

Метод обработки теневых фотографий факела распыла жидкости

А. С. Савельев

Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва
125412, Россия

E-mail: fisteh@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16 мая 2019 г.

Аннотация. С помощью теневого метода проведена съемка факела распыла воды, формируемого форсункой при различных давлениях жидкости. Разработан компьютерный алгоритм обработки цифровых изображений, с помощью которого проведена обработка полученных теневых микрофотографий факела распыла. В результате выполнения программы получена статистика распределения диаметра капель, выполнен расчет среднего диаметра и диаметра по Заутеру. <https://doi.org/10.33849/2019114>

1. ВВЕДЕНИЕ

Двухфазное течение в виде аэрозоля можно встретить во многих областях техники, например, в двигателях различного типа, от поршневых до газотурбинных. Эффективность того или иного агрегата зачастую зависит от свойств аэрозоля, который используется в его работе. Основными характеристиками аэрозоля являются средний диаметр капель D_{10} и средний объемно-поверхностный диаметр по Заутеру D_{32} , равный общему объему жидкости, отнесенному к суммарной поверхности капель. Средний диаметр характеризует движение аэрозоля в набегающем потоке воздуха и то, насколько он следует за потоком, а величина D_{32} — насколько интенсивно происходит теплообмен на поверхности капли при ее горении или испарении.

В настоящее время существуют методики, которые позволяют определять характеристики факела распыла, связанные с размером капель и статистическим распределением их диаметра. Среди них можно выделить контактные и бесконтактные методы. Ко вторым, в основном, относятся оптические методы, которые основаны на рассеянии излучения на каплях жидкости. В частности, наиболее “быстрым” методом диагностики является метод, основанный на одновременной регистрации интенсивности флуоресценции и рассеяния Ми, отношение величин которых дает величину, пропорциональную D_{32} . К современным методам, часто применяемым при экспериментальных исследованиях, относятся теневой и интерферометрический методы на основе рассеяния Ми. Каждый из существующих методов диагностики факела распыла жидкости обладает как преимуществами, так и недостатками. К примеру, метод, основанный на флуоресценции, использует процедуру фотометрирования, что приводит к необходимости калибровки системы при использовании в диагностике разных объектов или на разных установках. В данной работе рассматривается теневой метод, который по сравнению с упомянутыми методами, обладает преимуществом, связанным с тем, что не требуется применения флуоресцирующих добавок в жидкость, а также прозрачности жидкости или знания ее показателя преломления. В работе проведена разработка компьютерного кода, который позволил провести компьютерную обработку теневых цифровых фотографий факела распыла жидкости, получаемой с помощью форсунки при различном давлении жидкости.

Получаемые в эксперименте теневые фотографии капель жидкости в газе (или газовых пузырьков в жидкости) представляют собой темные пятна на более свет-

лом фоне. Это происходит из-за того, что часть лучей преломляется на границе раздела фаз и не попадает в объектив видеокамеры. Когда форма капель (или пузырьков) близка к шарообразной, определение их диаметра может быть выполнено по формуле [1, 2]:

$$D = \frac{2}{F} \sqrt{\frac{S}{\pi}}, \quad (1)$$

где D — диаметр капли, S — площадь изображения капли на цифровой фотографии, F — пространственное разрешение регистрирующей оптической системы. Таким образом, задача определения диаметра капли сводится к определению величины S ее соответствующего изображения. Для этого необходимо учесть, что глубина резкости для капель разного диаметра будет различной. Зачастую глубина резкости оптической системы значительно больше, чем диаметр капли. При обработке изображений и формировании статистики необходимо учитывать обстоятельство, что капли большего диаметра будут видны, если выйдут из плоскости съемки (плоскости фокусировки). Это приведет к тому, что полученное распределение $P(D)$, где P — вероятность зарегистрировать каплю диаметром D , будет иметь заниженное значение при малых значениях D и завышенное при больших значениях D . Одним из способов устранения этого эффекта является применение калибровки оптической системы с помощью оптических мишеней, на которых нанесены изображения с размерами, соответствующими диаметрам капель (10–100 мкм). В результате такой калибровки получается корректирующая функция $k(D)$, на которую умножается $P(D)$ для получения корректного распределения капель по диаметру. Другим способом является отсев в процессе обработки фотографий изображений капель, не удовлетворяющих определенным условиям. В этом случае существуют несколько подходов: по контрастности изображения на фоне подсветки [1, 3, 4], по градиенту интенсивности на границе изображения капли [5] и смешанный подход [6], когда для капель относительно маленького диаметра используется критерий контрастности, а для большого диаметра — градиентный подход. До сих пор выбор критерия для отсева изображений капель, которые вышли из плоскости фокусировки, является открытым вопросом [7]. В данной работе используется способ отсева групп пикселей, которые соответствуют каплям, вышедшим за пределы плоскости фокусировки, основанный на расчете зависимости от-

ношения средней интенсивности изображения капли к интенсивности фоновой подсветки вблизи него.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Фотографирование факела распыла жидкости, формируемого с помощью форсунки, проводилось на установке, схема которой представлена на рисунке 1. Установка состоит из прозрачной емкости в форме прямого параллелепипеда объемом около 1 м^3 , стенки которой выполнены из прозрачного материала (оргстекла). Внутри емкости располагалась форсунка, факел которой исследовался теневым методом. Емкость была снабжена подводом воды под постоянным давлением от 2 до 10 бар, а также системой отвода жидкости. Снаружи камеры располагались источник подсветки и видеокамера с объективом.

В качестве объектива использовался микроскоп с большим фокусным расстоянием Questar QM-1, а в качестве регистрирующей видеокамеры — LaVision Imager Pro X 2M с разрешением 1600×1200 пикселей. В этой конфигурации видеокамера с объективом позволяла получать двойные кадры с частотой 10 Гц и задержкой между кадрами 110 нс, при этом характерный размер области, видимой видеокамерой, был 1 мм, а пространственное разрешение составляло 1 пиксель/мкм на расстоянии 0.5 м до этой области.

Поскольку теневой метод диагностики факела распыла основан на регистрации оптических неоднородностей (капель), необходимо организовать подсветку, которая была бы равномерной по всему видимому видеокамерой полю. Для этого применялись соединенные друг с другом оптическим волноводом двойной Nd:YAG лазер Litron Nano-L PIV и оптический преобразователь LaVision High Efficiency Diffuser лазерного излучения в некогерентное излучение 580 нм. Действие преобразователя основано на флуоресценции красителя (родамин 6G) при облучении его лазерным излучением. Важно отметить, что длительность подсветки увеличивается (до 20 нс) по сравнению со временем свечения лазера (6 нс), но получаемые теневые микрофотографии капель можно считать практически мгновенными при скоростях движения капель несколько метров в секунду. Это обстоятельство важно, поскольку алгоритм обработки полученных фотографий определяет их размер по видимому контуру границ капель, изображения которых не должны быть “смазанными”. Поскольку применялся двойной лазер и видеокамера с двойной экспозицией, в эксперименте можно было получать два отдельных теневых изображения капель аэрозоля с задержкой не менее 110 нс.

Поскольку характер двухфазного течения был стационарным, в каждом экспериментальном запуске были получены 10^3 кадров, что позволило построить статистику распределения диаметра по каплям и вычислить параметры D_{10} и D_{32} . Поскольку каждый кадр является двойным (одна часть кадра смещена относительно другой по времени), то в результате можно получить распределение компонент вектора скорости, параллельных плоскости видимой области, по диаметру капель.

3. АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ПОЛУЧЕННЫХ ФОТОГРАФИЙ

Полученные кадры обрабатывались с помощью алгоритма, реализованного в виде компьютерной программы на языке программирования Python 2.7. На вход программы поступают кадры, полученные в одном эксперименте.

