

*Двенадцатая Международная научно-техническая конференция  
«Оптические методы исследования потоков»  
Москва, 25 — 28 июня 2013 г.*

УДК 535.8

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

*Институт механики сплошных сред УрО РАН,  
E-mail: [vbatalov@icmm.ru](mailto:vbatalov@icmm.ru), [rodion@icmm.ru](mailto:rodion@icmm.ru), [san@icmm.ru](mailto:san@icmm.ru)*

**ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ  
ИЗМЕРЕНИЯ РАЗМЕРОВ КАПЕЛЬ В ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКАХ**

**АННОТАЦИЯ**

Рассмотрены два оптических метода определения размеров капель жидкости в факеле распыла пневматических форсунок, основанные на возникновении пары бликов на каплях, а именно, метод IPI (Interferometric Particle Imaging) и метод «двух бликов». Для метода «двух бликов» разработан алгоритм поиска пар бликов и их валидации.

**ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, РАЗМЕР КАПЕЛЬ, ДВУХФАЗНЫЕ ПОТОКИ**

**ВВЕДЕНИЕ**

Сгорание топлива в авиадвигателях сопровождается выбросом в атмосферу большого количества вредных газов. В основном это оксиды углерода и азота. При проектировании двигателей много усилий направляется на уменьшение выбросов этих газов. Одним из средств оптимизации сгорания топлива является управление процессом его распыла. Поэтому измерения, размеров капель в факеле распыла форсунок авиадвигателей представляют большой интерес.

Вплоть до недавнего времени в качестве основного метода измерений скорости и размеров капель в факеле распыленного топлива форсунок авиадвигателей использовалась лазерная доплеровская анемометрия, с помощью которой удаётся проводить локальные измерения скорости и размеров частиц. Интегральные оптические (теневые и малых угловых отклонений) методы, позволяли дать интегральные оценки распределения частиц по размерам. Сегодня появились новые возможности для измерения в газогидродинамических потоках на основе измерительных систем PIV (Particle Image Velocimetry). Наиболее перспективными методами восстановления размеров капель являются полевые методы, основанные на возникновении бликов света, локализованных на каплях распыленной жидкости. Одним из них является метод IPI (Interferometric Particle Imaging) [1]. Принцип измерения заключается в следующем: выбранное сечение потока освещается лазерным ножом, в результате прохождения луча света через каплю образуются отраженный и однократно преломленный лучи, которые формируют интерференционную картину, при этом расстояние между интерференционными полосами обратно пропорционально диаметру капли [2,3]. Одним из недостатков метода IPI является перекрытие интерференционных образов капель, имеющих вид кругов с вертикальными (или горизонтальными) полосами. Для того чтобы обойти эту проблему, используют блок цилиндрических линз (блок сжатия), который преобразует круглые изображения частиц в горизонтальные полосы, что

существенно уменьшает их перекрытие и повышает допустимую концентрацию частиц. Пример IPI-изображения, обработанного при помощи программного обеспечения Actual Flow, показан на рис.1, где окружности показывают относительные размеры капель.

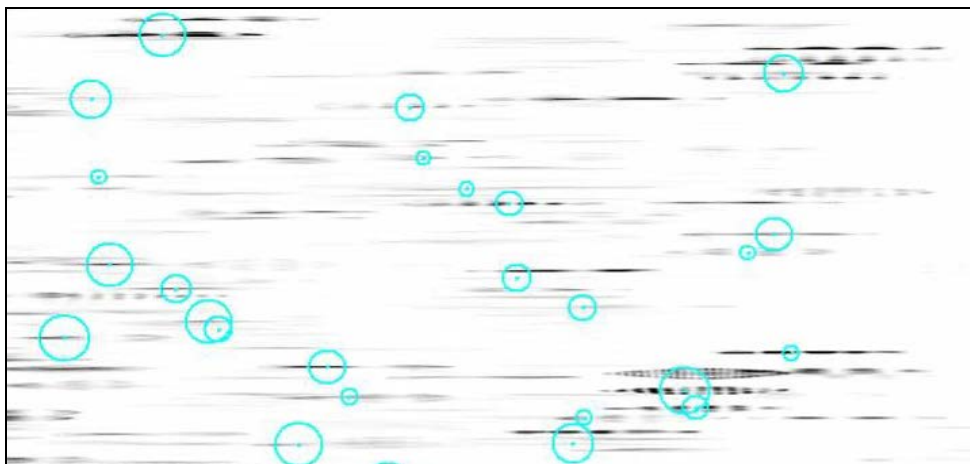


Рис. 1. IPI-изображения, обработанного при помощи программного обеспечения Actual

