

УДК 535.42

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕМА С ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ЧАСТИЦ НА ОСНОВЕ КОНТУРНОГО И КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Т.Ю. Николаева^а, Н.В. Петров^а

^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, paltanya@mail.ru

Аннотация. Предметом исследования являются техники определения статистики частиц, в частности, методы обработки изображений частиц, полученных при когерентной подсветке. Рассматривается задача распознавания и статистического учета индивидуальных изображений малых рассеивающих частиц в произвольном сечении объема в случае их высокой концентрации. Для автоматического распознавания изображений сфокусированных частиц использовался специальный алгоритм статистического анализа на основе оконтуривания и пороговой обработки. С использованием математического аппарата скалярной теории дифракции были смоделированы когерентные изображения частиц, сформированные оптической системой с высокой числовой апертурой. Проведена численная апробация предложенного метода для случаев различных концентраций и распределений частиц по объему. В результате получены распределения плотности и массовой доли частиц и определена эффективность метода при работе с изображениями частиц различной концентрации. При высоких концентрациях усиливается проявление эффекта когерентного наложения частиц из соседних плоскостей, что делает затруднительным распознавание изображений частиц с помощью рассмотренного в работе алгоритма. В этом случае мы предлагаем дополнить методику вычислением функции взаимной корреляции изображений частиц соседних сегментов объема и оценкой отношения высоты корреляционного пика к высоте пьедестала функции в случае различных характеров распределения. Рассмотренный в работе способ статистического учета частиц имеет важное практическое значение при исследовании объема с частицами различной природы, например, в задачах биологии и океанологии. Эффективная работа в режиме высоких концентраций расширяет пределы применимости рассматриваемых методов на практически важные случаи и позволяет оптимизировать время определения характера распределения и статистических характеристик частиц.

Ключевые слова: обработка изображений, численное моделирование, лазерная анемометрия по изображениям частиц.

Благодарности. Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01). Н.В. Петров благодарит за поддержку Министерство образования и науки Российской Федерации, проект № 2014/190 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания.

VOLUME STUDY WITH HIGH DENSITY OF PARTICLES BASED ON CONTOUR AND CORRELATION IMAGE ANALYSIS

T.Yu. Nikolaeva^а, N.V. Petrov^а

^а ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, paltanya@mail.ru

Abstract. The subject of study is the techniques of particle statistics evaluation, in particular, processing methods of particle images obtained by coherent illumination. This paper considers the problem of recognition and statistical accounting for individual images of small scattering particles in an arbitrary section of the volume in case of high concentrations. For automatic recognition of focused particles images, a special algorithm for statistical analysis based on contouring and thresholding was used. By means of the mathematical formalism of the scalar diffraction theory, coherent images of the particles formed by the optical system with high numerical aperture were simulated. Numerical testing of the method proposed for the cases of different concentrations and distributions of particles in the volume was performed. As a result, distributions of density and mass fraction of the particles were obtained, and the efficiency of the method in case of different concentrations of particles was evaluated. At high concentrations, the effect of coherent superposition of the particles from the adjacent planes strengthens, which makes it difficult to recognize images of particles using the algorithm considered in the paper. In this case, we propose to supplement the method with calculating the cross-correlation function of particle images from adjacent segments of the volume, and evaluating the ratio between the height of the correlation peak and the height of the function pedestal in the case of different distribution characters. The method of statistical accounting of particles considered in this paper is of practical importance in the study of volume with particles of different nature, for example, in problems of biology and oceanography. Effective work in the regime of high concentrations expands the limits of applicability of these methods for practically important cases and helps to optimize determination time of the distribution character and statistical characteristics of the particles.

Keywords: images processing, numerical simulation, particle image velocimetry.

Acknowledgements. The work has been partially financially supported by the Government of the Russian Federation (grant 074-U01). N.V. Petrov expresses thanks to the Russian Federation Ministry of Education and Science for federal projects support (project № 2014/190) in the sphere of scientific activity within a basic part of the government order.

