

УДК 53.082.54:53.088.4

А.В. Бильский^{1,2}, Ю.А. Ложкин¹, Д.М. Маркович^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН, Россия,
630090, Новосибирск, просп. Лаврентьева, д. 1, e-mail: lozhkin@itp.nsc.ru

² Новосибирский государственный университет, Россия,
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, д. 2

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА IPI ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОКАПЕЛЬНЫХ ПОТОКОВ

Рассматривается оптический бесконтактный метод измерения диаметров капель в сечении потока, в основе которого лежит интерференция света на капле (IPI). Проведен анализ пространственных распределений рассеянного частицей света для различных конфигураций измерительной системы с использованием теории Ми и приближения геометрической оптики. Определены базовые погрешности и динамический диапазон измерений, границы применимости метода, в том числе для конфигурации с установкой камеры нормально к плоскости светового ножа. С использованием полученных результатов предложен набор алгоритмов для обработки получаемых в эксперименте данных. Проведена валидация метода IPI путем сравнения с методом прямого наблюдения. Предложенные подходы применены для измерения характеристик формируемой форсункой газокапельной струи.

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ КАПЕЛЬ, ГАЗОКАПЕЛЬНАЯ СТРУЯ, ТЕОРИЯ МИ

ВВЕДЕНИЕ

Газокапельные 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 газокапельных 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 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]. В [31] IPI применялся для измерения дефектов оптического стекла (пузырьков).

Применение метода IPI 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 И ЕГО ОГРАНИЧЕНИЯ

Измерение диаметра сферической частицы методом IPI 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, λ — длина волны света (для импульсного Nd: YAG лазера с $\lambda = 532$ нм, $d > 4$ мкм). В диапазоне углов (примерно от 30° до 80°) 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, θ — 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:

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

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° 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° 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 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° 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 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° , 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,

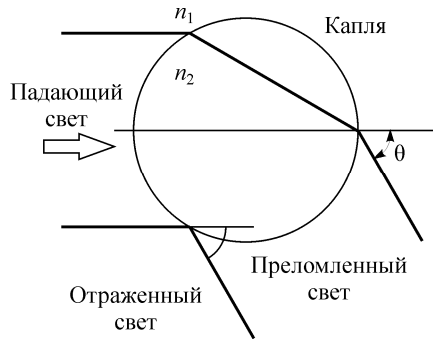


Рис. 1. Отражение и преломление света каплей

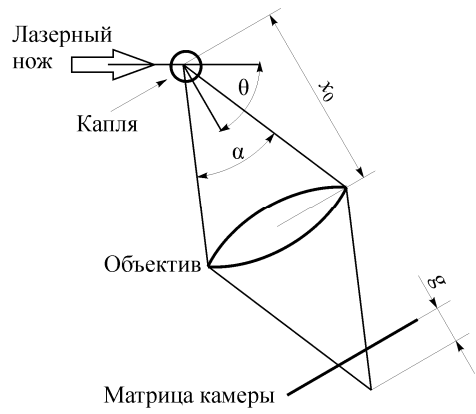


Рис. 2. Оптическая схема измерительной установки

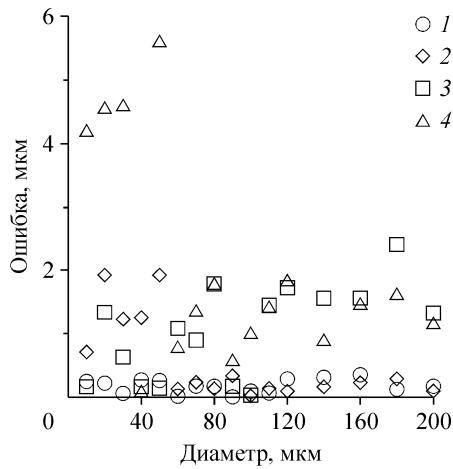


Рис. 3. Абсолютное значение ошибки измерения диаметра капли при использовании приближения геометрической оптики $\theta = 60^\circ, S_1$ (1), $60^\circ, S_2$ (2), $90^\circ, S_1$ (3), $90^\circ, S_2$ (4)

