

УДК 533; 53.08
PACS 87.63.lt

Анализ яркости отраженного света для определения структурных изменений в потоке жидкости от распыливающего устройства

В. Г. Баталов[†], А. Ю. Васильев[‡]

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

[†] vbatalov@icmm.ru

[‡] vasiliev.a@icmm.ru

Визуальные и инструментальные наблюдения распыленной форсункой жидкости показали неравномерное распределение яркости отраженного света в факеле распыла. Экспериментально исследована структура факела распыла центробежных форсунок. Предложен простой подход к анализу изображений факела распыла, который позволяет проследить за изменением структуры распыла. Подход основан на измерении интегральной яркости отраженного света, которая однозначно связана с площадью границы раздела сред. Измерения показали, что интегральная яркость меняется при удалении от форсунки. На графике изменения яркости по мере удаления от распыливающего устройства можно видеть три характерные области. В первой области наблюдается резкий рост яркости отраженного света, который достигает максимума при переходе ко второй области. Во второй области яркость отраженного света резко падает. В третьей области яркость практически перестает меняться. При этом визуально наблюдаются структурные изменения в факеле распыленной жидкости при удалении от форсунки. Детальный анализ этих структурных изменений был выполнен при помощи макросъемки и методом Glare Point Technique (далее GPT). Обнаружено, что жидкость вылетает из сопла форсунки в виде расширяющегося конуса сплошной пленки. Далее, во второй области, пленка рвется на отдельные фрагменты сложной формы, которые под действием сил поверхностного натяжения начинают превращаться в сферические объекты. В третьей области все фрагменты превращаются в объекты сферической формы, при этом их количество и форма далее практически перестают меняться.

Ключевые слова: спрей; яркость отраженного света; GPT; форсунка; несферические капли; сферические капли

Поступила в редакцию 04.09.2024; после рецензии 19.11.2024; принята к опубликованию 20.11.2024

Analysis of the reflected light brightness to determine structural changes in the fluid flow from a spray device

B. G. Batalov[†], A. Yu. Vasiliev[‡]

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russia

[†] vbatalov@icmm.ru

[‡] vasiliev.a@icmm.ru

Visual and instrumental observations of a liquid sprayed by the nozzle showed an uneven distribution of the reflected light brightness in the spray cone. The structure of the spray cone produced by centrifugal nozzles was experimentally investigated. A simple approach to the analysis of spray cone images is proposed, which allows tracking the change in the spray structure. The approach is based on measuring the integral brightness of the reflected light, which is uniquely related to the ar-

ea of the interface between the media. Measurements showed that the integral brightness changes with increasing distance from the nozzle. Three characteristic areas can be seen on the brightness change graph with increasing distance from the atomizing device. In the first area, a sharp increase in the reflected light brightness is observed, which reaches the maximum upon transition to the second area. In the second area, the reflected light brightness drops sharply. In the third area, the brightness practically stops changing. In this case, structural changes in the spray pattern are visually observed with increasing distance from the nozzle. A detailed analysis of these structural changes was performed using macrophotography and the Glare Point Technique (GPT). It was found that the liquid flies out of the nozzle in the form of an expanding cone of a solid film. Then, in the second area, the film breaks into separate fragments of a complex shape, which, under the action of surface tension forces, begin to turn into spherical objects. In the third area, all fragments turn into spherical objects, while their number and shape practically stop changing.

Keywords: light spray; brightness of the reflected light; GPT; atomizer; nozzle; spherical drops; non-spherical drops

