

Определение размера капель спрея методом вейвлет-анализа интерферометрических изображений

Родион Александрович Степанов^{1✉}, Владимир Геннадьевич Баталов²

^{1, 2} Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

¹rodion@icmm.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-8098-0720>

²vbatalov@icmm.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7941-1141>

Аннотация. Освещены вопросы оптимизации процессов сгорания топлива в зависимости от распыляющей способности форсунок ракетных и авиационных двигателей. На примере факела топливной форсунки рассмотрена задача определения размера капель спрея оптически прозрачной жидкости IPI-методом, основанным на анализе интерферометрических изображений частиц. Предложен метод анализа IPI-образа капли с применением непрерывного вейвлет-преобразования. Пространственное распределение вейвлет-коэффициентов использовано для введения интегральной меры, аналогичной спектральной плотности сигнала. Достоверность оценённых размеров капель проверена по результатам обработки бликовых изображений, которые получены прямым оптическим GPT-методом по сфокусированным изображениям капель. Сфокусированные и интерферометрические изображения капель сняты одновременно. Размеры капель, полученные IPI-методом и обработанные с помощью вейвлет- и фурье-преобразований, сравнены с данными GPT-метода. Показано, что применение вейвлет-преобразования существенно уменьшает частоту возникновения систематической погрешности определения размера, наиболее характерной для крупных капель. Установлено, что вызывающие систематическую погрешность ложные максимумы в спектре Фурье обусловлены появлением искажений на границе интерферометрического образа капли. Показано, что отделить эти искажения от основного максимума в окрестности центра капли можно с помощью вейвлет-преобразования.

Ключевые слова: спрей, размер капли, форсунка, параметры распыла, метод анализа интерферометрических изображений частиц, прямой оптический метод, анализ бликовых частиц, вейвлет-преобразование, фурье-преобразование

Для цитирования: Степанов Р. А., Баталов В. Г. Определение размера капель спрея методом вейвлет-анализа интерферометрических изображений // Измерительная техника. 2021. № 9. С. 23–27. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-9-23-27>

Determination of spray droplet size by wavelet analysis of interferometric images

Rodion A. Stepanov^{1✉}, Vladimir G. Batalov²

^{1, 2} Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

¹rodion@icmm.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-8098-0720>

²vbatalov@icmm.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7941-1141>

Abstract. The problem of size droplet determining by the Interferometric Particle Imaging (IPI) in a spray of an optically transparent liquid is considered. The measurements were carried out using the example of a fuel injector flame. A new method for analyzing the IPI image of a droplet using a continuous wavelet transform is proposed. The spatial distribution of wavelet coefficients is used to introduce an integral measure similar to the spectral density of the signal. As a reliable estimate of the droplet size, we considered the results by the Glare Point Technique (GPT), which were applied simultaneously. A comparative analysis of the sizes obtained using GPT and IPI showed that the application of the wavelet transform to IPI images, in comparison with the Fourier method, significantly reduces the frequency of occurrence of a systematic error in determining the size, which is most specific for large droplets. It was found that the false maxima in the Fourier spectrum causing these errors are due to the appearance of distortions at the boundary of the interferometric image of the droplet. The wavelet transform allows one to separate these distortions from the main maximum in the vicinity of the droplet center.

Keywords: spray, droplet size, nozzle, spray parameters, interferometric particle imaging, direct optical method, glare point technique, wavelet transform, Fourier transform

Введение. Процессы распыления жидкостей используются во многих отраслях производства в медицинской, топливной и энергетической промышленности. Образование спреев – сложный многофазный процесс, обычно осуществляемый с помощью форсунок. От распыляющей способности форсунок во многом зависит эффективность работы различных технических устройств, в частности авиадвигателей. В настоящее время в производственных условиях для определения расходных характеристик и равномерности распыла форсунок ракетных и авиационных двигателей применяется методика, описанная в [1] и основанная на сборе распыляемой жидкости секционными заборниками. По количеству жидкости в секциях судят о пространственном распределении расхода топлива. Это надёжный способ определения расходных характеристик потока, полная замена которому вряд ли когда-нибудь будет найдена. Однако для понимания и оптимизации процессов сгорания топлива необходимо знать не только расходные характеристики распыла, но и функции распределения (дисперсии) капель топлива по размерам и скоростям. По таким распределениям можно вычислять различные эффективные интегральные характеристики, например, зауэровский диаметр. Для получения функций распределения в настоящее время широко используются высокоинформативные неинвазивные полевые оптические методы [2].