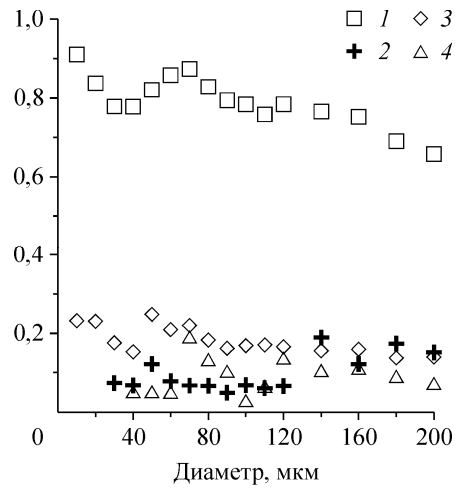


Рис. 4. Относительная амплитуда сигнала для $\theta = 60^\circ$, 1 — S_1 , первый по высоте пик, 2 — S_1 , второй по высоте пик, 3 — S_2 , первый по высоте пик, 4 — S_2 , второй по высоте пик

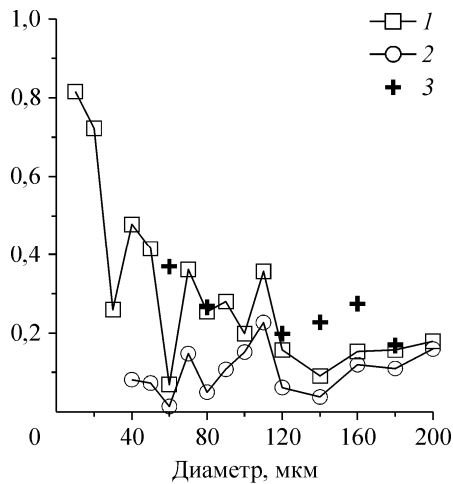


Рис. 5. Относительная амплитуда сигнала для $\theta = 90^\circ, S_1$, 1 — сигнальный пик, 2 — следующий за сигнальным пик, 3 — первый по высоте пик (если отличен от сигнального)

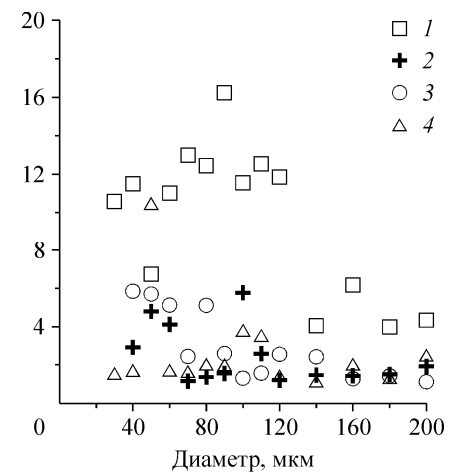


Рис. 6. Отношение сигнал-шум. $\theta = 60^\circ: S_1$ (1), $60^\circ, S_2$ (2), $90^\circ, S_1$ (3), $90^\circ, S_2$ (4)

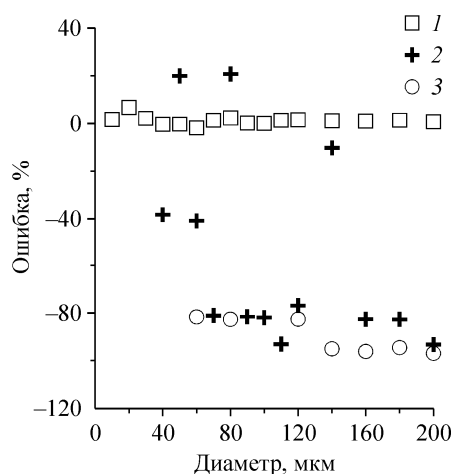


Рис. 7. Ошибка в определении размера капли для $\theta = 90^\circ$, S_1 , 1 — сигнальный пик, 2 — следующий за сигнальным пик, 3 — первый по высоте пик (если отличен от сигнального)