Если настроить оптическую систему на сфокусированное изображение капль жидкости, то на капле можно наблюдать два блика, расстояние между которыми пропорционально размеру капли. На определении этого расстояния основан метод, который можно называть методом «двух бликов». Огромными достоинствами этого метода является его простота и наглядность. Фактически этот метод сводится к отысканию на изображении пар бликов, принадлежащих одной капле, и измерению расстояния между бликами. Имеются определенные трудности при построения алгоритма для надежного отыскании пар бликов, также накладываются высокие требования к разрешающей способности матрицы камеры. На рис.2 показан пример мгновенного изображения потока капль. Квадратом отмечена капля воды размером около 20 микрон. Далеко не всегда пары бликов определяются однозначно, часто необходимо бывает провести предварительную фильтрацию изображения от шумов и крупных оптических дефектов. Оптимальным способом для предварительной обработки изображений оказалось применение вейвлет-преобразования.

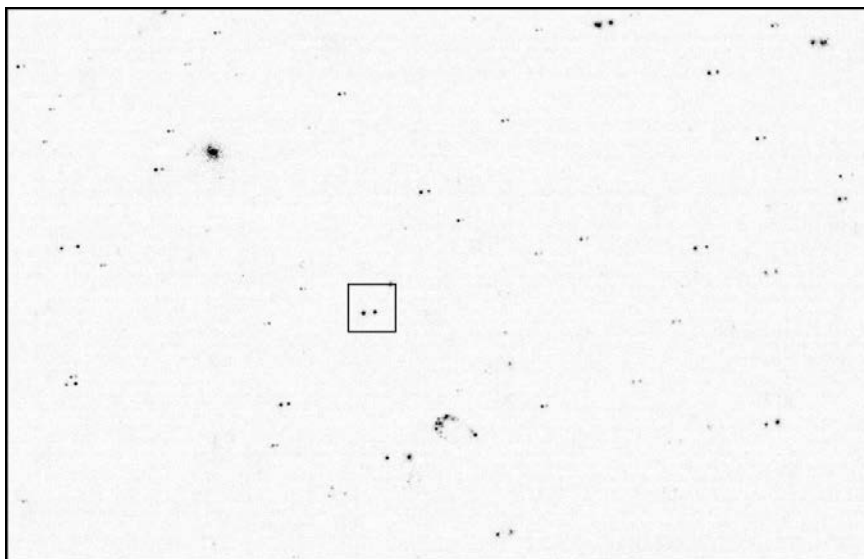


Рис.2. Мгновенное изображения потока капль

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Измерения проводились на экспериментальной установке, показанной на рис.3. Установка состояла из газового баллона высокого давления (до 250 атм) для азота (1), баллона из нержавеющей стали объемом 10 литров (2), газового редуктора для азота БАМЗ А-60-2 с манометром от 0 до 250 атм на входе и манометром от 0 до 25 атм на выходе (3), вентиля газового (до 40 атм) (4), шлангов кислородных (до 20 атм), форсунки(5), продувочного устройства (6).

Измерения проводились с использованием модернизированной измерительной системы POLIS, включающей в себя мощный импульсный лазер EverGreen Quantel (7), цифровую камеру ВИДЕОСКАН-11002-2001 разрешением 4004\*2671 пикселей и объектив Micro-Nikkor 200 мм (8). Оптическая система расположена на моторизованной подвижке IseI (9), с компьютерным управлением, что позволило производить позиционированное с высокой точностью. В качестве рабочей жидкости использовалась вода. В баллон 1 был закачан воздух до давления 150 атм.