Received 04 September 2024; revised 19 November 2024; accepted 20 November 2024

doi: 10.17072/1994-3598-2024-4-72-77

1. Введение

Процессы распыления жидкости с помощью специальных устройств (форсунок) играют важную роль в процессах горения. Воспламенение топлива, устойчивость и эффективность горения, снижение уровня выброса вредных продуктов сгорания тесно связаны с процессами дробления жидкого топлива и его смешения с воздухом в системе распыления [1, 2]. Проблема мелкодисперсного дробления потока жидкости и получения аэрозоля с заданными характеристиками является одной из актуальных задач при создании высокоэффективных малоэмиссионных камер сгорания. Дробление жидкости на капли обеспечивает высокоразвитую поверхность контакта взаимодействующих фаз. Измерение гидродинамических характеристик и размеров капель в газожидкостном потоке на сегодняшний день выполняется при помощи оптических методов, таких как Particle Image Velocimetry (PIV) [3], Interferometric Particle Imaging (IPI) [4, 5] и Glare Point Technique (GPT) [6–9]. Данные методы позволяют с хорошей точностью восстановить характеристики распыла жидкости. В то же время полезную информацию о структуре двухфазного потока можно получить из анализа яркости отраженного света. По изменению яркости можно судить об изменении общей площади поверхности распыленной жидкости. В [10] был обоснован подход к анализу яркости, рассмотрена простая математическая модель распыла жидкости, высказаны гипотезы об изменениях в структуре потока и вызванных ими изменениях яркости отраженного света. При распылении форсункой поток жидкости претерпевает изменения, в том числе и внутри форсунки. А именно, внутри центробежных форсунок существуют устройства, задачей которых является создание равномерной по толщине пленки жидкости перед тем, как она покинет сопло форсунки. В результате жидкость истекает из форсунки в виде тонкой пленки, которая по мере удаления от форсунки из-за неустойчивости разделя-

ется на отдельные капли. В данной работе структурные изменения пленки жидкости, обнаруженные [10] в результате анализа яркости отраженного факелом форсунки света, были верифицированы при помощи макросъемки и метода GPT, путем прямых наблюдений за факелом распыла.

2. Эксперимент

В качестве объекта исследования рассматривается поток распыленной жидкости, создаваемый центробежной осесимметричной форсункой. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. В экспериментах использовались две центробежные форсунки Danfoss 6.0 и Danfoss 8.0 с разными расходными характеристиками. Избыточное давление жидкости на входе в форсунки P_{in} поддерживалось постоянным и с точностью ± 0.01 МПа. Для каждого значения давления измерялся расход жидкости через форсунки при помощи мерной емкости. В качестве рабочей среды использовалась дистиллированная вода. Факел распыла освещался лазером. Освещение было сформировано в виде плоскости толщиной 1 мм.

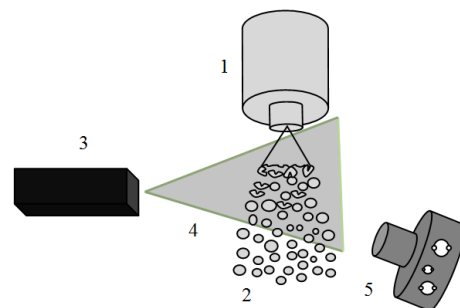


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – форсунка; 2 – факел распыла; 3 – лазер; 4 – импульсный лазерный нож; 5 – цифровая камера; 6 – GPT-примитив капли

Эта плоскость проходит через ось симметрии факела распыла и точку вылета жидкости из сопла

форсунки. Поскольку в первом приближении распыл осесимметричен, то любая такая плоскость характеризует состояние распыла во всем конусе. Отраженный свет от факела распыла регистрировался CCD камерой с размером матрицы 4000×2672 пикселей, формируя поле яркости. Камера располагалась под углом 110° к направлению распространения света. Такой угол необходим для возникновения диаметрально противоположных бликов на образах сферических капель жидкости и обнаружения сферических капель по их GPT образам. Для каждого режима было сделано по 100 фотографий распыла. Интервал времени между кадрами составлял 2 с. Режимы проливки двух форсунок описаны в таблице.

Режимы работы форсунок

	P_{in} , МПа	Q_v , мл/мин
Danfoss 8.0	0.20	244
	0.40	340
	0.64	440
Danfoss 6.0	0.36	244
	0.64	340

На рис. 2 представлено мгновенное изображение факела распыла. На изображении черному цвету соответствует максимальная яркость отраженного света от жидкой фазы потока. Вблизи форсунки факел распыла представляет собой осесимметричный конус сплошной пленки жидкости. При расширении и удалении от форсунки пленка рвется, и образуются области с каплями неправильной формы и сферические капли. Далее капли неправильной формы формируются также в сферические капли. Скорости распыленного потока направлены вниз (по направлению силы тяжести) и по конусу.