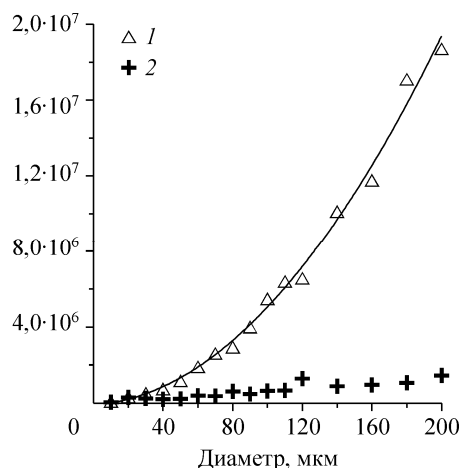


Рис. 8. Среднее значение сигнала для $\theta = 90^\circ$, 1 — S_1 , 2 — S_2

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. 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 Φ_{pix} и угол сбора света α . 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 $\alpha = 2 \text{tg}^{-1}(a/x_0)$, 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 стенов 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_{pix} – размер пикселя. Калибровка 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 полуэкспериментальной калибровки определяется, в первую очередь, погрешностью измерения угла α , так как размер образа капли Φ_{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 полуэкспериментальной 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.

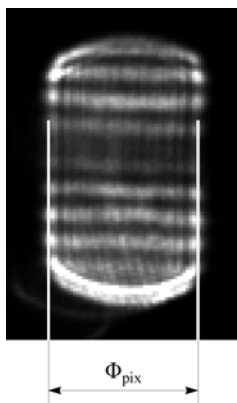


Рис. 9. Обрезанный прямоугольной диафрагмой образ капли

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Пример мгновенного изображения, полученного методом ИР с использованием “сжимающей” оптики, приведен на рис. 10 (справа). Характерный размер образа (интерференционной картины) в данном эксперименте составил 200×3 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, аналогично [17]. 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 — выделение масштабов, соответствующих размеру образа капли, при помощи непрерывного вейвлет-преобразования с использованием вейвлета типа «Мексиканская шляпа», где максимумы полученного распределения соответствуют положению образов. 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). На основе анализа получаемых результатов для большей надежности срабатывания этот алгоритм был дополнен следующими шагами. Предварительно из исходного изображения вычитается фоновый сигнал. Найденные максимумы фильтруются по критериям относительной яркости и абсолютной яркости образа (первый вариант наиболее эффективен для отсева ложных срабатываний алгоритма). Также фильтруются близкорасположенные максимумы, как многократное срабатывание алгоритма на одном образе (из этих максимумов выбирается наибольший по высоте). Далее выполняется отсев «пересвеченных» образов, яркость которых выходит за динамический диапазон камеры. Такая комбинация фильтров позволяет, в том числе, надежно обнаруживать образы при сильном неоднородном и непостоянном фоновом сигнале, возникающем, в частности, при наличии большого количества субмикронных капель (влажный пар с конденсацией).

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 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).

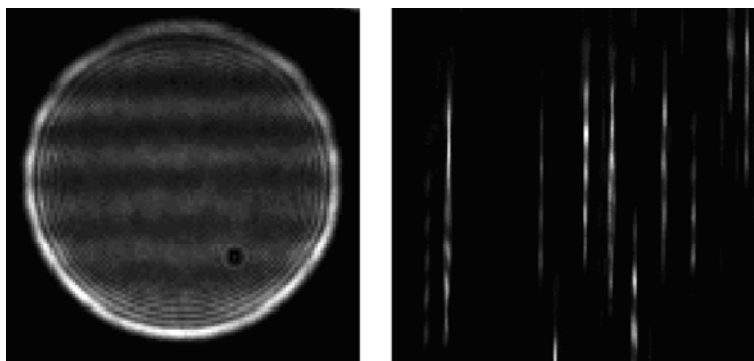


Рис. 10. Фрагменты изображений, полученных с блоком цилиндрических линз (справа) и без него (слева)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

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, были установлены на координатное устройство, позволяющее 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 532 нм) 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. Для калибровки измерительной системы использовалась двухшаговая калибровка.