Первым шагом является усреднение всех кадров и получение распределения интенсивности подсветки $I_{0av}(x, y)$ по видимому видеокамерой полю:

$$I_{0av}(x, y) = \sum_{i=1}^N \frac{I_{0i}(x, y)}{N}, \quad (2)$$

где x и y — координаты пикселя на изображении, N — количество снятых двойных теневых фотографий в эксперименте, $I_{0i}(x, y)$ — интенсивность пикселя с координатами x, y на i -ой фотографии. Затем каждый кадр проходит процедуру нормализации, когда интенсивность каждого пикселя приводится в соответствие с распределением интенсивности подсветки:

$$I_i(x, y) = \frac{I_{0i}(x, y)}{I_{0av}(x, y)}, \quad (3)$$

Следующим шагом является поиск пикселей, интенсивность которых имеет значение меньше, чем величина $a_1 I_{av}$, где I_{av} — среднее значение интенсивности на нормализованном изображении $I_{av}(x, y)$, a_1 — постоянная, меньше единицы, которая определяется эмпирически. Величина I_{av} рассчитывается по формуле:

$$I_{av} = \sum_{y=1}^{N_y} \sum_{x=1}^{N_x} \frac{I_i(x, y)}{N_x N_y}, \quad (4)$$

где N_x — ширина фотографии, N_y — высота фотографии. При этом найденные пиксели группируются, если граничат друг с другом. Величина a_1 определяется при просмотре нормализованных изображений и определении величины интенсивности пикселей, которые соответствуют капле, которую можно зарегистрировать с помощью используемого оборудования, диаметром D_{min} , эта величина принята равной $D_{min} = 5 \text{ мкм}$, поскольку пространственное разрешение системы составляло величину около $F = 1 \text{ пиксель/мкм}$. Следует отметить, что интенсивность изображения капли большего диаметра D ($D > D_{min}$) будет еще меньше. В описанном эксперименте оказалось, что величину a_1 следует принять равной 0.9.

В результате выполнения указанных действий для каждой фотографии получают отдельно стоящие группы пикселей, которые соответствуют неоднородностям в видимом поле. Этими неоднородностями являются капли жидкости, характеристики которого требуется определить. При этом капли могут находиться одна на фоне другой, иметь размытые границы из-за того, что находятся вне области резкости, а также иметь деформированную форму из-за взаимодействия с потоком воздуха, в котором двигается капля. В данной работе последнее явление не выражено, поскольку капли двигаются с относительно небольшой скоростью в неподвижном воздухе внутри емкости.