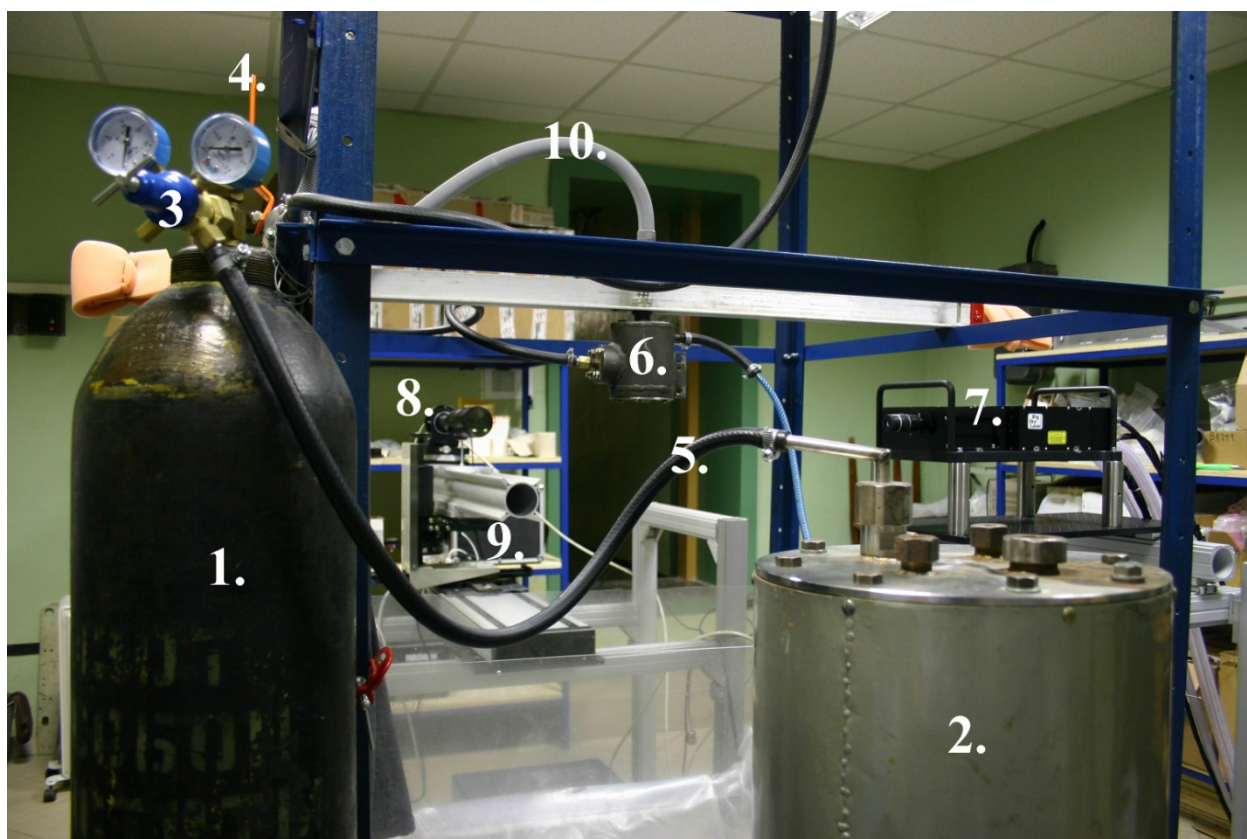


Рис. 3. Экспериментальный стенд

Установка работает 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.

Процесс распыла пневматической форсункой можно разбить на несколько этапов. Жидкость (топливо) под давлением подается через малые прорезы (они могут иметь различную форму) 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. 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. В нашем случае для удобства проведения эксперимента форсунка была направлена вертикально вниз. Плоскость лазерного ножа была также вертикальна и совпадала с плоскостью, проходящей через ось сопла. CCD-камера ВИДЕОСКАН-11002-2001 регистрировала изображение частиц воды в освещаемой лазерным ножом области в двухкадровом режиме.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Распределение капель по размерам восстанавливалось методами ИРІ и методом основанным на поиске пар бликов, на рис. 4 показан пример гистограммы, полученной методом пар бликов. Далее для различных областей факела форсунки, для нескольких режимов, для набора вертикальных сечений и конфигураций форсунок проводились серии измерений, с последующим анализом результатов и их систематизацией.

На рис. 5-6 показаны азимутальные зависимости среднего и заутеровского диаметра для двух различных конфигураций форсунки. Хорошо видно, что второй вариант обеспечивает более эффективный распыл. Измерения показали, что оба метода могут быть использованы для измерения размеров капель в реальных двухфазных потоках. Метод «двух бликов», как более простой и наглядный может служить тестовым для других методов. Метод ИРІ, обладая меньшей ресурсоемкостью, более подходит для измерений, поставленных на поток.