Полевые оптические методы позволяют одновременно захватывать большую область факела распыла и обладают достаточно высоким разрешением, что позволяет исследовать спреи с относительно высокой плотностью капель воды [3]. В процессе распыла форсункой капли под действием поверхностного натяжения быстро превращаются в сферические

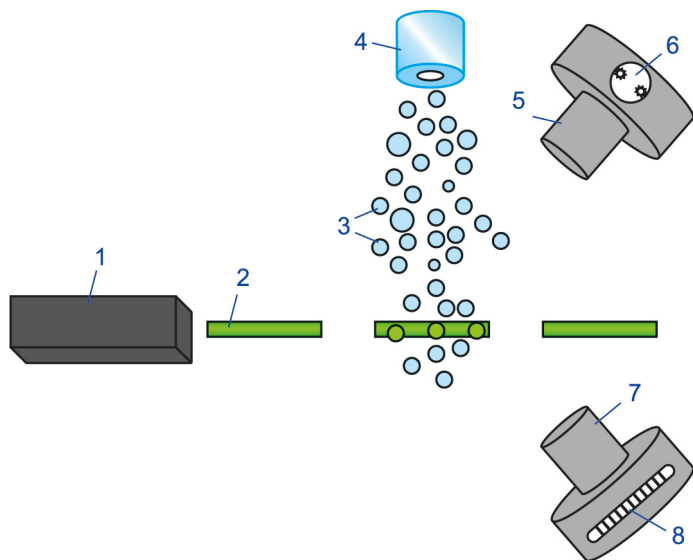


Рис. 1. Схема измерительной установки:

1 – импульсный лазерный нож; 2 – световые импульсы; 3 – факел распыла; 4 – форсунка; 5, 7 – цифровые камеры; 6, 8 – соответственно схематические изображения GPT- и IPI-образов капли

Fig. 1. Scheme of the experimental setup: 1 – pulse laser blade; 2 – light pulses; 3 – spray flow; 4 – nozzle; 5, 7 – CCD cameras; 6, 8 – droplet GPT-primitive and IPI-primitive

объекты. В связи с этим для изучения параметров распыла прозрачных сред широко применяются оптические методы, основанные на анализе интерферометрических изображений частиц (interferometric particle imaging, IPI) [4] и распределения бликов (glare point technique, GPT) [5]. В этих методах капли освещаются светом лазера. Свет лазера, отражённый и преломленный каплей жидкости, образует на капле два почти диаметрально противоположных блика (точечных источника света). Расстояние между бликами равно диаметру капли с некоторым коэффициентом, зависящим от геометрических параметров оптической схемы (угла освещения и т. д.). Камера на основе прибора с зарядовой связью (ПЗС), синхронизированная с лазером, регистрирует свет от этих бликов. Отличие методов IPI и GPT состоит в том, что в методе GPT камерой регистрируются сфокусированные изображения капель, которые в матрице камеры имеют вид парных бликов, а в методе IPI камера расфокусирована и регистрируются образы, являющиеся результатом интерференции света от точечных источников. В методе GPT диаметры d капель вычисляются непосредственно по расстоянию между бликами, а в методе IPI по периоду интерференционной картины:

$$d = 2\lambda g / [mhp n (\cos\theta/2 + 1)], \quad (1)$$

где λ – длина волны света (в данном случае $\lambda = 0,514$ мкм); g – относительное смещение камеры, обеспечивающее расфокусировку изображений капель; m – оптическое увеличение; h – размер пиксела матрицы; p – период интерференционной картины в пикселах; n – показатель преломления окружающей каплю среды (для воздуха $n \approx 1$); θ – угол наблюдения (в данном случае $\theta = 70^\circ$).

В процессе измерений определяемой величиной является период p , вычисляемый без применения специальных методов субпиксельной интерполяции с точностью до одного пиксела.

