

УДК 533, 53.08
PACS 87.63.lt

Оптические измерения размеров капель в факеле распыла топливной форсунки

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

Институт механики сплошных сред УрО РАН
614013, г.Пермь, ул.Ак.Королева, 1
email: vbatalov@icmm.ru, rodion@icmm.ru, san@icmm.ru

Результаты сравнительного анализа оптических методов исследования газокapельных потоков показали, что для изучения распыла топливной форсунки наиболее применимы методы Interferometric Particle Imaging (далее IPI) и Glare Point Technique (далее GPT). Проведены измерения размеров капель жидкости в факеле распыла пневматической форсунки этими двумя методами. Измерения характеристик распыла топливной форсунки на разных режимах работы выявили, что для выбранной схемы измерений метод IPI эффективнее определяет частицы в диапазоне от 5 до 100 мкм, а метод GPT – в диапазоне от 20 до 200 мкм. Для автоматизации метода GPT создано программное обеспечение с процедурой валидации капель жидкости, использующей вейвлет-преобразование. По измеренному методом GPT распределению размеров и скоростей капель жидкости восстановлена относительная расходная характеристика топливной форсунки. При комбинации двух методов диапазон измеряемых размеров капель соответственно значительно расширился. На интервале диаметров капель от 30 до 100 мкм результаты по количеству измеренных капель для обоих методов примерно одинаковы. Применение только одного из методов в практических приложениях может привести к значительным ошибкам. Так, зауртовский диаметр D_{32} , рассчитанный по данным только метода IPI, составил ~ 40 мкм, а по данным GPT ~ 80 мкм.

Ключевые слова: спрей; капля; частица; IPI; GPT; вейвлет

Поступила в редакцию 07.09.2017; принята к опубликованию 01.11.2017

Optical measurement of droplet dimensions in spray of fuel injector

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

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, 614013, Perm, Ac. Korolev str., 1
email: vbatalov@icmm.ru, rodion@icmm.ru, san@icmm.ru

In this paper, the optical methods for studying the gas-droplet flows are analyzed and compared. The analysis has shown that the Interferometric Particle Imaging (hereinafter IPI) and Glare Point Technique (hereinafter GPT) are most effective for studying the atomization process in fuel injectors. These methods have been used to measure the size of fuel droplets in the spray cone of the air-blast atomizer. Measurements of atomization characteristics of the fuel atomizer under different operating conditions made by both methods (IPI and GPT) have shown that the IPI technique is more effective for small particles (5-100 μm) and GPT technique – for larger particles (20 - 200 μm) for this scheme of measurements. To computerize the GPT method, a special software product, incorporating the wavelet transform –based procedure for validation of liquid droplets, has been developed. The size and velocity distributions of droplets determined by the GPT method have been used to construct the relative flowrate characteristic curve for the fuel atomizer. Therefore, the application of both methods essentially extends the range of measurable droplet dimensions. In practical applications, the use of only one method can lead to significant errors. Thus,

Sauter's diameter D_{32} evaluated with the use of IPI data was $\sim 40 \mu\text{m}$, whereas the use of GPT method gives the value of about $80 \mu\text{m}$.

Keywords: spray; droplet; particle; IPI; GPT; wavelet

Received 07.09.2017; accepted 01.11.2017

doi: 10.17072/1994-3598-2017-3-40-47

1. Введение

Проблема определения распределений капель распыляемой жидкости по размерам, скоростям, пространственной плотности является важной для многих отраслей производства. Процессы распыления используются в медицинской, топливной и энергетической промышленности. Создание спреев – это сложный многофазный процесс, который осуществляется при помощи форсунок и характеризуется потоком жидкости внутри форсунки, распадом на крае сопла форсунки, разбиением и распылением при перемешивании с газообразной фазой, с последующим испарением или сгоранием. В частности, форсунка, являясь одним из важных узлов газотурбинных двигателей, служит для организации распыла авиационного топлива. Для того чтобы процесс сгорания топлива в камере сгорания был предсказуем, распыл (спрей) должен быть однороден в азимутальном направлении, иметь заданный угол раскрытия, известную структуру потока, характеризоваться каплями заданного распределения по размерам и скоростям. Одной из важных количественных характеристик газокapельной топливной смеси является зауровский диаметр D_{32} . Эта величина выражает соотношение суммарного объема капель топлива к их суммарной площади и характеризует процесс их сгорания. Для исследования спреев в настоящее время широко применяются оптические методы благодаря их неинвазивности и высокой информативности.

