

На правах рукописи

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'А. С. Ольшук' (A. S. Olyshukov). The signature is written in a cursive style with a large, sweeping underline.

Ольшук Алексей Сергеевич

Методы определения пространственного положения частиц
по данным, полученным из цифровых голограмм

Специальность 01.04.05 – оптика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2012

Работа выполнена на кафедре Оптико-электронных систем и дистанционного зондирования в Национальном исследовательском Томском государственном университете.

Научный кандидат физико-математических наук,
руководитель: доцент Демин Виктор Валентинович

Официальные доктор технических наук, профессор
оппоненты: Тарлыков Владимир Алексеевич

доктор физико-математических наук,
профессор Шандаров Владимир
Михайлович

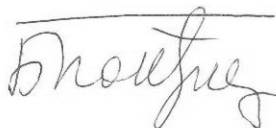
Ведущая организация: Институт оптики атмосферы им.
В.Е. Зуева Сибирского отделения РАН,
г. Томск

Защита состоится 29 марта 2012 г. в 14 ³⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.267.04 при Томском государственном университете, 634050 г. Томск, пр. Ленина, 36, ауд. 119.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета по адресу: г. Томск, пр. Ленина, 34а.

Автореферат разослан «27» февраля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного
совета Д 212.267.04



Б.Н. Пойзнер

Актуальность и состояние вопроса

Необходимость исследования частиц, расположенных в объёме среды, возникает во многих научных и практических задачах атмосферной оптики (исследование туманов, аэрозолей), биологических задачах, океанологии (исследование планктона, взвешенных и оседающих частиц в жидкости). Благодаря своим преимуществам голография выгодно отличается от других методов исследования подобных объектов: способностью регистрации объёма среды с последующим исследованием его восстановленного изображения по плоскостям (в отличие от фото и видео съемки); минимальным возмущением исследуемой среды; отсутствием необходимости в предварительной информации об исследуемом ансамбле и о природе образования, химическом составе микрочастиц.

При использовании методов цифровой голографии, могут быть получены следующие данные о частицах: форма, размер, пространственное положение и скорость каждой частицы, зарегистрированной на цифровой голограмме. Цифровая голография получила широкое применение в практических задачах исследования частиц, благодаря следующим преимуществам: восстановление информации о фазе предметной волны; передача цифровых голограмм по линиям связи; создание так называемого голографического видео [1-2, 2*-3*].

В практических задачах необходимо идентифицировать частицу. Как правило, распознавание осуществляется по форме частицы [3]. Для восстановления цифровых голограмм в литературе используется несколько методов: метод свертки, метод с использованием преобразования Фурье и прямой метод расчёта дифракционного интеграла [4,7*]. Сравнение алгоритмов в литературе производится по различным характеристикам, но вопрос точности восстановления формы частиц при использовании различных методов восстановления до сих пор актуален.

В настоящее время в литературе рассматриваются несколько методов определения пространственного положения частиц по восстановленным изображениям с цифровых голограмм [5-7]. Но предложенные методы определяют координаты либо сферических частиц, либо частиц, размеры которых соответствуют размерам нескольких пикселей ПЗС-камеры. Разработка методов определения координат частиц сложной формы по данным восстановленным из цифровых голограмм является актуальной задачей и позволит расширить область применения цифровой голографии.

Цель работы

Разработка методов и алгоритмов извлечения информации о пространственном положении частиц путём обработки данных из цифровых голограмм.

Основные задачи

- Разработка и апробация метода количественного учёта точности восстановления формы частицы;
- Разработка метода восстановления пространственного положения частицы сложной формы по данным с цифровых голограмм;
- Разработка метода реконструкции траектории и скорости перемещения частиц по данным, полученным с цифровых голограмм;
- Разработка метода определения вращения частиц по данным с цифровых голограмм.

Методы исследования

При решении поставленных задач использовался комплексный подход, сочетающий экспериментальные методы и методы компьютерного моделирования. Для расчёта дифракционного интеграла использовались численные методы, основанные на скалярной теории дифракции, алгоритмы дискретного преобразования Фурье (ДПФ) и быстрого преобразования Фурье (БПФ). Оценка погрешности восстановления формы частицы проводилась методами статистики.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Погрешность работы алгоритмов восстановления цифровых голографических изображений частиц (применительно к форме частиц) может быть количественно оценена по формуле:

$$\delta = \frac{S_{out} + S_{in}}{S},$$

где S_{in} – суммарная площадь, ошибочно включенная в изображение частицы, S_{out} – суммарная площадь, ошибочно исключенная из изображения частицы, S – площадь сечения модельной частицы.

2. Пространственное положение частицы идентифицируемо по данным из цифровой голограммы, если в качестве продольной координаты выбрать расстояние восстановления, соответствующее плоскости наилучшей фокусировки голографического изображения

частицы, а в качестве поперечных координат – координаты центра тяжести изображения в указанной плоскости.

