

УДК 53.082.5

Применение прямых оптических методов для исследования характеристик двухфазного потока

Баталов В.Г.*, Степанов Р.А.*, Сухановский А.Н.*****

Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, ул. Академика Королева, 1, Пермь, 614013, Россия

*e-mail: vbatalov@icmm.ru

**e-mail: rodion@icmm.ru

***e-mail: san@icmm.ru

Аннотация

Экспериментально исследованы характеристики двухфазного потока в факеле форсунки. Измерение размеров капель производилось прямым оптическим методом на основе парных бликов. Структура потока исследовалась при помощи полевых измерений скорости на базе метода PIV (Particle Image Velocimetry). Показаны особенности применения этих методов при измерениях в реальных потоках.

Ключевые слова: Particle Image Velocimetry, прямой метод измерения размеров капель, двухфазный поток.

1. Введение

Одним из важных узлов газотурбинных авиационных двигателей является форсунка. Наибольшее распространение в газотурбинных

двигателях получили механические и пневматические форсунки, которые служат для организации качественного распыла топлива. Распыл должен быть однороден в азимутальном направлении, иметь определенный угол раскрытия и структуру потока, характеризоваться каплями заданного распределения по размерам.

Сейчас для оптимизации конструкций форсунок активно используется численное моделирование при помощи коммерческих программных продуктов, в качестве примера можно привести получивший широкое распространение пакет AnsysCFX [1-3]. Однако процесс формирования воздушного потока и капель настолько сложен, что обойтись без экспериментальных методов исследования характеристик воздушно-капельных потоков нельзя. Методы контроля потока в факеле форсунок можно разделить на несколько групп [4]. Прежде всего, это прямые методы измерений. Наиболее распространенные прямые методы измерения скорости потока (капель) это PIV (Particle Image Velocimetry) и PTV (Particle Tracking Velocimetry) [5]. Для восстановления размеров капель используются различные теневые методы [6,7], методы, основанные на использовании бликов на поверхности капель [8,9]. Следующая группа методов основана на измерении интенсивности света рассеянного каплями, можно отметить, активно развивающиеся и представляющие большой интерес методы использующие Ми-рассеяние, в особенности метод, основанный на отношении интенсивности света рассеянного флуоресцирующими трассерами в каплях и интенсивности Ми-

рассеяния[10,11].Предполагается, что флуоресцентное излучение пропорционально объему капли, а Ми-рассеяние площади капли, соответственно их отношение позволяет получить размер капель.Третья группа методов это интерферометрические методы, так, для измерения скорости широко используется лазерная доплеровская анемометрия [12], а для измерения размеров капель применяются такие методы как PDA (PlanarDopplerAnalyzer) [13], IPI (Interferometric Particle Imaging) [14], голографические методы [15]. Целью работы является разработка прямого метода измерений скоростей и размеров капель по парным бликам на оптических изображениях и применение данного метода для исследования характеристик воздушно-капельных потоков.

2. Экспериментальная установка

Измерения проводились на экспериментальной установке, показанной на рис.1, состоящей из газового баллона (1) высокого давления (до 250 атм) для азота, баллона из нержавеющей стали (2) объемом 10 л, редуктора (3), вентиля (4), шлангов кислородных(5) высокого давления (до 20 атм), продувочного устройства с форсункой (6), лазера (7), камеры с объективом (8), моторизованной подвижки (9), шланга низкого давления (10).