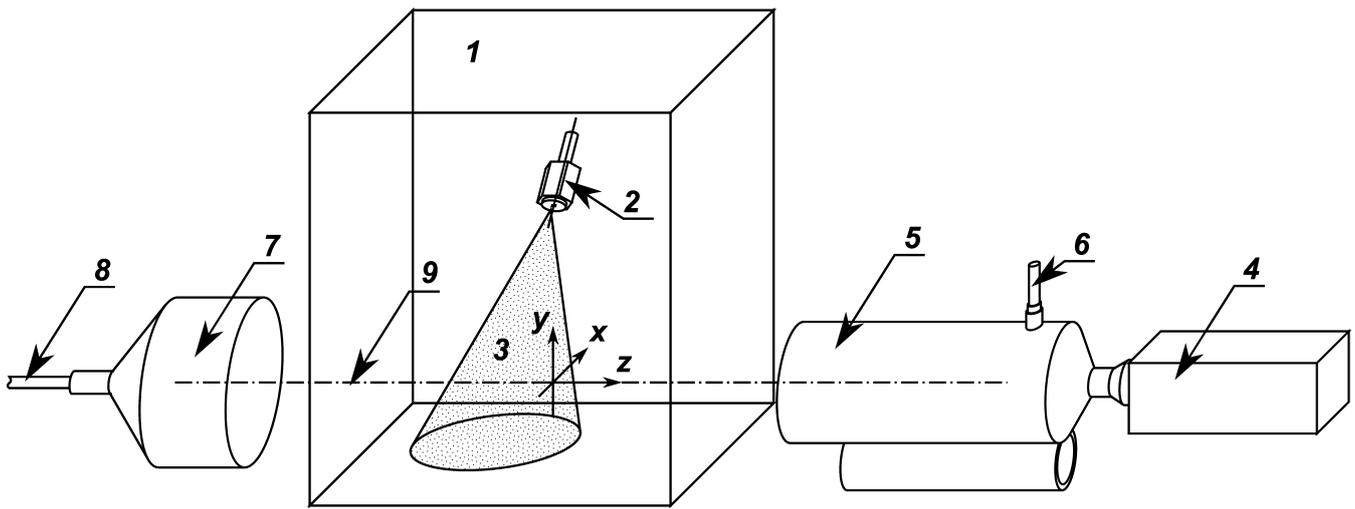


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки. 1 — прозрачная емкость, 2 — форсунка, 3 — факел распыла жидкости, 4 — видеокамера, 5 — микроскоп, 6 — видеоискатель, 7 — оптический преобразователь, 8 — оптический волновод, 9 — оптическая ось.

После формирования списка групп пикселей одного изображения применяется ряд процедур, которые можно охарактеризовать как процедуры постобработки. В список процедур постобработки следует отнести также и упомянутую выше первую операцию отсева групп, которые соответствуют каплям диаметром менее D_{min} .

Второй процедурой постобработки является определение границы капли, т.е. границы пикселей, которые следует считать изображением капли и по их количеству рассчитывать диаметр. Изображение капли представляется в виде темного пятна на светлом фоне, причем переход от светлого к темному осуществляется не скачкообразно, а на расстоянии в несколько пикселей [8]. Это утверждение справедливо не только для изображений капель, вышедших из плоскости фокусировки, но и для резких изображений капель из-за несовершенства оптической системы. Для проведения отсева пикселей из группы вычисляется величина интенсивности фоновой подсветки вблизи капли. Для этого вычисляются координаты (x_0, y_0) геометрической середины группы по формуле:

$$x_0 = \sum_{i=1}^{N_{gr}} \frac{x_i}{N_{gr}}, y_0 = \sum_{i=1}^{N_{gr}} \frac{y_i}{N_{gr}}, \quad (5)$$

где N_{gr} — количество пикселей в группе, а x_i и y_i — это x и y координаты i -го пикселя в группе. Вычисляется среднее значение интенсивности I_{gr} изображения капли:

$$I_{gr} = \sum_{i=1}^{N_{gr}} \frac{I_i}{N_{gr}}, \quad (6)$$

где I_i — интенсивность i -го пикселя в группе. Для вычисления интенсивности фоновой подсветки вблизи капли выбираются пиксели, которые имеют координаты (x, y) на изображении, которые удовлетворяют условиям:

$$x < x_0 + Da_2, x > x_0 - Da_2, \quad (7)$$

$$y < y_0 + Da_2, y > y_0 - Da_2, \quad (8)$$

где a_2 — некоторое постоянное число (более 1). Также дополнительно проверяется, чтобы выбранные пиксели не входили ни в одну группу на фотографии. Аналогично (6) определяется средняя интенсивность окружающей группу пикселей I_{near} . Далее из группы следует удалить те пиксели, интенсивность I которых удовлетворяет условию:

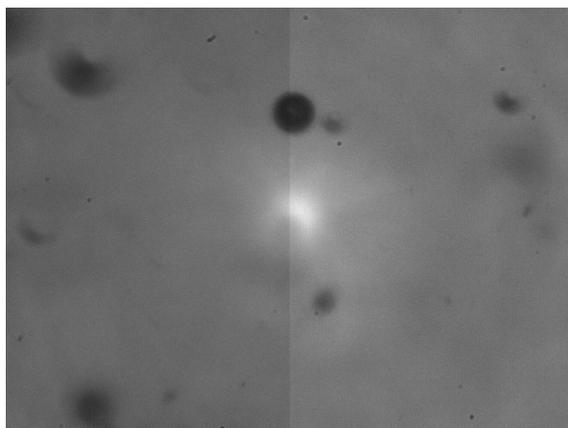
$$I > I_{gr} + a_3(I_{near} - I_{gr}) \quad (9)$$

где a_3 — положительное число от 0 до 1 (обычно $a_3 = 0.5$ [3, 6, 8]). В виду того, что глубина резкости тем меньше, чем меньше диаметр капли, вторую процедуру постобработки целесообразно выполнять для групп, которые соответствуют изображениям капель с диаметром более определенной величины. При обработке экспериментальных данных, полученных в данной работе, этот диаметр принимался равным 20 мкм.

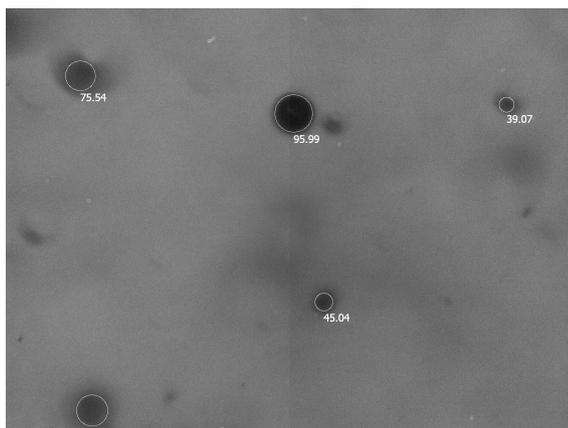
Третьей процедурой постобработки является удаление изолированных пикселей, которые появляются в результате выполнения предыдущей операции и могут окружать основную группу пикселей, не контактируя с ней.

Четвертой процедурой постобработки является разбиение группы пикселей на две или более групп, если эти группы потеряли контакт в результате выполнения предыдущих операций. Такая ситуация может возникнуть, если изображения капель находятся близко друг к другу, частично перекрываясь.

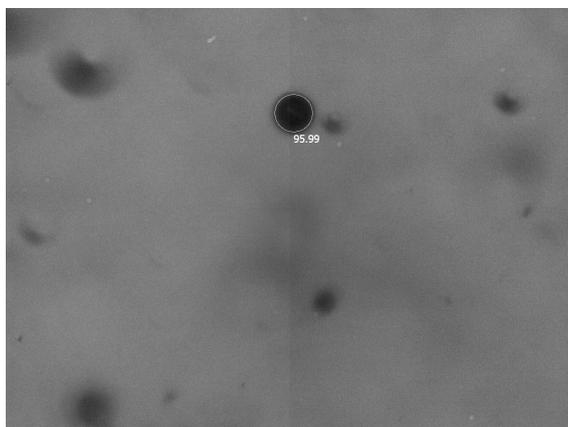
Пятой процедурой постобработки является удаление тех групп, которые соответствуют изображениям капель нешарообразной формы. Эта ситуация может возникнуть при перекрытии изображений капель, при сильном отдалении капли от плоскости фокусировки, когда форма изображения капли имеет вид не круга, а окружности или части окружности (см. рисунок 2(а)), а также при деформации капли из-за взаимодействия с окружающим потоком газа при относительно высоких значениях числа Вебера. Для этого вычисляется отношение площади группы S и площади прямоугольника, в который вписано изображение капли. Если эта величина



(a)



(b)



(c)

Рисунок 2. Пример получаемой в эксперименте теневой микрофотографии каплей воды (а), после цифровой обработки без (b) и с (c) применением шестой операции постобработки. Размеры указаны в микрометрах. Ширина каждого из изображений равна 1.423 мм.