2. Обзор методов

Выбор того или иного метода определяется поставленной задачей исследования. Так, теневой оптический метод, в котором используется осветительный пучок большой поперечной площади ($\sim 10 \text{ см}^2$), позволяет проводить измерения размеров частиц на большой площади вдоль направления освещения. Этот метод является интегральным вдоль направления освещения. Однако, поскольку при этом видны все частицы вдоль направления освещения, велика вероятность перекрытия образов частиц и поэтому обычно теневой метод применяется в разреженных потоках.

Метод малых угловых отклонений также является интегральным, но для гораздо меньшей области и только вдоль луча осветителя. Данные получают путем сканирования спрея лучом света с

малым поперечным сечением ($\sim 1 \text{ мм}^2$). Метод малых угловых отклонений работает в очень плотных потоках, где получить информацию о размерах частиц другими методами невозможно.

Метод LDA (Laser Doppler Anemometry) является точным локальным методом измерения размеров и скоростей капель жидкости (частиц) с очень ограниченным полем зрения ($\sim 0.1 \text{ мм}^2$). Однако одна из основных проблем при измерениях LDA в плотных потоках состоит в том, что возникают большие ошибки при попадании в область измерений нескольких капель.

Если необходимо подробно изучить структуру потока, скорости капель (частиц), то применяют метод PIV (Particle Image Velocimetry) [1], который позволяет проводить измерения на большой площади (до нескольких десятков см^2).

Выпускаемые в настоящее время измерительные системы (фирмы производители: LaVision, Dantec Dynamics, Сигма-Про и др.) используют метод PIV для полевых измерений скорости и метод Interferometric Particle Imaging (IPI) [2,3] для полевых измерений размеров частиц. Метод IPI основан на восстановлении размеров капель по частоте интерференционной картины от точечных источников света, возникающих на сферических прозрачных каплях жидкости при освещении их мощным лазерным импульсом света.

Известен также метод Glare Point Technique (GPT) [4], в котором размеры капель измеряются не по частоте интерференционной картины, а непосредственно по расстоянию между соответствующими точечными источниками. В данной работе использованы два полевых метода: IPI и GPT.

3. Подробнее о методах IPI и GPT

На сегодняшний день не существует универсального оптического или какого-либо другого метода, при помощи которого можно было бы измерить истинное (полное) распределение капель в факеле распыла реальных форсунок, поскольку для каждого метода есть те или иные ограничения, например, по степени прозрачности жидкости, по диапазону размеров капель и скоростей. Чтобы получить как можно более полную картину распределения капель по размерам, необходимо проведение измерений различными методами.

С этой целью распыл форсунки был исследован двумя методами: IPI и GPT. Выбор методов

был неслучаен. Каждый из методов имеет свой диапазон надежно измеряемых размеров, при этом диапазоны частично перекрываются. Это позволяет их сравнить. В целом же измеряемый диапазон диаметров капель значительно расширяется, что дает возможность приблизиться к получению истинного распределения. Для оптической схемы данных экспериментов для метода IPI этот диапазон составил от 5 до 100 мкм, а для GPT – от 20 до 200 мкм и более. Обычно для газок капельных спреев диапазон размеров капель от 5 до 200 мкм представляет наибольший интерес. Кроме того, удобство применения этих методов заключается в том, что для обоих методов используется одно и то же оборудование (лазер, CCD камеры и т.д.), отличаются они лишь некоторыми элементами оптической системы и процедурой расшифровки полученных изображений.

В работах [5,6] проводилось сравнение этих методов для разреженных потоков, которое показало, что при небольшой плотности капель порядка 3-7 штук на кадр матрицы размером 24 на 36 мм и разрешением 4004 на 2671 пикселей удается идентифицировать капли и измерить их диаметр одновременно методом IPI и методом GPT (рис. 2). Для валидных частиц результат измерения их диаметров оказался одинаковый в пределах погрешности.