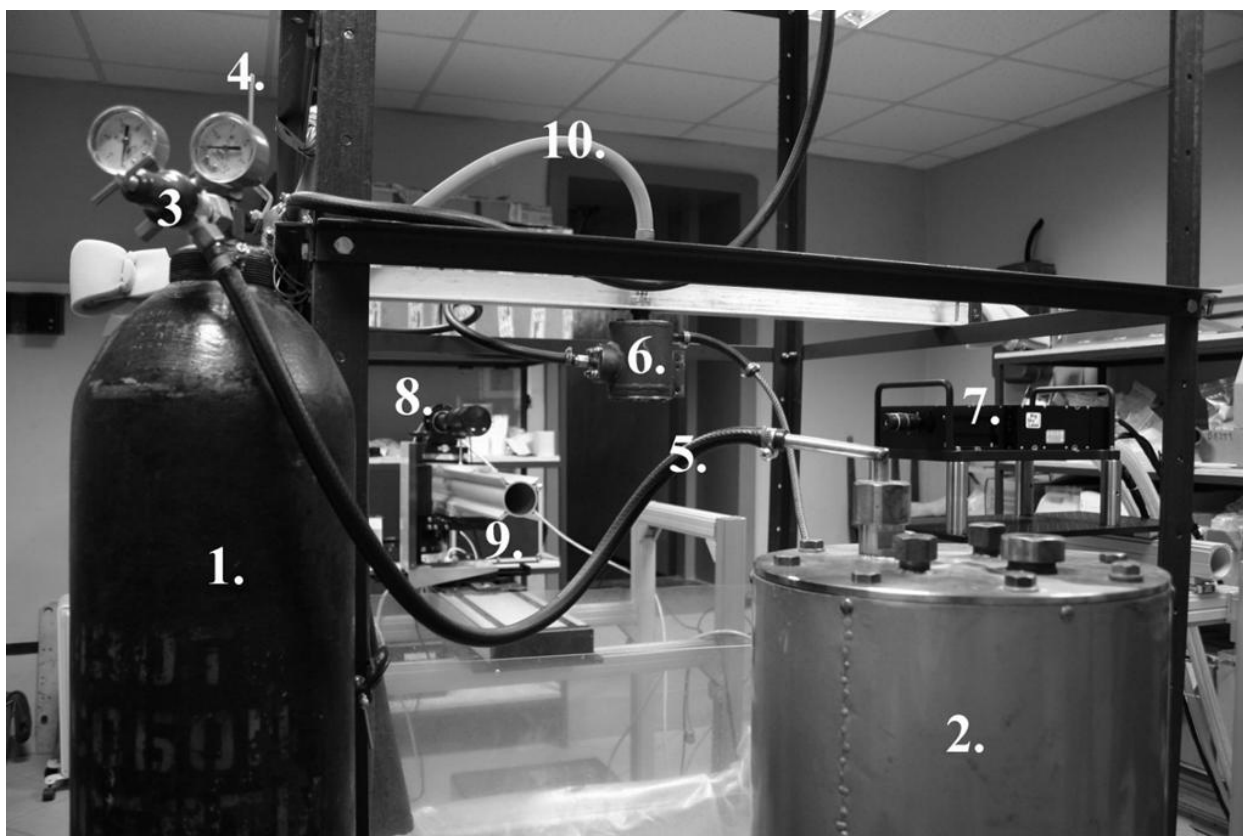


Рис. 1. Экспериментальная установка

В качестве рабочей жидкости использовалась вода. В баллон (1) был закачан воздух до давления 150 атм. Установка работала следующим образом. В баллон (2) заливалось около 10 л воды, которая вытеснялась затем давлением воздуха (0.1-10 атм) из баллона(1) и распылялась форсункой в продувочном устройстве (6). Процесс распыла пневматической форсункой можно разбить на несколько этапов. Жидкость (топливо) под давлением подается через малые прорезы на стенки сопла и затем стекает по стенкам в виде тонкой пленки. Сопло обдувается интенсивным потоком воздуха, который разрывает тонкую пленку, стекающую с кромки сопла. Воздух подается по шлангу 10 от компрессора в продувочное устройство (6). Распад на капли и их дальнейшее дробление на более мелкие капли осуществляется именно за счет взаимодействия жидкой пленки и потока воздуха. Скорость

подаваемого воздуха обычно достаточно высокая (больше 30 м/с), поэтому в реальных устройствах форсунка может располагаться горизонтально (ось сопла расположена горизонтально) без существенного изменения структуры потока, так как характерный размер рабочей области факела составляет около 4 см. Измерения проводились с использованием измерительной системы "Полис" и программного обеспечения «ActualFlow», разработанных в Институте теплофизики СО РАН. Измерительная система включает в себя мощный импульсный лазер Quantel (7), цифровую камеру ВИДЕОСКАН-11002-2001 разрешением 4004*2671 (пикселей) и объектив Micro-Nikkor 200 mm (8). Оптическая система расположена на моторизованной подвижке IseI (9), с компьютерным управлением, что позволило производить позиционирование с высокой точностью.

3. Измерение полей скорости в двухфазном потоке

Измерения полей скорости проводились при помощи системы PIV «Полис». На рис.2. показана схема измерений. В нашем случае для удобства проведения эксперимента продувочное устройство с форсункой (1) было направлено вертикально вниз. При помощи импульсного лазера (2) формировался световой нож, расположенный вертикально и совпадающий с плоскостью, проходящей через ось сопла. CCD-камера ВИДЕОСКАН-11002-2001 (3) регистрировала изображение частиц воды в освещаемой лазерным ножом области в двухкадровом режиме. Методика измерений полей скорости методом PIV заключается в следующем. Лазер генерирует два импульса с

заданной задержкой по времени. Камера, синхронизированная с лазером, регистрирует по два соответствующих изображения частиц в плоскости светового ножа.

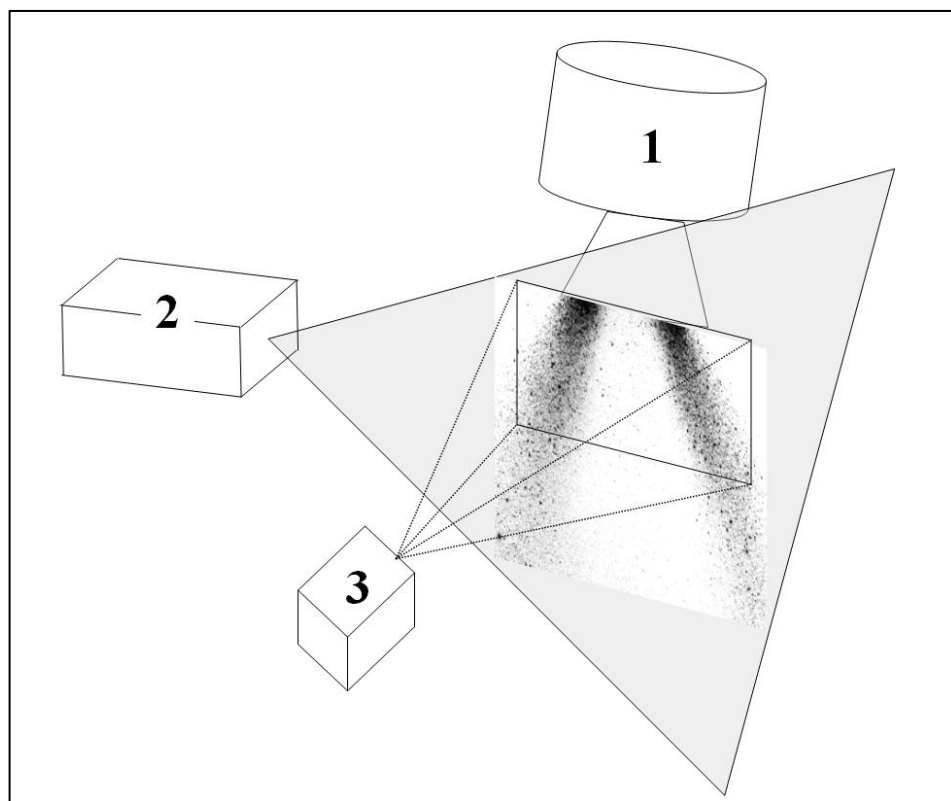


Рис.2. Схема измерений.