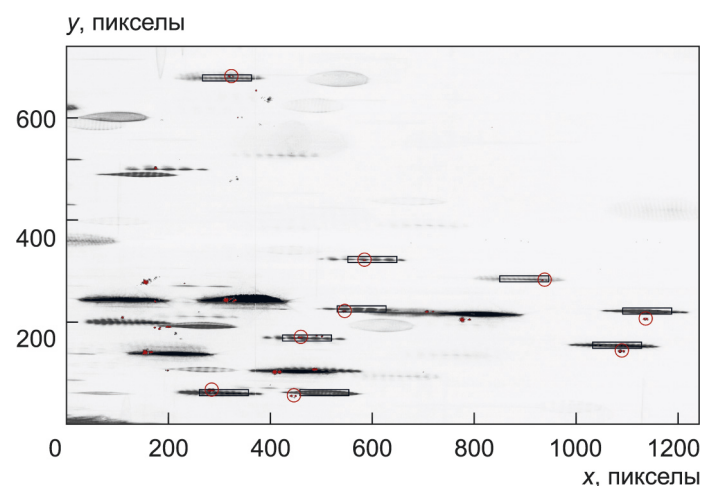


Рис. 2. Совмещённые IPI- и GPT-изображения показаны чёрным и красным цветом соответственно; прямоугольниками и кружками выделены «валидные» образы, соответствующие одной капле

Fig. 2. Combine IPI and GPT images shown in black and red, respectively. Rectangles and circles mark “valid” images corresponding to the same droplet

Относительную погрешность метода IPI можно уменьшить выбором оптического увеличения при настройке экспериментальной установки. Методы IPI и GPT с оценкой погрешностей описаны в работах [3, 6].

В [7] показано, что с увеличением пространственной плотности капель применение методов IPI, GPT к одному спрею может приводить к разным результатам распределения капель по размерам. Определение размеров по IPI-образам крупных капель плотных спреев проблематично, а применение GPT-метода даёт более надёжные результаты [8], но требует значительно большего пространственного разрешения по сравнению с методом IPI, что не всегда технически достижимо. К достоинствам IPI-метода относится и продвинутое программное обеспечение [6].

Цель настоящей работы – повысить точность IPI-метода за счёт обработки изображений с помощью вейвлет-преобразования вместо традиционного преобразования Фурье. Вейвлеты уже давно успешно применяются для анализа пространственно-временной структуры сигналов различной физической природы [9], в том числе для технических измерений [10]. Основное преимущество использования вейвлетов состоит в возможности оценки масштаба некоторой структуры, локализованной в физическом пространстве.

Измерительная установка. Для выяснения причины возникновения погрешностей, описанных в [7] при применении IPI-метода, и проверки нового метода необходимо иметь независимую от IPI, более надёжную оценку размера капли. Для этого параллельно с получением IPI-образов капель снимали их GPT-изображения. На рис. 1 приведена схема измерительной установки для определения размеров капель спреями GPT- и IPI-методами. Форсунка 4 распыляет дистиллированную воду и создаёт характерный факел 3. Импульсный лазер 1 короткими (длительностью около 10 нс) импульсами (вспышками) 2 светового излучения, развёрнутого в виде вертикальной плоскости толщиной примерно 1 мм, освещает факел. Цифровые камеры (4000×2672 пикселей) 5, 7, синхронизированные с лазером, расположены симметрично относительно освещённого сечения факела, настроены на одновременную экспозицию и фиксируют расфокусированные 8 и сфокусированные 6 образы капель. Симметричное расположение камер обеспечивает наблюдение одинаковой области факела распыла, что позволяет сопоставить GPT- и IPI-образы одних и тех же капель и таким образом сравнить результаты, полученные обоими способами. Далее в качестве проверочных использовали данные о размерах капель, полученные методом GPT.

Обработка IPI изображений с применением вейвлет- и фурье-преобразования. На предварительном этапе обработки IPI-изображений с помощью вейвлет-преобразования находили изолированные объекты, соответствующие

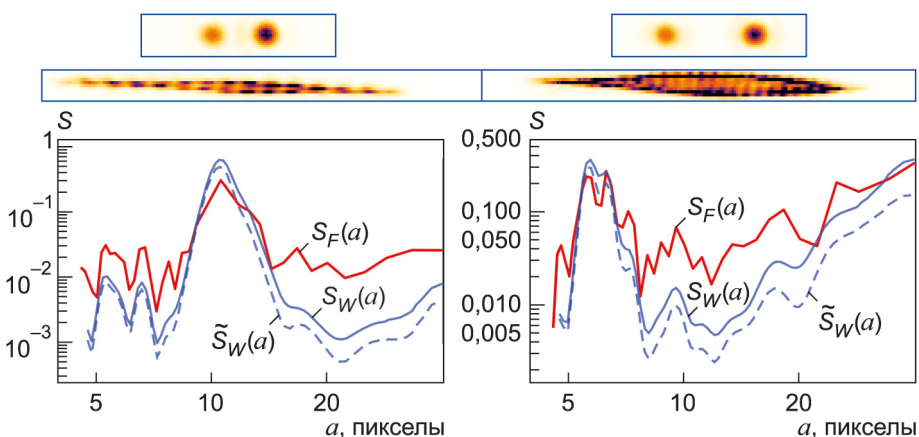


Рис. 3. GPT- и IPI-образы (соответственно сверху и снизу) капель и спектры с однозначным (слева) и неоднозначным (справа) положением максимума – спектр Фурье $S_F(a)$ и вейвлеты $S_W(a)$, $\tilde{S}_W(a)$