С другой стороны светового ножа нормально к ножу была установлена аналогичная камера с объективом Sigma 180/3.5, регистрировавшая сфокусированные изображения

потока с высоким оптическим увеличением одновременно с первой камерой. Эти изображения применялись для тестирования метода IPI (см. раздел «Тестирование метода»). Приведение изображений с камер к одной системе координат выполнялось при помощи плоской мишени с прямоугольной решеткой линий с выделением начала координат более широкими линиями.

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 $0,17$ г/с, расход воды — $0,2$ г/с. Схема измерений показана на рис. 12, фотография стенда на рис. 13. Центральное продольное сечение струи освещалось лазерным ножом. Размер измерительной области составлял 28×28 мм, измерения проводились на различных расстояниях от форсунки.

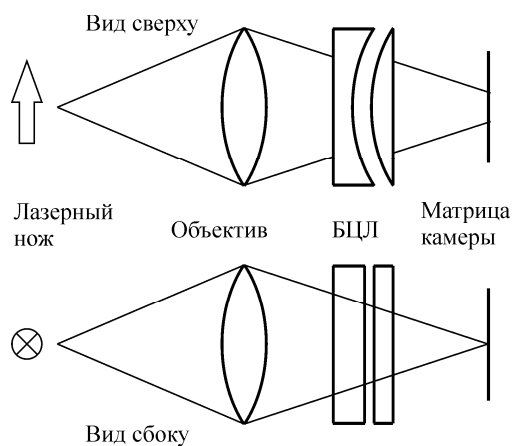


Рис. 11. Схема принимающей свет оптики с блоком цилиндрических линз (на рисунке — БЦЛ)