менее значения a_5 , то группа пикселей удаляется. Хотя отношение площади круга к площади квадрата равно $\pi/4$, величину a_5 следует принимать менее этого значения, если в факеле распыла жидкости есть деформация каплей. Но снизу величину a_5 необходимо ограничить значением 0.5, чтобы избежать учета каплей, вышедших из плоскости фокусировки на значительное расстояние, так что их изображение уже не имеет круглую форму (рисунок 2(a)).

Шестой процедурой постобработки является алгоритм отсева групп, которые вышли из плоскости фокусировки объектива. В этом случае применяется подход, основанный на анализе контрастности изображения капли на фоне подсветки. При этом не используются дополнительные предварительные калибровки. После выполнения всех первых пяти процедур постобработки на диске сохраняется предварительный список распознанных каплей, в котором записана информация о диаметре, координатах центра капли, средней интенсивности ее изображения I_{gr} и средней интенсивности фоновой подсветки вблизи этого изображения I_{near} . Затем строится зависимость $C = I_{gr}/I_{near}$ от диаметра изображения капли D . Величина будет наименьшей в случае, если капля находится в плоскости фокусировки объектива. Тогда из списка изображений каплей удаляются те из них, у которых величина I_{gr}/I_{near} больше, чем $C(D)$.

В результате выполнения операций постобработки получается список параметров изображения каплей, которые находятся в плоскости фокусировки объектива. Количество таких списков соответствует удвоенному количеству полученных в одном эксперименте фотографий, поскольку, как отмечалось выше, эти фотографии являются двойными. При сравнении списков представляется возможным поставить в соответствие изображению капли на первой фотографии изображение на второй ее части. Поскольку время Δt между вспышками двойного лазера известно, то делением разности положения центра изображения на этих частях фотографии на Δt можно получить скорость каждой капли. Если процесс распыления жидкости является стационарным, то при построении распределений параметров каплей и расчете величин D_{10} и D_{32} правомерным является учет каплей на всех полученных в эксперименте фотографиях.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Для апробации метода обработки цифровых микрофотографий каплей аэрозоля использовалась форсунка с диаметром выходного отверстия 0.5 мм, а в качестве жидкости использовалась вода, которая подавалась на форсунки при различном давлении p_w в диапазоне от 2 бар до 10 бар (относительно атмосферного давления). Эксперименты проводились на установке, описанной выше в разделе 2, при этом расстояние от выходного отверстия форсунки до области съемки было выбрано произвольно и равнялось 20 см. На рисунке 2(a) представлен пример фотографии, полученной при $p_w = 10$ бар. На фотографии видно неравномерное распределение интенсивности фоновой подсветки из-за профиля лазерного луча, который изначально гауссовский, дефекты изображения (пыль на оптических поверхностях) и центральное засвеченное пятно, которое связано с особенностью оптической схемы объектива. Эти свойства исходной фотографии устраняются с помощью описанной выше нормализации изображения (рисунки 2(b,c)). Также на представленной фотографии видны капли, вышедшие из плоскости фокусировки, в данном примере только одна капля видна резко и находится в плоскости фокусировки. Изображения других каплей не должны быть включены в расчет параметров аэрозоля. Для построения функции относительной интенсивности изображения каплей $C(D)$ выполня-

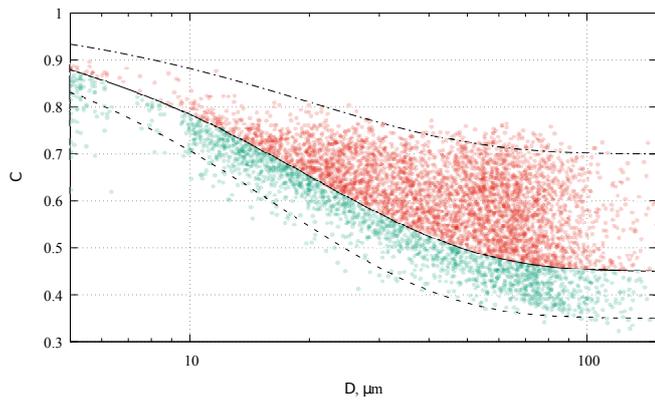


Рисунок 3. Распределение отношения интенсивностей $C_1(D)$ (---), $C_2(D)$ (- · -) Сплошной линией показана выбранная граница отсева изображений капель $C(D)$.

