a nozzle-stream system on two-phase gas-droplet streams propagation. *Aerospace MAI Journal*. 2015;22(4):75–84. (In Russ.).
 2. Siluyanov MV, Chelebyan OG. Pneumatic method for uniform air-fuel mixture preparation in GTE combustor. *Aerospace MAI Journal*. 2016;23(4):86–94. (In Russ.).
 3. Siluyanov MV, Chelebyan OG. The use of alternative fuels in aviation gas turbine engines. *Trudy MAI*. 2016;(87). (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=69695>
 4. Tropea C. Optical particle characterization in flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2011;43(1):399–426. DOI: 10.1146/annurev-fluid-122109-160721
 5. Adrian RJ, Westerweel J. *Particle Image Velocimetry*. Cambridge, UK: Cambridge University Press; 2011. 586 p.
 6. Hofeldt DL, Hanson RK. Instantaneous imaging of particle size and spatial distribution in two-phase flows. *Applied Optics*. 1991;30(33):4936–4948. DOI: 10.1364/AO.30.004936
 7. Bongiovanni C, Chevaillier J, Fabre J. Sizing of bubbles by incoherent imaging: defocus bias. *Experiments in Fluids*. 1997;23(3):209–216. DOI: 10.1007/s003480050104
 8. Rohacs D, Yasar O, Kale U, et al. Past and current components-based detailing of particle image velocimetry: A comprehensive review. *Heliyon*. 2023;9(3). DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e14404
 9. Arefyev KY, Prokhorov AN, Saveliev AS. Study of the breakup of liquid droplets in the vortex wake behind pylon at high airspeeds. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2018;25(1):57–69.
 10. Van de Hulst HC, Wang RT. Glare points. *Applied Optics*. 1991;30(33):4755–4763. DOI: 10.1364/AO.30.004755
 11. Hess CF, L'Esperance D. Droplet imaging velocimeter and sizer: A two-dimensional technique to measure droplet size. *Experiments in Fluids*. 2009;47(1):171–182. DOI: 10.1007/s00348-009-0645-2
 12. Jermy MC, Greenhalgh DA. Planar dropsizing by elastic and fluorescence scattering in sprays too dense for phase Doppler measurement. *Applied Physics B*. 2000;71(5):703–710. DOI: 10.1007/s003400000404
 13. Domann R, Hardalupas Y. Spatial distribution of fluorescence intensity within large droplets and its dependence on dye concentration. *Applied Optics*. 2001;40(21):3586–3597. DOI: 10.1364/AO.40.003586
 14. Zuyev YV, Istomin EA, Lepeshinskii IA, et al. System of the laser measurements by particulate composition for two-phase flows. *Aerospace MAI Journal*. 2014;21(5):80–87. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/eng/publications.php?ID=56309>
 15. Varaksin AY, Polezhaev YuV, Polyakov AF. Effect of particle concentration on the intensity of pulsations of their velocities during the turbulent flow of a suspended gas in a pipe. *Teplofizika vysokikh temperatur*. 1999;37(2):343–346. (In Russ.).
 16. Aisa L, Garcia JA, Cerecedo LM, et al. Particle concentration and local mass flux measurements in two-phase flows with PDA. Application to a study on the dispersion of spherical particles in a turbulent air jet. *International Journal of Multiphase Flow*. 2002;28(2):301–324. DOI: 10.1016/S0301-9322(01)00071-4
 17. Semidetnov N, Tropea C. Conversion relationships for multidimensional particle sizing techniques. *Measurement*

- Science and Technology*. 2004;15(1):112-118. DOI: 10.1088/0957-0233/15/1/015
18. Kühn J, Charrière F, Colomb T, et al. Axial sub-nanometer accuracy in digital holographic microscopy. *Measurement Science and Technology*. 2008;19(7):074007. DOI: 10.1088/0957-0233/19/7/074007
 19. Lepeshinskii IA, Tsipenko AV, Reshetnikov VA, et al. Joint measurement of gas-dynamic parameters of two-phase highly concentrated flows by laser-optical and probe methods. *Aerospace MAI Journal*. 2019;26(3):152-160. (In Russ.).
 20. Liverko EA, Loginova AA, Maslov VP, et al. Application of the PSV method to study the aerosol characteristics behind the front-end device of the combustion chamber of a gas turbine engine. *Materialy III Otravlevoi konferentsii po izmeritel'noi tekhnike i metrologii dlya issledovaniy letatel'nykh apparatov (June 05–06, 2018; Zhukovskii)*. Zhukovskii: TsAGI, 2018. С. 324-344. (In Russ.).
 21. Siluyanov MV, Chelebyan OG. Shadow particles anemometry method implementation for aerosol characteristics behind the flame tube heads of low-emission gas turbine engines. *Aerospace MAI Journal*. 2017;24(1):75-82. (In Russ.).
 22. Niazbaev KT, Ivchenkova IA, Kudryavtsev VA, et al. Experimental-analytical study of the occurrence of fuel splash through the air intake pipe of the emulsion atomizer. *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2022(7). (In Russ.). DOI: 10.18698/2308-6033-2022-7-2194
 23. Kudryavtsev AV, Kuntsev GM Stability of gorenje process in combustion chamber with separate fuel supply. In: *Klyachko LA. (ed) Workflow in RAMJET combustion chambers*. Trudy TsIAM No. 1307. Moscow: TsIAM; 2002. p. 6-27. (In Russ.).
 24. Artem'ev EV, Vostokov VYu, Klyachko LA. Experimental study of the combustion process in a model of a RAMJET combustion chamber with an emulsion-carburetor mixing system. In: *Klyachko LA. (ed) Workflow in RAMJET combustion chambers*. Trudy TsIAM No. 1307. Moscow: TsIAM; 2002. p. 77-95. (In Russ.).
 25. Dobrovol'skii MV. *Liquid rocket engines. Fundamentals of Design*. 3rd ed. Moscow: BMSTU; 2016. 461 p. (In Russ.).
 26. Minko A, Guskov O, Arefyev K, et al. Physical and mathematical modeling of the interaction of water droplets and high-speed gas flow. *Applied sciences*. 2021;11(23):11146. DOI: 10.3390/app112311146
 27. Niazbaev KT, Ivchenkova IA, Kudryavtsev VA, et al. Experimental research technique for a two-phase medium preparation device. *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2022(1). (In Russ.). DOI: 10.18698/2308-6033-2022-1-2145

Статья поступила в редакцию / Received 28.03.2025
 Одобрена после рецензирования / Revised 15.05.2025
 Принята к публикации / Accepted 27.05.2025