

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-04-40-49

УДК 551.468

Установка для измерения распределений объёмных концентраций капель аэрозоля по размерам на основе теневого метода и методика её калибровки

Даниил Александрович СЕРГЕЕВ¹✉, **Иван Михайлович КРАЕВ²***Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова–Грехова Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия*¹*daniil@ipfran.ru* <https://orcid.org/0000-0003-4910-3935>²*ikraev@ipfran.ru* <https://orcid.org/0000-0003-3523-6681>

Аннотация

Предмет исследования. Измерения распределений по размерам концентраций брызг, образующихся в лабораторном эксперименте при взаимодействии воздушного потока со свободной водной поверхностью (моделирование взаимодействия атмосферы и гидросферы) оптическими методами. **Цель работы.** Разработка макета установки для измерения распределений объёмных концентраций капель аэрозоля по размерам на основе теневого метода и методики его калибровки. **Метод.** Применялся теневой метод со скоростной съёмкой вида сбоку на воздушный поток с движущимися в нём каплями над взволнованной водной поверхностью с мощной диодной подсветкой с противоположной стороны. Особенность подобных измерений заключается в том, что ширина области измерения (детектирования) такой установки перпендикулярно плоскости съёмки зависит от глубины фокусировки. Поэтому была разработана специальная методика калибровки, которая полностью воспроизводила оптический тракт, но со стеклянными микрошариками известного размера вместо капель. **Основные результаты.** Методика калибровки позволила получить зависимость размера области измерения перпендикулярно плоскости изображения от размера детектируемой капли. Эта зависимость была использована для корректного пересчёта распределений количества капель в плоскости изображений в объёмные концентрации при измерениях в лабораторных экспериментах по моделированию ветроволнового взаимодействия на Высокоскоростном ветроволновом термостратифицированном бассейне (ВВТСБ) ИПФ РАН. Нижняя граница по радиусу в 50 мкм является минимальной среди полученных к настоящему времени результатов с использованием теневых методов в аналогичных исследованиях. **Практическая значимость.** Предложенный метод калибровки/измерений теневой визуализацией позволяет получить данные о распределениях концентраций брызг по размерам, которые необходимы для разработки физических моделей, качественно и количественно описывающие процессы взаимодействия атмосферы и гидросферы в широком диапазоне условий (шторма и ураганы).

Ключевые слова: теневой метод, высокоскоростная видеосъёмка, брызги, ветер, волны, лабораторное моделирование

Благодарность: работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-77-10060. Работа Краева поддержана в рамках выполнения темы госзадания ИПФ РАН № 0030-2022-0005. Эксперименты проведены на оборудовании уникальной научной установки «Комплекс крупномасштабных геофизических стендов» ИПФ РАН.

Ссылка для цитирования: Сергеев Д.А., Краев И.М. Установка для измерения распределений объёмных концентраций капель аэрозоля по размерам на основе теневого метода и методика её калибровки // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 4. С. 40–49. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-04-40-49>

Код OCIS: 100.0100.

Installation for measuring the distributions of volume concentrations of aerosol droplets by size based on the shadow method and its calibration procedure

DANIIL A. SERGEEV¹✉, IVAN M. KRAYEV²

Gaponov–Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia

¹daniil@ipfran.ru <https://orcid.org/0000-0003-4910-3935>

²ikraev@ipfran.ru <https://orcid.org/0000-0003-3523-6681>

Abstract

The subject of study is the measurements of size distributions of spray concentrations induced in a laboratory experiment during the interaction of an air flow with a free water surface (simulation of the interaction of the atmosphere and hydrosphere) by optical methods. **The aim of study** is the development of a model of a system for measuring the distribution of volume concentrations of aerosol droplets by size based on the shadow imaging method and its calibration techniques. **Method.** A shadow method with high-speed video recording of a side view of an air flow with drops moving in it over a rough water surface with powerful diode illumination from the opposite side was used. A feature of these measurements is that the width of the region of detection of such a system perpendicular to the plane of filming depends on the focusing depth. Therefore, a special calibration system completely reproducing the optical path as in the flume, but with glass microspheres of a known size instead of drops was developed. **Main results.** The calibration system made it possible to obtain the dependence of the size of the measurement area across the image on the size of the detected drop. This dependence was used to correctly recalculate the distributions of the number of drops in the image plane into volume concentrations during the measurements in laboratory experiments on modeling of the wind-wave interaction in the Thermostratified Wind-Wave Tank (TsWiWaT) of the IAP RAS. The lower limit on the radius of 50 μm is the minimum among the results of similar studies using the shadow methods obtained to date. **Practical significance.** The proposed method of calibration/measurement by shadow visualization makes it possible to obtain data on the distribution of spray concentrations by size, which are necessary for the development of physical models that qualitatively and quantitatively describe the processes of interaction between the atmosphere and the hydrosphere in a wide range of conditions (storms and hurricanes).

Keywords: shadow method, high speed video recording, spray, wind, waves, laboratory modeling

Acknowledgment: the work was supported by the RGNF grant № 23-77-10060. The work of I.M. Krayev was supported within the state task of IAP RAS № 0030-2022-0005. The experiments were carried out on the equipment of a unique scientific installation "Complex of large-scale geophysical stands" of the IPF RAS.

For citation: Sergeev D.A., Krayev I.M. Installation for measuring the distributions of volume concentrations of aerosol droplets by size based on the shadow method and its calibration procedure [in Russian] // *Opticheskii Zhurnal*. 2024. V. 91. № 4. P. 40–49. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-04-40-49>

OCIS code: 100.0100.

ВВЕДЕНИЕ

Брызги, образующиеся при ветроволновом взаимодействии над морской поверхностью, являются одним из важнейших факторов, обуславливающих обмен импульсом, теплом, влагой между океаном и атмосферой, в особенности при штормовых и ураганных условиях, когда за счёт высокой концентрации в воздухе резко возрастает межфазное взаимодействие [1]. При разработке моделей, количественно описывающих процесс генерации брызг, используют функцию генерации брызг (см., например, [2]), которая показывает сколько капель определённого радиуса образуется в единицу времени на единицу площади взволнованной поверхности. Модели базируются на эмпирических данных, которые характеризуются большими погрешностями измерений и сильным разбросом (см., например, [3]). Причина заключается в сложности проведения *in situ* измерений характеристик брызг в экспедиционных исследованиях, особенно при штормовых и ураганных условиях. Выходом из данной ситуации является проведение лабораторных исследований на экспериментальных установках, на которых моделируется ветроволновая обстановка в широком диапазоне условий, включая режимы регулярных обрушений и образования брызг при сильных ветрах. В контролируемых условиях ветроволновых каналов, в отличие от натуральных условий, можно использовать широкий спектр измерительных методов для исследования характеристик брызг, получать необходимый статистический ансамбль данных. При исследованиях характеристик брызг применяются как контактные методы, так и бесконтактные (большой частью лазерно-оптические). Контактные методы, использованные, например, в работах [4, 5], позволяют проводить измерения лишь в отдельных точках, сложны в калибровке, их динамический диапазон измерения размера капель сильно зависит от характеристик чувствительного элемента приёмника, они вносят возмущения в поток. В свою очередь, лазерно-оптические методы можно условно разделить на точечные и панорамные. К первым относят хорошо известную лазерную доплеровскую анемометрию и анализатор динамики частиц: методы, которые использовались, например, в работе [6]. Их преимущество заключается в высоком

временном разрешении и возможности детектирования капель с высокими скоростями движения. Однако малый объём, в котором выполняются измерения, фактически делает этот метод точечным, затрудняя набор статистического ансамбля реализаций и ограничивая сверху динамический диапазон по радиусу капли. Следует отметить, что в экспериментах на ветроволновых каналах с большим сечением воздушных потоков и сравнительно низкой концентрацией (по сравнению, например, с газокпельными потоками от форсунок, распылителей и т.п.) панорамные методы более предпочтительны. Их, в свою очередь, можно разделить на теневые (рефрактографические) [7–9] и методы с использованием вертикальной подсветки (в том числе типа светового (лазерного) ножа) [10] для визуализации капель в потоке. В обоих случаях выполняется съёмка вида сбоку на поток воздуха с брызгами над волнами в канале. В случае теневого метода визуализации используется подсветка с противоположной от видеокамеры стенки. В свою очередь, световая (лазерная) плоскость обычно располагается вертикально посередине вдоль канала. При теневом методе визуализации важную роль играет глубина фокусировки используемых оптических систем. При отклонении от плоскости фокуса происходит дефокусировка и размытие изображения капли, которое усложняет её детектирование и корректное определение размеров с помощью специальных алгоритмов обработки цифровых изображений. В свою очередь, толщину световой плоскости ножа можно регулировать для обеспечения фокусировки, но при этом крупные капли приводят к затенениям ножа. Также следует отметить, что зачастую при высоких скоростях потока приходится иметь дело со съёмкой с малой экспозицией. И чтобы получить контрастное изображение при боковом рассеянии капель падающего излучения в ноже, требуется его высокая интенсивность, которая может быть получена при использовании лазера в качестве источника света для формирования ножа. Однако сильные блики лазерного излучения представляют опасность для чувствительного элемента камеры. Также существует проблема переотражения излучения и бликов от взволнованной поверхности, что также затрудняет анализ получаемых изображений. Теневой метод не создаёт подоб-

ных сложностей, но при этом остаётся проблема размытого изображения капель на кадрах. Проблемы идентификации компактных изображений на последовательностях цифровых изображений в присутствии шумов определение координат, размеров, трассировка объектов характерны для различного рода прикладных задач и активно исследуются в настоящее время [11, 12].

Ранее в работах [7] при переходе от количества капель на единицу площади изображения к объёмной концентрации использовался поперечный размер, который определялся по глубине фокусировки для калиброванных изображений кругов определённого диаметра. Однако диаметр этих изображений был много больше минимального определяемого размера капли, но при этом поперечный размер области для вычисления объёмной концентрации устанавливался фиксированным вне зависимости от размера капли. Это является не совсем корректным подходом, так как, чем меньше размер капли, тем сложнее её детектировать при одинаковой дефокусировке (расстояния от плоскости фокуса).

Настоящая работа нацелена на решение обозначенной проблемы. В первой части работы описывается эксперимент по исследованию капель брызг, образующихся при взаимодействии воздушного потока со свободной

поверхностью, на экспериментальном стенде. Во второй части описана оригинальная методика калибровочных экспериментов по измерению глубины фокусировки в зависимости от размера капли для корректного пересчёта количества частиц на изображении в объёмную концентрацию. В третьей части приводятся полученные результаты измерений распределений концентраций капель по размерам.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты выполнялись на ВВТСБ. Общая схема экспериментов была сходной с использованной при наблюдении процессов генерации брызг, которая применялась в экспериментах на этой же экспериментальной установке, описанной в работе [13]. Здесь также использовалась съёмка вида сбоку на воздушный поток над взволнованной водной поверхностью высокоскоростной видеокамерой NAC Memrecam HX3, которая устанавливалась в герметичном полупогруженном боксе сбоку от канала (рис. 1а). В настоящем эксперименте камера находилась на расстоянии 9,5 м от входа в канал. С противоположной стороны аэродинамического канала располагались мощные диодные светильники (800 Вт) для теневой визуализации. В отличие от предыдущих экспериментов, использовался специаль-

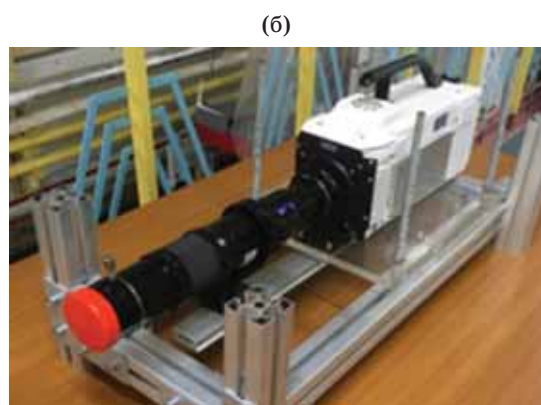
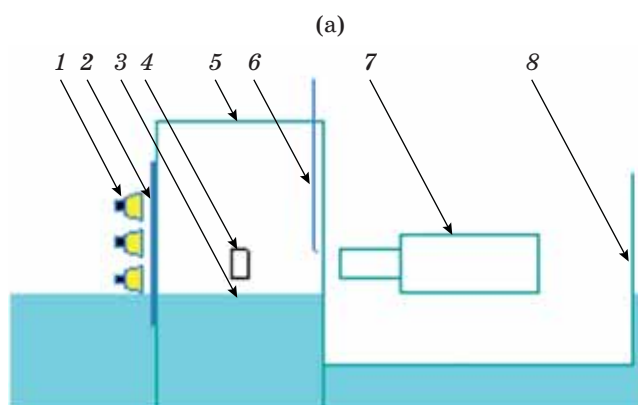


Рис. 1. Схема эксперимента при съёмке капель в канале ВВТСБ, поперечное сечение канала, направление воздушного потока от нас. (а) 1 — светодиодные источники, 2 — матовый экран, 3 — вода в канале, 4 — область съёмки, 5 — крышка канала, 6 — система сдува капель, 7 — высокоскоростная камера, 8 — полупогруженный бокс. (б) Общий вид камеры с установленным объективом HMLL

Fig. 1. Scheme of the experiment on the TSwiWaT, cross section of the flume, the direction of the air flow is away from us. (a) 1 — LED source, 2 — opaque screen, 3 — water in flume, 4 — area of filming, 5 — flume roof, 6 — system of drop blowing from the side wall, 7 — high-speed camera, 8 — semi subwater box for camera. (b) Common view of the camera with HMLL objective

ный объектив-микроскоп High Magnification Lens Lavision (HMLL) для обеспечения высокого разрешения — 10 мкм/пкс с целью детектирования мелких капель. Скорость съёмки была 5000 кадров/секунду. Размер области съёмки 19,6×11 мм (1920×1080 пикселей) с фокусировкой посередине канала. Предварительные эксперименты были проведены для двух значений скорости 19,7 и 29,9 м/с воздушного потока и высоты области съёмки 128 и 280 мм от невозмущённой поверхности. Данные условия были выбраны таким образом, чтобы обеспечить широкий диапазон условий наблюдения капель брызг (разная концентрация, разные размеры). При этом для минимальной скорости визуально (по видео) наблюдалось присутствие капель на максимальной высоте, а для максимальной скорости воздушного потока минимальная высота съёмки была выше уровня гребней волн в этих условиях, чтобы избежать их попадания в кадр. Короткая выдержка в 5 мкс была выбрана, чтобы избежать размазывания изображения капель вдоль направления потока.

Также использовалась система сдува капель с внутренней поверхности стенки канала, через которую велась съёмка, чтобы избежать связанных с ними искажений получаемых изображений.

МЕТОД КАЛИБРОВКИ

Как уже упоминалось выше, ширина области измерения (детектирования) такой системы перпендикулярно плоскости съёмки зависит от глубины фокусировки при съёмке. При этом более мелкие капли при одной и той же дефокусировке (расстоянии до плоскости фокусировки) будут детектироваться хуже (рис. 3). Поэтому нужно получить зависимость ширины области детектирования от размера капли. Для этого нами была создана специальная система для калибровки (рис. 2). Эта система полностью воспроизводит расположение камеры, светильника и стенок канала также как в экспериментах на ВВТСБ. Вместо капель здесь качестве калибровочных объектов были взяты стеклянные микрошарики. Размер микрошариков был предварительно измерен с помощью микроскопа (рис. 2а). Было отобрано восемь микрошариков с размерами от 142 до 617 мкм. Чтобы зафиксировать положение микрошариков на предметном столике перпендикулярно оси съёмки вся система была поставлена в вертикальное положение, в отличие от съёмки на ВВТСБ, которая выполнялась в горизонтальном положении. То есть вне ВВТСБ был полностью промоделирован оптический тракт (рис. 2б) и все расстояния между камерой, светильниками и стенками из оргстекла были теми же самыми.

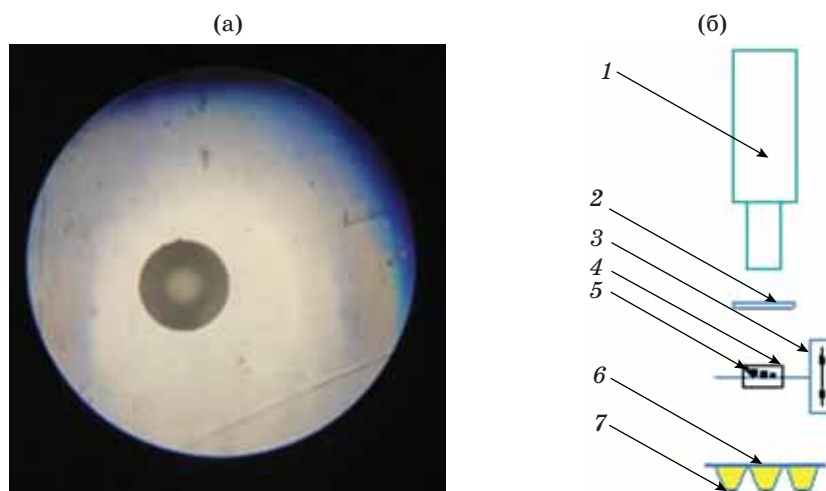


Рис. 2. Изображение с микроскопа Биолам Д11У11, микрошарик диаметром 395 мкм (а). (б) Схема эксперимента с калибровкой, где 1 — высокоскоростная камера, 2 — стеклянная стенка, 3 — подвижный столик, 4 — область съёмки, 5 — микрошарики, 6 — матовый экран, 7 — светодиодные источники

Fig. 2. (a) Image from a Biolam D11U11 microscope, microsphere with a diameter of 395 μm. (b) Scheme of the experiment with calibration. 1 — high-speed camera, 2 — glass wall, 3 — movable table, 4 — filming area, 5 — microspheres, 6 — opaque screen, 7 — LED sources

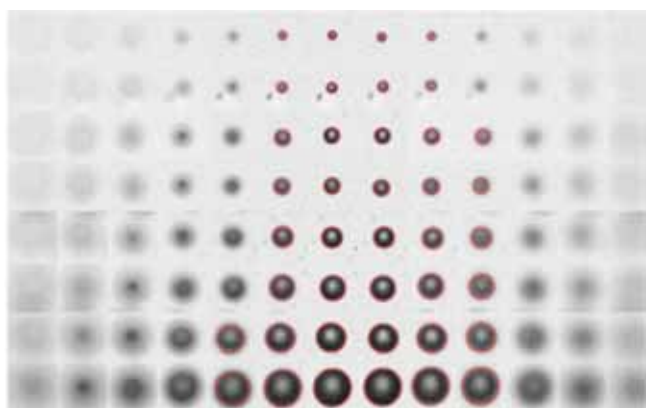


Рис. 3. Матрица изображений калиброванных микрошариков при разных расстояниях от плоскости фокусировки. Размер (диаметры) в мкм, сверху вниз по изображениям: 141,9; 173,2; 253,1; 264,0; 332,3; 404,6; 471,0; 617,4. Расстояния от плоскости фокусировки слева направо в мм: -10, -7, -5, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 5, 7, 10 (минус соответствует расстоянию дальше от камеры)

Fig. 3. Array of images of calibrated microspheres at different distances from the focusing plane. Size (diameters) in microns, from top to bottom in images: 141.9; 173.2; 253.1; 264.0; 332.3; 404.6; 471.0; 617.4. Distances from the focusing plane from left to right in mm: -10, -7, -5, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 5, 7, 10 (minus corresponds to farther distance from the camera)

Для исследования влияния дефокусировки проводилась съёмка, когда предметный столик с калиброванными микрошариками смещался на различные фиксированные расстояния (от -10 до 10 мм относительно плоскости фокусировки). Полученные изображения всех микрошариков на всех расстояниях от плоскости фокусировки были объединены в матрицу (рис. 3).

Был разработан специальный алгоритм цифровой обработки изображений, позволяющий детектировать как изображения микрошариков при калибровочных измерениях, так изображения капель при измерениях на ВВТСБ в условиях воздушного потока над взволнованной водной поверхностью. Вначале алгоритм тестировался на калибровочных изображениях (рис. 4). Он включал в себя следующие стадии: сначала из исходного изображения вычитался фон, проводилось гауссово размытие для удаления шума, пороговое преобразование по яркости, поиск границ методом Канни, морфологическое закрытие, заполнение замкнутых областей, преобразование областей в выпуклые. В итоге проводился поиск и вычисление площади для всех выделенных таким образом областей.

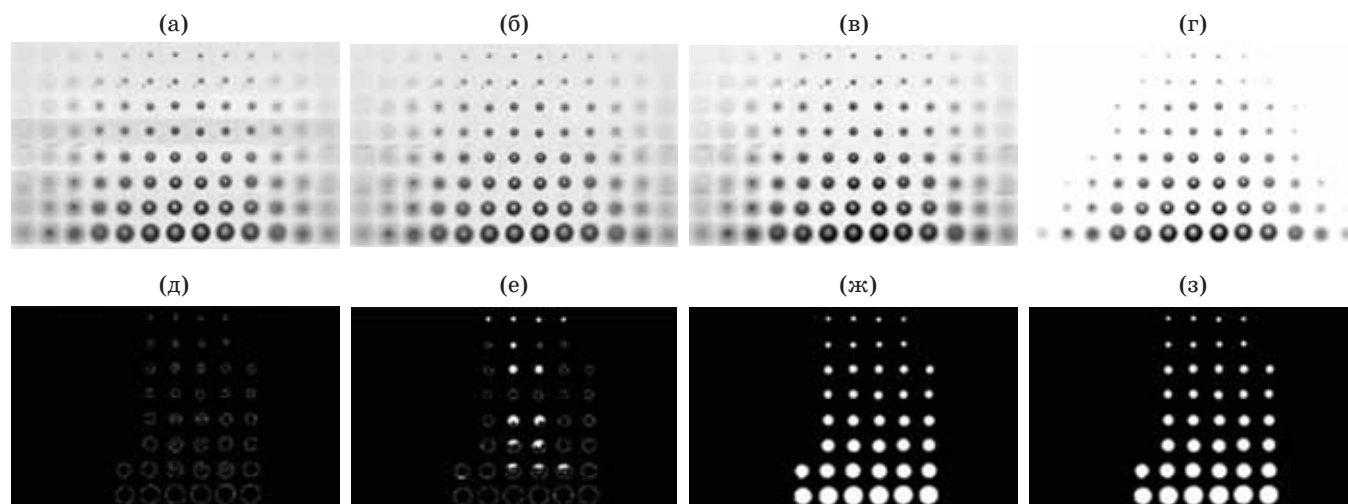


Рис. 4. Последовательность обработки изображений на примере калибровочного стенда сверху вниз: (а) исходное изображение; (б) вычитание фона; (в) гауссово размытие для удаления шума; (г) порог по яркости; (д) поиск границ методом Канни; (е) морфологическое закрытие; (ж) заполнение замкнутых областей; (з) преобразование областей в выпуклые

Fig. 4. The sequence of image processing using the example of a calibration stand from top to bottom: (a) original image; (b) background subtraction; (в) gaussian blur for noise removal; (г) brightness threshold; (д) finding boundaries using the Canny method; (е) morphology closing; (ж) filling closed areas; (з) converting areas to convex

Каждая область соответствовала изображению микрошарика (или капли) на снимке. В качестве размера капли принималось значение радиуса круга, площадь которого эквивалентна площади области изображения капли.

Применяя этот алгоритм к калибровочному изображению каждого микрошарика, можно определить значения смещения от плоскости фокусировки, при которых ещё возможно детектирование его изображения (см. нижнее

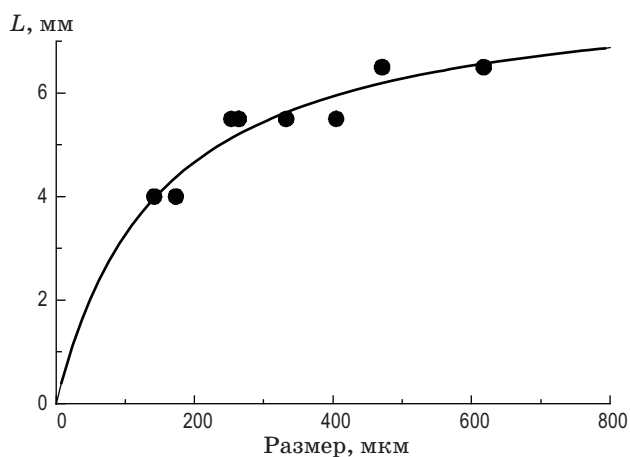


Рис. 5. Зависимость ширины области детектирования от диаметра микрошарика, полученная при обработке калибровочных изображений (рис. 3). Сплошная линия — аппроксимация по формуле (1)

Fig. 5. Dependence of the detection area width on the microsphere diameter, obtained by processing calibration images (from Fig. 3). Solid line — approximation according to formula (1)



Рис. 6. Пример обработки кадра с детектированием капель в воздушном потоке над водной поверхностью на ВВТСБ. Размер изображения 19,6×11 мм

Fig. 6. An example of the frame processing with drops detection in an air flow over a water surface on TSWiWaT. Image size 19.6×11 mm

изображение на рис. 4). Среднее значение смещений для изображений на границе детектирования было использовано для определения полной ширины области измерения для каждого микрошарика (рис. 5). Полученные значения были аппроксимированы следующей зависимостью от радиуса:

$$L = (8,161r - 1,696)/(r + 149,6). \quad (1)$$

Та же самая зависимость была затем использована для обработки изображений капель, полученных уже в основных экспериментах на ВВТСБ. Пример обработки изображений показан на рис. 6.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

После обработки массива всех видеозаписей в экспериментах на ВВТСБ, на кадрах которых детектировались изображения частиц, сначала вычислялось среднее (по кадрам записи) количество частиц определённого радиуса. При этом выполнялся биннинг для определённых интервалов по радиусу. В отличие от работы [7], где ширина интервала была фиксированной во всём диапазоне, в нашей работе, учитывая, что концентрация мелких капель выше, чем крупных, размер интервала увеличивался по логарифмической зависимости с увеличением радиуса (табл.). Таким образом, достигались одинаковые погрешности в определении концентраций во всём диапазоне. Динамический диапазон определения радиуса был выбран от 50 до 500 мкм (табл.). Основная проблема с определением более мелких капель заключалась в том, что из-за очень узкой области фокусировки получить неразмытое изображение удаётся редко. Формула (1), аппроксимирующая зависимость ширины области детектирования, ускоряет спад при стремлении радиуса к нулю. При этом погрешности определения размера сильно возрастают. Верхний предел связан с редкостью детектирования крупных капель и их неправильной формой, что увеличивает погрешности при вычислении радиуса шара, эквивалентного радиуса капле.

В соответствии с определением, данным в [8], среднее количество капель C_i на изображении для i -го интервала бинирования по радиусу, центр которого равен r_i , а ширина Δr_i пере-

Данные для построения распределения объёмных концентраций капель по размерам
 Data for constructing droplet volume concentrations distribution by size

Середина бина r_i , мкм	Размер интервала бина Δr_i , мкм	Ширина области детектирования L_i , мм	Измерительный объём в 10^{-6} , м ³
56,82	14,58	3,52	75,8
73,39	18,83	4,04	87,0
94,79	24,32	4,56	98,3
122,42	31,41	5,06	109,1
158,11	40,56	5,54	119,5
204,21	52,39	5,97	128,7
263,75	67,66	6,36	137,0
340,65	87,39	6,69	144,2
439,96	112,87	6,97	150,5