ются все действия алгоритма, описанные выше (результат представлен на рисунке 2(b)), кроме последней, шестой процедуры. Промежуточные данные об изображениях капель сохраняются в файл, и их можно представить в виде графика, пример которого представлен на рисунке 3. Данные рисунка получены в эксперименте при съемке 10^3 кадров распыла и при $p_w = 10$ бар. Из полученных результатов следует, что величина C близка к 0.9 при малых значениях D , что соответствует заданной константе a_1 . Для выбранного диаметра D значения C изображений капель распределены равномерно в диапазоне от C_1 до C_2 , значения которых зависят от выбранного D , но при этом C_1 и C_2 тем меньше, чем больше D .

При обработке фотографий оказалось удобным использовать функцию $C(D)$ в виде:

$$C(D) = 1 + K[\exp(-AD) - 1], \quad (10)$$

где K и A — некоторые не зависящие от D величины, причем $K < 1$ всегда, а $A \ll 1$ мкм⁻¹. В данном случае $K = 0.6$, $A = 0.04$ мкм⁻¹. Изображения капель, для которых величина $C = I_{gr}/I_{near}$ лежит ниже кривой $C(D)$, следует учесть при расчете параметров аэрозоля. На рисунке 3 красным цветом обозначены данные для изображений, которые отсеяны, а зеленым цветом те, что будут учтены при расчете. Выбор конкретного вида функции $C(D)$ зависит от экспериментальных условий и свойств неоднородностей, регистрация которых происходит на теневых фотографиях. К этим свойствам следует отнести вид неоднородностей (капли или пузырьки) и диапазон их диаметров. При выборе такой функции полезно проверять на обработанных выборочных фотографиях (см. рисунок 2(c)) получаемый результат. Если далее в экспериментах параметры оптической системы остаются неизменными, то $C(D)$ не следует менять.

После отсева изображений капель, которые не находятся в плоскости фокусировки объектива, можно построить зависимость $P(D)$ следующим образом. Сначала определяется (или задается) диапазон минимального и максимального значения D , он разбивается на поддиапазоны, к примеру, шириной 1 мкм. Определяется, какая часть резких изображений капель входит в конкретный поддиапазон. На рисунке 4 представлен пример полученного распределения $P(D)$ при $p_w = 6$ бар.

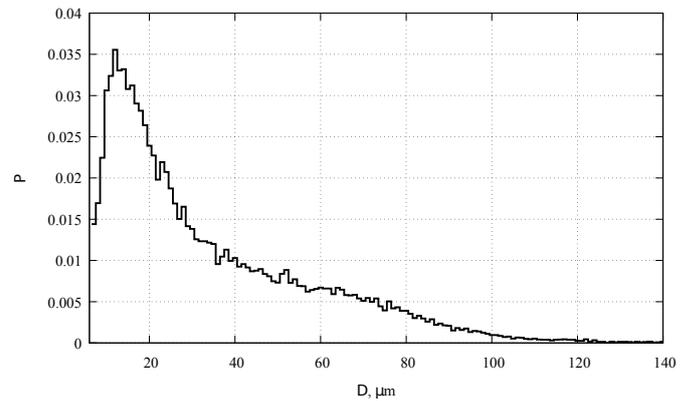


Рисунок 4. Пример построенной вероятности $P(D)$ при $p_w = 6$ бар.