Введение

Сложно переоценить важность методов цифровой обработки изображений частиц и их статистического учета. Область применения этих методов включает в себя фундаментальные научные исследования, такие как изучение динамики потоков частиц (газодинамики двухфазных потоков, сверхзвуковых потоков, гидродинамики течений, аэродинамики вертолетов) [1, 2], исследование частиц разной природы в задачах океанологии и биологии [3], исследование прозрачных сред [4]. Помимо этого, методы цифровой

обработки изображений также находят применение при решении многих практических задач, таких как впрыск топлива, сельскохозяйственные спреи, фармацевтика, распылительная сушка продуктов питания. Здесь особую важность приобретает знание статистических характеристик распределения частиц в объеме среды, таких как характер распределения, размеры и концентрация частиц.

Существует множество методов обработки изображений частиц, полученных при когерентной подсветке, среди которых можно выделить метод лазерной анемометрии по изображениям частиц – PIV (particle image velocimetry) [5] и методы цифровой голографии – DH (digital holography) [6]. PIV наиболее широко используется для визуализации различных потоков жидкости или газа. Однако в классических методах PIV можно получить только две компоненты скорости потока в двух пространственных координатах в плоскости измерения. В связи с этим в настоящее время большое применение в области обработки изображений частиц нашли методы цифровой голографии. Благодаря своему главному преимуществу, способности записывать и реконструировать 3D-изображения тестового объема в масштабе реального времени, эти методы используются при решении задач детектирования частиц и определения их размера и положения в объеме [7], а также для анализа движущихся частиц и измерения полей скоростей потоков (цифровые голографические методы лазерной анемометрии по изображениям частиц DH PIV) [8]. Однако возможности широкого практического применения DH PIV-методов для анализа как потоков частиц, так и частиц, взвешенных в объеме оптической среды, существенно ограничены вследствие того, что запись голограммы с опорной волной требует высокой стабильности опорного и предметного пучков. А это подразумевает необходимость работы в лабораторных условиях с виброизоляцией. В дополнение к этому, наличие опорной волны увеличивает количество оптических элементов в схеме, что усложняет работу с ней. Кроме того, в работах, использующих DH-методы, речь идет о малых концентрациях частиц [9, 10]. Особое внимание при этом уделяется именно качеству восстановления изображений частицы и точности определения ее 3D-координат в объеме. Однако с практической точки зрения не менее важным является исследование точности существующих методов в случае высоких плотностей частиц в объеме среды. К сожалению, опубликованных работ, посвященных этому вопросу, нам найти не удалось.

Целью настоящей работы является решение задачи распознавания и статистического учета индивидуальных изображений малых рассеивающих частиц в произвольном сечении объема в случае их высокой концентрации. Ввиду упомянутых выше особенностей DH-методов в качестве базового метода мы решили использовать одну из современных модификаций PIV-техник [11], которая заключается в использовании алгоритма статистического анализа частиц на основе оконтуривания и пороговой обработки. В результате численной апробации исследуемого метода с использованием специально разработанной имитационной модели были получены распределения плотности и массовой доли частиц для случаев различной плотности частиц и их распределений по объему, а также определена эффективность метода при работе с изображениями частиц различной концентрации. В случае, когда плотности частиц в объеме среды слишком высоки, чтобы эффективно распознавать их посредством предложенного метода, мы предлагаем дополнить методику вычислением функции взаимной корреляции изображений двух соседних сегментов объема для определения характера распределения частиц по нему.

Имитационная модель для исследования индивидуальных изображений частиц

Для апробации исследуемого метода и оценки его эффективности в качестве инструмента для статистического учета взвешенных в объеме рассеивающих частиц была разработана специальная имитационная модель в многофункциональной среде National Instruments LabVIEW.

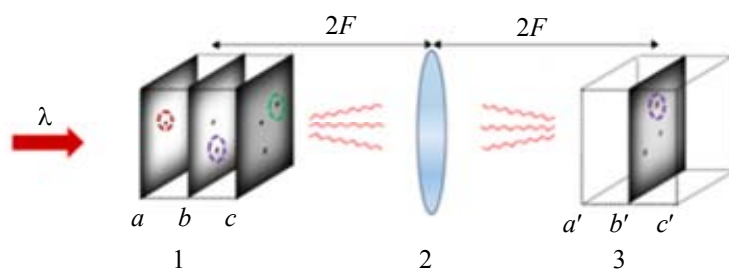


Рис. 1. Распределение интенсивности волнового поля, продифрагировавшего на трех частицах в объеме оптической среды, регистрируемое в плоскости b' : 1 – объем среды, разбитый на сегменты a , b , c ; 2 – линза; 3 – плоскость изображения