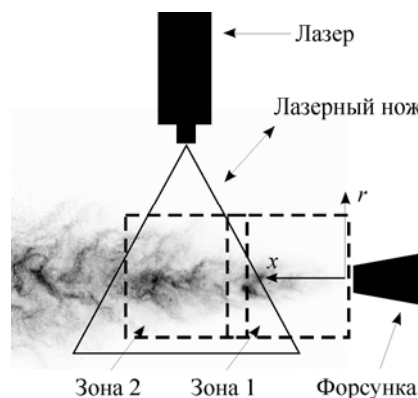


Рис. 12. Схема измерений

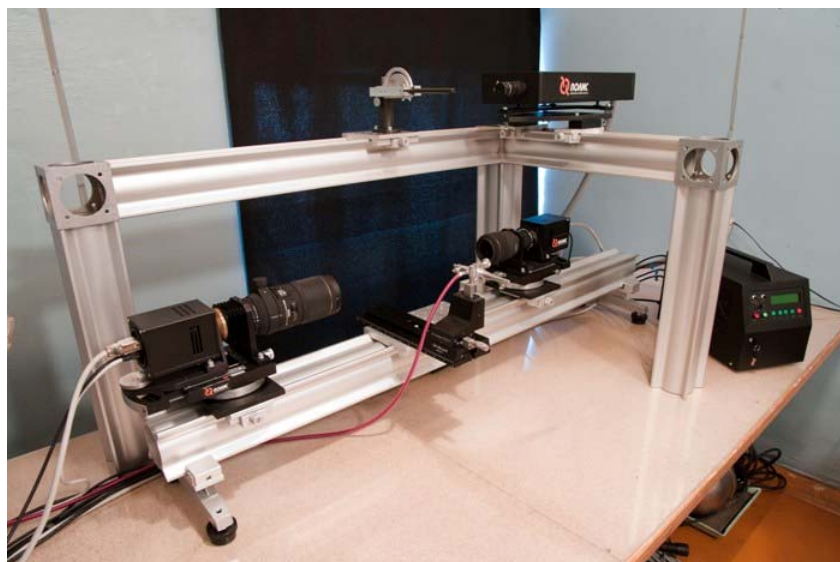


Рис. 13. Фотография экспериментального стенда

ТЕСТИРОВАНИЕ МЕТОДА

Ранее ряд исследователей проводил тестирование метода ИРІ на монодисперсных аэрозолях с известным размером капель. В данной работе тестирование реализации метода выполнялось на полидисперсном аэрозоле. Основной вопрос – выбор метода, с которым будет сравниваться ИРІ. Требуется эквивалентный по свойствам метод: работающий в том же диапазоне размеров с небольшой погрешностью измерения и возможностью напрямую сравнивать результат измерения этих двух методов, то есть измерения должны происходить одновременно, в одной измерительной области. Желательно использовать полевой, а не точечный метод, с однозначной привязкой координат. Метод должен быть прост в реализации и доступен. Анализ возможных решений привел к использованию метода прямого наблюдения с регистрацией рассеянного каплями света (известен в литературе как Glare Point [30]) на камеру. Использование одного лазерного ножа для ИРІ и контрольного метода упрощает оптическую конфигурацию измерительной системы, ее настройку и, как следствие, погрешность измерения. На сфокусированном изображении капля наблюдается как пара ярких точек, соответствующих отражению и однократному преломлению света. Расстояние между точками l пропорционально диаметру капли: $d = 2l/(1 + \cos(\theta/2))$. Погрешность измерения диаметра методом прямого наблюдения определяется оптическое увеличением M_0 , и пропорциональна размеру пикселя светочувствительного элемента камеры S_{pix} , оценочно погрешность составляет не менее S_{pix}/M . Погрешность составила 4,25 мкм для метода GP и 1,37 мкм для ИРІ (за погрешность измерения методом ИРІ принимается погрешность вследствие дискретизации измеряемой частоты интерференционных полос).

Обработка ИРІ изображений выполнялась автоматически с ручным контролем корректности работы, GP изображения обрабатывались вручную. Всего было обработано 400 образов капель, использованная методика позволила сравнить результаты измерения диаметра каждой отдельной капли полидисперсного спрея. Минимальный измеряемый диаметр составил 12 мкм (определялось параметрами оптики ИРІ камеры), максимальный размер капель в потоке – 80 мкм. Среднее абсолютное различие в диаметрах, измеренных двумя методами, составило 1,17 мкм, что ниже погрешности измерения методом GP (4,25 мкм). Таким образом, можно говорить о корректности работы метода ИРІ в широком диапазоне размеров капель с погрешностью на уровне 1 мкм.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИАМЕТРОВ КАПЕЛЬ В СТРУЕ АЭРОЗОЛЯ

На рис. 14 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/см³. При указанных параметрах измерительной системы минимально измеряемый диаметр капель составил 14 мкм. Векторами на рисунке обозначена мгновенная скорость капель, рассчитанная корреляционным методом [32] по смещению интерференционных картин за время между двумя последовательными импульсами лазера. Ниже представлены результаты измерений при расстояниях от среза форсунки 30 мм и более, так как аэрозоль в этой области становится менее плотным, и метод ИРІ работает более надежно. Размер области осреднения для приведенных на рис. 15 и 16 распределений составляет 5x30x0,7 мм (т.е. область, вытянутая вдоль перпендикулярной оси форсунки прямой, ширина соответствует радиусу струи (менее 30 мм), высота – толщине светового ножа (около 0,7 мм)). Сравнительно большой размер области осреднения обусловлен небольшим числом реализаций (мгновенных измерений распределений капель). На рис. 15 показаны средние по времени распределения капель по размерам при различных расстояниях от среза сопла (форсунки). Видно, что с увеличением расстояния доля мелких капель в измерительной области уменьшается, что может быть связано с испарением капель.