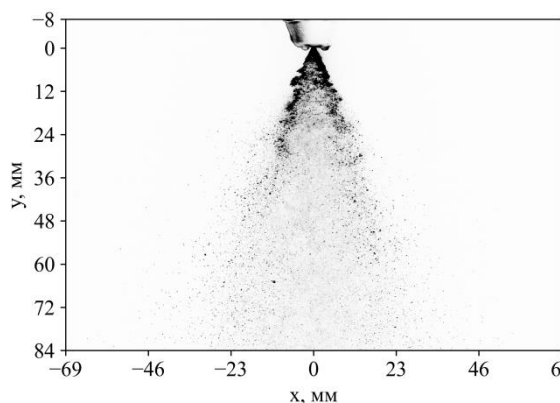


Рис. 2. Мгновенная картина распределения яркости света в плоскости, освещенной лазером

3. Результат

Для количественного описания изменения структуры факела рассматривалась интегральная яркость для горизонтальной полосы шириной Δy

как функция расстояния от форсунки до центра полосы:

$$I_b(l) = \frac{1}{\Delta y} \int_{-L_x/2}^{L_x/2} \int_{l-\Delta y/2}^{l+\Delta y/2} \langle I(x, y) \rangle_t dx dy,$$

где $I(x, y)$ – распределение яркости, $\langle \dots \rangle_t$ – осреднение по 100 изображениям, l – расстояние от форсунки до центра полосы. Ширина полосы постоянна и равна 42 пикселя, учитывая масштабный коэффициент 0.0343 мм/пикс, 1.44 мм. Для уменьшения влияния шумов матрицы вне факела на интегральную яркость на первом этапе определялась граница факела с помощью порогового метода. На рис. 3 представлено распределение средней по времени яркости, где красным цветом выделены области вне факела. Значения яркости в этих областях искусственно занулялись.

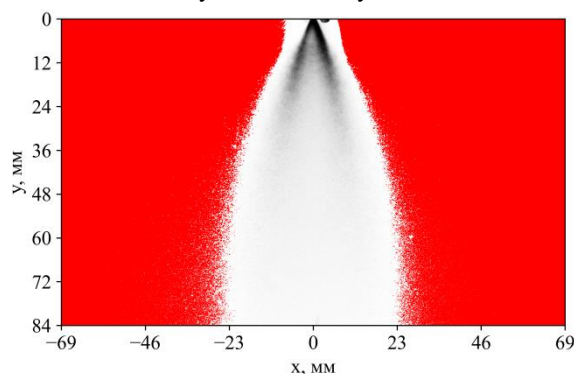


Рис. 3. Поле распределения яркости, усредненное по 100 мгновенным распределениям яркости

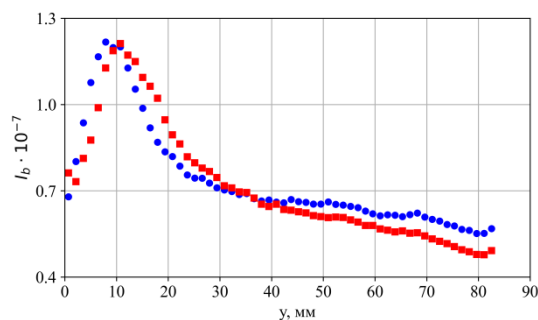


Рис. 4. Интегральная яркость, как функция расстояния от форсунки: для форсунок Danfoss 8.0 (квадраты) и Danfoss 6.0 (круги) с одинаковым объемным расходом

Анализ интегральной яркости отраженного света позволил определить границы структурных изменений в факеле распыла.