Fig. 3. GPT and IPI droplet images. Fourier $S_F(a)$ and wavelet spectra: $S_W(a)$ and $\tilde{S}_W(a)$. The left panel shows an example with an unambiguous maximum position, and the right panel shows an example with an ambiguous one

IPI-образам капель, которые затем сопоставляли с GPT-образами. Для этих целей применяли скользящий гауссовский фильтр:

$$\tilde{f}(x, y) = \int f(x', y') g(x' - x, y - y') dx' dy',$$

где $f(x, y)$ – двумерное распределение интенсивности яркости IPI-изображения; $g(x, y) = \exp(-[(x/\sigma_x)^2 + (y/\sigma_y)^2]/2)$ – гауссиана с параметрами σ_x, σ_y .

Для выделения капель на IPI-изображениях находили положения локальных максимумов $\sigma_{x_m}, \sigma_{y_m}$ в распределении $\tilde{f}(x, y)$, интенсивность которых выше некоторого порога δ . Значения $\delta, \sigma_{x_m}, \sigma_{y_m}$ подбирали эмпирически такими, чтобы отношение сигнал/шум составляло не менее трёх. Капли на GPT-изображениях выделяли методом, предложенным в [7]. Результат обработки двух совмещённых изображений, полученных на описанной выше установке, показан на рис. 2. Парные блики подобрали для GPT-образов примерно 50 % всех видимых объектов.

Основной этап обработки состоял в вычислении размеров капель. Как и в [7], размер капель по GPT-образам определяли по расстоянию между положениями максимумов пары бликов. Далее проводили спектральный анализ IPI-образов с применением вейвлет- и фурье-преобразований для нахождения периода интерференционной картины, который обратно пропорционален размеру капель [8]. Определяли коэффициенты фурье- и вейвлет-преобразований по формулам соответственно

$$\hat{f}(a) = \int_G f(x, y) \exp(2\pi i x/a) dx dy;$$

$$w(a, x, y) = \int_G f(x', y') \psi([x - x']/a, [y - y']/a) dx' dy',$$

где a – период волны; G – область IPI-образа капли; $\psi(x, y) = \exp(-[x^2 + y^2]/2 + 2\pi i x)$ – двумерная версия вейвлета Морле.

На основе полученных разложений для каждого отдельного IPI-образа вычисляли соответственно вейвлет- и фурье-спектры:

$$S_W(a) = \int_G |w(a, x, y)|^2 dx dy; \quad (2)$$

$$S_F(a) = |\hat{f}(a)|^2. \quad (3)$$

Положение максимума функций $S(a)$ определяет период интерференционной картины a^* , т. е. $S(a^*) = \max_a S(a)$. При необходимости линейные размеры капель можно рассчитывать по выражению (1) при $p = a^*$. Однако сравнивать значения a^* , полученные по формулам (2), (3), можно и в пикселах. В настоящей работе требуется выделить случаи, в которых применение фурье-преобразования приводит к значительной систематической погрешности определения максимума спектра.

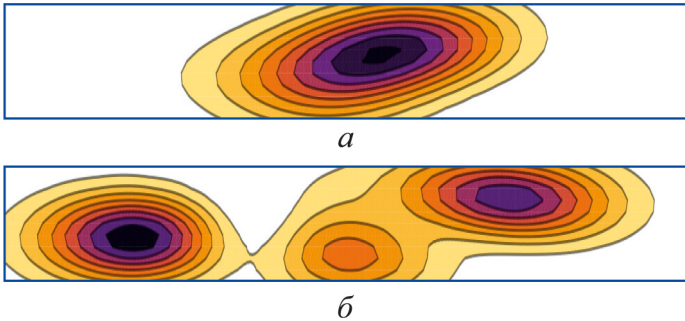


Рис. 4. Распределение вейвлет-коэффициентов на двух масштабах для капли, показанной на рис. 3 справа, при $a = 5,7$; $40,0$ – соответственно a , b