В случае работы форсунок на реальных режимах плотность капель в факеле распыла становится слишком высокой для сравнительной идентификации по отдельным каплям. Поэтому в данной работе не применялась схема одновременного измерения, примененная в [5], а использовались статистические результаты измерений ансамбля капель для одной и той же области факела форсунки последовательно каждым из методов.

Как будет видно далее из описания измерительного стенда и конструкции форсунки, факел распыла имеет азимутальную симметрию. Поэтому были применены двумерные варианты методов IPI и GPT.

4. Описание измерительного стенда

В канал центробежной форсунки, установленной внутри продувочного устройства (1) (рис. 1), подавалась жидкость (дистиллированная вода) под давлением от 1 до 5 атм. Из форсунки жидкость истекала в виде симметричного конуса. По другому каналу в продувочное устройство от компрессора подавался воздух под давлением 0,08 атм. Течение воздуха также было в виде симметричного конуса. При этом разбрызгиваемая форсункой жидкость дополнительно распылялась воздушной струей. В результате получался факел распыла, имеющий азимутальную симметрию. На некотором расстоянии от сопла продувочного устройства капли прозрачной распыленной жидкости приобретают сферическую форму. В этой области мож-

но судить о размерах капель по их диаметрам. Капли освещаются короткой (10 нс) вспышкой Nd:YAG лазера, сформированной в виде узкой полосы света («ножа») толщиной около 1 мм. Свет лазера, отраженный и преломленный каплей жидкости, образует на капле два почти диаметрально противоположных блика, расстояние между которыми равно диаметру капли с некоторым коэффициентом, зависящим от угла освещения [7,8]. CCD камера, синхронизированная с лазером, регистрирует свет от этих бликов.

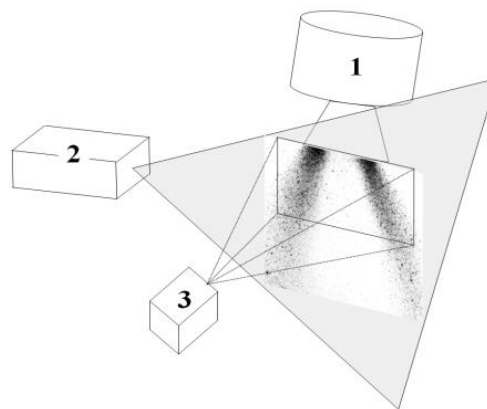


Рис. 1. Схема регистрации изображения потока: 1 – продувочное устройство с форсункой внутри, 2 – лазер, 3 – CCD камера

Отличие метода IPI от метода GPT состоит в том, что в методе GPT CCD камерой регистрируются сфокусированные изображения капель (рис. 2 и рис. 3, а). Световые блики (точечные источники света) на каплях также находятся в фокусе, и диаметры капель вычисляются умножением количества пикселей между бликами на масштабный коэффициент и коэффициент, зависящий от угла освещения.

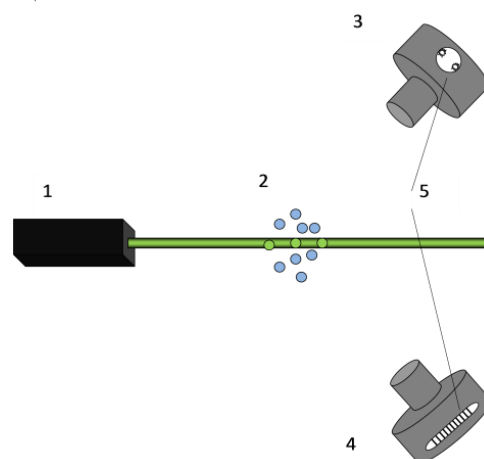


Рис. 2. Схема измерений двумя методами: 1 – лазер, 2 – спрей, 3 – CCD камера, настроенная на метод GPT, 4 – CCD камера, настроенная на метод IPI (цветной в электронной версии)

