

УДК 53.082.54, 53.088.4

## **Интерферометрический метод измерения диаметров капель\***

**А.В. Бильский<sup>1</sup>, Ю.А. Ложкин<sup>1</sup>, Д.М. Маркович<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

<sup>2</sup>*Новосибирский государственный университет*

E-mail: dmark@itp.nsc.ru

В статье рассматривается оптический бесконтактный метод измерения размеров капель в сечении потока, в основе которого лежит интерференция света на капле. Проведен анализ распределения рассеянного частицей света для различных конфигураций измерительной системы с использованием теории Ми и приближения геометрической оптики. Определены базовые погрешности измерения и динамический диапазон. Продемонстрирована возможность проведения измерений с установкой камеры под углом 90° к плоскости лазерного ножа, что упрощает калибровку установки и выравнивает характеристики по полю изображения. Предложена процедура калибровки измерительной системы и набор алгоритмов для обработки данных. Предложенные подходы применены для измерения характеристик газокapельной струи.

**Ключевые слова:** диаметр капли, интерферометр, лазер, газокapельный поток, IPI.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Газокapельные потоки часто встречаются в различных технических устройствах. Паровые турбины, впрыск топлива в авиационных и автомобильных двигателях, устройства струйного охлаждения, системы пожаротушения, ингаляторы, автоклавы, струйные принтеры, системы нанесения краски и других покрытий — это лишь некоторые примеры. Таким образом, задача разработки и совершенствования экспериментальных методов, позволяющих получать более полную и детальную информацию о газокapельных потоках, является актуальной. Интерферометрический метод измерения размеров капель Interferometric Particle Imaging (IPI, также известен под названием ILIDS и др.) можно отнести к классу полевых оптических методов исследования течений жидкости и газа. Данный метод позволяет измерять размеры сферических капель в выделенном плоском сечении потока. Обработка данных позволяет также определить положение капель и их скорость, что вместе с размерами капель составляет значительную часть информации

---

\* Работа выполнена при поддержке Федерального агентства по образованию в рамках реализации Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

о потоке. Основными преимуществами метода IPI являются: невозмущающий способ измерения, локальность больше, чем у распространенных интегральных методов, возможность измерений в реагирующих потоках, в т. ч. с горением. В отличие от одноточечных методов измерения (например, PDA — Phase Doppler Analyzer), IPI дает информацию о каплях сразу во всем выбранном сечении потока. Перечисленными выше преимуществами обладают также методы GPD (Global Phase Doppler) [1] и метод теневой фоновой фотографии. Однако оптическая схема и процесс проведения эксперимента с использованием метода IPI проще, чем у GPD, а метод теневой фотографии обладает меньшим динамическим диапазоном и применим только для низких концентраций, при которых поток является оптически прозрачным. Еще одним преимуществом IPI является возможность построения измерительной системы на базе довольно широко распространенных PIV-систем (измеритель полей скорости на основе метода Particle Image Velocimetry), задействовав наиболее дорогие компоненты таких систем — цифровую камеру и лазер. Также возможно комбинирование метода IPI, например, с методом PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence) для одновременного измерения температуры в том же сечении потока или с методом PIV для измерения полей скорости.

Измерение диаметра капли методом IPI осуществляется по расстоянию между полосами на интерференционной картине, формируемой отраженным и однократно преломленным каплей светом. Впервые такой принцип измерения был сформулирован в работе [2]. Простейший вариант измерительной системы был предложен в работе [3]: измерительная система включает в себя лазер, из луча которого формируется световой нож, и цифровую камеру с расфокусированным объективом. Камера регистрирует интерференционные картины сразу от всех капель, освещенных световым ножом. Однако такая схема имеет существенные ограничения по концентрации капель, образы которых могут перекрываться. Усовершенствованная оптика для камеры, включающая как сферические, так и цилиндрические линзы, была предложена в работе [4], позже в [5]. Такая оптика позволяет получить “сжатый” по одной координате образ капли с сохранением полезной информации — интерференционных полос, что значительно снижает вероятность перекрытия образов капель. В [6] теоретически исследовались возможности оптических схем с различными параметрами. Систематизация способов калибровки измерительной системы и некоторых путей снижения погрешности измерений и ограничений метода даны в работе [7]. Было предложено несколько алгоритмов автоматизированной обработки интерференционных картин [5, 8, 9, 10]. Кроме того, известно несколько разработок метода IPI: использование других порядков рассеяния при измерении диаметров пузырьков [11], измерение трехкомпонентных полей скорости [12], алгоритмы обработки для измерения распределений капель по размерам в режиме реального времени [13], измерение концентрации примеси в капле [8] и др.

Несмотря на определенные достижения, метод IPI на настоящий момент не получил достаточно широкого распространения, однако область его применения потенциально весьма широка. Типичные приложения — измерение распределений капель по размерам и их скоростей в аэрозолях, формируемых форсунками различных типов [5, 8, 14, 9], в том числе в моделях двигателей внутреннего сгорания [15], изучение процессов испарения [16, 17, 18], горения топлива [19, 10], взаимодействия аэрозоля со стенкой [20]. В работе [21] изучался тепло- и массообмен между аэрозолем и паром в рамках программы по изучению условий, возникающих в защитной оболочке водо-водяного энергетического ядерного реактора в результате аварий. В работе [22] измерялись размеры капель вблизи рта

человека при кашле и разговоре. Влияние внешнего акустического возмущения на распределение капель в воздушной струе исследовалось в работе [23].

Применение метода ИРІ в эксперименте в настоящее время осложнено тем, что отсутствует обобщение результатов всех исследований, нет анализа эффективности различных предложенных схем обработки данных, конфигураций оборудования и возможностей их комбинирования с точки зрения улучшения характеристик метода, снижения погрешности, удобства экспериментатора. Не исследована проблема создания наиболее универсального и эффективного алгоритма обработки данных, влияние таких алгоритмов на характеристики метода. Ряд предложенных в литературе усовершенствований являются лишь идеями и имеют ограниченное применение, поэтому требуют развития.