Fig. 4. Distribution of wavelet coefficients at two scales $a = 5,7$; $40,0$ (respectively a , b) for the droplet shown on the right panel in Fig. 3

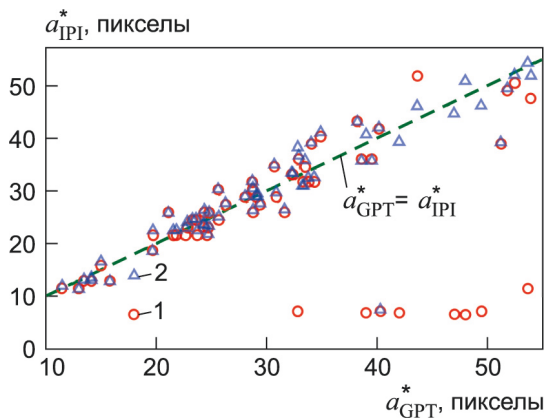


Рис. 5. Распределение капель по размерам, определённым методами обработки IPI-образов с использованием спектров Фурье (1) и вейвлетов (2)

Fig. 5. Distribution of droplets by their sizes, determined by different methods of IPI image processing: Fourier transform (1), wavelet transform (2)

На рис. 3 представлены типичные GPT- и IPI-образы капель. На рис. 3 слева все спектры имеют один выраженный максимум при $a^* = 11$ пикселей, при котором размеры, определённые методами GPT и IPI, близки. На рис. 3 справа значения локальных минимумов спектра находятся в окрестности $a^* = 6,3$ пикселей, что близко к правой границе спектра. Для фурье-спектра $S_F(a)$ значение на правой границе, хоть и незначительно, но все-таки больше: $S_F(6,3) \approx 0,26$, а $S_F(40) \approx 0,33$, а значит, метод IPI даёт ложный размер. Несмотря на то, что для вейвлет-спектра $S_W(a)$ «ложный» и «истинный» максимумы совпадают в пределах погрешности ($S_W(5,7) \approx S_W(39) \approx 0,36$), такой результат нельзя считать удовлетворительным.

Установить источник подобных погрешностей можно, если рассмотреть распределение вейвлет-коэффициентов в масштабах, где наблюдаются два максимума в спектре. Для правильного масштаба вейвлет-преобразования (рис. 4, a) максимум привязан к центру IPI-образа, а ложная составляющая доминирует на краях. Повысить вклад вейвлет-коэффициентов на масштабах, соответствующих правильному размеру капли, в интегральный спектр (2) можно за счёт локализации IPI-образа:

$$\tilde{S}_W(a) = \int_G |w(a, x, y)|^2 g(x - x_0, y - y_0) dx dy,$$

где (x_0, y_0) – координаты центра капли.

«Ложный» вклад в правой части спектра $\tilde{S}_W(a)$ (см. рис. 3) эффективно подавляется.

Сравнение и обсуждение результатов спектрального анализа. Авторы настоящей статьи не нашли в литературе примеров использования вейвлет-спектра IPI-образов по аналогии с фурье-спектром. Вейвлет-преобразование имеет ряд достоинств. Первое полезное свойство вейвлетов – возможность непрерывного изменения масштаба вейвлета, что позволяет более точно определять максимум по сравнению с дискретным набором периодов для фурье-коэффициентов. Дискретность особенно явно проявляется при больших значениях a , когда увеличивается расстояние между вершинами ломаной кривой фурье-спектра. При этом вейвлет-спектр остаётся гладким. Второе преимущество – пространственная локализация спектра. Авторами настоящей статьи предложено использовать именно это преимущество, которое даёт основное уточнение результатов обработки IPI-образов.

Результат обработки 10 последовательных кадров, на которых было выделено 63 капли, приведён на рис. 5. Для большинства капель IPI-размеры соответствуют GPT-размерам. Исключение составляют девять капель, для которых метод IPI с использованием преобразования Фурье дал систематическую погрешность. Вейвлет-преобразование также дало ошибочный результат, но только в одном из этих случаев. Эффект «ложного» максимума в большей степени касается капель относительно больших размеров.