3. Если восстановить изображения частицы из цифровых голограмм, зарегистрированных в два последовательных момента времени t_1 и t_2 , выбрать на сфокусированном контуре восстановленного изображения частицы дополнительную точку (с координатами (x_1, y_1, z_1) и (x_2, y_2, z_2) в моменты времени t_1 и t_2), то поворот частицы относительно центра тяжести ее изображения (с координатами $(x_{цт1}, y_{цт1}, z_{цт1})$ и $(x_{цт2}, y_{цт2}, z_{цт2})$ в моменты времени t_1 и t_2) описывается углом:

$$\alpha = \arccos \left(\frac{(x_1 - x_{цт1}) \cdot (x_2 - x_{цт2}) + (y_1 - y_{цт1}) \cdot (y_2 - y_{цт2}) + (z_1 - z_{цт1}) \cdot (z_2 - z_{цт2})}{\sqrt{(x_1 - x_{цт1})^2 + (y_1 - y_{цт1})^2 + (z_1 - z_{цт1})^2} \cdot \sqrt{(x_2 - x_{цт2})^2 + (y_2 - y_{цт2})^2 + (z_2 - z_{цт2})^2}} \right).$$

При этом координаты дополнительной точки должны быть определяемы на восстановленных изображениях частицы.

Достоверность результатов:

Достоверность первого защищаемого положения подтверждается согласием результатов численного моделирования и лабораторных экспериментов регистрации и восстановления цифровых голограмм модельных частиц (отклонения экспериментальных данных от результатов моделирования составили 6 %).

Достоверность второго защищаемого положения подтверждается согласием данных о пространственном перемещении и форме траектории движения модельных частиц, полученных по восстановленным из цифровых голограмм изображениям частиц, с перемещениями, которые задавались точной системой позиционирования на этапе голографирования. При этом доверительные интервалы экспериментального определения положения частиц по голографическим изображениям составили для продольной координаты 100 мкм, для поперечной 14,8 мкм, а контроль перемещений частиц в экспериментах осуществлялся системой позиционирования с заведомо более высокой точностью (продольная координата - 2,5 мкм, поперечные - 1 мкм). Кроме этого, полученные результаты по определению точности продольных координат не противоречат результатам, которые были получены другими авторами [8–10].

В пользу достоверности третьего защищаемого положения свидетельствует качественное (на уровне относительной погрешности 15 %) согласование данных об угле поворота частицы, полученных из цифровых голограмм и данных измерения системой позиционирования (с точностью 1°). Полученные результаты не противоречат результатам, полученным другими авторами [11].

Научная новизна защищаемых положений:

Новизна первого защищаемого положения заключается в том, что предложена методика оценки точности восстановления формы частицы [12*-13*].

Новизна второго защищаемого положения заключается в том, что смещение частицы можно рассматривать как смещение материальной точки, где в качестве продольной координаты выступает расстояние, соответствующее плоскости наилучшего восстановления голографического изображения частицы, а в качестве поперечных координат – координаты центра тяжести голографического изображения частицы в плоскости наилучшего его восстановления [2*, 14*].

Новизна третьего защищаемого положения заключается в том, что предложена методика количественной оценки угла поворота частицы относительно центра тяжести изображения частицы [4*, 17*] по двум последовательным цифровым голограммам.

Практическая значимость защищаемых положений и других результатов работы:

Разработанный метод, основанный на первом защищаемом положении, оперативно позволяет количественно оценить точность восстановления формы частиц.

Методы восстановления цифровых голограмм, основанные на методе свертки, методе БПФ и методе прямого расчёта дифракционного интеграла позволяют восстановить форму частиц с погрешностью не превышающей 10 % на расстояниях от 100 до 300 мм и 20 % на расстояниях от 300 до 500 мм для частиц с площадью не менее 40000 мкм². В связи с тем, что погрешности алгоритмов по восстановлению формы частиц одинаковы, выбор алгоритма для решения конкретной практической задачи голографирования частиц обусловлен ресурсными и временными условиями.

Сформулированные во втором защищаемом положении результаты позволяют определить пространственное положение частиц по данным

из цифровых голограмм с продольной точностью 100 мкм и поперечной 1 – 2 пикселя используемой камеры.

Экспериментально показано, что использование второго ракурса регистрации цифровых голограмм частиц позволяет увеличить точность определения продольной координаты до точности определения поперечной за счёт геометрии схемы [3*].