Распределение каплевок поперек оси сопла (рис. 16) меняется незначительно, наблюдается лишь небольшое его уширение при движении вниз по потоку, что свидетельствует о слабом влиянии газовой фазы на движение дисперсной фазы на таких расстояниях от форсунки (30 мм и более).

На рис. 17 показаны распределения расстояния между каплями вблизи оси сопла для различных областей потока (размер области осреднения $5 \times 4 \times 0,7$ мм), такие распределения могут использоваться для оценки равномерности распределения каплевок в потоке, динамику процессов образования или разрушения кластеров. Данные распределения обрезаны снизу, так как алгоритм обработки IPI изображений не распознает находящиеся слишком близко образы каплевок. Можно наблюдать, что с удалением от оси форсунки распределение меняется, становясь более пологим, среднее расстояние между каплями увеличивается.

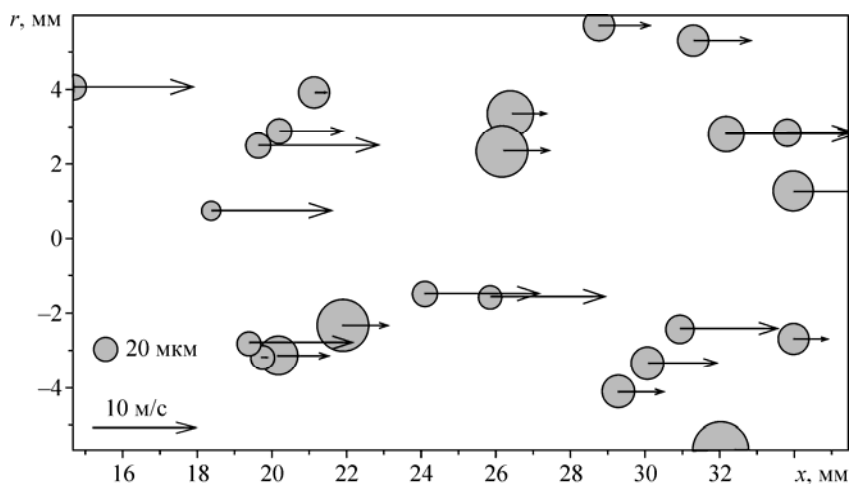


Рис. 14. Мгновенное распределение каплевок в измерительной плоскости (зона 2) и их скорости