Все регистрируемое поле разбивается на ячейки (опросные области), внутри которых вычисляется корреляция изображений частиц на паре снимков, полученных камерой, и по максимуму коэффициента корреляции определяется среднее для данной ячейки значение двумерного вектора смещения в плоскости лазерного ножа [5]. Примеры мгновенного и среднего векторных полей скорости представлены на рис.3.

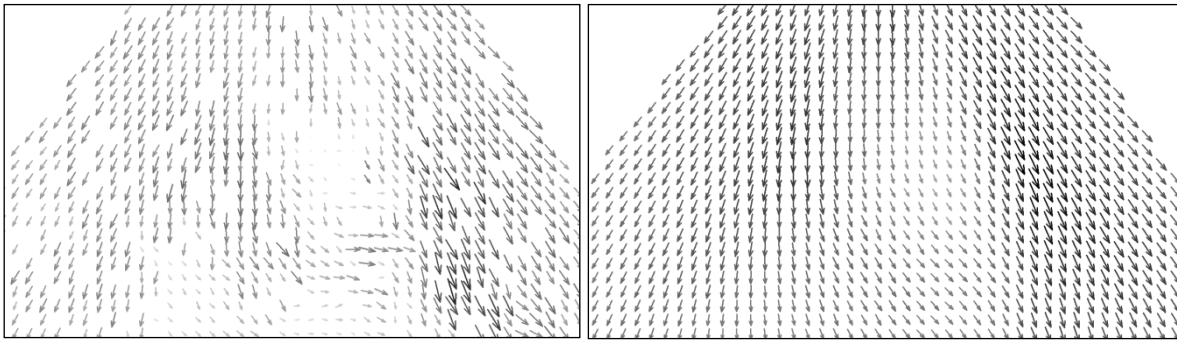


Рис.3. Пример мгновенного (слева) и среднего (справа) векторных полей скорости в факеле пневматической форсунки.

Измерение полей скорости в двухфазном воздушно-капельном потоке в факеле форсунок имеет ряд особенностей. Поведение капель в потоке несущей фазы (воздуха) во многом определяется их размером. Достаточно большие капли, размер которых составляет десятки, а то и сотни микрон инертны и движутся со скоростями отличными от скорости воздушного потока. Если концентрация таких капель высока, то они оказывают существенное влияние на регистрируемое распределение скорости в потоке воздуха. Только очень малые капли, размер которых не превышает 5 мкм, ведут себя как пассивная примесь и фактически могут служить трассерами для определения полей скорости в воздушном потоке. Поэтому, если целью работы является изучение воздушного потока в факеле форсунки необходимо вводить специальные трассеры. Эффективными трассерами для исследования структуры течений газа являются пары глицерина или пары различных смол, например, ладана. В том случае, когда в качестве трассеров используются капли распыливаемой жидкости, при помощи метода PIV восстанавливается

распределение скорости капель, которое может существенно отличаться от распределения скорости воздуха.

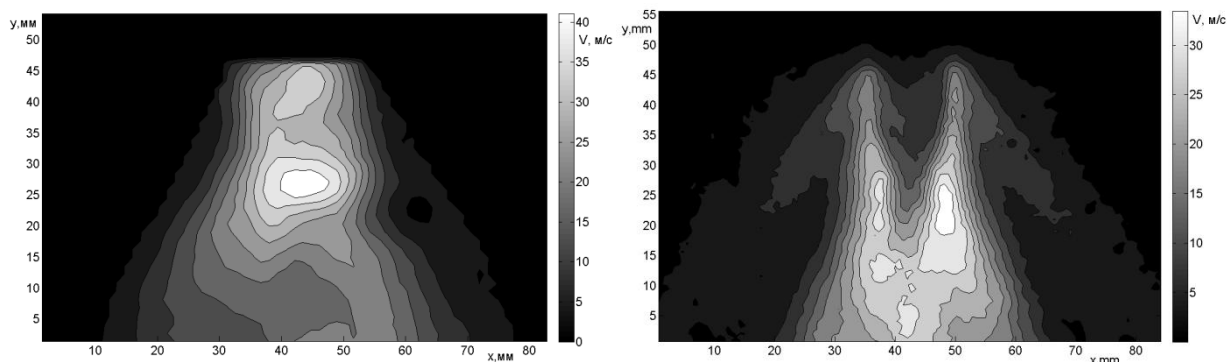


Рис.4. Мгновенные поля абсолютных значений скорости в режиме «холостого хода» (слева) и в рабочем режиме (справа) в факеле пневматической форсунки.