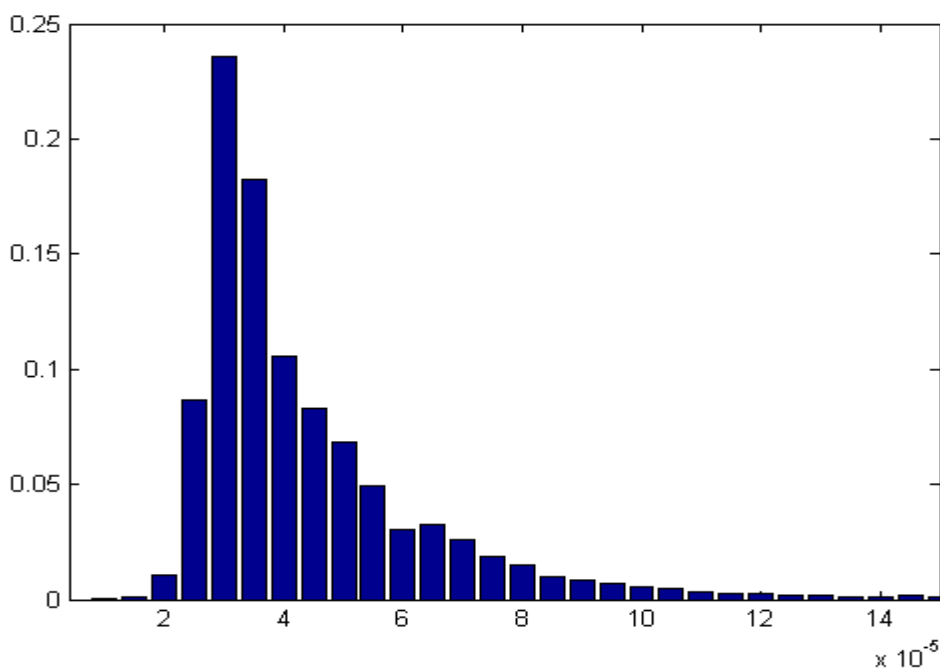


Рис. 4. Распределение капель по размерам (по вертикали отложена относительная частота, по горизонтали размер в м).

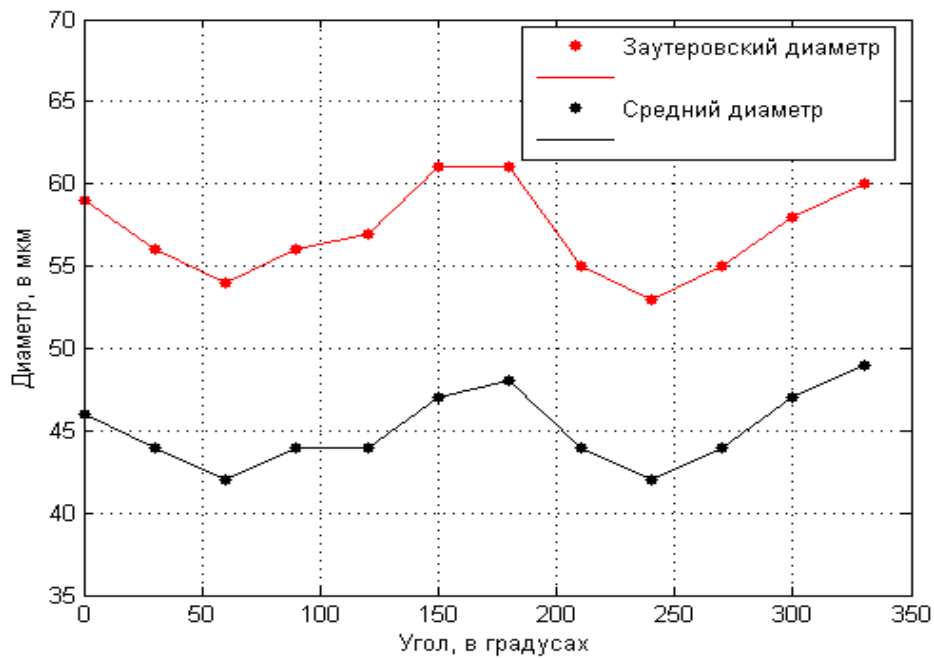


Рис. 5. Азимутальная зависимость среднего и заутеровского диаметра (конфигурация 1)