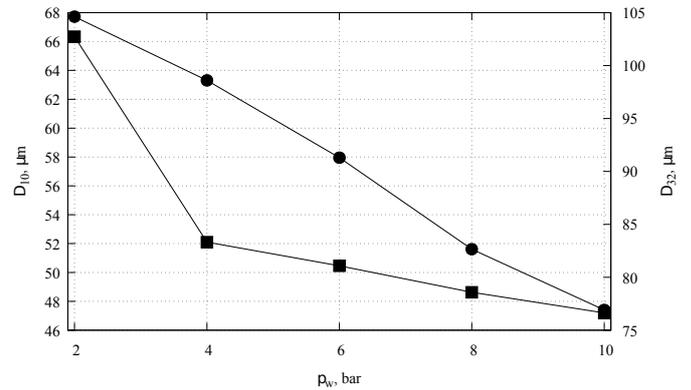


Рисунок 5. Зависимость параметров D_{10} (■) и D_{32} (●) от давления воды p_w .

Вычисление характеристик аэрозоля проводится по известным формулам:

$$D_{10} = \sum_{i=1}^N \frac{D_i}{N}, \quad (11)$$

$$D_{32} = \sum_{i=1}^N \frac{D_i^3}{D_i^2}, \quad (12)$$

где N — количество изображений, полученных после обработки изображений. На рисунке 5 представлены зависимости D_{10} и D_{32} , вычисленные после обработки фотографий факела распыла, полученного с помощью форсунки при различных давлениях воды. Видно, что эти параметры аэрозоля монотонно уменьшаются при повышении давления, что качественно согласуется с известными результатами и обобщениями [9].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен алгоритм обработки теневых микрофотографий капель аэрозоля и вычисления его характеристик $P(D)$, выполнена его программная реализация, которая затем применена для обработки экспериментальных данных, соответствующих факелу распыла жидкости форсункой при различных давлениях. Алгоритм выполнен по классической схеме [8] и состоит из трех основных частей, выполняемых последовательно: предварительная обработка фотографии, поиск

изображений неоднородностей и постобработка, в которую включена процедура поиска тех изображений капель, которые в момент фотографирования находятся в плоскости фокусировки. Отличительной особенностью этой процедуры является то, что параметры всех изображений капель (в том числе нерезкие) используются для определения критерия отсева нерезких изображений. При этом выполнение этой процедуры не является затратным по процессорному времени и может быть выполнено после основного алгоритма. Метод поиска критерия отсева изображений капель, которые не попали в плоскость фокусировки, основан на анализе распределения по диаметру капли относительной интенсивности ее изображения. Кроме непосредственно фотографий, на вход программы их обработки необходимо ввести некоторые параметры, которые зависят от свойств объекта исследования и оптической системы и которые могут быть получены при анализе значительного количества теневых фотографий исследуемого аэрозоля, если процесс стационарный. В нестационарном случае необходимо проводить дополнительный эксперимент с объектом (стационарным факелом распыла жидкости), параметры которого близки к параметрам аэрозоля, ко-

торый необходимо исследовать. Описанный в работе алгоритм обработки также может быть применен в случае пузырьковой жидкости [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Malot H and Blaisot J B 2000 *Part. Part. Syst. Charact.* **17** 146–58
2. Fdida N and Blaisot J B 2010 *Meas. Sci. Technol.* **21** 025501
3. Kim K S and Kim S S 1994 *Atomization Sprays* **4**(1) 65–78
4. Lebrun D, Touil C E and Ozkul C 1996 *Appl. Opt.* **35** 6375–81
5. Lecuona A, Sosa P A, Rodriguez P A and Zequeira R I 2000 *Meas. Sci. Technol.* **11** 1152–61
6. Koh K U, Kim J Y and Lee S Y 2001 *Atomization Sprays* **11**(4) 317–33
7. Castanet G, Dunand P, Caballina O and Lemoine F 2013 *Exp. Fluids* **54** 1489
8. Lee S Y and Kim Y D 2004 *KSME International Journal* **18**(5) 879–94
9. Wang X F and Lefebvre A H 2001 *J. Propul. Power* **3**(1) 11–8
10. Panov V A, Vasilyak L M, Vetchinin S P, Pecherkin V r and Saveliev A S 2018 *Plasma Phys. Rep.* **44** 882–5