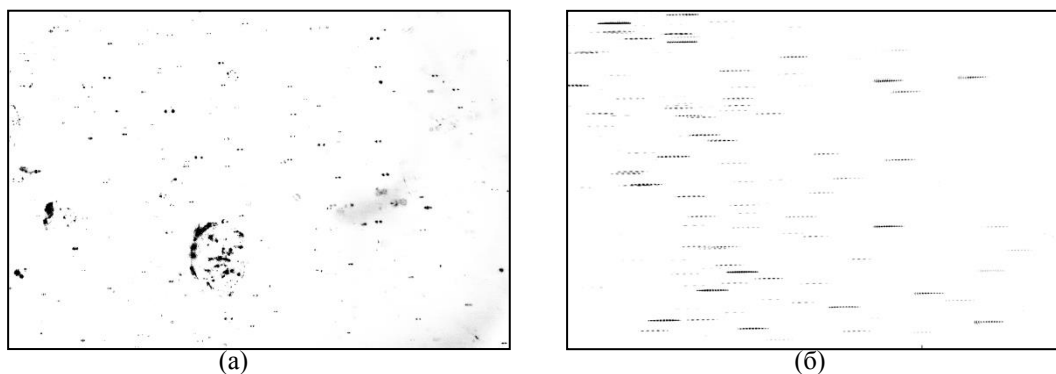


Рис. 3. Образы капель жидкости на матрице CCD камеры: а – для метода GPT; б – для метода IPI (для лучшего восприятия цвета изображений инвертированы)

В случае метода IPI регистрируется расфокусированное изображение этих же точечных источников (бликов), а точнее, картина интерференции света от них (рис. 2 и рис. 3, б), а диаметры капель вычисляются по частоте этой интерференционной картины с учетом тех же коэффициентов.

Для правильного понимания того, почему интерференционные образы видны в виде узких полосок, необходимо отметить, что в методе IPI используются цилиндрические линзы, сжимающие эти образы по одной из координат, для предотвращения их пространственного перекрытия.

5. Измерения методом GPT

На рис. 3, а приведен пример мгновенного сфокусированного изображения воздушно-капельного потока от форсунки, освещаемого слева направо вспышкой лазера. Хорошо видны парные блики на отдельных каплях. Расстояние между бликами пропорционально диаметру капель.

Также видны крупные несферические капли с несформировавшейся негладкой поверхностью и, как следствие этого, множеством бликов. Так, чуть ниже и левее середины кадра видна крупная несферическая капля размером около 2 мм. Такие капли не поддаются автоматической обработке ни GPT, ни IPI методом. В то же время здесь можно обратить внимание на то, как метод GPT не только помогает лучше понять общую картину распыла, но и дополняет данные, полученные методом IPI. Так, на снимках, полученных IPI методом, крупные несферические капли будут видны в виде ярких пятен без интерференционной картины и никакой информации об их размерах невозможно будет получить, в то время как на снимках, полученных GPT методом, они видны в виде сфокусированных образов, их можно сосчитать вручную и оценить размер. На рис. 3, б приведен пример расфокусированного изображения воздушно-капельного потока, полученного методом IPI. Высокая частота интерференционных полос на образах капель соответствует крупным каплям, низкая – мелким. Также видны яркие образы без интерфе-

ренционной картины, про которые можно сказать, что это, возможно, крупные несформировавшиеся капли. Получение информации о наличии таких крупных капель в распыле очень важно, поскольку крупные капли переносят значительную часть топлива.

Для автоматической обработки данных, полученных методом GPT, была написана программа определения координат центров бликов с последующим вычислением диаметров и скоростей капель. На стадии валидации капель применена процедура фильтрации на основе вейвлет-преобразования [9].

Дадим оценку разрешающей способности метода GPT для данной конфигурации оптической измерительной системы. Поток освещался слева направо, и поэтому диаметры капель измерялись в горизонтальном направлении.

Использовалась CCD камера Видеоскан 11002 с матрицей 4004x2671 пикс²; матрица по горизонтали имеет физический размер 36 мм и 4004 пикселей. Увеличение системы было таким, что на матрице камеры отображалась область размером 10 мм по горизонтали, т.е. одна из областей (-31,-32,-33) на рис. 4.