На рис. 4 представлены изменения интегральной яркости для двух форсунок с одинаковыми расходами в зависимости от расстояния до них. Изменение интегральной яркости отраженного света можно поделить на три области: от 0 до 10 мм – область монотонного роста яркости; от 10 до 40 мм – область монотонного уменьшения яркости; от 40 до 84 мм – область, где яркость слабо

меняется. Аналогичное поведение интегральной яркости сохраняется и при других расходах (рис. 5). На рис. 2 можно увидеть, что с потоком жидкости происходят структурные изменения, но какие именно, при таком увеличении сказать невозможно. Поэтому была применена макросъемка для всего факела, совмещенная с методом GPT для сферических капель.

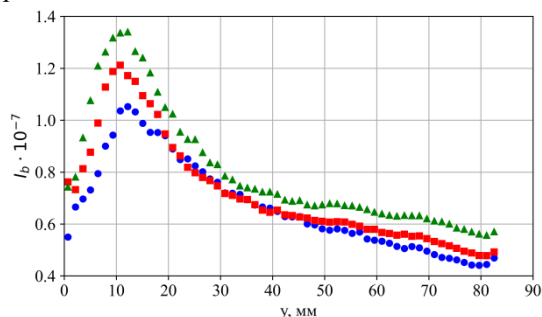


Рис. 5. Интегральная яркость как функция расстояния до форсунки для всех режимов проливки форсунки Danfoss 8.0.

4. Макросъемка и метод GPT

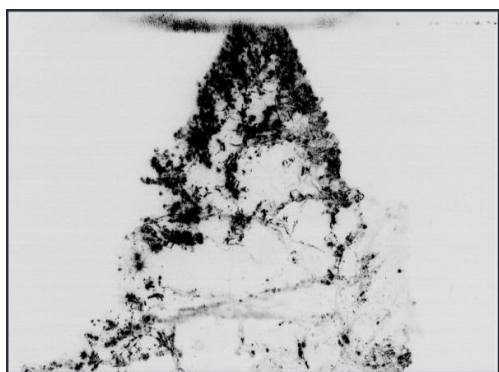


Рис. 6. Мгновенная картина распыла на расстоянии от 1 до 5 мм

Для детального изучения изменения структуры факела распыла использовалась макросъемка. В экспериментах применялась 11 Мп CCD камера с полнокадровой матрицей. Геометрический размер полнокадровой матрицы составляет 36 мм по горизонтали и 24 мм по вертикали. На камере был установлен длиннофокусный объектив компании Nikon с фокусным расстоянием 200 мм. Коэффициент увеличения оптической системы равен 6, что соответствует размеру видимой области факела 6×4 мм. Благодаря тому, что угол между камерой и лазерным ножом — 110° , на сфокусированных изображениях капли образуются пары бликов, по наличию которых можно судить о том, что наблюдаемые капли в первом приближении имеют сферическую форму. В результате были получены следующие картины распыла для разных расстояний от форсунки (рис. 6). Из рисунка видно, что пленка жидкости, истекающая из форсунки, при удалении от нее распадается на фрагменты. На рис. 7–9 представлены фотографии, иллюстрирующие изменение структуры факела распыла на разном удалении от форсунки.

Области макросъемки выбирались таким образом, чтобы показать структуру факела распыла для трех характерных областей поведения интегральной яркости.