В качестве примера приведем мгновенные поля абсолютных значений скорости в факеле пневматической форсунки для одинаковых значений давления воздуха в продувочном устройстве (300 мм.вод.ст.), но различных расходах воды (рис.4.). Слева представлено поле скорости для режима «холостого хода», для которого давление в топливном канале составляло 0.1 атм., а справа - для рабочего режима с давлением в топливном канале равным 10 атм. Режим «холостого хода» характеризуется низким расходом воды и малым размером капель, которые слабо влияют на воздушный поток и могут служить трассерами для восстановления поля скорости в воздушной струе. В случае рабочего режима расход воды значительно выше и, как хорошо видно на рис.4., восстановленное поле скорости капель существенно отличается от поля скорости в режиме «холостого хода». Отличия объясняются тем, что, во-первых, перемещение относительно крупных капель не всегда совпадает с

направлением движения окружающего их воздушного потока, а во-вторых, достаточно плотный поток капель сам влияет на движение воздуха, изменяя структуру воздушной струи. Еще один важный момент касается особенностей самого метода PIV. Как уже отмечалось ранее, для восстановления полей скорости изображение с трассерами разбивается на небольшие подобласти, как правило, размером 32x32 пикселя. Для корректного расчета смещения в опросной области должно быть не менее 4 трассеров [5], поэтому найденное в результате кросс-корреляционного анализа смещение опросной области является результатом осреднения смещения всех трассеров в данной области и приводит к сглаживанию поля скорости.

4. Измерение размеров капель в двухфазном потоке прямым оптическим методом

Одной из важнейших характеристик воздушно-капельного потока в факеле форсунки является размер капель. Для детального анализа качества распыливания необходимо знать мгновенные пространственные распределения капель по размерам и скоростям. Однако, как показывает обзор литературы по данной тематике [4], универсальных методов, которые позволяют получить исчерпывающую информацию о распределении капель в различных условиях нет. Для того, чтобы использовать прямой метод измерения по бликам, необходимо получить четкое изображение с высоким пространственным разрешением. При использовании описанной оптической системы удалось достичь пространственного разрешения около 3 мкм на

пиксель. На рис.5 приведен увеличенный фрагмент мгновенного изображения потока капель, на котором хорошо видны пары бликов, расстояние между которыми пропорционально размеру капель.

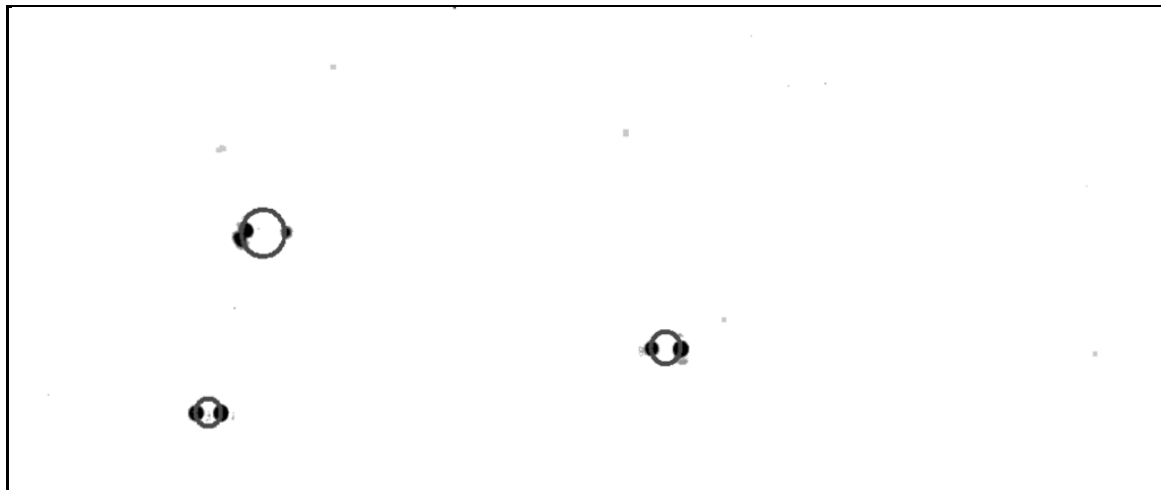


Рис. 5. Мгновенное изображение потока капель (показан увеличенный фрагмент). Окружности с диаметром, соответствующим размеру капли, схематически иллюстрируют обнаруженную каплю.

Один из простейших предлагаемых авторами вариантов обработки изображений состоит в следующем. Исходя из средней засветки, выбирается порог интенсивности, что позволяет бинаризовать изображения. Далее соседние ненулевые пиксели объединяются в группы, которые при превышении определенного числа пикселей в группе рассматриваются как блик. После это осуществляется поиск парных бликов ближайших друг к другу. Такой алгоритм позволяет находить пары бликов ("двойные блики") и восстанавливать размеры капель (рис.5).