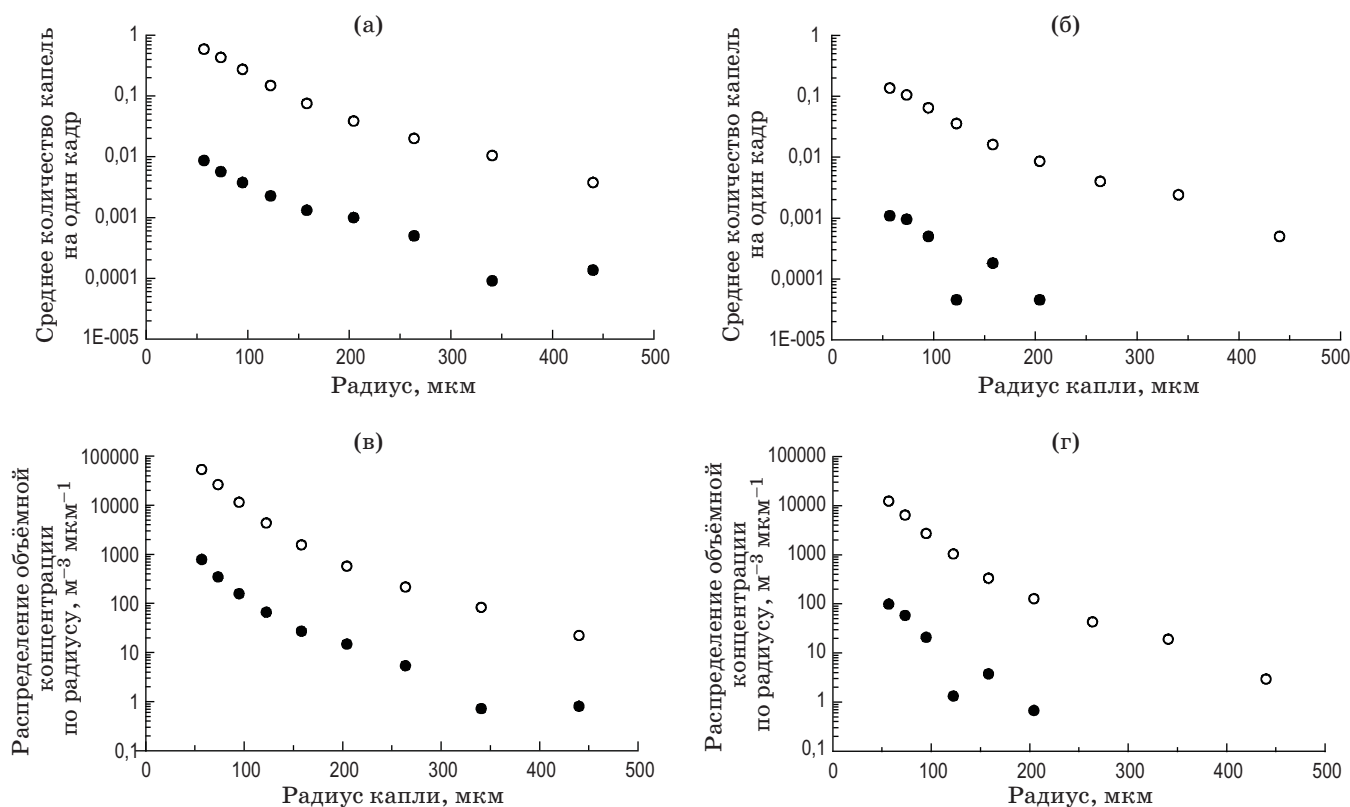


Рис. 7. Зависимость количества изображений капель на одном кадре от их радиуса для высоты 128 мм (а), зависимость количества изображений на одном кадре от радиуса капли для высоты 240 мм (б), зависимость пересчитанной объёмной концентрации от радиуса капли для высоты 128 мм (в), зависимость пересчитанной объёмной концентрации от радиуса капли для высоты 240 мм (г). ● — скорость ветра 19,7 м/с, ○ — скорость ветра 29,9 м/с

Fig. 7. (a) Dependence of the number of droplet images in one frame on their radius for a height of 128 mm, (б) dependence of the number of images in one frame on the radius of a drop for a height of 240 mm, (в) dependence of the recalculated volume concentration on the radius of a drop for a height of 128 mm, (г) dependence of recalculated volume concentration on drop radius for a height of 240 mm. ● — wind speed is equal to 19.7 m/s, ○ — wind speed is equal to 29.9 m/s

считывалась в объёмную концентрацию следующим образом:

$$n(r_i) = \frac{C_i}{S \Delta r_i L_i}, \quad (2)$$

где S — площадь области съёмки, а L_i — ширина области детектирования, определённая в соответствии с зависимостью (1).

Окончательные результаты продемонстрированы на рис. 7. Видно скачкообразное увеличение количества капель с ростом скорости ветра во всём диапазоне размеров. С другой стороны, с увеличением высоты концентрация капель падает. При этом для малой скорости потока капли с радиусом более 200 мкм не смогли достигнуть второго уровня, где проводились измерения, хотя наблюдались на низкой высоте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для проведения исследований характеристик брызг, образующихся при взаимодействии атмосферы и океана в условиях сильных ветров,

в рамках лабораторного моделирования разработан макет установки для измерения распределений объёмных концентраций капель аэрозоля по размерам на основе теневого метода и методика его калибровки, обеспечивающие корректный пересчёт количества изображений капель в их объёмную концентрацию. Для обработки изображений разработан специальный пошаговый алгоритм, включающий в себя процедуры бинаризации по порогу, определения границы методом Канны и замыкание областей. В ходе последующих тестовых измерений в экспериментах на ВВТСБ ИПФ РАН получены распределения концентраций по радиусам при разных условиях ветроволновой обстановки на разных высотах от поверхности. Достигнутое минимальное разрешение по радиусу 50 мкм при детектировании капель является наилучшим среди полученных к настоящему времени результатов с использованием теневых методов в аналогичных исследованиях (сравнивая с [7], [9]).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Fairall C.W., Kepert J., Holland G. The effect of sea spray on surface energy transports over the ocean // *Global Atmos. Ocean Syst.* 1994. V. 2. P. 121–142. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0608.1>
2. Andreas E.L. A review of the sea spray generation function for the open ocean. In *Atmosphere–ocean interactions*. V. 1 (eds W.A. Perrie). Southampton, UK.: WIT Press, 2002. P. 1–46.
3. Veron F. Ocean spray // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2015. V. 47. P. 507–538. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010814-014651>
4. Wang C.S., Street R.L. Transfers across an air-water interface at high wind speeds the effect of spray // *J. Geophys Res.* 1978. V. 8. № 3. P. 2959–2969.
5. Lai R.J., Shemdin O.H. Laboratory study of the generation of spray over water // *J. Geophys. Res.* 1974. V. 79. P. 3055–3063.
6. Fairall C.W., Banner M.L., Peirson W.L., Asher W., Morison R.P. Investigation of the physical scaling of sea spray spume droplet production // *J. of Geophys. Res.* 2009. V. 114. C10001. <https://doi.org/10.1029/2008JC004918>
7. Ortiz-Suslow D.G., Haus B.K., Mehta S., Laxague N.J. Sea spray generation in very high winds // *J. Atmos. Sci.* 2016. V. 73. P. 3975–3995. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-15-0249.1>
8. Troitskaya Y., Kandaurov A., Ermakova O., Kozlov D., Sergeev D., Zilitinkevich S. Bag-breakup fragmentation as the dominant mechanism of sea-spray production in high winds // *Sci. Rep.* 2017. V. 7. P. 1614. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01673-9>
9. Veron F., Hopkins C., Harrison E.L., Mueller J.A. Sea spray spume droplet production in high wind speeds //