Закключение. Разработка и верификация метода оценки размера капель по их IPI-образам выполнена в рамках общей методологии [7], включающей применение вейвлет-анализа как основного инструмента обработки и интерпретации

изображений, которые получены оптическими полевыми методами. Предложенная схема измерений позволила идентифицировать IPI- и GPT-образы, которые соответствуют одной и той же капле. Была выделена группа капель, для которых определение размера с применением преобразования Фурье даёт систематическую погрешность. Проанализировав распределения вейвлет-коэффициентов IPI-образов, установили, что данная погрешность возникает из-за неоднородной периодичности IPI-образа. Этот вывод послужил основанием для введения новой интегральной вейвлет-характеристики, которая в большинстве случаев дает корректную оценку размера капли.

Финансирование. Фундаментальные аспекты вейвлет-анализа разрабатывались в рамках государственного задания темы (номер гос. регистрации АААА-А19-119012290101-5). Исследование по практическому применению вейвлетов для IPI-метода выполнено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00574.

Список литературы

1. Леонтьев С. Н., Новиков А. О., Ягодников Д. А. Использование цифровой измерительной техники для гидравлических испытаний форсунок // Наука и Образование: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 10. С. 161–170.
2. Tropea C., *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 2011, vol. 43, pp. 399–426. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-122109-160721>
3. Баталов В. Г., Степанов Р. А., Сухановский А. Н. Оптические измерения размеров капель в реальных потоках // Вестник Пермского университета. Физика. 2017. № 3 (37). С. 40–47. <https://doi.org/10.17072/1994-3598-2017-3-40-47>
4. Maeda M., Kawaguchi T., Hishida K., *Measurement Science and Technology*, 2000, vol. 11, no. 12, L. 13. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/11/12/101>
5. Van de Hulst H. and Wang R., *Applied optics*, 1991, vol. 30, pp. 4755–4763. <https://doi.org/10.1364/AO.30.004755>
6. Бильский А. В., Ложкин Ю. А., Маркович Д. М. Интерферометрический метод измерения диаметров капель // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18. № 1. С. 1–13.
7. Sukhanovskii A., Batalov V., Stepanov R., *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2019, vol. 103, pp. 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2019.01.005>

8. Qieni L., Xiaoxue Y., Baozhen G., Tingting C., *Opt. Express*, 2018, vol. 26, pp. 1038–1048. <https://doi.org/10.1364/OE.26.001038>

9. Короновский А. А., Храмов А. Е. Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. М.: Физматлит, 2003. 176 с.

10. Филяк М. М., Четверикова А. Г., Каныгина О. Н., Анисина И. Н. Вейвлет-анализ изображений поверхности керамических материалов как метод измерения размеров её структурных элементов // Измерительная техника. 2020. № 2. С. 50–54. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-2-50-54>

References

1. Leont'ev S. N., Novikov A. O., Yagodnikov D. A., *Science and Education of Bauman MSTU*, 2015, no. 10 pp. 161–170. (In Russ.)
2. Tropea C., *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 2011, vol. 43, pp. 399–426. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-122109-160721>
3. Batalov V. G., Stepanov R. A., Sukhanovsky A. N., *Bulletin of Perm University. Physics*, 2017, no. 3 (37), pp. 40–47. (In Russ.) <https://doi.org/10.17072/1994-3598-2017-3-40-47>
4. Maeda M., Kawaguchi T., Hishida K., *Measurement Science and Technology*, 2000, vol. 11, no. 12, L. 13. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/11/12/101>
5. Van de Hulst H. and Wang R., *Applied optics*, 1991, vol. 30, pp. 4755–4763. <https://doi.org/10.1364/AO.30.004755>
6. Lozhkin Y. A., Bilsky A. V., Markovich D. M., *Thermophysics and Aeromechanics*, 2011, vol. 18, no. 1, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1134/S086986431101001X>
7. Sukhanovskii A., Batalov V., Stepanov R., *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2019, vol. 103, pp. 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2019.01.005>
8. Qieni L., Xiaoxue Y., Baozhen G., Tingting C., *Opt. Express*, 2018 vol. 26, pp. 1038–1048. <https://doi.org/10.1364/OE.26.001038>
9. Koronovskij A. A., Hramov A. E., *Nepreryvnyj veyvletnyj analiz i ego prilozheniya*, Moscow, Fizmatlit Publ., 2003, 176 p. (In Russ.)
10. Filyak M. M., Chetverikova A. G., Kanygina O. N., Anisina I. N., *Measurement Techniques*, 2020, vol. 63, no. 2, pp. 130–134. <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01761-9>

Статья поступила в редакцию 11.01.2021; принята к публикации 29.04.2021.