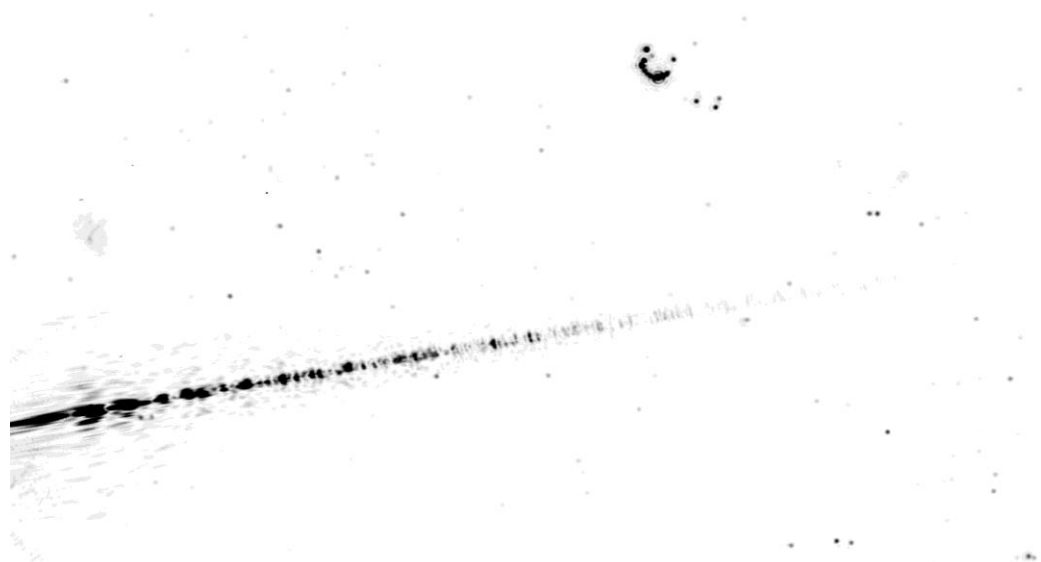


Рис. 6. Мгновенное изображение потока капель с высоким уровнем шума.

Задача становится более сложной, если изображение характеризуется высоким уровнем шума, связанного с наличием крупных засвеченных объектов. Блики могут иметь неправильную форму, а интенсивность света в области блика может быть сильно неоднородна. Типичное изображение с высоким уровнем шума показано на Рис.6. Поэтому в случае изображений с высоким уровнем контраста и низким уровнем шумов удастся получить хорошие результаты, однако в случае наличия заметных оптических дефектов нельзя использовать предложенную выше методику поиска пар бликов без предварительной фильтрации изображения от шумов и крупных оптических дефектов. Оптимальным способом оказалось применение вейвлет-преобразования с использованием вейвлет-функции $\psi(x, y) = (2 - (x^2 + y^2))e^{\frac{-(x^2 + y^2)}{2}}$ ("мексиканской шляпы"). Масштаб вейвлет-функции подбирался по среднему размеру бликов.

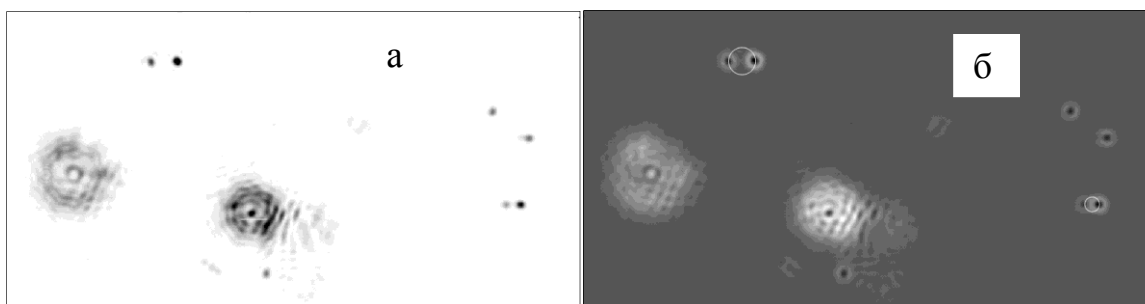


Рис. 7. Применение вейвлет-обработки для анализа изображений: а – исходное изображение; б – результат обработки (распределение вейвлет-коэффициентов). Окружности показывают пары бликов, по которым производится восстановление размеров капель.

После вейвлет-преобразования изображения получаем плоскость вейвлет-коэффициентов (рис.7,б), на которой блики имеют ряд отличительных признаков. В центре блика – максимум интенсивности (темное пятно), а на периферии – область отрицательных значений вейвлет-коэффициентов (светлое кольцо). Объекты такой структуры достаточно надежно определяются по величине коэффициента кросс-корреляции с шаблоном. Затем по парам соседних бликов определяется размер капли (рис.7,б).

Ключевой особенностью предложенной методики является процедура валидации, то есть отбора только тех парных бликов, которые действительно сформированы на одной капле. В условиях достаточно плотных потоков или при высоком уровне шума корректная валидация является необходимым условием для применения того или иного метода измерений. Для процедуры валидации предлагается использовать два изображения потока, полученных с

малой (заданной) задержкой по времени. Подобным образом производится съемка изображений для восстановления поля скорости методом PIV. Затем анализируется смещение пар бликов на втором изображении относительно первого. Если оба блика смещаются синхронно, то предполагается, что данная пара бликов валидна и может быть использована для измерения размеров капли, в противном случае данные пары бликов не валидны и исключаются из рассмотрения. Пример использования процедуры валидации показан на рис.8. Валидные капли соединены прямыми линиями.



Рис. 8. Пример использования процедуры валидации по смещению парных бликов. Показано наложение результатов обработки двух последовательных изображений. Линиями показано смещение капель.

Другие капли, обнаруженные на первом этапе валидации и отмеченные окружностями, но для которых не нашлось пары на втором

кадре, не используются в дальнейшем. Надо подчеркнуть, что в результате использования процедуры валидации помимо получения достоверной информации о размерах капель, восстанавливается также и скорость капель. Таким образом, появляется возможность исследовать зависимость скорости капель от их размера, восстанавливать пространственное распределение расхода (в плоскости лазерного ножа). Распределение размеров, восстановленное при помощи предлагаемой методики, показано на рис.9.