На рис. 1 представлена схема оптической системы, формирующей изображение объема среды с частицами. Электромагнитное излучение, проходя через объем среды, разбитый предварительно на сегменты (a , b , c на рис. 1), дифрагирует на частицах, находящихся в этих сегментах. Сфокусированное изображение частиц, находящихся в определенном сегменте объема (сегмент b), переносится в плоскость регистрации с помощью линзы. Линза имеет высокую числовую апертуру, что позволяет различать изображения частиц, находящихся в различных плоскостях объема. Полученное изображение частиц (b' на

рис. 1) является результатом когерентного наложения частиц, расположенных в различных сегментах объема. В численном эксперименте, меняя расстояния, на которое производился расчет волнового поля из плоскости сегмента объема в плоскость линзы, были получены сфокусированные изображения различных плоскостей из объема оптической среды. При этом частицы из соседних плоскостей принимали вид расфокусированных пятен.

Чтобы разрабатываемая модель объемной оптической среды максимально близко соответствовала условиям, наиболее часто имеющим место в задачах исследования частиц, рассматривались два распределения: случайное (равновероятное по сегментам) и нормальное, реализуемое в численной модели с помощью преобразования Бокса–Мюллера (случайные величины распределены по нормальному закону относительно оптической оси [12]). Для расчета распространения электромагнитного поля через объем оптической среды и оптическую систему использовался метод распространения углового спектра плоских волн, позволяющий рассчитать распространение волнового поля между двумя близко расположенными плоскостями (x_1, y_1) и (x_2, y_2) , находящимися на расстоянии Δl [13]:

$$U(x_2, y_2, \Delta l) = \iint_{-\infty}^{+\infty} \hat{F}(f_x, f_y) \exp\left(ik\Delta l \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2}\right) \exp[i2\pi(f_x x + f_y y)] df_x df_y,$$

где $\hat{F}(f_x, f_y)$ – преобразование Фурье волнового поля во входной плоскости $U(x_1, y_1)$; f_x, f_y – пространственные частоты.

Принципы метода статистического учета частиц на основе автоматического оконтуривания и пороговой обработки

Обрабатываемые изображения представляют собой наборы сфокусированных и расфокусированных изображений частиц из всех сегментов объема, накладывающихся друг на друга. Для автоматического распознавания изображений сфокусированных частиц в заданном сегменте объема использовался специальный алгоритм статистического анализа на основе оконтуривания и пороговой обработки [1], подробно описанный в [14].

В изначальном варианте алгоритм был разработан для работы с протяженными изображениями треков частиц. В данной работе алгоритм был адаптирован для изображений, взвешенных в объеме частиц круглой формы: изменены параметры срабатывания механизма оконтуривания на основе априорной информации о строении частиц. Используемый алгоритм заключается в следующем: выделяются примерные области, внутри которых находятся изображения сфокусированных частиц; затем программа, сканируя выделенные фрагменты изображения вдоль и поперек, находит в них двойные перепады яркости от светлого к темному и обратно и тем самым определяет координаты частиц; далее, считывая результаты, полученные на предыдущих этапах, строятся радиальные распределения, распределения плотности и массовой доли исследуемых частиц в плоскости изображения.

Корреляционная обработка изображений частиц в случае высоких концентраций

В случае, когда концентрация частиц высока, их изображения накладываются таким образом, что использование алгоритма, основанного на оконтуривании и пороговой обработке, становится недостаточно эффективным. Здесь применение корреляционного анализа изображений частиц может служить дополнительным инструментом при исследовании частиц, распределенных по объему. В отличие от обычного корреляционного анализа, применяемого для оценки перемещений по координатам корреляционного пика [11], и метода, представленного в [15], где оценивается автокорреляционная функция распределения интенсивности поля в плоскости наблюдения (радиус корреляции), мы предлагаем использовать корреляционный анализ изображений частиц соседних сегментов объема. Функция взаимной корреляции для двух изображений соседних сегментов рассчитывалась с использованием серии двумерных преобразований Фурье [16] вида

$$c(\Delta x, \Delta y, t) = \hat{F}^{-1} [H^*(\xi, \eta, 0) H(\xi, \eta, t)],$$

где $\Delta x, \Delta y$ – относительные координаты в плоскости изображения; ξ, η – пространственно-частотные компоненты; \hat{F}^{-1} – обратное преобразование Фурье; $H(\xi, \eta, 0)$ и $H(\xi, \eta, t)$ – двумерные преобразования Фурье от отклонений от средних распределений интенсивности фрагментов изображений, * – комплексное сопряжение.

По построенным сечениям функции взаимной корреляции изображений двух соседних сегментов объема по одной из координат изображения рассматривалось соотношение высоты корреляционного пика к высоте пьедестала функции, что позволило определять характер распределения частиц в случае их высокой концентрации.

Статистическое исследование когерентных изображений частиц, взвешенных в объеме оптической среды

Для получения качественных и количественных характеристик распределений частиц, взвешенных в объеме оптической среды, была проведена статистическая обработка сфокусированных изображений частиц. Для различных значений концентраций частиц в объеме рассматривалась тестовая выборка из 10 изображений, полученных при одинаковых параметрах. На рис. 2 представлены результаты моделирования сфокусированных изображений частиц на один поперечный сегмент объема для случайного и нормального распределений частиц по объему, а также обозначены координаты распознанных с помощью описанного выше алгоритма изображений частиц для всех 10 изображений из тестовой выборки. Исследуемый объем среды $3 \times 3 \times 3$ мм в ходе численного эксперимента делился на 20 сегментов, шаг сетки $\Delta x = 6$ мкм, $\lambda = 632,8$ нм, фокусное расстояние формирующей изображение линзы $f = 29$ мм, диаметр частицы $d = 0,05$ мм. Можно заметить, что в обоих случаях попавшие на границы или вблизи границ объема частицы не распознаются, что обусловлено использованием квадратной аподизирующей диафрагмы при моделировании.

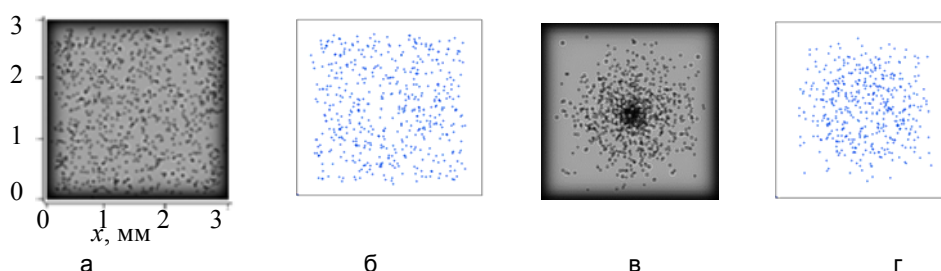


Рис. 2. Сфокусированные изображения частиц (концентрация частиц в одном сегменте (плоскости) объема $K = 50$): случайное распределение (а), нормальное распределение (в); результаты распознавания частиц: случайное распределение (б), нормальное распределение (г)

Были построены зависимости нормированных распределений плотности частиц в плоскости изображения и нормированные распределения массовой доли частиц (рис. 3), где n – концентрация частиц в единице объема; K/K_{\max} – нормированные на максимальное значение плотности частиц; Kn/Kn_{\max} – нормированные на максимальное значение массовые доли частиц. Из рисунка видно, что в случае равномерного распределения частиц по объему полученные в результате численного моделирования распределения плотности хорошо соотносятся с пуассоновской статистикой. Однако при больших концентрациях частиц на сегмент объема распознаются также некоторые частицы, не принадлежащие исследуемому сегменту, и, как следствие, наблюдаются незначительные флуктуации массовой доли частиц (рис. 3, е). Когда частицы распределены по объему по нормальному закону, имеет место меньшее соответствие распределений частиц пуассоновской статистике; так как большинство частиц локализуется ближе к центру оптической оси, выделить частицы, находящиеся в исследуемом сегменте, становится затруднительным. На рис. 3, ж, з, четко видны флуктуации массовой доли частиц. Это говорит о том, что в случае нормального распределения эффект когерентного наложения частиц из соседних плоскостей проявляется уже при малых концентрациях частиц, что делает затруднительным распознавание изображений частиц с помощью рассмотренного в работе алгоритма при больших концентрациях.

Для оценки эффективности работы алгоритма была построена зависимость количества распознанных (пойманных) частиц от изначально заданного количества на один сегмент объема (рис. 4). Видно, что в случае равномерного распределения частиц по объему при концентрации частиц больше 100 на один сегмент объема происходит довольно резкое ухудшение эффективности работы программы ввиду невозможности распознать более 10% от заданного количества частиц. В случае стандартного нормального распределения невозможность распознавания более 10% частиц возникает уже при меньших концентрациях.

Для случая больших концентраций мы предлагаем дополнить метод расчетом взаимной корреляционной функции для двух изображений соседних сегментов объема. В одном изображении мы имеем дело со сфокусированными частицами из одного сегмента, в другом изображении эти частицы принимают вид расфокусированных пятен, и в фокусе находятся частицы из соседнего сегмента. На рис. 5 представлены результаты расчета взаимной корреляционной функции для двух изображений, а также сечения этой функции по одной из координат изображения. Корреляционная функция вычислялась от изображения меньшего размера, что было обусловлено наличием аподизирующей диафрагмы, а также локализацией частиц преимущественно в непосредственной близости от оптической оси в случае нормального распределения.

Графики сечений функции взаимной корреляции двух изображений показывают, что в случае равномерного распределения с увеличением концентрации частиц увеличивается корреляционные связи между элементами изображений соседних сегментов объема, и изображения частиц все меньше поддаются распознаванию методами компьютерной обработки. Это заметно по уменьшению пьедестала пика (a – на рис. 5, г) и увеличению пика корреляционной функции (b – на рис. 5, г). Однако в случае нормаль-

ного распределения наблюдается противоположная ситуация: увеличение концентрации частиц на один сегмент объема ведет к уменьшению корреляционных связей между элементами изображений. Изображения соседних сегментов объема становятся хорошо различимыми, но при этом, как обсуждалось выше, при таких больших концентрациях происходит значительная потеря информации о частицах.

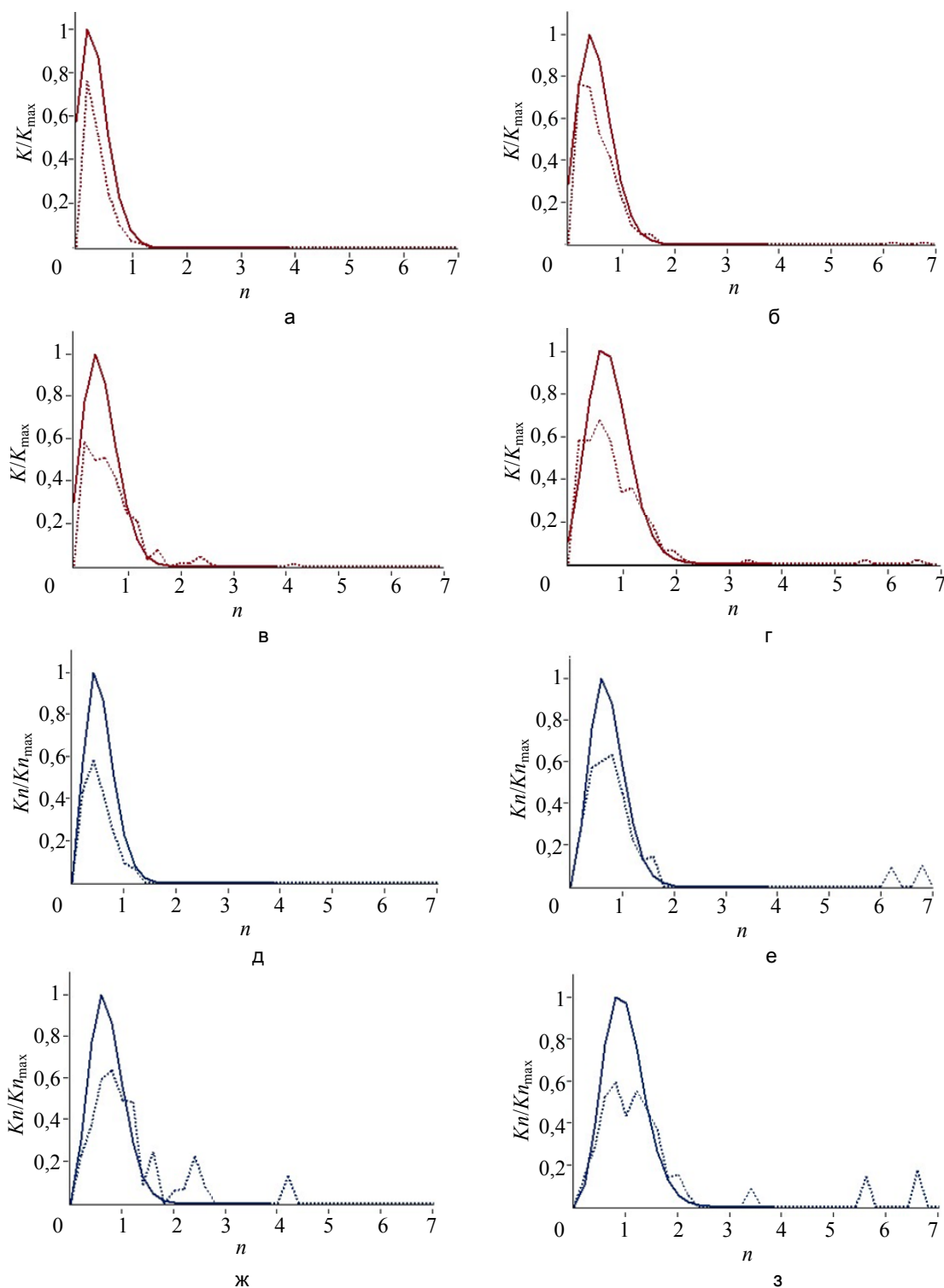


Рис. 3. Рассчитанные согласно пуассоновской статистике (сплошная кривая) и полученные в результате численного моделирования (пунктирная кривая) нормированные распределения плотности частиц в плоскости изображения (а)–(г): первая строка – случайное распределение ($K = 50$ и $K = 150$ соответственно), вторая строка – нормальное распределение ($K = 50$ и $K = 150$); рассчитанные согласно пуассоновской статистике (сплошная кривая) и полученные в результате численного моделирования (пунктирная кривая) нормированные распределения массовой доли частиц (д)–(з): третья строка – случайное распределение ($K = 50$ и $K = 150$), четвертая строка – нормальное распределение ($K = 50$ и $K = 150$)

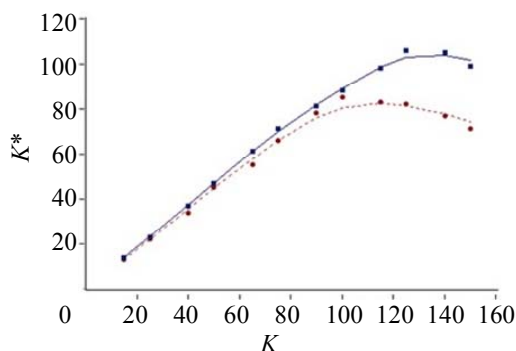


Рис. 4. Зависимость количества распознанных частиц K^* от изначально заданного количества частиц в одном сегменте объема K : случайное распределение (синяя кривая) и нормальное распределение (красная кривая)

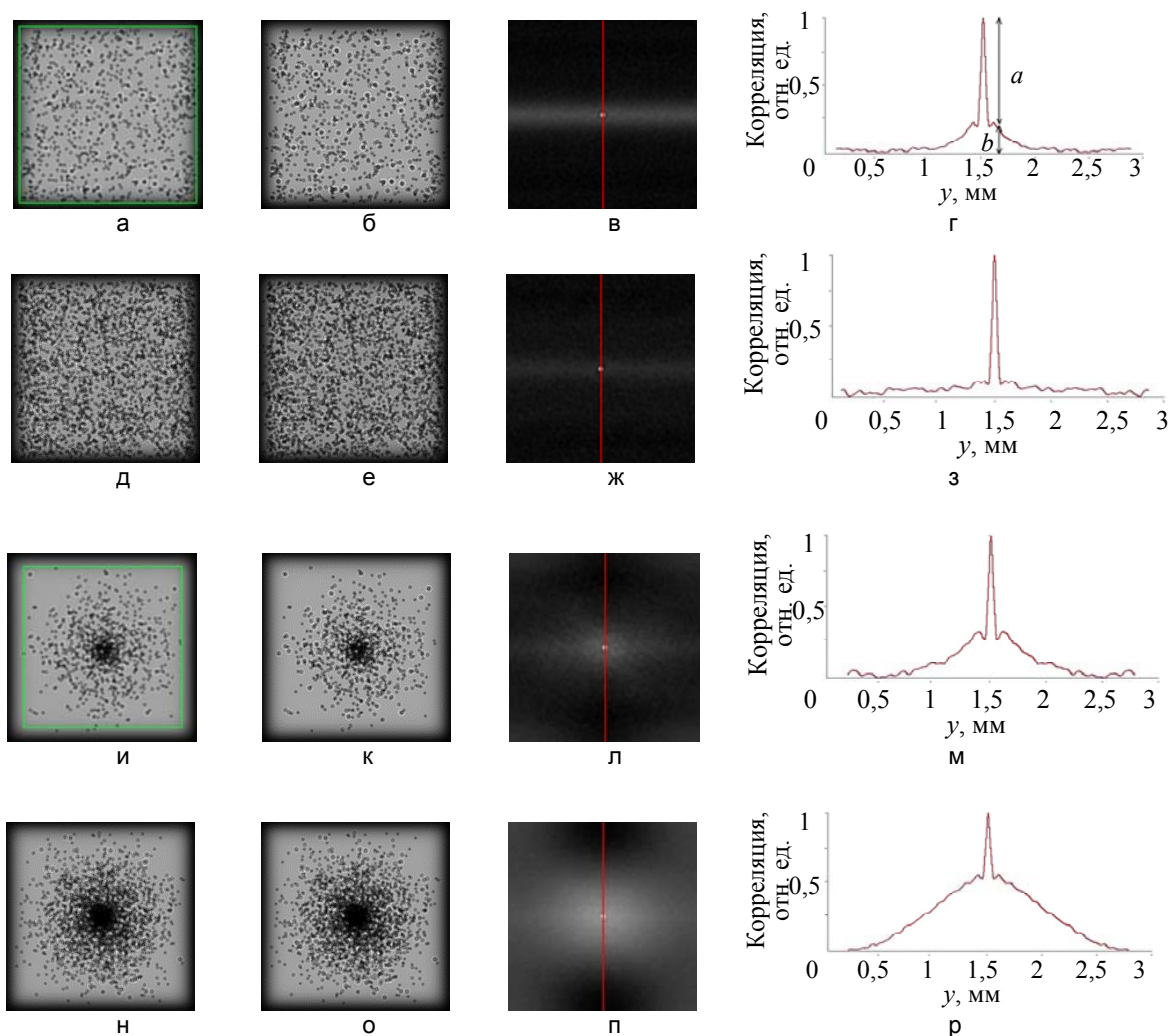


Рис. 5. Результаты корреляционного анализа изображений для случаев распределения частиц: по случайному закону (а)–(з), по нормальному закону (и)–(р): использованные изображения частиц (первые два столбца), нормированная функция взаимной корреляции (третий столбец) и сечение этой функции (последний столбец) для различных концентраций: $K = 50$ (а)–(г), (и)–(м); $K = 150$ (д)–(з), (н)–(р)

Заключение

В работе проведено исследование и предложено решение задачи распознавания и статистического учета индивидуальных изображений малых рассеивающих частиц в произвольном сечении объема в случае их высокой концентрации. Разработана специальная имитационная модель, позволяющая численно моделировать объем среды с распределенными по нему частицами, обладающими такими различными характеристиками, как размер, концентрация и характер распределения по объему. Для исследования ста-

тики взвешенных частиц круглой формы был адаптирован алгоритм статистического анализа на основе оконтуривания и пороговой обработки. В результате численной апробации исследуемого метода с использованием специально разработанной имитационной модели были получены распределения плотности и массовой доли частиц для случаев различных концентраций и законов распределений частиц по объему. В работе были установлены предельные концентрации частиц, при которых удастся распознать изображения отдельных частиц с помощью используемого алгоритма. В дополнение к совокупности таких техник, как автоматическое оконтуривание и пороговая обработка, предложено использование корреляционного анализа изображений частиц из двух соседних плоскостей объема. Оценка отношения высоты корреляционного пика к высоте пьедестала функции взаимной корреляции позволила определить характер распределения частиц даже при высоких концентрациях, когда стандартный метод оконтуривания дает ошибочные результаты. Предложенный подход к задаче статистического учета взвешенных в объеме частиц обладает рядом преимуществ перед распространенными ДН-методами, в частности, простотой его практической реализации.

Литература

1. Воронецкий А.В., Михайлов В.Н., Петров Н.В., Стаселько Д.И. Измерение пространственно-временных параметров движения самосветящихся частиц в сверхзвуковом высокотемпературном потоке // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 1. С. 18–24.
2. Pereira F., Gharib M. Defocusing digital particle image velocimetry and the three-dimensional characterization of two-phase flows // Measurement Science and Technology. 2002. V. 13. N 5. P. 683–694.
3. Dyomin V.V., Olshukov A.S. Digital holographic video for studying biological particles // Journal of Optical Technology. 2012. V. 79. N 6. P. 344–347.
4. Johansson E.-L., Benckert L., Sjudahl M. Phase object data obtained from defocused laser speckle displacement // Applied Optics. 2004. V. 43. N 16. P. 3229–3234.
5. Peterson K., Regaard B., Heinemann S., Sick V. Single-camera, three-dimensional particle tracking velocimetry // Optics Express. 2012. V. 20. N 8. P. 9031–9037.
6. Pitkääho T., Niemelä M., Pitkääkangas V. Partially coherent digital in-line holographic microscopy in characterization of a microscopic target // Applied Optics. 2014. V. 53. N 15. P. 3233–3240.
7. Malek M., Allano D., Coëtmellec S., Lebrun D. Digital in-line holography: influence of the shadow density on particle field extraction // Optics Express. 2004. V. 12. N 10. P. 2270–2279.
8. Zhang Y., Shen G., Schroder A., Kompenhans J. Influence of some recording parameters on digital holographic particle image velocimetry // Optical Engineering. 2006. V. 45. N 7. Art. 075801.
9. Yang W., Kostinski A.B., Shaw R.A. Depth-of-focus reduction for digital in-line holography of particle fields // Optics Letters. 2005. V. 30. N 11. P. 1303–1305.
10. Singh D.H., Panigrahi P.K. Improved digital holographic reconstruction algorithm for depth error reduction and elimination of out-of-focus particles // Optics Express. 2010. V. 18. N 3. P. 2426–2448.
11. Petrov N.V., Bepalov V.G., Zhevlakov A.P., Soldatov Yu.I. Determining the velocity of an object in water, using digital speckle-photography // Journal of Optical Technology. 2007. V. 74. N 11. P. 779–782.
12. Box G.E.P., Muller M.E. A note on the generation of random normal deviates // Ann. Math. Stat. 1958. V. 29. N 2. P. 610–611.
13. Goodman J.W. Introduction to Fourier Optics. NY: McGraw-Hill, 1961. 441 p.
14. Воронецкий А.В., Михайлов В.Н., Петров Н.В., Стаселько Д.И. Экспериментальное исследование пространственно-скоростных параметров частиц в сверхзвуковом двухфазном потоке // Труды НИЦ фотоники и оптоинформатики. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. С. 347–359.
15. Павлов П.В., Петров Н.В., Малов А.Н. Определение параметров шероховатости и дефектация поверхностей деталей воздушного судна с применением спиральных пучков лазерного излучения // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2011. № 6 (76). С. 84–88.
16. Synnergren P., Larsson L., Lundström S. Digital speckle photography: visualization of mesoflow through clustered fiber networks // Applied Optics. 2002. V. 41. N 7. P. 1368–1373.

- Николаева Татьяна Юрьевна** – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, paltanya@mail.ru
- Петров Николай Владимирович** – кандидат физико-математических наук, доцент, соискатель, Университет ИТМО, ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Nickolai.petrov@gmail.com
- Tatyana Yu. Nikolaeva** – student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, paltanya@mail.ru
- Nikolai V. Petrov** – PhD, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, n.petrov@niuitmo.ru

Принято к печати 10.09.14

Accepted 10.09.14