Целью настоящей работы был анализ известных подходов для измерения размеров капель интерферометрическим методом, определение погрешности и характеристик метода, выявление и разработка оптимальных конфигураций оборудования, алгоритмов обработки, а также испытание этих подходов в эксперименте.

#### ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Измерение диаметра сферической частицы методом ИРІ осуществляется путем анализа распределения интенсивности света, рассеянного такой частицей. Точное решение для рассеяния электромагнитных волн на диэлектрической сфере было получено Ми и, позже и независимо, Дебаем. Однако вычислительная сложность для этого решения растет с увеличением размера частицы, и на практике зачастую используют приближение геометрической оптики. Согласно [24], это приближение хорошо согласуется с точным решением при  $\pi d/\lambda > 20$ , где  $d$  — диаметр частицы,  $\lambda$  — длина волны света (для импульсного Nd: YAG лазера с  $\lambda = 532$  нм,  $d > 4$  мкм). В диапазоне углов (примерно от  $30$  до  $80^\circ$ ) преобладают отраженный и однократно преломленный каплей свет, образующие интерференционную картину. Угловое расстояние  $\Delta\theta$  между полосами на этой картине связано с диаметром капли  $d$  следующим выражением [1, 25,]:

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

где  $m = n_2/n_1 > 1$ ,  $n_2$  и  $n_1$  — показатели преломления капли и окружающей ее среды,  $\theta$  — угол наблюдения (см. рис. 1, 2).

В приближении геометрической оптики ограничение на угол наблюдения определяется полным внутренним отражением, когда преломленный свет отсутствует. Ограничение сверху на угол наблюдения —  $\theta < 2 \cos^{-1}(1/m)$ , для капель воды в воздухе это составляет  $82,4^\circ$ . Однако при больших углах преломленный свет присутствует вследствие поверхностных волн и наблюдается интерференционная картина, что позволяет проводить измерения. При этом соотношение между диаметром капли и угловым расстоянием между полосами:

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

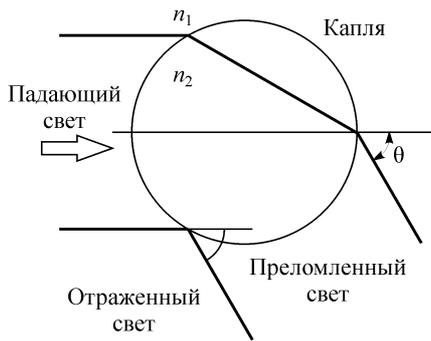


Рис. 1. Отражение и преломление света каплей.

Вышеприведенная формула получена в допущении, что фазовая скорость поверхностной волны не отличается от фазовой скорости для волны в окружающей каплю среде. Согласно приведенному в [26] выражению, для капли воды диаметром 10 мкм и длины волны света 532 нм это верно с точностью до 2%. Ошибка уменьшается с ростом размера

капли. Таким образом, возможно проводить измерения, установив камеру под прямым углом к световому ножу, что имеет ряд преимуществ для экспериментатора: упрощение калибровки, равномерность параметров измерительной системы по всей измерительной области, возможность измерения скорости капель по тому же изображению.

Согласно приведенным в [27] результатам моделирования рассеяния света сферической частицей, уже для капли диаметром 100 мкм интенсивность однократно преломленного света для угла рассеяния  $90^\circ$  становится сравнимой с интенсивностью преломленного света более высоких порядков и падает с дальнейшим увеличением размера капли. Следовательно, это приводит к изменению регистрируемого распределения рассеянного света и, начиная с некоторого размера капли, к невозможности использования приведенного выше выражения (2) для расчета диаметра. Таким образом, при установке камеры под прямым углом к световому ножу максимальный измеряемый размер капли ограничен.

Для определения этого ограничения были, с использованием теории Ми [24], вычислены распределения интенсивности рассеянного каплей воды света для углов наблюдения  $\theta = 60^\circ$  и  $90^\circ$  и диаметров капель 10–200 мкм. Для вычислений использовалась программа, основанная на представленном в работе [28] коде. Длина волны света — 532 нм, поляризация света перпендикулярная ( $S_1$ ) и параллельная ( $S_2$ ), показатель преломления капли — 1,33, среды — 1 (капля воды в воздухе), угол сбора света  $\alpha = 10^\circ$ . Для вычисленных распределений угловое расстояние между интерференционными полосами определялось путем поиска максимума в амплитудном Фурье-спектре с интерполяцией положения этого максимума [5]. Рассматривались следующие параметры этих спектров: ошибка вычисления размера капли, возникающая из-за различия в угловом расстоянии между интерференционными полосами  $\Delta\theta$ , вычисленном по теории Ми и в приближении геометрической оптики (формулы (1), (2)); высота максимумов в спектре по отношению к половине амплитуды максимума в нуле (определяет отношение амплитуды соответствующей гармоники сигнала к среднему значению сигнала, далее называется относительной амплитудой). Первым по высоте считается пик в спектре с наибольшей амплитудой из соответствующих

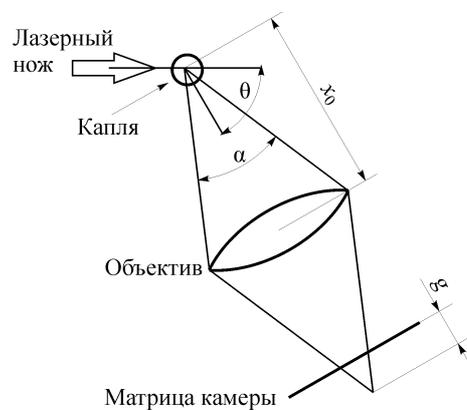


Рис. 2. Оптическая схема измерительной установки.

Рис. 3. Абсолютное значение ошибки измерения диаметра капли при использовании приближения геометрической оптики.

$\theta = 60^\circ, S_1$  (1),  $60^\circ, S_2$  (2),  $90^\circ, S_1$  (3),  $90^\circ, S_2$  (4).

ненулевой частоте пиков, сигнальным пиком — соответствующий интерференции пик между отраженным и однократно преломленным светом. Относительную амплитуду сигнального максимума назовем контрастом, отношение высот сигнального максимума и следующего за ним по высоте — отношением сигнал-шум. Эти параметры характеризуют базовую погрешность измерений, возможность измерения размера капли по частоте регистрируемого сигнала (интерференционной картины), позволяют определить параметры фильтров для найденных на изображении образов капель.

На рис. 3 показана ошибка в определении размера капли. Видно, что погрешность измерения меньше для угла наблюдения  $\theta = 60^\circ$  по сравнению с  $\theta = 90^\circ$ , а для перпендикулярной поляризации света  $S_1$  меньше по сравнению с параллельной  $S_2$ . В наихудшем варианте ( $\theta = 90^\circ, S_2$ ) погрешность достигает 5,6 мкм. Для  $\theta = 90^\circ$  и  $S_1$  средняя погрешность в диапазоне размеров 10–100 мкм составляет 0,6 мкм, для  $\theta = 60^\circ, S_1$  — 0,14 мкм. Контраст интерференционной картины показан на рис. 4, 5. Для угла наблюдения  $60^\circ$  и поляризации  $S_1$  наблюдается наилучший контраст. Кроме того, отношение сигнал-шум находится в диапазоне 4–16 для капель 10–200 мкм (для  $S_2$  этот диапазон составляет 1,2–5,7). При увеличении размера капли до 1000 мкм при  $\theta = 60^\circ$  тенденция сохраняется. Таким образом, при установке камеры под острым углом к лазерному ножу метод применим для

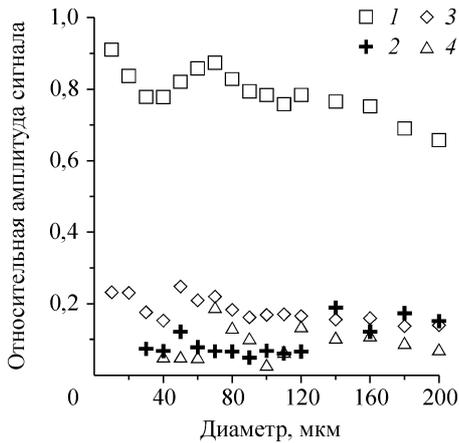
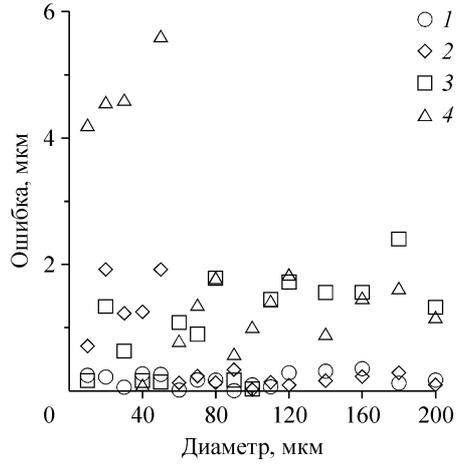


Рис. 4. Относительная амплитуда сигнала для  $\theta = 60^\circ$ .

1 —  $S_1$ , первый по высоте пик, 2 —  $S_1$ , второй по высоте пик, 3 —  $S_2$ , первый по высоте пик, 4 —  $S_2$ , второй по высоте пик.

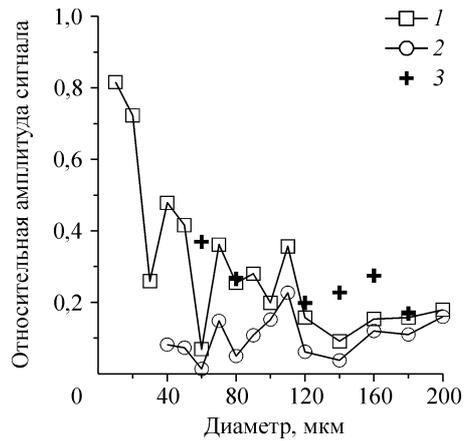


Рис. 5. Относительная амплитуда сигнала для  $\theta = 90^\circ, S_1$ .

1 — сигнальный пик, 2 — следующий за сигнальным пик, 3 — первый по высоте пик (если отличен от сигнального).

измерений капель диаметром 10–1000 мкм, при этом рекомендуется использовать свет с перпендикулярной поляризацией. Ввиду высокого контраста и отношения сигнал–шум падение контраста интерференционной картины, являющееся следствием того, что распределение света в лазерном ноже неоднородно, не приведет к невозможности измерения при выполнении выявленных в [29] условий: капля должна быть меньше толщины светового ножа. Контраст интерференционной картины и отношение сигнал–шум могут использоваться для определения образов капель, находящихся на периферии лазерного ножа.

Для угла наблюдения  $\theta = 90^\circ$  и перпендикулярной поляризации света картина выглядит существенно иначе (см. рис. 5). Первый по высоте пик не всегда является сигнальным пиком, для капель больше 120 мкм первый по высоте максимум всегда отличен от сигнального. Контраст быстро снижается до уровня 0,2, отношение сигнал–шум меньше, чем для угла наблюдения  $60^\circ$ , и составляет 1,3–5,8 для капель в диапазоне 10–100 мкм. Для параллельной поляризации света контраст выше (0,4–0,8), а первый по высоте пик почти всегда совпадает с сигнальным. Отношение сигнал–шум сравнимо со случаем  $S_1$  (см. рис. 6), но ошибка измерения существенно выше (см. рис. 3), поэтому такой вариант можно рекомендовать только для измерения капель диаметром от 50 мкм. Итак, при установке камеры под прямым углом к лазерному ножу рекомендуемой является перпендикулярная поляризация, аналогично острому углу. Контраст и отношение сигнал–шум ниже, чем для острого угла, что может усложнять фильтрацию образов капель, находящихся на периферии светового ножа и т. п. Для более корректной обработки образов таких капель требуется ввести дополнительный критерий отсева максимумов в спектре. Заметим, что, за редким исключением, значения диаметра капли оказываются заниженными на 40 % и более при вычислении размера по первому (отличному от сигнального) и следующему за сигнальным максимумам (см. рис. 7). Так как интенсивность рассеянного каплей света меняется по близкому к квадратичному закону (см. рис. 8), то уменьшение размера капли в два раза приведет к уменьшению яркости примерно в четыре раза. Это позволяет выбирать сигнальный максимум в спектре с учетом не только его высоты, но и средней яркости образа.

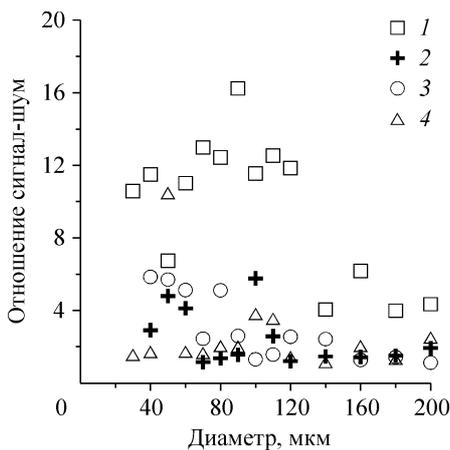


Рис. 6. Отношение сигнал–шум.  
 $\theta = 60^\circ, S_1$  (1),  $60^\circ, S_2$  (2),  $90^\circ, S_1$  (3),  $90^\circ, S_2$  (4).

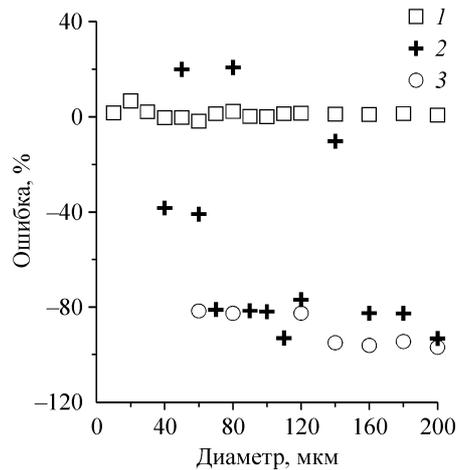
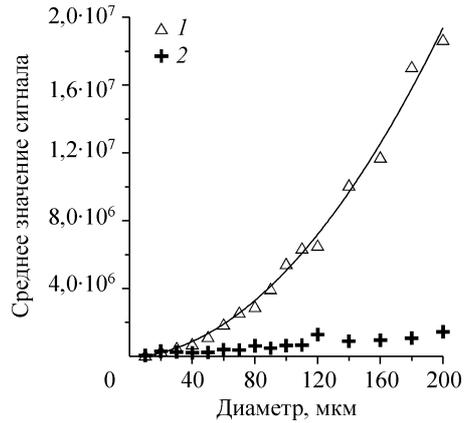


Рис. 7. Ошибка в определении размера капли для  $\theta = 90^\circ, S_1$ .  
 1 — сигнальный пик, 2 — следующий за сигнальным пик, 3 — первый по высоте пик (если отличен от сигнального).

Рис. 8. Среднее значение сигнала для  $\theta = 90^\circ$ .  
 $1 - S_1, 2 - S_2$ .

При увеличении размера капли с 10 до 200 мкм среднее значение сигнала увеличивается в 400 раз (в случае  $\theta = 60^\circ, S_1$ ). Для широко распространенных камер с разрядностью АЦП 12 бит, при условии, что сигнал от капли 200 мкм входит в динамический диапазон, наблюдаемая средняя яркость сигнала от капли диаметром 10 мкм составит 6 градаций яркости, что, как правило, сопоставимо с фоновым сигналом и шумами камеры.

Таким образом, хотя динамический диапазон измеряемых диаметров 1:20 является допустимым, измерение мелких капель осложнено. Их количество будет сильно недооценено, и необходимо искусственно уменьшать динамический диапазон, либо использовать камеры с большей разрядностью АЦП и меньшим уровнем шума. При  $\theta = 90^\circ, S_1$ , из-за меньшего контраста сигнала от крупных капель и более медленного роста среднего значения сигнала с увеличением диаметра капли, динамический диапазон измерений больше, чем для  $\theta = 60^\circ, S_1$ , и формально составляет 1:40.



#### КАЛИБРОВКА

Как следует из формул (1) и (2), для проведения количественных измерений требуется знать отношение углового расстояния между интерференционными полосами (в радианах) к расстоянию между ними на матрице камеры (в пикселях)  $C_{\text{rad/pix}}$ . Для расчета такого отношения требуется знать параметры оптической схемы, включая точные положения камеры и объектива относительно светового ножа, диаметр принимающего свет отверстия и некоторых других величин, измерение которых трудоемко и не всегда возможно. Таким образом, необходимо применять косвенные методы определения этого коэффициента. В [7] описан ряд способов калибровки, из которых отметим следующие два: полуэкспериментальная и двухшаговая.

Для полуэкспериментальной калибровки требуется знать размер образа капли на изображении  $\Phi_{\text{pix}}$  и угол сбора света  $\alpha$ . Тогда  $C_{\text{rad/pix}} = \alpha / \Phi_{\text{pix}}$ . Так как ряд параметров фотообъективов не документируется, то для измерения угла предлагается устанавливать на объектив прямоугольную диафрагму, которая обрежет образ капли на изображении, как показано на рис. 9. Тогда  $\alpha = 2\text{tg}^{-1}(a/2x_0)$ , где  $a$  — ширина диафрагмы, а  $x_0$  — расстояние от диафрагмы до измерительной области (см. рис. 2). При этом корректное измерение угла сбора света возможно лишь для стендов с открытой рабочей частью, иначе требуется знать параметры окон (толщина и показатель преломления материала окна).

Для двухшаговой калибровки требуется измерение увеличения оптической системы  $M$  и длины расфокусировки  $g$  (расстояние, на которое смещена матрица от положения, в котором наблюдается сфокусированное изображение капель (см. рис. 2). Тогда  $C_{\text{rad/pix}} = Mh_{\text{pix}}/g$ , где  $h_{\text{pix}}$  — размер пикселя. Калибровка

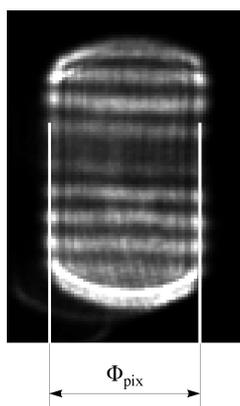


Рис. 9. Обрезанный прямоугольной диафрагмой образ капли.

возможна как со смещением камеры при неподвижном объективе, так и со смещением камеры одновременно с объективом. Для измерения увеличения достаточно воспользоваться калибровочной мишенью с известными параметрами нанесенного на ней рисунка (например, параллельными полосами).

При использовании блока цилиндрических линз, который позволяет существенно повысить максимальную измеряемую концентрацию капель [5], указанные процедуры не могут быть применены напрямую. Оптическая система регистрации имеет в такой конфигурации два фокуса — в одном наблюдаются интерференционные картины от капель (образы капель — тонкие полоски, параллельные направлению светового ножа), а в другом интерференции нет (образы капель перпендикулярны направлению светового ножа). Второе состояние будем считать сфокусированным, а первое — расфокусированным. Предлагаемая авторами процедура двухшаговой калибровки позволяет откалибровать оптическую схему, включающую блок цилиндрических линз для сжатия образов, и состоит из следующих шагов.

Шаг 1:

- получить сфокусированное изображение капель;
- установить мишень с параллельными полосами так, чтобы полосы были перпендикулярны направлению светового ножа. Передвигая мишень вдоль оптической оси, получить на камере сфокусированное изображение мишени;
- по изображению мишени в таком положении получить увеличение  $M$  как отношение расстояния между полосами мишени на матрице и фактическим расстоянием между полосами на мишени.

Шаг 2:

- сместить только камеру на известное расстояние  $g$  для получения расфокусированного изображения капель.

При невозможности запустить установку в рабочем режиме во время настройки (т. к. в момент калибровки в рабочей части нет капель) для калибровки измерительной системы можно воспользоваться только мишенью. Для этого на шагах 1 и 2 следует установить мишень в плоскость лазерного ножа так, чтобы полосы были перпендикулярны и параллельны направлению светового ножа, соответственно, после чего настраивать положение камеры для получения резкого изображения мишени.

Погрешность полуквалификационной калибровки определяется, в первую очередь, погрешностью измерения угла  $\alpha$ , так как размер образа капли  $\Phi_{pix}$  может быть определен осреднением по нескольким образам. Погрешность двухшаговой калибровки определяется точностью перемещения камеры (характерное значение смещения 10 мм, т. е. точность перемещения 0,1 мм соответствует ошибке в 1 %) и точностью измерения оптического увеличения. Характерная погрешность измерения  $M$  вследствие неточной установки мишени в плоскость светового ножа не превышает 0,5 %. Суммарно погрешность двухшаговой калибровки составляет не более 1,5 %.

Для тестирования процедур полуконтактной и двухшаговой калибровки измерительная система была собрана на экспериментальном стенде (описание стенда см. ниже). В случае двухшаговой калибровки камера смещалась вместе с объективом при помощи модуля линейных перемещений с микровинтом. Различие в калибровочном коэффициенте  $C_{\text{rad/pix}}$ , полученном этими двумя способами, составило 0,2 %, что позволяет говорить о возможности применения обоих методов.

#### ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Пример мгновенного изображения, полученного методом ИРІ с использованием “сжимающей” оптики, приведен на рис. 10 (справа). Характерный размер образа (интерференционной картины) в данном эксперименте составил  $200 \times 3$  пикселя. Предлагаемая процедура для автоматической обработки полученных в ходе эксперимента изображений включает в себя следующие шаги: идентификация образов капель и определение их положения, определение пространственной частоты интерференционных полос, отсев невалидных образов капель, применение калибровки для расчета размера капли.

Было предложено и испытано два метода идентификации “сжатых” образов капель: поиск светлых областей на сглаженном и бинаризованном по заданному порогу изображении и поиск максимумов свертки изображения с маской. Метод бинаризации работает на предварительно сглаженном изображении, где подавлены высокие (соответствующие интерференционным полосам) частоты. Метод хорошо распознает образы капель, автоматически определяет их размер и положение, но имеет ограничение по допустимой локальной концентрации образов, так как частично перекрывающиеся образы не разделяются. Второй подход — расчет корреляционной функции между изображением и колоколообразной маской, где максимумы на корреляционной плоскости соответствуют положению образов частиц. Данный алгоритм эффективно различает частично перекрывающиеся образы, позволяя распознавать капли в областях с высокой локальной концентрацией (до 1000 штук на изображении разрешением в миллион пикселей).

Частота интерференционных полос определяется по максимуму в амплитудном Фурье–спектре профиля, построенного вдоль сжатого образа капли. Для расчета положения максимума с точностью выше частоты дискретизации спектра используется предложенное в [5] уточнение положения максимума путем интерполяции его гауссом.

В результате анализа рассеяния света сферической частицей (см. выше), был определен набор процедур (фильтров) для отсева невалидных образов капель. К невалидным относятся образы капель, находящиеся на периферии светового ножа, образы, не попадающие в динамический диапазон измеряемых размеров или

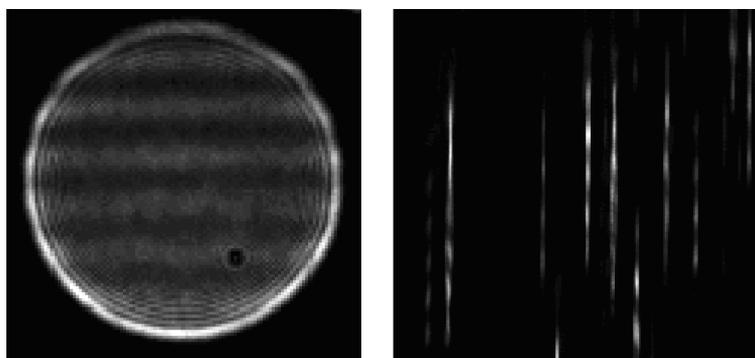


Рис. 10. Фрагменты изображений, полученных с блоком цилиндрических линз (справа) и без него (слева).

значительно перекрывающиеся образы. Критерии для отсева — контраст, отношение сигнал–шум, средняя яркость образа, соответствие вычисленного размера (частоты интерференционных полос) динамическому диапазону, заданному согласно ограничениям алгоритма определения частоты или априорным знаниям об объекте исследования (например, ограничение сверху на размер капель). Кроме того, как было показано выше, при вычислении частоты необходимо выбирать максимум в спектре согласно оценке размера капли по яркости ее образа. Один из способов выполнения такой коррекции — обработка данных в две итерации, когда на первой итерации по валидным образам определяется зависимость яркости от размера, после чего повторно вычисляется размер с учетом полученной на первом шаге зависимости.

Вычисление размера состоит в применении калибровки для преобразования частоты интерференционных полос (положения максимума в спектре) в угловое расстояние согласно полученному на этапе калибровки коэффициенту  $C_{\text{rad/pix}}$  и преобразованию этого расстояния в размер согласно формулам (1) и (2).

### ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИАМЕТРОВ КАПЕЛЬ В СТРУЕ АЭРОЗОЛЯ

Для проведения экспериментальных испытаний изложенных выше подходов к измерению размеров капель была собрана измерительная система на базе комплекса «ПОЛИС». Камера Видеоскан-4021 (разрешение 2048×2048 пикселей, размер светочувствительного элемента 15,15×15,15 мм), блок цилиндрических линз для сжатия образов и объектив Sigma Macro 105/2,8, установленные на координатное устройство, позволяющих линейно перемещать камеру в процессе калибровки вдоль оптической оси с точностью 0,1 мм. Для оптического сжатия интерференционных картин использовался разработанный блок цилиндрических линз, имеющий характеристики, равномерные по полю изображения. Схема принимающей свет оптики показана на рис. 11. Также система включала импульсный Nd: YAG лазер «ПОЛИС» (длина волны 532нм) с энергией в импульсе 50 мДж. Световой нож толщиной 0,5 мм с углом раскрытия 8,5° формировался из луча лазера при помощи системы цилиндрических и сферических линз. Поляризация света — перпендикулярная. Камера была установлена нормально к плоскости лазерного ножа.

В качестве объекта для тестирования метода была выбрана газочапельная струя, формируемая пневматической форсункой с подводом воздуха по периферии потока воды. Угол раскрытия струи — 25°. Расход воздуха в эксперименте был

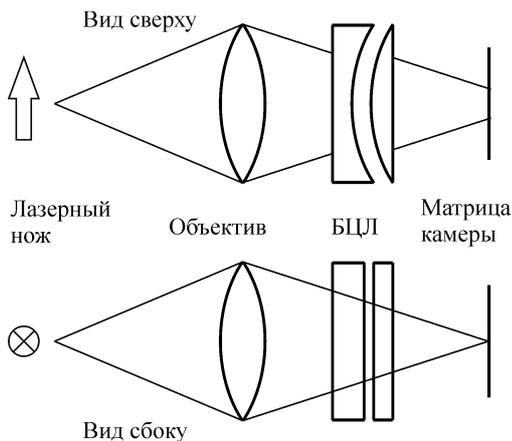


Рис. 11. Схема принимающей свет оптики с блоком цилиндрических линз (на рисунке — БЦЛ).

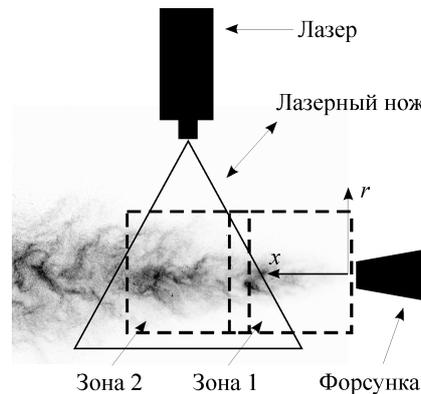


Рис. 12. Схема измерений.

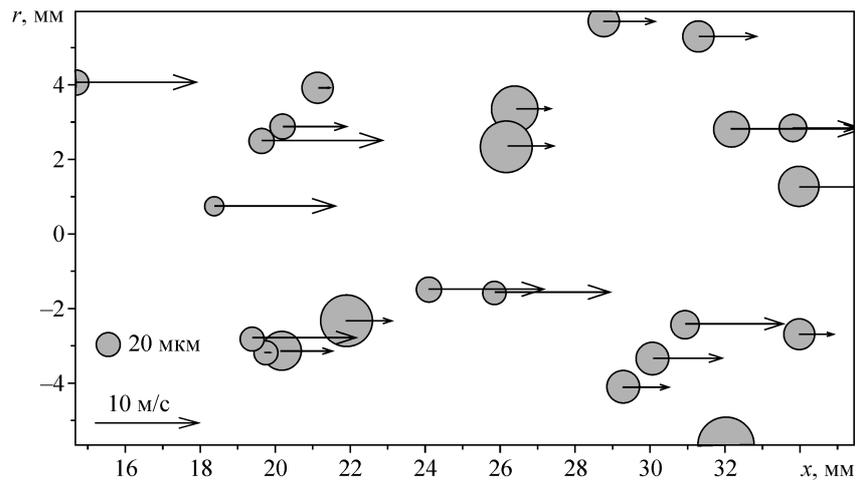


Рис. 13. Мгновенное распределение капель в измерительной плоскости (зона 2) и их скорости.

0,17 г/с. Схема измерений показана на рис. 12. Центральное продольное сечение струи освещалось лазерным ножом. Размер измерительной области составлял  $20 \times 20$  мм, измерения проводились в двух областях потока — на расстоянии 0–20 мм от среза сопла (зона 1) и на расстоянии 15–35 мм (зона 2).

На рис. 13 показан пример мгновенного распределения капель в измерительной плоскости зоны 2, полученный методом ИРІ. Локальная счетная концентрация капель на изображении достигала 100 капель на миллион пикселей, что с учетом толщины лазерного ножа составляет  $10^3$  капель/см<sup>3</sup>. При указанных параметрах измерительной системы минимально измеряемый диаметр капель составил 14 мкм. Векторами на рисунке обозначена мгновенная скорость капель, рассчитанная корреляционным методом [30] по смещению интерференционных картин за время между двумя последовательными импульсами лазера. На рис. 14 показаны распределения капель по размерам, каждое из которых получено по 50 мгновенным измерениям. Видно, что эти распределения в зоне 1 и зоне 2 различаются слабо, что свидетельствует о завершении процессов слияния и распада капель на таких расстояниях для данного потока. Распределение капель поперек оси сопла при движении вниз по потоку становится более широким (рис. 15), что демонстрирует раскрытие струи вниз по потоку.

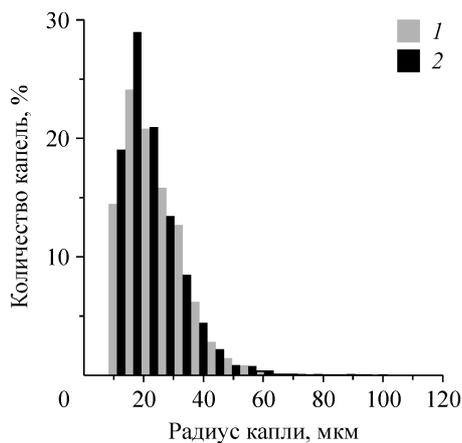


Рис. 14. Распределение капель по размерам.  
1 — зона 1, 2 — зона 2.

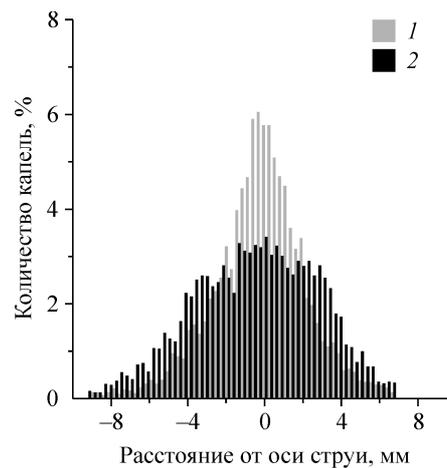


Рис. 15. Распределение капель поперек оси струи.  
1 — зона 1, 2 — зона 2.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ распределений рассеянного частицей света для различных конфигураций измерительной системы, работающей на основе метода IPI, выполнено сравнение с используемым при обработке IPI данных подходом геометрической оптики. Продемонстрировано, что с точки зрения погрешности измерения предпочтительной является установка камеры под острым углом к световому ножу и перпендикулярная поляризация света лазера. Погрешность в таком случае составляет 0,14 мкм для капель диаметром 10–100 мкм, а динамический диапазон измеряемых диаметров капель не превышает 1:20 при использовании камер с разрядностью 12 бит. Хотя установка камеры нормально к световому ножу имеет ряд преимуществ, погрешность измерения в этом случае выше (0,6 мкм), а для корректного измерения капель диаметром от 60 мкм требуется использовать более сложную обработку данных. На основе результатов анализа разработан алгоритм обработки данных. Для поиска образов капель, полученных с применением “сжимающей” оптики, был использован корреляционный подход, что позволило определять до 1000 образов капель на изображении разрешением 1 мегапиксель. Набор процедур отсева позволяет определить образы капель, находящихся на периферии светового ножа, а также значительно перекрывающиеся образы и правильно определить расстояние между интерференционными полосами. Проведен анализ погрешностей калибровки, предложен простой способ калибровки измерительной системы, включающей блок цилиндрических линз в качестве “сжимающей” оптики. С использованием предложенной процедуры погрешность калибровки составляет не более 1,5 %. На основе изложенных выше подходов и алгоритмов реализована измерительная система, которая была применена для измерения параметров газочапельной струи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Semidetrov N., Tropea C. Conversion relationships for multidimensional particle sizing techniques // Measurement Science and Technology. 2004. Vol. 15. P. 112–118.
2. Glantschnig W.J., Chen S. Light scattering from water droplets in the geometrical optics approximation // Applied Optics. 1981. Vol. 20. P. 2499–2509.
3. Konig G., Anders K., Frohn A. A new light-scattering technique to measure the diameter of periodically generated moving droplets // J. of Aerosol Science. 1986. Vol. 17, No. 2. P. 157–167.
4. Harada Y., Murakami T. Method for the time-resolved measurement of the size and position of a moving particle using an image sensor // Applied Optics. 1991. Vol. 30, No. 33. P. 4921–4929.
5. 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.
6. 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.
7. Dehaeck S., Beeck J.P.A.J. van Designing a maximum precision interferometric particle imaging set-up // Experiments in Fluids. 2007. Vol. 42. P. 767–781.
8. Glover A.R., Skippon S.M., Boyle R.D. Interferometric laser imaging for droplet sizing: a method for droplet-size measurement in sparse spray systems // Applied Optics. 1995. Vol. 34, No. 36. P. 8409–8421.
9. Pan G., Shakal J., Lai W., Calabria R., Massoli P. Simultaneous global size and velocity measurements of droplets and sprays // 20th Annual Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems (Europe), Orleans, France, September 5–7, 2005.
10. Fujisawa N., Hosokawa A., Tomimatsu S. Simultaneous measurement of droplet size and velocity field by an interferometric imaging technique in spray combustion // Measurement Science and Technology. 2003. Vol. 14. P. 1341–1349.
11. Dehaeck S., Beeck J.P.A.J. van Multifrequency interferometric particle imaging for gas bubble sizing // Experiments in Fluids. 2008. Vol. 45. P. 823–831.
12. Zama Y., Kawahashi M., Hirahara H. Simultaneous measurement method of size and 3D velocity components of droplets in a spray field illuminated with a thin laser sheet // Measurement Science and Technology. 2005. Vol. 16. P. 1977–1986.

13. **Querel A., Lemaitre P., Brunel M., Porcheron E., Grehan G.** Real-time global interferometric laser imaging for the droplet sizing (ILIDS) algorithm for airborne research // Measurement Science and Technology. 2009. Vol. 21. P. 015306 (9 pp).
14. **Fiore L., Romano G.P.** Simultaneous measurements of particle size and velocity using imaging methods // 5th Intern. Symp. on Particle Image Velocimetry, Busan, Korea, September 22–24, 2003.
15. **Mounaim-Rousselle C., Pajot O.** Droplet sizing by Mie scattering interferometry in a spark ignition engine // Particle and Particle Systems Characterization. 1999. Vol. 16. P. 160–168.
16. **Rossov B., Kruger S., Grunefeld G.** Experimental investigation of the evaporation of a monodisperse droplet stream for variable air velocity // Atomization and Sprays. 2005. Vol. 17, No. 2. P. 157–167.
17. **Sugimoto D., Zarogoulodis K., Kawaguchi T., Matsuura K., Hardalapus Y., Taylor A.M.K.P., Hishida K.** Extension of the compressed interferometric particle sizing technique for three-component velocity measurement // 13th Intern. Symp. on applications of laser techniques to fluid mechanics, Lisbon, Portugal, June 26–29, 2006.
18. **Calabria R., Casaburi A., Massoli P.** Laser diagnostics of optically trapped particles // 13th Intern. Symp. on applications of laser techniques to fluid mechanics, Lisbon, Portugal, June 26–29, 2006.
19. **Calabria R., Casaburi A., Massoli P.** Investigation of burning sprays applying GSI out-of-focus technique // 9th Inter. Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems, Sorrento, Italy, July 14–17, 2003.
20. **Damaschke N., Kalantari D., Roisman I.V., Tropea C.** Characterization of spray transport and spray/wall interactions using the IPI technique // 20th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (Europe), Orleans, France, September 5–7, 2005.
21. **Porcheron E., Lemaitre P., Nuboer A., Vendel J.** Heat, mass and aerosol transfers in spray conditions for containment application // J. of Power and Energy Systems. 2008. Vol. 2, No. 2. P. 633–647.
22. **Chao C.Y.H., Wan M.P., Morawska L., Johnson G.R., Ristovski Z.D., Hargreaves M., Mengersen K., Corbett S., Li Y., Xie X., Katoshevski D.** Characterization of expiration air jets and droplet size distributions immediately at the mouth opening // J. of Aerosol Science. 2009. Vol. 40, No. 2. P. 122–133.
23. **Freret L., Lacour C., Chaisemartin S., Ducruix S., Durox D., Laurent F., Massot M.** Pulsated free jets with polydisperse spray injection: experiments and numerical simulations // Proc. of Combustion Inst. 2009. Vol. 32. P. 2215–2222.
24. **Van de Hulst H.C.** Light Scattering by Small Particles. New York: Wiley. 1957.
25. **Roth N., Anders K., Frohn A.** Refractive-index measurement for the correction of particle sizing methods // Applied Optics. 1991. Vol. 30, No. 33. P. 4960–4965.
26. **Hovenac E.A., Lock J.A.** Assessing the contributions of surface waves and complex rays to the far-field Mie scattering by use of the Debye series // J. of the Optical Society of America A. 1992. Vol. 9, No. 5. P. 781–795.
27. **Albrecht H-E., Boris M., Damaschke N., Tropea C.** Laser Doppler and phase Doppler measurement techniques. Berlin: Springer. 2003.
28. **Bohren C.F., Huffman D.R.** Absorption and scattering of light by small particles. New York: Wiley. 1983.
29. **Hesselbacher K.H., Anders K., Frohn A.** Experimental investigation of Gaussian beam effects on the accuracy of a droplet sizing method // Applied Optics. 1991. Vol. 30, No. 33. P. 4930–4935.
30. **Токарев М.П., Маркович Д.М., Бильский А.В.** Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12, № 3. С. 109–131.

*Статья поступила в редакцию 6 июля 2010 г.*