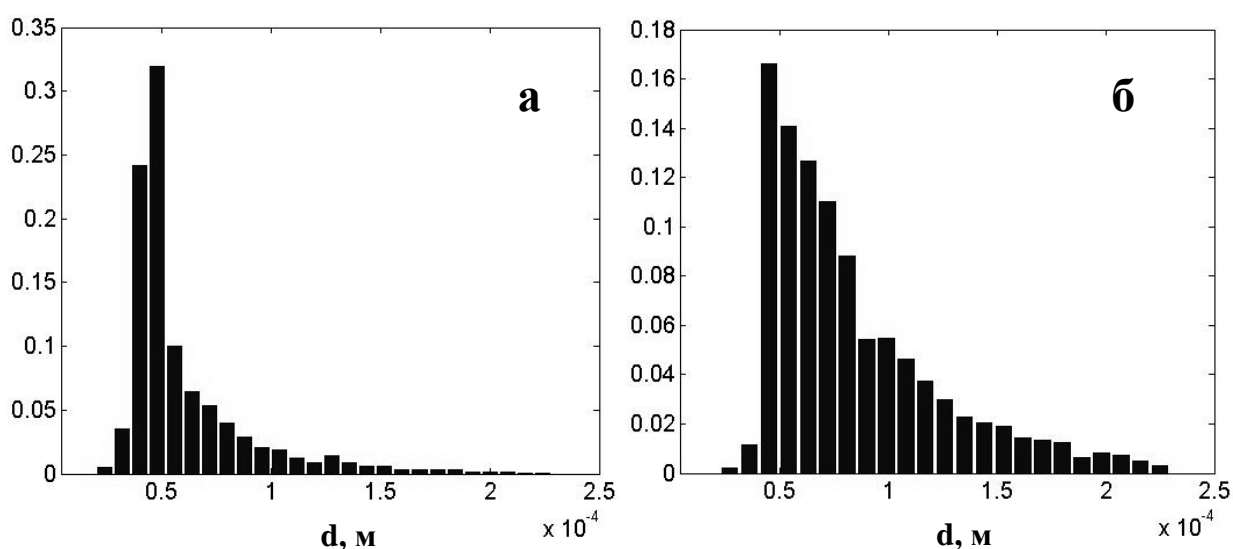


Рис. 9. Распределение капель по размерам, а – для $p=0.1 \text{ атм.}$, б – для $p=10 \text{ атм.}$, по вертикали отложена относительная доля капель.

Измерения производились в факеле распыла пневматической форсунки, в области размерами $14 \times 9 \text{ мм}^2$, для двух режимов распыливания – режима «холостого хода» (рис.9,а) и рабочего режима (рис.9,б). Хорошо видно, что с ростом расхода увеличивается размер капель, в режиме «холостого хода» заутеровский диаметр равен $d_{32} = 95$

мкм, а средний диаметр $d=60$ мкм, в рабочем режиме размер капель увеличивается: $d_{32}=124$ мкм, $d=84$ мкм. Интересно, что с увеличением расхода заметно меняется структура распределения капель в плоскости скорость-диаметр (рис.10), хорошо видно, что большая часть крупных капель движется с высокой скоростью.

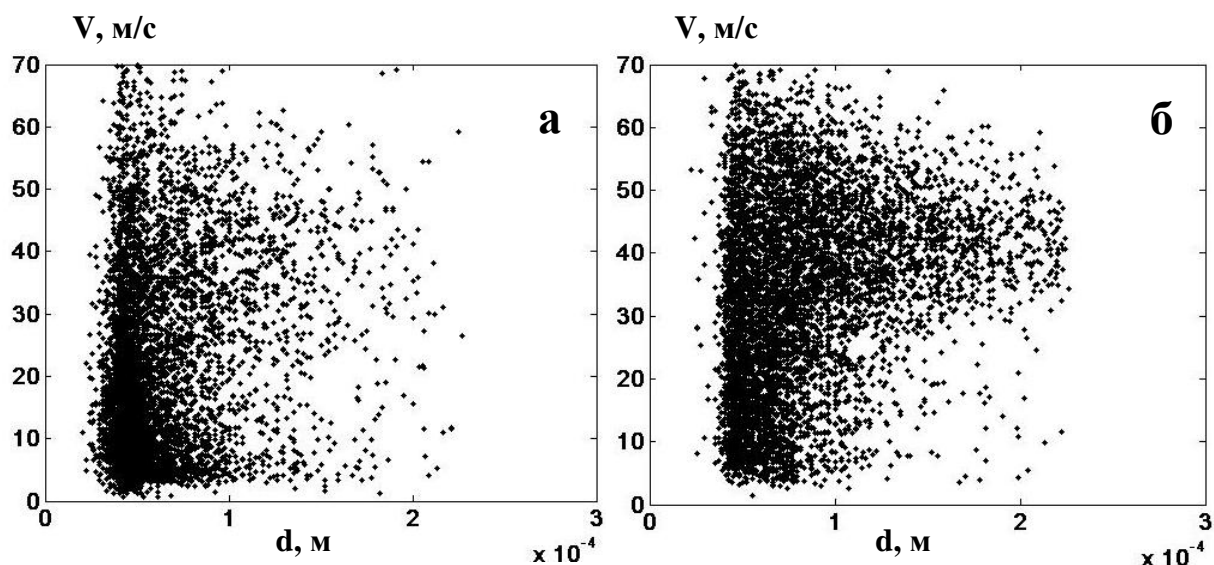


Рис. 10. Распределение капель в плоскости V-d, а – для $p=0.1$ атм., б – для $p=10$ атм.