Таким образом, 1 пиксель матрицы, размер которого составляет 9 мкм, соответствовал 2.5 мкм физического пространства. Чтобы блики воспринимались отдельно, между ними должно быть расстояние не менее одного пикселя. Таким образом, разрешение для одной капли составляет $2.5 \times 3 = 7.5$ мкм. Другими словами, в идеальном случае при помощи метода GPT с данной конфигурацией оптической системы можно измерить (зафиксировать) каплю размером 7.5 мкм. В реальных измерениях из-за рассеяния света (рис. 5) размеры бликов составляют 2–3 пикселя, поэтому нужно считать, что надежно измеряемый минимальный размер капли составляет ~20 мкм. Максимальный размер капли ограничен размером самой матрицы и выбранного увеличения (в данном случае это 10 мм).

Примеры изображений и результатов обработки методом GPT представлены на рис. 5.

Процедура определения капель проводилась следующим образом. Подобно методике PIV фиксировались два сфокусированных изображения потока, полученных с малой (обычно 6 мкс) задержкой по времени [10]. Идентификация каждого отдельного блика проводилась автоматически с использованием программного обеспечения (ПО) с применением вейвлет-фильтрации.

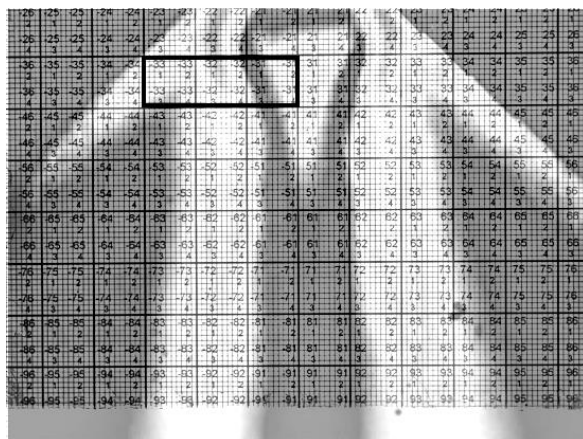


Рис. 4. Вид распыла форсунки при освещении лазером слева направо на фоне координатной мишени. Светлым тоном выделена область воздушно-капельного спрея, прямоугольником – область (-31,-32,-33), где проводились измерения размеров и скоростей капель

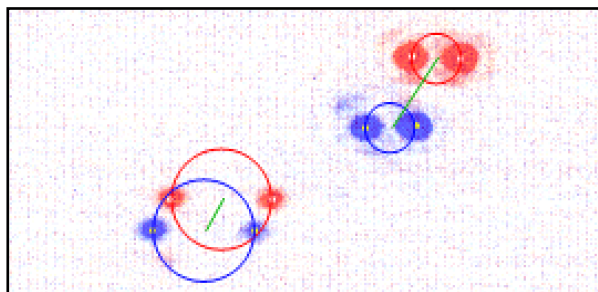


Рис. 5. Смещение и размер капель, восстановленных методом GPT (цветной в электронной версии)

В результате получалось некоторое множество одиночных бликов. Затем отыскивались блики, принадлежащие одной капле, при этом учитывалось смещение пар бликов на втором изображении (нижние круги из пар, соединенных прямыми линиями на рис. 5) относительно первого (верхние круги из пар, соединенных прямыми линиями на рис. 5). Если оба блика смещались синхронно, то предполагалось, что они принадлежат одной капле. Тогда данная пара бликов обозначалась как валидная и использовалась для вычисления диаметра капли (круги одинакового диаметра на рис. 5), в противном случае пары бликов считались не валидными, и процедура повторялась для других комбинаций бликов. На рис. 5 прямыми линиями соединены центры валидных капель. Видно, что

крупная капля движется медленнее, чем меньшая по размеру, поскольку крупная капля более инертна и медленнее разгоняется потоком воздуха. Стоит подчеркнуть, что в результате применения метода GPT с использованием предложенной выше процедуры валидации, помимо получения достоверной информации о размерах капель, восстанавливаются также положение в пространстве и скорость капель. Таким образом, появляется возможность исследовать зависимость скорости капель от их размера и восстанавливать пространственное распределение расхода (в данном случае, в плоскости лазерного ножа). Это, в свою очередь, позволяет провести верификацию метода GPT по удельному расходу (объему жидкости, проходящей через сечение факела форсунки в единицу времени).

Так, для пяти значений (табл. 1) полного (реального) расхода жидкости Q_p , измеренного мензурным стаканом, были измерены значения относительного расхода Q_o путем измерения размеров капель и их скоростей методом GPT последовательно для областей -31,-32,-33 вертикального сечения факела распыла.

Таблица 1. Соотношение реального расхода Q_p и относительного расхода Q_o , измеренного методом GPT

Q_o	Q_p (мл/мин)
5	282
5.8	365
7.2	450
8.6	530
9.7	615

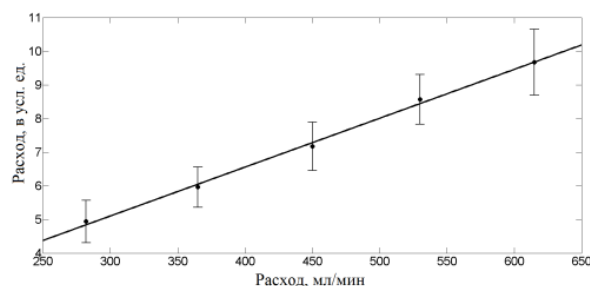


Рис. 6. Соотношение реального расхода (горизонтальная ось) и измеренного методом GPT (вертикальная ось)

Как видно из рис. 4, измерительные области (-31,-32,-33) перекрывают сечение воздушно-капельного потока таким образом, что в них полностью попадают все капли левой половины сечения факела распыла. На рис. 6 приведен график, где по вертикальной оси отложены значения суммарного расхода жидкости для областей (-31,-32,-33) факела распыла, восстановленные методом GPT по 100 кадрам. При этом нужно еще

раз обратить внимание на то, что таким образом измерялся относительный (условный) расход для сечения, освещаемого лазерным ножом (для областей -31,-32,-33). Поскольку движение капель в факеле распыла форсунки сложное, то для данного сечения возникают довольно значительные отклонения количества капель, а значит, и расхода, от среднего. Однако из графика видно, что средние значения расходов хорошо укладываются на некоторую прямую, что говорит о возможности восстановления реальных расходов на форсунке при использовании данных измерений. По горизонтальной оси отложены значения реального расхода (мл/мин), измеренного путем сбора жидкости в измерительную емкость (мензурный стакан с ценой деления 10 мл).

6. Измерения методом IPI

Для этих же режимов работы форсунки и для той же области факела (-31,-32,-33) были проведены измерения размеров капель методом IPI. Применялась стандартная методика IPI. Подробно можно остановиться на оценке разрешающей способности. Уровень оптических искажений при IPI измерениях минимален при совпадении размеров матрицы и области измерений. Кроме того, требования к разрешающей способности для метода IPI значительно ниже, чем для метода GPT. Поэтому измерения проводились одновременно для всех областей факела (-31,-32,-33) и увеличение в схеме IPI было равно единице. Тогда размер пикселя матрицы, который равен 9 мкм, совпадает с размером отражаемого матрицей физического пространства. При помощи этой матрицы можно различать интерференционную картину с периодом $P_{\min} = 3 \text{ pix}$. Для вычисления диаметра капли d используется следующая формула [3]:

$$d = \frac{2\lambda}{\Delta\theta n_1} \left(\cos \frac{\theta}{2} + 1 \right)^{-1}, \quad (5.1)$$

где $\Delta\theta$ – угловое расстояние между интерференционными полосами; n_1 – показатель преломления окружающей каплю среды ($n_{\text{воздуха}} \approx 1$), θ – угол наблюдения равен 70° , λ – длина волны света 0.514 мкм.

Угловое расстояние выражается через период интерференционной картины таким образом:

$$\Delta\theta = CP, \quad (5.2)$$

где C – калибровочный коэффициент; P – период интерференционной картины в пикселях.

Калибровочный коэффициент получается следующим образом:

$$C = Mh/g, \quad (5.3)$$

где h – размер пикселя (9 мкм), M – оптическое увеличение (1) и g – расстояние, на которое камера смещена при калибровке – 10 мм.