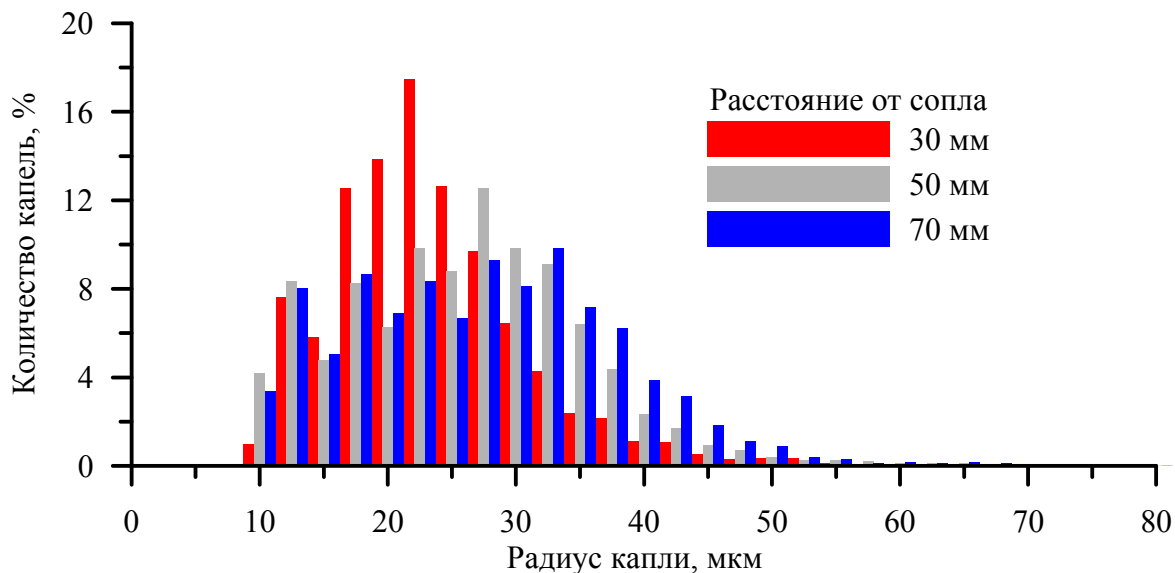


Рис. 15. Распределение каплевок по размерам для различных расстояний от среза сопла

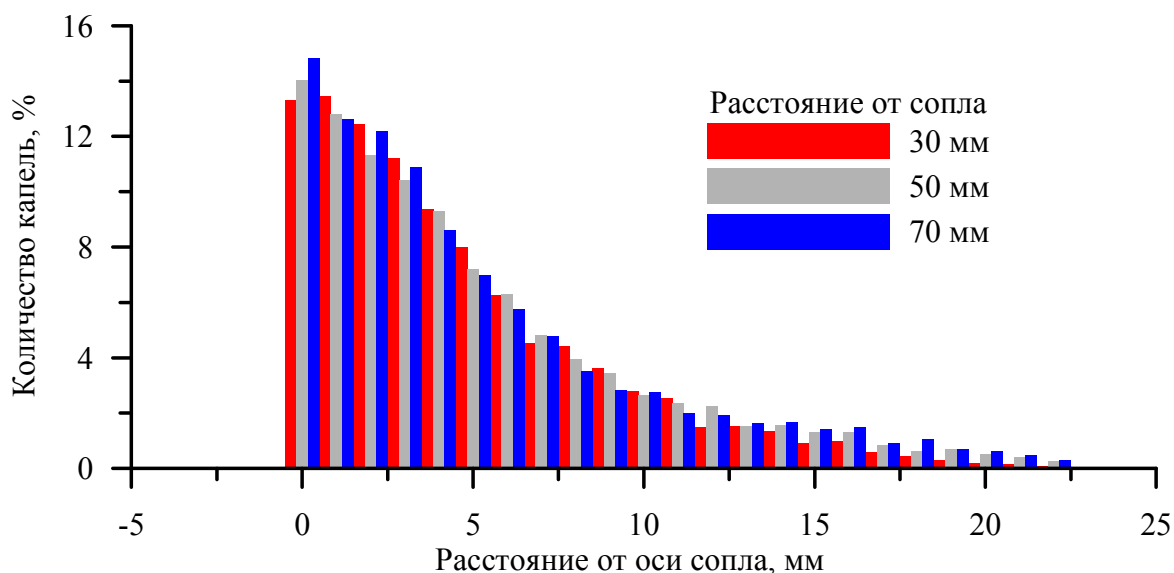


Рис. 16. Распределение капель поперек оси сопла для различных расстояний от среза сопла