В заключение надо отметить, что предлагаемый метод имеет свои ограничения. Первое из них связано с разрешающей способностью используемой оптической системы, так, при пространственном разрешении в 3 мкм/пиксель нельзя достоверно измерить размер капель с диаметром менее 20 мкм, так как диаметр бликов составляет обычно несколько пикселей и они начинают сливаться на изображении. Второе обстоятельство, которое может приводить к значительной ошибке, связано с тем, что маленькие капли (в данной конфигурации это капли размером менее 10 мкм) видны на

изображении как одиночные блики. Иногда возникает ситуация, когда два таких блика, сформированные различными каплями, расположены достаточно близко и на двух последовательных PIV изображениях смещаются синхронно. В этом случае предлагаемый алгоритм будет воспринимать эти два блика как пару бликов принадлежащих одной крупной капле (рис.11).

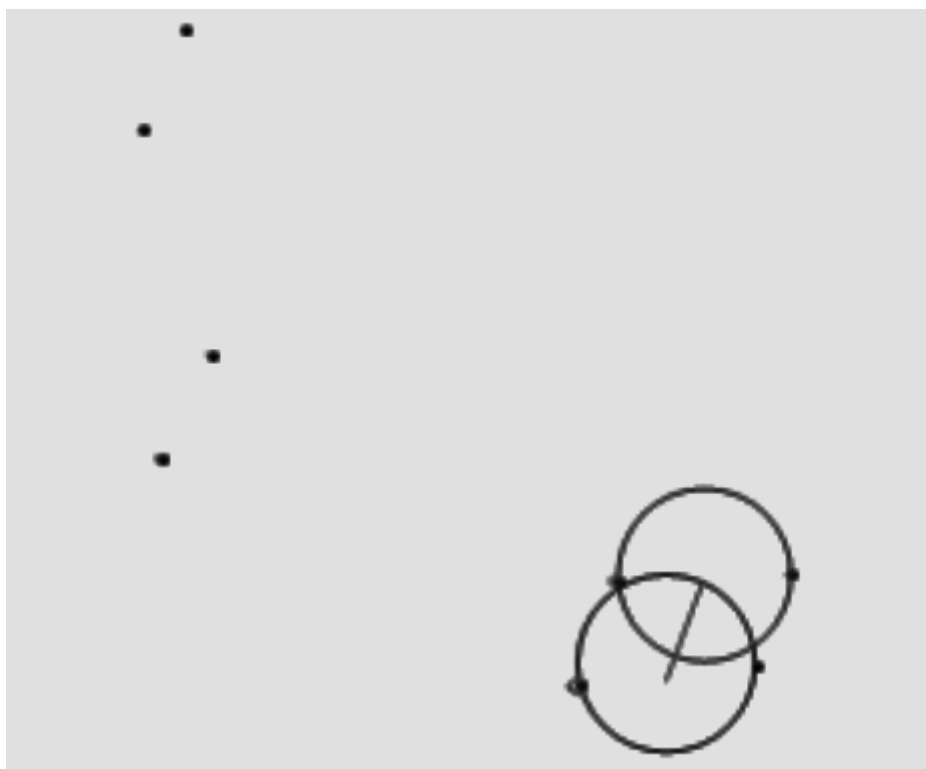


Рис. 11. Одиночные блики при недостаточном пространственном разрешении оптической системы.

Этот эффект был обнаружен при измерении размеров капель в различных областях факела распыла. На рис.12а показано распределение капель в периферийной области, в которой находится большая часть крупных капель, а на рис.12б представлено распределение капель в центральной области, с высокой концентрацией маленьких капель. Хорошо видно, что

распределение на рис.12б имеет длинный «хвост» образованный тем, что есть небольшое количество пар маленьких капель, которые успешно проходят процедуру валидации и учитываются как пары бликов на крупных каплях. Несмотря на то, что это достаточно редкие события, они приводят к заметной ошибке и завышенным значениям заутеровского и среднего диаметров. Это еще раз подчеркивает, что к измерению размеров в капель в факеле распыла надо подходить очень внимательно с учетом особенностей используемого метода.