Тогда диаметр капли можно вычислить:

$$d = \frac{2\lambda}{CPn_1} \left(\cos \frac{\theta}{2} + 1 \right)^{-1} = \frac{2\lambda g}{MhPn_1} \left(\cos \frac{\theta}{2} + 1 \right)^{-1}. \quad (5.4)$$

Тогда максимальный размер капли можно оценить:

$$d_{\max} = \frac{2\lambda g}{MhP_{\min}n_1} \left(\cos \frac{\theta}{2} + 1 \right)^{-1} \approx 20 \times 10^{-5} (\text{м}). \quad (5.5)$$

Таким образом, верхний предел надежно измеряемых диаметров для метода IPI и для данной конфигурации оптической системы составляет ~ 200 мкм. Однако, видимо, из-за большого количества переотражений света в плотном газокapельном потоке IPI метод определял частицы диаметром больше 100 мкм с большой погрешностью, и эти данные были расценены как ошибочные. Нижняя граница измеряемых диаметров капель определяется возможностями геометрического приближения. Поскольку исследуемый объект должен быть минимум в 10 раз больше длины волны используемого источника света, то минимальный диаметр измеряемой капли составит ~ 5 мкм.

В случае IPI измеряемый диапазон сместился в сторону мелких капель. Измерения показали, что и в случае большой плотности капель есть участок, на котором результаты, полученные методами IPI и GPT, совпадают. А именно, на интервале размеров капель 30–100 мкм, который доступен обоим методам (рис.7).

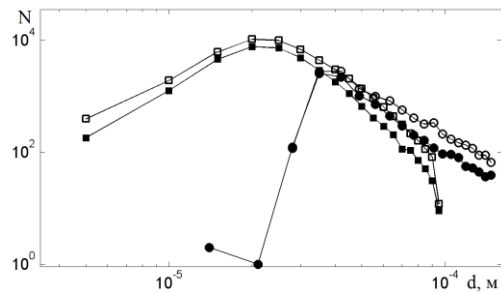


Рис. 7. Распределения капель по размерам в логарифмических координатах для различных расходов: квадраты – IPI, круги – GPT, открытые символы – 4 атм, закрытые – 1 атм, N – количество капель, d – диаметр капель

Таким образом, применение обоих методов значительно расширяет диапазон измеряемых размеров, что позволит существенно корректировать данные о количественных характеристиках спрея.

Одной из таких характеристик является зауровский диаметр (D_{32}):

$$D_{32} = \frac{V_p}{S_p}, \quad (5.4)$$

где V_p – суммарный объем измеренных капель; S_p – суммарная площадь поверхности измеренных капель.

Как уже говорилось выше, заутеровский диаметр – очень важная величина, которая характеризует процесс переноса и горения топлива в камере сгорания. Стоит обратить внимание на то, что в тривиальном случае, когда все капли одинаковые, заутеровский диаметр равен среднему диаметру. Если хоть одна капля отличается по размерам от других, то заутеровский диаметр становится больше среднего (см. табл. 2–3).

Если посчитать заутеровский диаметр (D_{32}) и средний диаметр ($D_{ср}$) по данным только IPI, то получим один результат (табл. 2), а по данным только GPT, то получим другой результат (см. табл. 3).

Таблица 2. Значения заутеровского D_{32} и среднего $D_{ср}$ диаметров капель, измеренные методом IPI, для различных значений реального расхода Q_p

Q_p , мл/мин	D_{32} , мкм	$D_{ср}$, мкм
282	36	23
365	40	25
450	42	27
530	42	26
615	43	26

Таблица 3. Значения заутеровского D_{32} и среднего $D_{ср}$ диаметров капель, измеренные методом GPT, для различных значений реального расхода Q_p

Q_p , мл/мин	D_{32} , мкм	$D_{ср}$, мкм
282	79	51
365	77	48
450	85	57
530	87	56
615	91	60

7. Заключение

Из табл. 2 и 3 видно, что значения заутеровского D_{32} и среднего $D_{ср}$ диаметров капель, измеренные разными методами, значительно отличаются. Если в практических применениях использовать только один из методов, то велика вероятность ошибки практически в два раза. Таким образом, применение двух методов значительно расширяет диапазон измеряемых размеров, дает более полное представление о структуре газокapельной смеси и при этом не связано со значительными экономическими затратами, поскольку в обоих методах ис-

пользуется практически одно и то же оборудование.