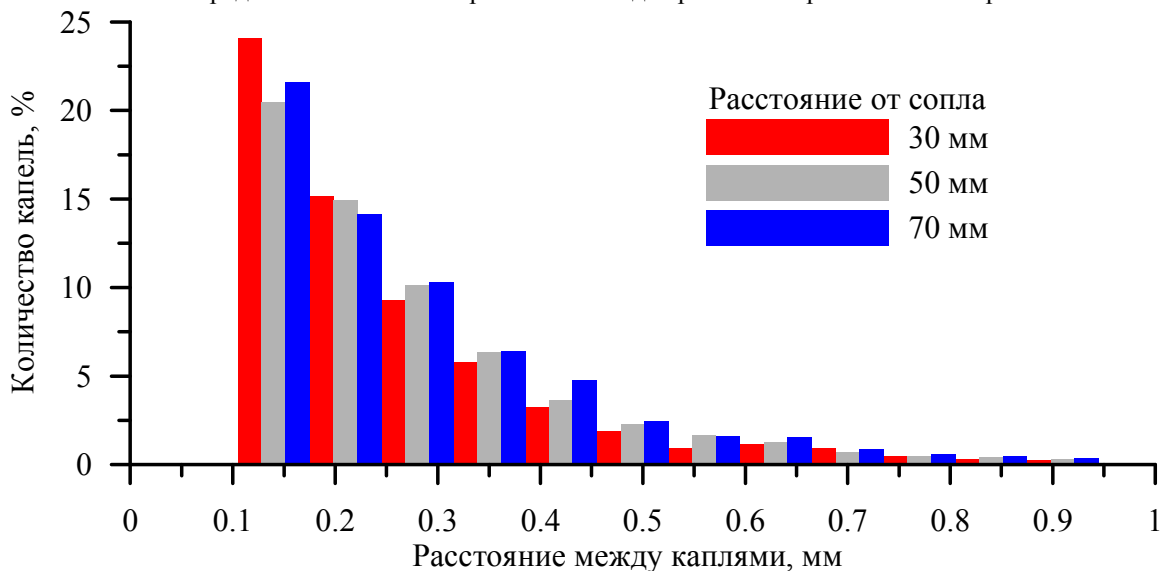


Рис. 17. Распределение расстояния между каплями вблизи оси сопла для различных расстояний от среза сопла

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 %. Проведенное тестирование метода ПИ путем сравнения с результатами измерения методом прямого наблюдения продемонстрировало работоспособность метода и низкую погрешность измерения (около 1 мкм, что соответствует теоретическим оценкам). На основе изложенных выше подходов и алгоритмов реализована измерительная система, которая была применена для измерения параметров газочапельной струи.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках реализации Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 г. и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 10-08-01304-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Semidetnov 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., Beek 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., Beek 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. **Rosow 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 IPI 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. **Van de Hulst H.C., Wang R.T.** Glare points // *Applied Optics*. 1991. Vol. 30, No. 33. P. 4755–4763.

31. Михалев А.С., Ринкевичюс Б.С., Скорнякова Н.М. Лазерный интерференционный метод определения параметров пузырьков газа // Метрология. 2009. № 9. С. 3–14.
32. 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.

A.V. Bilsky^{1,2}, Yu.A. Lozhkin¹, D.M. Markovich^{1,2}

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Russia,
630090, Novosibirsk, Lavrent'ev ave, 1, e-mail: lozhkin@itp.nsc.ru

² Novosibirsk State University, Russia,
630090, Novosibirsk, Pirogova st., 2

APPLICATION OF IPI TECHNIQUE TO STUDY SPRAY FLOWS

The paper considers the optical contact-free method of droplet diameter sizing in the flow cross-section utilizing light interference on a droplet. Distribution of light scattered by a particle was analyzed for different configurations of the measurement system using the Mie theory and approximation of geometrical optics. Basic measurement errors and dynamic range were determined including the case of camera mounted at the angle of 90° to the plane of a laser sheet. With the use of obtained results a set of algorithms are suggested for processing of data obtained during experiment. Validation of IPI technique was carried out by means of comparison with direct observation method. The suggested approaches were applied for measurement of characteristics of the gas-droplet jet.

INTERFEROMETRIC PARTICLE IMAGING, GAS-DROP JET, MI THEORY