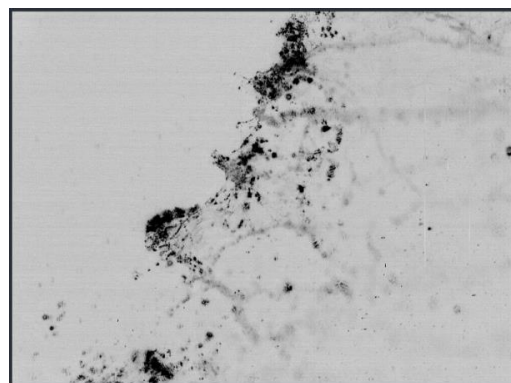


Рис. 7. Мгновенная картина распыла на расстоянии от 5 до 9 мм

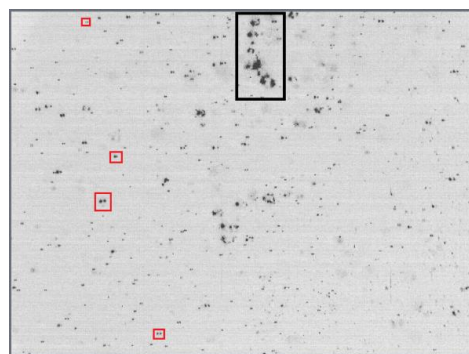


Рис. 8. Мгновенная картина распыла на расстоянии от 26 до 30 мм

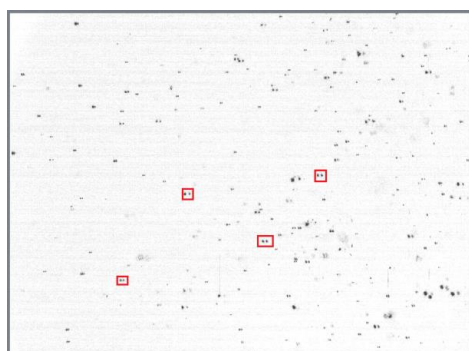


Рис. 9. Мгновенная картина распыла на расстоянии от 36 до 40 мм

На рис. 6, 7 представлены фотографии факела для области монотонного быстрого увеличения интегральной яркости. В этой области наблюдается пленка жидкости, которая разрушается на крупные фрагменты. Структура факела для области монотонного быстрого уменьшения интегральной яркости показана на рис. 8. Здесь вместе с крупными фрагментами (объекты в большом квадрате в верхней части фотографии) наблюдаются сфери-

ческие капли (объекты в виде пары точек в малых квадратах).

В области слабо меняющейся (уменьшающейся) интегральной яркости (рис. 9) наблюдаются только сферические капли (выделены некоторые объекты в виде пары точек в малых квадратах). Таким образом, на данном удалении от форсунки практически не встречаются несферические капли.

Процессы деления этих капель и их формирование в сферические объекты на данном горизонте заканчиваются, что приводит к слабым изменениям яркости отраженного света. Дальнейшее менее быстрое уменьшение яркости, видимо, происходит из-за продолжающегося расширяться в виде конуса потока. Яркость в этой области продолжает уменьшаться из-за вылета капель из освещенной лазерным «ножом» плоскости [10].

5. Заключение

Проведены экспериментальные исследования распыла центробежных форсунок. Предложен экспресс-подход оценки структурных изменений в факеле распыла путем анализа интегральной яркости отраженного света. Он позволил выделить три характерные области в факеле распыла, которые последовательно сменяются при удалении от форсунки. Эти области отвечают за существенные изменения в структуре течения. Первой области соответствует рост интегральной яркости, вызванный увеличением отражающей поверхности пленки жидкости после истечения из форсунки из-за истончения пленки при разлете в виде конуса. Начало деления пленки жидкости на фрагменты сопровождается уменьшением яркости (вторая область). Для третьей области окончание превращения фрагментов распыленной жидкости в сферические капли приводит к тому, что изменения интегральной яркости, вызванные делением пленки на капли, прекращаются. Полученные результаты могут быть полезны для создания стендов по контролю качества работы форсунок на производстве.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема № 124012300246-9.

Список литературы

1. Пажу Д. Г., Галустов В. С. Основы техники распыливания жидкостей. М.: Химия, 1984. 256 с.
2. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД. М.: Мир, 1986. 566 с.
3. Adrian R. J., Westerweel J. Particle Image Velocimetry. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2010. 558 p.