Список литературы

1. Adrian R.J., Westerweel J. Particle Image Velocimetry. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 558 p.
2. N. Damaschke, H. Nobach, C. Tropea. Optical limits of particle concentration for multi-dimensional particle sizing techniques in fluid mechanics // Experiments in Fluids. 2002. N. 32. P.143–152.
3. Semidetnov N., Tropea C. Conversion relationships for multidimensional particle sizing techniques // Measurement Science and Technology. 2004. N. 15. P. 2499–2509.
4. Van de Hulst H.C, Wang R.T. Glare points. Applied Optics. 1991. Vol. 30. P. 4755–4763.
5. Sukhanovskii A., Batalov V., Stepanov R. Comparison of Direct optical and IPI methods in real flow measurements // Proc. of 26th European Conference on Liquid Atomization & Spray Systems Bremen, Germany, 8–10 September 2014. P. 1–9.
6. Sukhanovskii A., Batalov V., Stepanov R. Using of direct imaging and IPI techniques for measurements in nozzle sprays // AIP Conference Proceedings. 2016. Vol. 1770, 030023. DOI: 10.1063/1.4963965.
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. N. 33. P. 125–134. DOI 10.1007/s00348-002-0453-4
8. Kawaguchi T., Akasaka Y., Maeda M. Size measurements of droplets and bubbles by advanced interferometric laser imaging technique // Measurement Science and Technology. 2002. Vol. 13. P. 308–316.
9. Степанов Р.А. Программа определения размеров и скоростей капель аэрозоля по их оптическим изображениям. Свидетельство о гос. регистрации прог. для ЭВМ № 2013611440. Роспатент, 2013.
10. Баталов В. Г., Степанов Р. А., Сухановский А. Н. Применение прямых оптических методов измерений для исследования характеристик двухфазного потока [Электронный ресурс] // Электронный журнал Труды МАИ. 2014. Вып. 76. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=50074> (Дата обращения: 20.11.2017)

References

1. Adrian R.J., Westerweel J. Particle image velocimetry. Cambridge: Cambridge University Press, 2011, 558 p.

2. N. Damaschke, H. Nobach, C. Tropea. Optical limits of particle concentration for multi-dimensional particle sizing techniques in fluid mechanics. *Experiments in Fluids*, 2002, no. 32, pp. 143–152
3. Semidetnov N., Tropea C. Conversion relationships for multidimensional particle sizing techniques. *Measurement Science and Technology*, 2004, no. 15, pp. 2499–2509
4. Van de Hulst H.C., Wang R.T. Glare points. *Applied Optics*, 1991, vol. 30, pp. 4755–4763
5. Sukhanovskii A., Batalov V., Stepanov R. Comparison of Direct optical and IPI methods in real flow measurements. *Proceedings 26th European Conference on Liquid Atomization & Spray Systems*, Bremen, Germany, 8–10 September 2014. pp. 1–9.
6. Sukhanovskii A., Batalov V. and Stepanov R. Using of direct imaging and IPI techniques for measurements in nozzle sprays. *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1770, 030023. DOI: 10.1063/1.4963965
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, no.33, pp. 125–134. DOI 10.1007/s00348-002-0453-4
8. Kawaguchi T., Akasaka Y., Maeda M. Size measurements of droplets and bubbles by advanced interferometric laser imaging technique, *Measurement Science and Technology*, 2002, vol. 13, pp. 308–316.
9. Stepanov R. A. *Programma opredeleniia razmerov i skorostei kapel' aerrozolia po ikh opticheskim izobrazheniiam* (Program of aerosol droplets size and velocity determination from its optical images). Certificate of state registration of the computer program N. 2013611440. Rospatent, 2013.
10. Batalov V., Stepanov R., Sukhanovsky A. Application of direct optical methods for investigation of two-phase flow characteristics, *Trudy MAI (Electronic journal)*, 2014, no.76, URL: <http://trudymai.ru/pub-lished.php?ID=50074>

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Баталов В. Г., Степанов Р. А., Сухановский А. Н. Оптические измерения размеров капель в факеле распыла топливной форсунки // Вестник Пермского университета. Физика. 2017. № 3 (37). С. 40–47. doi: 10.17072/1994-3598-2017-3-40-47

Please cite this article in English as:

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. doi: 10.17072/1994-3598-2017-3-40-47