REFERENCES

1. Fairall C.W., Kepert J., Holland G. The effect of sea spray on surface energy transports over the ocean // *Global Atmos. Ocean Syst.* 1994. V. 2. P. 121–142. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0608.1>
2. Andreas E.L. A review of the sea spray generation function for the open ocean. In *Atmosphere–ocean interactions*. V. 1 (eds W.A. Perrie). Southampton, UK.: WIT Press, 2002. P. 1–46.
3. Veron F. Ocean spray // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2015. V. 47. P. 507–538. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010814-014651>
4. Wang C.S., Street R.L. Transfers across an air-water interface at high wind speeds the effect of spray // *J. Geophys Res.* 1978. V. 8. № 3. P. 2959–2969.
5. Lai R.J., Shemdin O.H. Laboratory study of the generation of spray over water // *J. Geophys. Res.* 1974. V. 79. P. 3055–3063.
6. Fairall C.W., Banner M.L., Peirson W.L., Asher W., Morison R.P. Investigation of the physical scaling of sea spray spume droplet production // *J. of Geophys. Res.* 2009. V. 114. C10001. <https://doi.org/10.1029/2008JC004918>
7. Ortiz-Suslow D.G., Haus B.K., Mehta S., Laxague N.J. Sea spray generation in very high winds // *J. Atmos. Sci.* 2016. V. 73. P. 3975–3995. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-15-0249.1>
8. Troitskaya Y., Kandaurov A., Ermakova O., Kozlov D., Sergeev D., Zilitinkevich S. Bag-breakup fragmentation as the dominant mechanism of sea-spray production in high winds // *Sci. Rep.* 2017. V. 7. P. 1614. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01673-9>
9. Veron F., Hopkins C., Harrison E.L., Mueller J.A. Sea spray spume droplet production in high wind speeds //

- Geophys. Res. Lett. 2012. V. 39. L16602. <https://doi.org/10.1029/2012GL052603>
10. Anguelova M., Barber R.P., Wu J. Spume drops produced by the wind tearing of wave crests // J. Phys. Oceanogr. 1999. V. 29. P. 1156–1165. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1999\)029<1156:SDPBTW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1999)029<1156:SDPBTW>2.0.CO;2)
11. Меденников П.А. Алгоритм обнаружения и определения координат точечного объекта // Оптический журнал. 2019. Т. 86. № 8. С. 65–69. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2019-86-08-65-69>
12. Меденников П.А., Павлов Н.И. Обнаружение и сопровождение точечных слабоизлучающих объектов на основе анализа последовательности минисерий изображений // Оптический журнал. 2021. Т. 88. № 12. С. 50–58. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2021-88-12-50-58>
13. Troitskaya Y., Kandaurov A., Ermakova O., Kozlov D., Sergeev D., Zilitinkevich S. The ‘Bag Breakup’ spume droplet generation mechanism at high winds. Part I: Spray generation function // J. Phys. Oceanogr. 2018. V. 48. № 9. P. 2167–2188. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-17-0104.1>
- Geophys. Res. Lett. 2012. V. 39. L16602. <https://doi.org/10.1029/2012GL052603>
10. Anguelova M., Barber R.P., Wu J. Spume drops produced by the wind tearing of wave crests // J. Phys. Oceanogr. 1999. V. 29. P. 1156–1165. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1999\)029<1156:SDPBTW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1999)029<1156:SDPBTW>2.0.CO;2)
11. Medennikov P.A. Algorithm for detecting and determining the coordinates of a point object // Journal of Optical Technology. 2019. V. 86. № 8. P. 510–514. <https://doi.org/10.1364/JOT.86.000510>
12. Medennikov P.A., Pavlov N.I. Detection and tracking of weakly emitting point objects based on the analysis of a sequence of miniseries of images // Journal of Optical Technology. 2021. V. 88. № 12. P. 716–721. <https://doi.org/10.1364/JOT.88.000716>
13. Troitskaya Y., Kandaurov A., Ermakova O., Kozlov D., Sergeev D., Zilitinkevich S. The ‘Bag Breakup’ spume droplet generation mechanism at high winds. Part I: Spray generation function // J. Phys. Oceanogr. 2018. V. 48. № 9. P. 2167–2188. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-17-0104.1>

АВТОРЫ

Даниил Александрович Сергеев — канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией, Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова–Грехова Российской академии наук (ИПФ РАН), 603950, Нижний Новгород, Россия; Scopus ID:6603887343; <https://orcid.org/0000-0003-4910-3935>; daniil@ipfran.ru

Иван Михайлович Краев — младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова–Грехова Российской академии наук (ИПФ РАН), 03950, Нижний Новгород, Россия; Scopus ID: 57205167268; <https://orcid.org/0000-0003-3523-6681>; ikraev@ipfran.ru

Статья поступила в редакцию 25.09.2023
Одобрена после рецензирования 14.11.2023
Принята к печати 29.02.2024

AUTHORS

Daniil A. Sergeev — PhD in Physics and Mathematics, Head of Laboratory in Federal Research Center Gaponov–Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS), 603950, Nizhny Novgorod, Russia, Scopus ID: 6603887343; <https://orcid.org/0000-0003-4910-3935>; daniil@ipfran.ru

Ivan M. Kraev — Junior Researcher, Federal Research Center Gaponov–Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS), 603950, Nizhny Novgorod, Russia; Scopus ID: 57205167268; <https://orcid.org/0000-0003-3523-6681>; ikraev@ipfran.ru

The article was submitted to the editorial office 25.09.2023
Approved after review 14.11.2023
Accepted for publication 29.02.2024