4. Damaschke N., Nobach H., Tropea C. Optical limits of particle concentration for multi-dimensional particle sizing techniques in fluid mechanics // *Experiments in Fluids*. 2002. Vol. 32. P. 143–152.
5. Semidetnov N., Tropea C. Conversion relationships for multidimensional particle sizing techniques // *Measurement Science and Technology*. 2004. Vol. 15. P. 2499–2509.
6. van de Hulst H. C., Wang R. T. Glare points // *Appl. Opt.* 1991. Vol. 30. P. 4755–4763.
7. Maeda M., Akasaka Y., Kawaguchi T. Improvements of the interferometric technique for simultaneous measurement of droplet size and velocity vector field and its application to a transient spray // *Experiments in Fluids*. 2002. Vol. 33. P. 125–134. DOI 10.1007/s00348-002-0453-4
8. Tropea C. Optical particle characterization in flows // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2011. Vol. 43. P. 399–426. DOI: 10.1146/annurev-fluid-122109-160721
9. Баталов В. Г., Степанов П. А., Сухановский А. Н. Оптические измерения размеров капель в реальных потоках // *Вестник Пермского университета. Физика*. 2017. № 3 (37). С. 40–47. DOI: 10.17072/1994-3598-2017-3-40-47
10. Баталов В. Г., Степанов П. А. Математическое моделирование потока капель распыливающего устройства // *Вестник Пермского университета. Физика*. 2023. №4. С. 69–74. DOI: 10.17072/1994-3598-2023-4-69-74

References

1. Paji D.G., Galustov V.S. *Osnovy tekhniki raspylivaniya zhidkostey* [Basics of liquid spraying techniques]. Moscow: Khimiya, 1984. 256 p. (In Russian).
2. Lefebvre A. H. *Processes in GTE Combustion Chambers*. Washington: Hemisphere Publ., 1983. 531 p.
3. Adrian R.J., Westerweel J. *Particle Image Velocimetry*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 558 p.
4. Damaschke N., Nobach H., Tropea C. Optical limits of particle concentration for multi-dimensional particle sizing techniques in fluid mechanics. *Experiments in Fluids*, 2002, vol. 32, pp. 143–152.
5. Semidetnov N., Tropea C. Conversion relationships for multidimensional particle sizing techniques. *Measurement Science and Technology*, 2004, no.15, pp. 2499-2509.
6. van de Hulst H.C., Wang R. T. Glare points. *Appl. Opt.*, 1991, vol. 30, pp. 4755–4763.
7. Maeda M., Akasaka Y., Kawaguchi T. Improvements of the interferometric technique for simultaneous measurement of droplet size and velocity vector field and its application to a transient spray.

- Experiments in Fluids*, 2002, vol. 33, pp. 125–134. DOI 10.1007/s00348-002-0453-4
8. Tropea C. Optical particle characterization in flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2011, vol. 43, pp. 399–426. DOI: 10.1146/annurev-fluid-122109-160721
9. Batalov V. G., Stepanov R. A., Sukhanovsky A. N. Optical measurement of droplet dimensions in spray of fuel injector. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2017, no. 3 (37), pp. 40–47. (In Russian). DOI: 10.17072/1994-3598-2017-3-40-47
10. Batalov V.G., Stepanov R.A. Mathematical modeling of the droplet flow of a spraying device. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2023, no. 4, pp. 69–74. (In Russian). DOI: 10.17072/1994-3598-2023-4-69-74

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Баталов В. Г., Васильев А. Ю. Анализ яркости отраженного света для определения структурных изменений в потоке жидкости от распыливающего устройства // Вестник Пермского университета. Физика. 2024. № 4. С. 72–77. doi: 10.17072/1994-3598-2024-4-72-77

Please cite this article in English as:

Batalov V. G., Vasiliev A. Yu. Analysis of the reflected light brightness to determine structural changes in the fluid flow from a spray device. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2024, no. 4, pp. 72–77. doi: 10.17072/1994-3598-2024-4-72-77

Сведения об авторах

1. *Баталов Владимир Геннадьевич*, к.ф.-м.н., н.с., Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Ак. Королева, д. 1, Пермь, 614013
2. *Васильев Андрей Юрьевич*, к.ф.-м.н., с.н.с., Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Ак. Королева, д. 1, Пермь, 614013

Author information

1. *Vladimir G. Batalov*, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia
2. *Andrei Yu. Vasiliev*, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia