ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
Т. 56, № 7 ФИЗИКА 2013

УДК 535:778.38:004.932

В.В. ДЁМИН, Д.В. КАМЕНЕВ**

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОСКОСТИ НАИЛУЧШЕЙ ФОКУСИРОВКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ЧАСТИЦЫ, ВОССТАНОВЛЕННОГО С ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАММЫ

Исследован метод определения плоскости наилучшей фокусировки, основанный на анализе граничного контраста и граничного перепада изображений частиц, восстановленных с цифровых голограмм. Проведена апробация метода на изображениях, восстановленных как с реальных, так и с численно рассчитанных голограмм. Выполнено сравнение предлагаемого метода с существующими способами определения положения плоскости наилучшей фокусировки, выявлены его преимущества, погрешности, ограничения.

Ключевые слова: *цифровая голография частиц, плоскость наилучшей фокусировки, критерии качества изображения, граничный контраст, граничный перепад.*

Введение

Методы цифровой голографии позволяют детально исследовать частицы размерами от сотни микрометров и выше, в результате чего они востребованы при исследовании частиц в различных средах в лабораторных и натурных условиях, например аэрозольных частиц в облаках и в модельных условиях [1, 2], планктонных частиц в их естественной среде обитания [3].

В подобных задачах цифровая голография используется не только для детального исследования формы, ориентации и измерения размеров частиц, но и для определения их положения в пространстве с целью последующего исследования динамики, построения траектории движения и т.п. Поскольку реальная частица (например, планктонная особь) может иметь достаточно большие размеры (от сотни микрометров до сантиметров), наиболее сложной задачей является определение ее координат. Обычно в качестве продольной координаты используют плоскость, в которой наблюдается наиболее четкое голографическое изображение частицы (плоскость наилучшей фокусировки – ПНФ) [3], а в качестве поперечных координат используют поперечные координаты центра тяжести изображения частицы в этой плоскости, поэтому разработка метода определения ПНФ с высокой точностью является актуальной задачей. Наиболее простым способом поиска ПНФ является визуальный, который вполне пригоден для получения предварительных и качественных результатов, но не применим для точных количественных измерений и не может быть автоматизирован.

В автоматическом режиме могут использоваться известные методы поиска положения ПНФ, разработанные в микроскопии [4]. Эти методы, так же как и ряд других [5–7], обладают высоким быстродействием, легко программно реализуемы. Однако они характеризуются точностью, недостаточной для некоторых задач, например для исследования трёхмерной траектории движения частицы.

В настоящей работе для определения положения ПНФ используются такие характеристики, как граничный контраст (ГК) и граничный перепад (ГП), успешно зарекомендовавшие себя в предыдущих исследованиях [8, 9] Для вычисления значений ГК и ГП в голографическом изображении определяется граница частицы шириной в 1 пиксель. Вдоль границы выделяются внешняя (соответствующая фону) и внутренняя (соответствующая непосредственно изображению частицы) области задаваемой ширины, и в них рассчитываются средние интенсивности. Значение граничного контраста определяется как отношение этих интенсивностей, граничного перепада – как их разность, нормированная на максимальное значение интенсивности в восстановленном с цифровой голограммы кадре (для BMP-формата, с которым обычно осуществляется работа, максимальная интенсивность равна 255).

Описанным образом значения ГК и ГП рассчитываются для последовательности голографических изображений сечений объема, содержавшего частицы на этапе регистрации, восстановленных на разных расстояниях от плоскости регистрации. Плоскость, в которой ГК и ГП для голографического изображения выбранной частицы максимальны, считается ее ПНФ.

В настоящей работе представлены результаты апробации этого метода определения ПНФ на различного рода голографических изображениях частиц и его сравнение с аналогами.

Апробация метода на круглых модельных частицах, расположенных в одной плоскости на этапе регистрации голограммы

Первое тестирование метода [10,11] проводилось на реальных цифровых голограммах круглых непрозрачных частиц диаметром 500 мкм (рис. 1), что составляет около 70 пикселей используемой ПЗС-камеры «Видеоскан 2020». Исследуемые частицы нанесены на стеклянную пластину методом фотолитографии, что гарантирует расположение частиц в одной плоскости. Для регистрации голограмм использовался непрерывный твердотельный лазер с длиной волны излучения 532 нм. На этапе регистрации частицы находились на расстоянии 156 мм.

Особенность данного эксперимента заключается в том, что все регистрируемые частицы расположены в одной плоскости. Поэтому показателем достоверности того или иного метода определения ПНФ является совпадение или минимальное отличие расстояний, соответствующих положению ПНФ для всех рассматриваемых частиц. Для определения ПНФ предлагаемым методом расстояния восстановления задавались в диапазоне от 155 до 157 мм с шагом 0,1 мм. На рис. 1 представлены несколько фрагментов голографических изображений стеклянной пластины с частицами, восстановленных на расстояниях 155; 156,2; 156,3 и 157 мм (рис. 1, *б–д*).

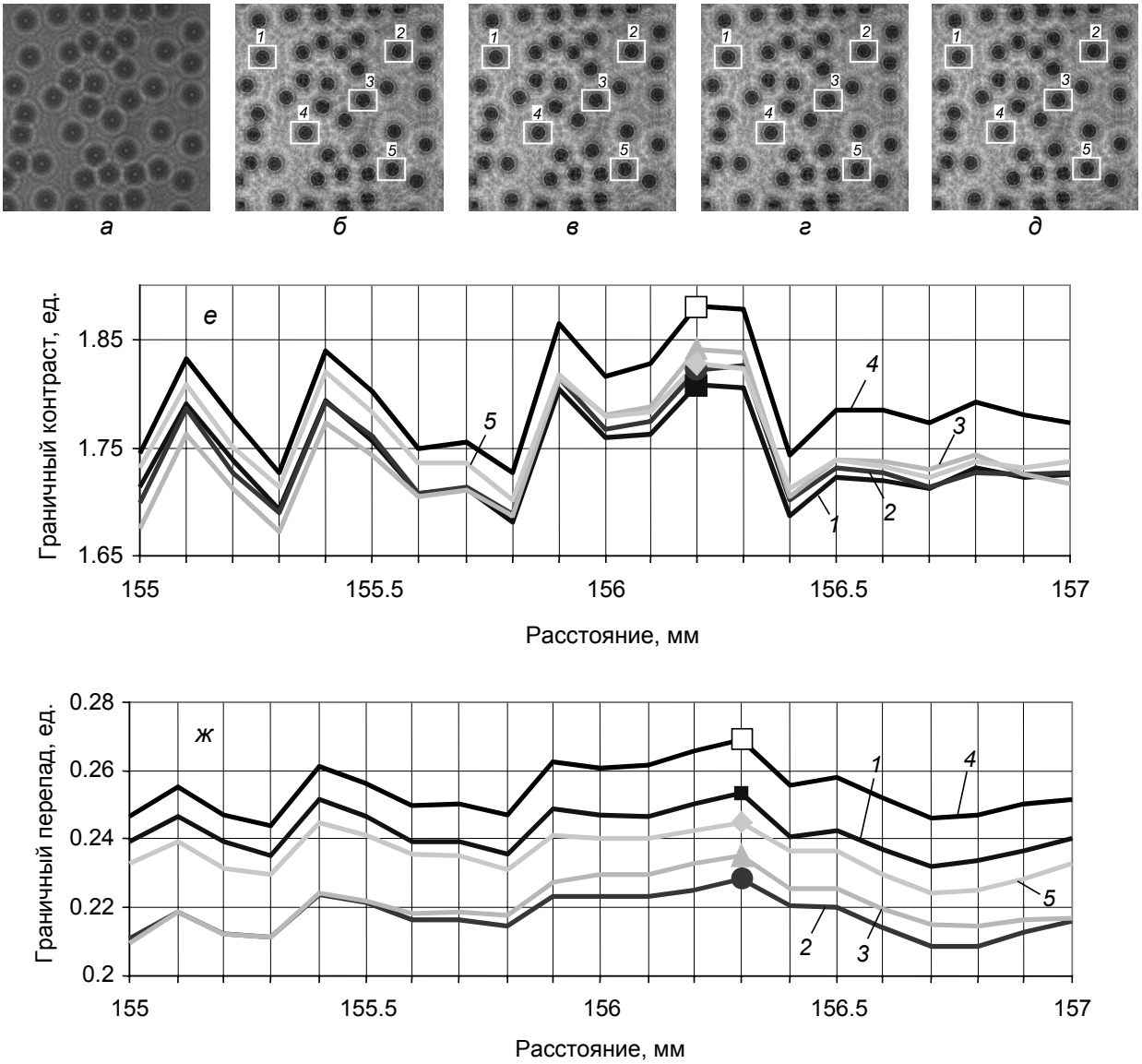


Рис. 1. Определение положения ПНФ по максимальным значениям граничного контраста (*е*) и граничного перепада (*ж*) для изображений выбранных модельных частиц, помеченных цифрами *1–5*, восстановленных на расстояниях: *б* – 150, *в* – 156,2, *г* – 156,3, *д* – 157 мм соответственно. На этапе регистрации голограммы (*а*) частицы располагались в одной плоскости

По этим изображениям практически невозможно визуально определить ПНФ. Тем не менее во многих задачах положение частицы необходимо определять с высокой точностью, сравнимой по порядку величины с размером частицы, как в рассматриваемом случае.

Для выбранных частиц (обозначены на рис. 1 цифрами *1–5*) рассчитаны значения и построены графики зависимостей ГК (рис. 1, *е*) и ГП (рис. 1, *ж*) от расстояния восстановления. При расчёте ширина выделяемых областей задавалась равной 7 пикселям (много меньше размера частицы), чтобы характеризовать именно границу изображения частицы с фоном и тем самым минимизировать влияние шума. Графики, приведённые на рис. 1, *е*, *ж*, позволяют уточнить положение ПНФ по максимальному значению ГК и ГП. Несовпадение составило 0,1 мм, что в большинстве практических задач соответствует приемлемой точности. Отметим также, что, несмотря на тот факт, что графики для частиц *1–5* отличаются по абсолютным значениям, соответствующие кривые подобны и положения максимума (ПНФ) для разных частиц совпадают, что подчеркивает устойчивость и эффективность используемых критериев – ГК и ГП.

Предлагаемый метод сравнивался с наиболее эффективными существующими методами определения ПНФ (Тэненград, Брэннер, дисперсионный и энтропийный [10]). Другие методы не рассматривались как заведомо более грубые. Например, определение положения ПНФ методом продольной интенсивности [12] неэффективно из-за того, что ПНФ находится для одной точки, а не для всего изображения частицы в целом. Корреляционный метод существенно зависит от выбранного интервала восстановления, и для различных интервалов восстановления рассчитывает разное положение ПНФ [12].

Результаты определения положения ПНФ перечисленными альтернативными методами для изображений тех же частиц *1–5* (рис. 1) представлены на рис. 2 и показывают, что эти методы существенно уступают по точности предлагаемому методу определения ПНФ по максимальному значению ГК и ГП.

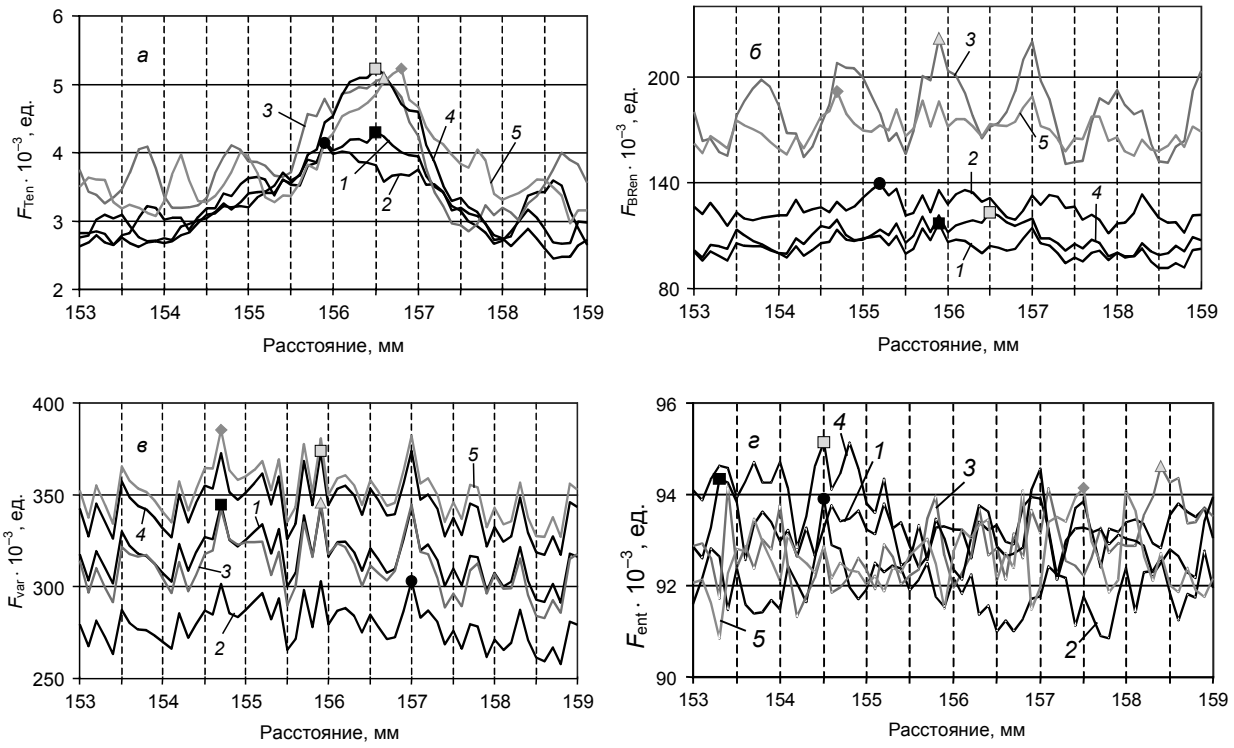


Рис. 2. Определение положения ПНФ для частиц, расположенных в одной плоскости на этапе регистрации голограммы (рис. 1), методами Тэненград (*а*), Брэннер (*б*), дисперсионным (*в*) и энтропийным (*г*). F_{Ten}, F_{Bren}, F_{var} и F_{ent} – значения операторов Тэненград, Брэннер, дисперсии и энтропии; *1–5* – кривые для частиц с соответствующими номерами (рис. 1)

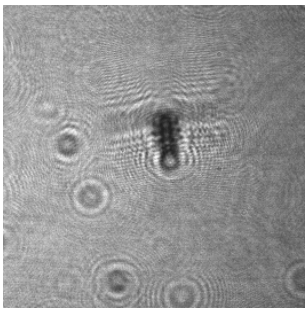
Так, разброс значений расстояний, соответствующих плоскостям наилучшей фокусировки для различных частиц из набора *1–5*, по методу Тэненград составляет 0,9 мм. Для методов Брэннер, дисперсионного и энтропийного разброс положений ПНФ составил 1,8; 2,3 и 5,1 мм соответ-

ственно. Напомним, что частицы на этапе регистрации голограммы располагались в одной плоскости, поэтому положения ПНФ для изображений различных частиц должны максимально совпадать. Кроме этого, отметим, что приведённые графики имеют разный характер зависимости для частиц *1–5*, что указывает на нестабильность получаемых результатов.

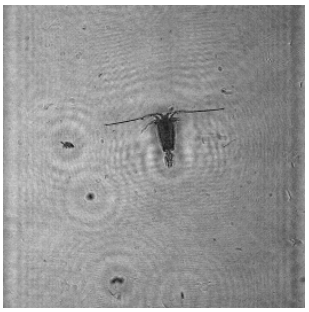
Определение ПНФ для крупной планктонной частицы

Как уже отмечалось выше, наиболее сложно определить ПНФ для случая регистрации объемных частиц достаточно большого размера, например крупных планктонных особей.

Рассмотрим пример определения ПНФ-изображения относительно крупной планктонной частицы (размер порядка 2 мм) вида Epischura baicalensis (рис. 3, *б*), восстановленного с цифровой голограммы (рис. 3, *а*). Регистрация цифровой голограммы осуществлялась на ПЗС-камеру «Видеоскан 2020» He–Ne-лазером (длина волны 632,8 нм). На рис. 3, *в*, *г*, *д* представлены восстановленные на расстояниях 154; 155,2 и 157 мм от голограммы фрагменты изображений поперечных сечений объема среды, содержавшего исследуемую частицу во время голографирования.



а



б

в

г

д

Рис. 3. Цифровая голограмма (*а*) и восстановленные с нее изображения: полный кадр – изображение сечения объема среды с частицей (*б*); фрагменты изображений поперечных сечений объема среды, содержавшего исследуемую частицу во время голографирования (расстояния восстановления 154 (*в*), 155,2 (*г*) и 157 мм (*г*)

При визуальном контроле по восстановленным кадрам (рис. 3, *в*, *г*, *д*), как и в предыдущих случаях, невозможно определить ПНФ с высокой точностью. Предлагаемый метод максимумов ГК и ГП позволяет определить ПНФ, которая в рассматриваемом случае расположена на расстоянии 155,2 мм (рис. 4).

Отметим, что в данном случае положения ПНФ, рассчитанные предложенным методом (ГК и ГП), совпадают. В работе [13] показано, что ГП является более устойчивым к ошибкам определения границы изображения частицы, но в большинстве ситуаций, для получения более точного результата, целесообразно совместное использование ГК и ГП.

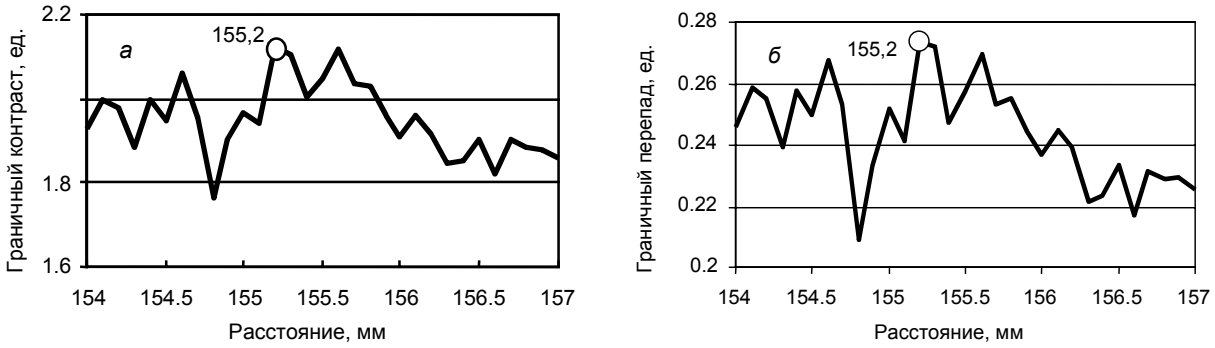


Рис. 4. Определение ПНФ голографического изображения планктонной частицы с помощью граничного контраста (*а*) и граничного перепада (*б*)

Результаты определения ПНФ другими методами приведены на рис. 5.

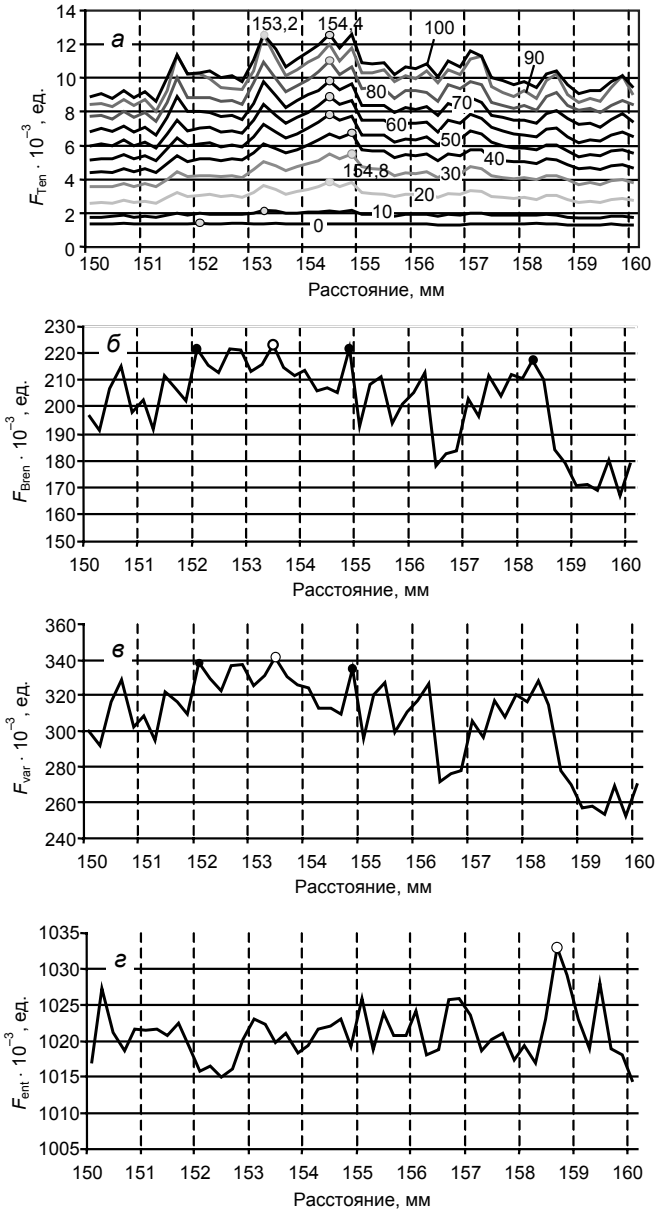


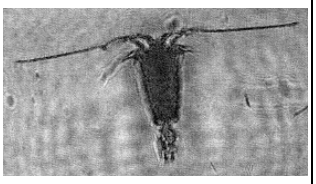
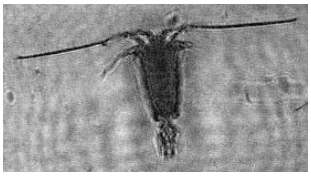
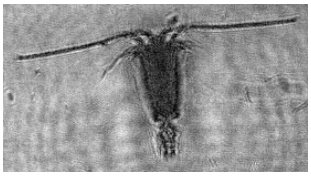
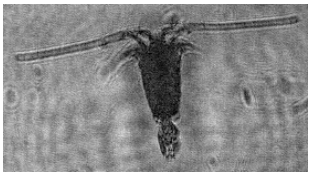
Рис. 5. Определение ПНФ планктонной частицы альтернативными методами: Тэненград (*а*) при различных уровнях порога, устраняющих шум; Брэннер (*б*), дисперсионным (*в*), энтропийным (*г*). F_{Ten}, F_{Bren}, F_{var} и F_{ent} – значения операторов Тэненград, Брэннер, дисперсии и энтропии

Исходя из результатов, представленных на рис. 5, *а*, видно, что при задании различных порогов, например для устранения шума, результат определения ПНФ методом Тененград может измениться на 1,6 мм. Этот факт показывает, что метод не подходит для определения положения ПНФ с точностью лучше 1 мм.

Положения ПНФ, рассчитанные методами Брэннер, дисперсионным и энтропийным (рис. 5), существенно отличаются друг от друга и от значений, рассчитанных предлагаемым методом (ГК и ГП). Напомним, что в предыдущем эксперименте с круглыми модельными частицами, расположенными в одной плоскости на этапе регистрации, перечисленные альтернативные методы также демонстрировали низкую точность.

В таблице приведены изображения планктонной частицы, восстановленные на расстояниях, соответствующих ПНФ, определенных различными методами.

Сравнение результатов определения ПНФ различными методами

Граничный перепад, граничный контраст	Тэненград	Брэннер, дисперсионный	Энтропийный
			
155,2	154,4	153,4	158,6

Даже путем визуальной оценки можно обнаружить, что изображение планктонной частицы, полученное с помощью, например, энтропийного метода, имеет чётко сфокусированное «тело», но все мелкие детали частицы расфокусированы. Из таблицы видно также, что при использовании метода определения ПНФ по ГК и ГП удается определить такое положение ПНФ, при котором все детали частицы одинаково сфокусированы и могут быть измерены. В то же время, в случае необходимости сокращения обрабатываемой информации, здесь тоже можно устранить мелкие детали, например, морфологическими методами перед этапом выделения границы.

Реконструкция трёхмерной траектории движения планктонной частицы по голографическому видео

Для комплексной апробации метода и демонстрации его возможностей в данном разделе реконструирована траектория движения планктонной частицы по данным, восстановленным с временной (видео-) последовательности из 15 кадров-голограмм (т.н. голографическое видео [14]).

Как уже сказано выше, продольная координата частицы определяется по положению плоскости наилучшего восстановления голографического изображения частицы, а поперечные – по положению его центра тяжести в этой плоскости [3]. Определив таким образом координаты выбранной планктонной особи с использованием каждой голограммы (кадра) видеопоследовательности, можно построить траекторию движения особи, а скомпоновав восстановленные изображения в видеофильм, можно изучить динамику движения частицы.

На рис. 6 приведены примеры изображений, восстановленных с одного и того же кадра (голограммы) голографического видео. Для указанной белой рамкой частицы приведён пример определения положения ПНФ предлагаемым методом.

Отметим, что в реальных ситуациях голографическая регистрация планктонных частиц производится либо в кювете, либо через иллюминатор погружаемой голографической камеры [15]. В этом случае можно считать, что голограмма регистрируется через оптическую систему вода-стекло – воздух. На этапе восстановления голограммы это проявляется в том, что положение ПНФ восстановленного в воздухе голографического изображения частицы не совпадает с координатой частицы, соответствующей её истинному положению на этапе её регистрации. В ряде работ этот эффект детально исследован [15, 16], в настоящей работе он не учитывается.

На рис. 7 приведены для сравнения положения ПНФ частицы, указанной на рис. 6, определенные для каждой из 15 голограмм (кадров) видеопоследовательности, рассчитанные всеми рассматриваемыми методами.

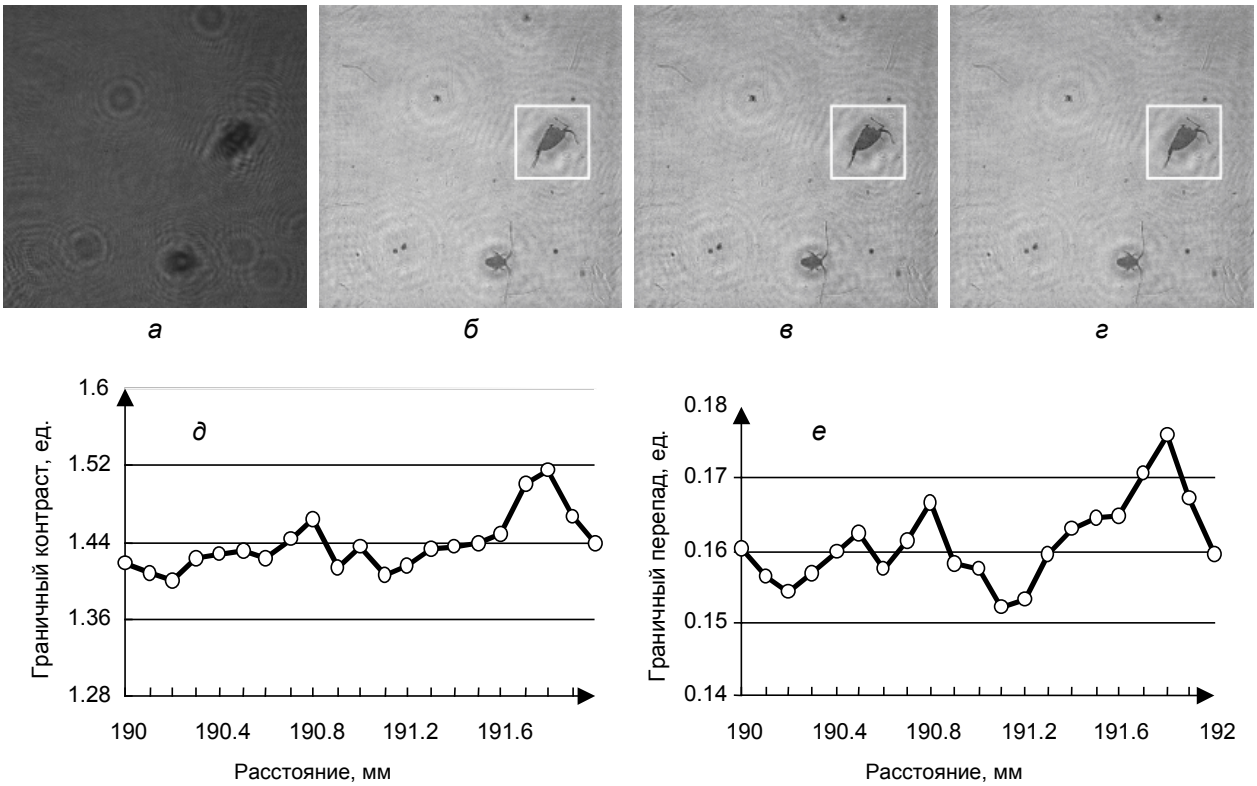


Рис. 6. Определение положения ПНФ по изображениям планктонной особи, восстановленным с цифровой голограммы (*а*), методом, основанным на расчёте значений граничного контраста (*д*) и граничного перепада (*е*). *б*, *в*, *г* – восстановленные на расстояниях 190 (*б*), 191,8 (*в*), 192 мм (*г*) изображения

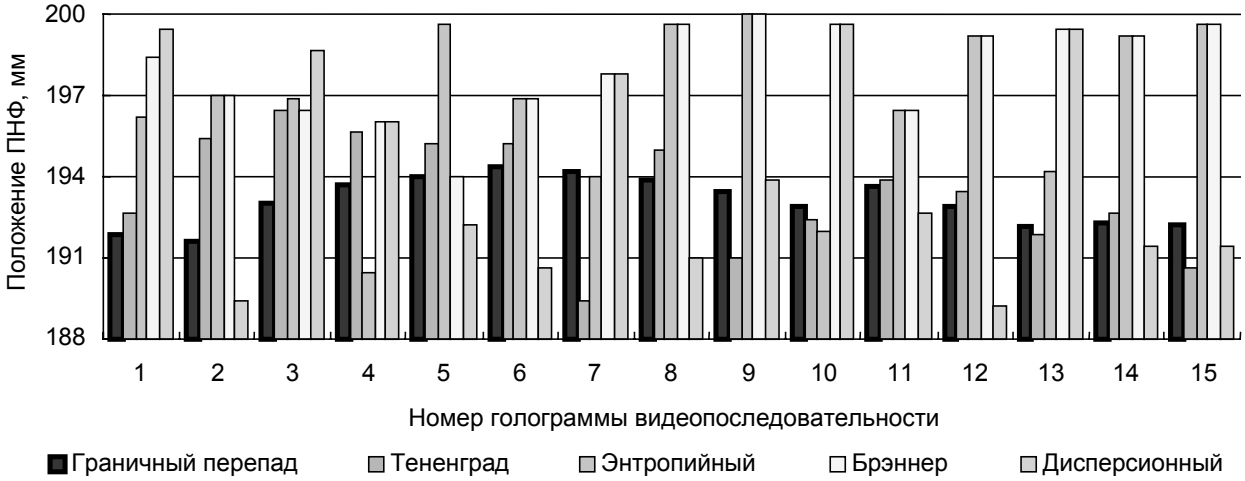


Рис. 7. Определение положений ПНФ планктонной частицы по 15 голограммам (кадрам) видеопоследовательности рассматриваемыми методами

Из рис. 7 видно, что наиболее плавное и соответствующее наиболее вероятному движению планктонной особи изменение положения ПНФ (продольной координаты планктонной частицы), получено методом граничного перепада,

Заключение

В работе детально исследован метод определения положения ПНФ, основанный на расчёте значений граничного контраста и граничного перепада. Показано, что предложенный метод обладает более высокой точностью по сравнению с аналогами. Результаты экспериментов как с модельными частицами, так и с живым планктоном позволяют оценить эту точность как 0,1 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fugal J.P. and Shaw R.A. // Atmos. Meas. Tech. – 2009. – No. 2. – P. 259–271.
2. Демин В.В., Степанов С.Г. // Оптика атмосферы и океана. – 2000. – Т. 13. – № 9. – С. 833–836.
3. Демин В.В., Ольшуков А.С., Дзюба Е.В. // Изв. вузов. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 8. – С. 81–89.
4. Santos A., Ortiz de Solorzano C., Vaquera J.J., et al. // J. Microscopy. – 1997. – V. 188. – Pt 3. – P. 264–272.
5. Hesham E. // J. Comput. Sci. – 2006. – V. 8. – No. 2. – P. 205–210.
6. Pan G. and Meng H. // Appl. Opt. – 2003. – No. 42. – P. 827–833.
7. Yang Y., Kang B.S., and Choo Y.J. // Appl. Opt. – 2008. – No. 6. – P. 817–824.
8. Демин В.В., Каменев Д.В. // Изв. вузов. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 9. – С. 46–53.
9. Демин В.В., Каменев Д.В. // Изв. вузов. Физика. – 2012. – Т. 55. – № 11. – С. 61–67.
10. Dyomin V.V. and Kamenev D.V. // EOS Annual Meeting 2012, Aberdeen, Scotland, UK, 25–28 September 2012.
11. Демин В.В., Каменев Д.В. // Опт. журн. – 2012. – Т. 79. – № 4. – С. 17–21.
12. Демин В.В., Козлова А.С. // Изв. вузов. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 9/3. – С. 35–37.
13. Дёмин В.В., Каменев Д.В. // Изв. вузов. Физика. – 2012. – Т. 55. – № 8. – С. 68–73.
14. Демин В.В., Ольшуков А.С., Наумова Е.Ю., Мельник Н.Г. // Оптика атмосферы и океана. – 2008. – Т. 64. – № 12. – С. 1089–1095.
15. Dyomin V.V., Olshukov A.S., and Kamenev D.V. // Proc. of the «Oceans'11», Santander, Spain, 6–9 June 2011. – 2011. – P. 110131-015; IEEE Catalog Number: CFP11OCF-CDR.
16. Демин В.В., Ольшуков А.С. // Опт. журн. – 2012. – Т. 79. – № 6. – С. 42–46.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия
E-mail: dyomin@mail.tsu.ru, kamenev87@mail.ru

Поступила в редакцию 25.04.13.

Дёмин Виктор Валентинович, к.ф.-м.н., доцент, декан;
Каменев Денис Вадимович, аспирант.