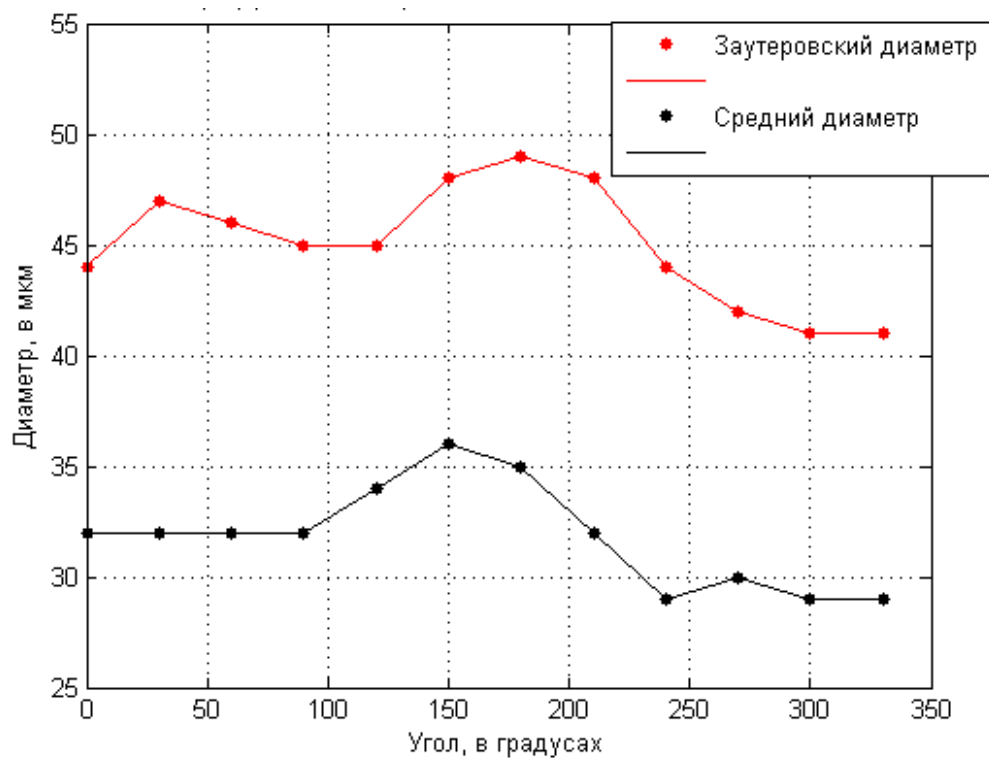


Рис. 6. Азимутальная зависимость среднего и заутеровского диаметра (конфигурация 2)

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке правительством Пермского края проектов Международных исследовательских групп ученых.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Damaschke N., Nobach H., Tropea C.** Optical limits of particle concentration for multi-dimensional particle sizing techniques in fluid mechanics // Experiments in Fluids. 2002. №32. P.143-152.
2. **Van de Hulst H.C.** Light Scattering by Small Particles. N. Y.: Wiley, 1957.
3. **Semidetnov N., Tropea C.** Conversion relationships for multidimensional particle sizing techniques // Measurement Science and Technology. 2004. №15. P.2499-2509.

V.G. Batalov, R.A. Stepanov, A.N. Sukhanovsky

*Institute of Continuous Media Mechanics UB of RAS, Russia,  
E-mail: [vbatalov@icmm.ru](mailto:vbatalov@icmm.ru), [rodion@icmm.ru](mailto:rodion@icmm.ru), [san@icmm.ru](mailto:san@icmm.ru)*

### **CHARACTERISTICS OF DIFFERENT OPTICAL METHODS FOR DROP SIZE MEASUREMENTS IN TWO-PHASE FLOWS**

*Two optical methods for drop size measurement in spray of pneumatic nozzles were considered. The methods are based on appearance of glare pairs on drops, method IPI (Interferometric Particle Imaging) and “two glares” or direct method. For direct method procedure of glare pairs detection and validation was developed.*