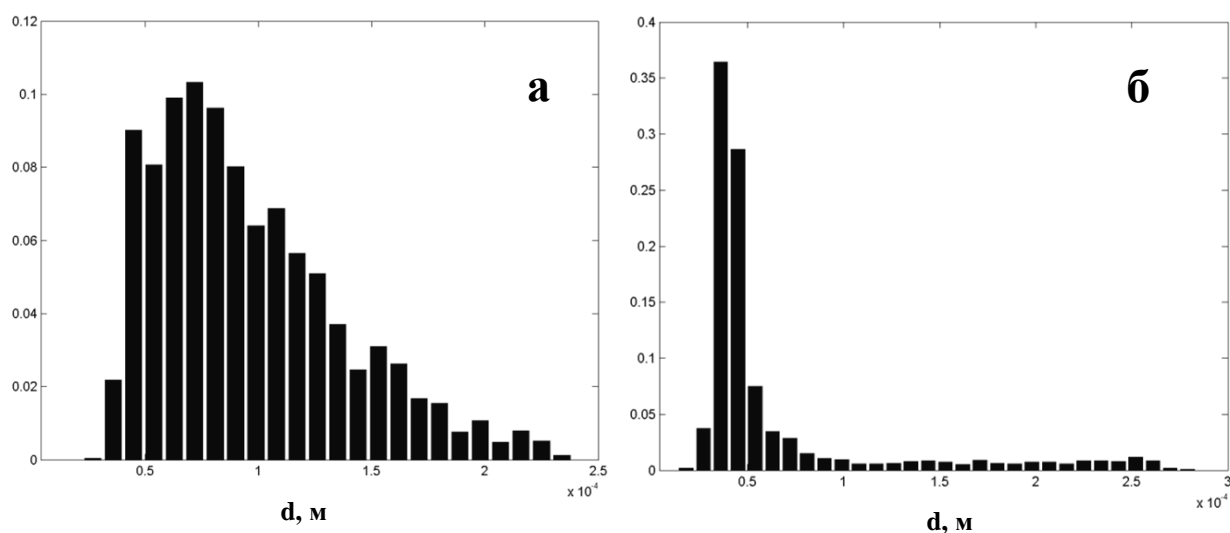


Рис. 12. Распределение капель по размерам, а – для периферийной области, б – для центральной области, по вертикали отложена относительная доля капель.

Вычислительный алгоритм эффективно масштабируется под многопроцессорную вычислительную технику. При этом требуется минимальная адаптация к программной среде кластера. Такую возможность трудно недооценить при проведении массовых измерений для набора представительной статистики.

5. Заключение

Экспериментально исследованы характеристики двухфазного потока в факеле форсунки. Показано, что измерение полей скорости методом PIV в двухфазном воздушно-капельном потоке в факеле форсунок имеет ряд особенностей. Поведение капель в потоке несущей фазы (воздуха) во многом определяется их размером. Достаточно большие капли, размер которых составляет десятки, а то и сотни микрон инертны и движутся со скоростями отличными от скорости воздушного потока. Если концентрация таких капель высока, то они оказывают существенное влияние на распределение скорости в потоке воздуха. Измерение размеров капель производилось прямым оптическим методом на основе парных бликов. Ключевой особенностью предложенной методики является процедура валидации, то есть отбора только тех парных бликов, которые действительно сформированы на одной капле. В результате использования процедуры валидации помимо получения достоверной информации о размерах капель, восстанавливается также и распределение скоростей капель. Таким образом, появляется возможность исследовать зависимость скорости капель от их размера, восстанавливать пространственное распределение расхода. По итогам проведенной работы был подготовлен пакет программ для ЭВМ "Программа определения размеров и скоростей капель аэрозоля по их оптическим изображениям" (свидетельство о государственной регистрации № 2013611440 от 09.01.2013).

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и правительства Пермского края (проектов РФФИ-Урал №13-01-96015, № 11-07-96001, проекта Международных исследовательских групп).

Библиографический список

1. Русаков С.В., Шуваев Н.В. Численное моделирование аэроупругого взаимодействия компрессорной лопатки с дозвуковым потоком воздуха в трёхмерной постановке // Вычислительная механика сплошных сред. – 2013. – Т. 6, № 3. – С. 300-308.
2. Сипатов А.М., Карабасов С.А., Гомзиков Л.Ю., Абрамчук Т.В., Семаков Г.Н. Применение методов трехмерного моделирования при конструировании пневматических форсунок // Вычислительная механика сплошных сред. – 2013. – Т. 6, № 3. – С. 346-353.
3. Брыкин Б. В., Евдокимов И. Е. Численное моделирование эксперимента по исследованию течения в лабиринтном уплотнении // Электронный журнал «Труды МАИ». 2012. № 61, <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=35499>.
4. C.Tropea. Optical particle characterization in flows // Annual Review of Fluid Mechanics, 2011 - annualreviews.org.
5. Adrian R.J., Westerweel J. 2010. Particle Image Velocimetry // Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press.
6. Hofeldt D.L., Hanson R.K. 1991. Instantaneous imaging of particle size and spatial distribution in two-phase flows // Appl. Opt. 30:4936–48.
7. Bongiovanni C., Chevallier J.Ph., Fabre J. 1997. Sizing of bubbles by incoherent imaging: defocus bias // Exp.Fluids 23:209–16.
8. van de Hulst H.C, Wang RT. 1991. Glare points // Appl. Opt. 30:4755–63.

9. Hess C.F., L'Esperance D. 2009. Droplet imaging velocimeter and sizer: a two-dimensional technique to measure droplet size // *Exp. Fluids* 47:171–82.
10. Jermy M.C., Greenhalgh D.A. 2000. Planar droplet sizing by elastic and fluorescence scattering in sprays too dense for phase Doppler measurement // *Appl. Phys. B* 71:703–10.
11. Domann R., Hardalupas Y. 2001a. Spatial distribution of fluorescence intensity within large droplets and its dependence on dye concentration // *Appl Opt.* 40:3586–97.
12. Варакин А.Ю., Поляков А.Ф. Измерения скоростей крупных частиц с использованием лазерных доплеровских анемометров // *Измерительная техника*. 1998. №8. С.22-26.
13. Aisa L., Garcia J.A., Cerecedo L.M., Garcia Palacin I., Calvo E. 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 // *Int. J. Multiphase Flow* 2002. V.28. №2.
14. Semidetnov N., Tropea C. 2004. Conversion relationships for multidimensional particle sizing techniques // *Meas. Sci. Technol.* 15:112–18.
15. Kuhn J., Charriere F., Colomb T., Cuhe E., Montfort F., et al. 2008. Axial subnanometer accuracy in digital holographic microscopy // *Meas. Sci. Technol.* 19:074007.