Практическая значимость работы подтверждается использованием результатов диссертации в следующих грантах и проектах: грант РФФИ № 07-04-90828-моб_ст; № 09-04-90738-моб_ст; проект Участник молодёжного научно-инновационного конкурса (У.М.Н.И.К.), гос. контракт № 5653р/8059 от 13 февраля 2008; ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» гос. контракт № П1736 от 25.09.2009, гос. контракт № П1756 от 30.09.2009; интеграционный проект СО РАН № 6, 2009-2011 гг.

Значимость работы подтверждена присуждением автору стипендии Президента Российской Федерации для аспирантов на 2008 – 2009 гг. за комплекс научных работ по тематике диссертации.

Результаты работы внедрены и используются в Лимнологическом институте СО РАН (г. Иркутск) и в учебном процессе в Томском государственном университете (г. Томск).

Апробация работы

Основные результаты работы обсуждались на следующих конференциях: Четвертая, Пятая, Шестая, Седьмая Международная школа молодых ученых и специалистов «Физика окружающей среды» (2004, 2006, 2007, г. Томск; 2008, г. Красноярск); V и VI Международная школа-семинар молодых ученых "Современные проблемы физики, технологии и инновационного развития" (2004, 2005, Томск); Первая, Вторая и Четвёртая конференция студенческого научно-исследовательского инкубатора (2005, 2007, г. Томск); Одиннадцатая всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых учёных (2005, Екатеринбург); Международная научная конференция «Фундаментальные проблемы физики» (2005, Казань); Двадцать шестая Школа по когерентной оптике и голографии (2007, Иркутск); Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (2008, Красноярск); SPIE International Symposium on Optical Engineering / Application Digital Image Processing XXXI (2008, San Diego, USA); Молодежная научная конференция в рамках I Фестиваля Науки в Томском государственном университете (2009, Томск); Международная научно-практической конференция

«Актуальные проблемы радиофизики» АПР – 2008 и АПР – 2010 (2008, 2010, Томск); Conference Proceedings of the “Oceans’11” (2011 Santander, Spain). Аппаратно-программный комплекс для изучения планктона методами подводной цифровой голографии представлен на: Пятой Биотехнологической выставке-ярмарке «РосБиоТех-2011» (2011, Москва) и Международной выставке и Форуме «Черное море 2011 – Парад инноваций и инвестиционных проектов» (2011, Москва).

Личный вклад автора

Автор работы принимал прямое участие в разработке и экспериментальной апробации метода определения точности восстановления цифровых голограмм, метода определения координат частиц по восстановленным изображениям с цифровых голограмм и метода определения вращения частиц по данным с цифровых голограмм. Автором разработано и реализовано программное обеспечение для обработки и восстановления цифровых голограмм. Все проведённые эксперименты и большая часть последующей обработки полученных данных проведена автором лично. Вклад основных соавторов заключается в постановке научной задачи и совместной интерпретации полученных результатов (В.В. Дёмин), совместной обработке цифровых голограмм (А.Ю. Старинщикова (Давыдова)), численной реализации метода граничного контраста (Д.В. Каменев).

Работа выполнялась в период с 2006 по 2012 год на базе Томского государственного университета.

Публикации и апробация работы:

По материалам выполненных исследований опубликовано 17 публикаций, в том числе 4 в реферируемых журналах из списка ВАК.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Общий объем работы составляет 140 страниц, включая 83 рисунка, 7 таблиц и списка литературы из 108 наименований.

Краткое содержание диссертации

Во введении дается общая характеристика работы, обосновывается актуальность, определяется тематика и формулируется цель работы,

кратко излагаются основные задачи исследования и результаты, выносимые на защиту.

Первая глава представляет собой литературный обзор. Проведён сравнительный анализ цифровой и классической голографии. Проведены оценки необходимых характеристик приёмника оптического излучения (разрешение, размер поля зрения, время экспозиции, разрядность) в зависимости от глубины сцены, размера и скорости регистрируемых частиц.

Анализируются существующие методы определения пространственного положения частиц по восстановленным голографическим изображениям.

Рассмотрены особенности регистрации цифровых голограмм объёмных ансамблей частиц расположенных в жидкой среде.

Во **второй главе** рассматриваются алгоритмы для восстановления цифровых голограмм и методы оценки точности восстановления формы частицы.

Как и в фотоголографии в цифровой происходит регистрация интерференционной картины предметной и опорной волн, но регистрация осуществляется ПЗС (или КМОП) – камерой.

Зарегистрированная голограмма в виде двумерного массива распределения интенсивностей передаётся в память компьютера.

В цифровой голографии распределение восстановленного поля ($U(x_1, y_1)$) в плоскости голограммы с точностью до константы совпадает с распределением в этой же плоскости интенсивности картины интерференции опорной и предметной волн на этапе регистрации голограммы [2*,4]. (В случае фотоголографии это соответствует регистрации голограммы на фотоматериал с коэффициентом контрастности, равным 2 [12]).

В связи с этим восстановление цифровых голограмм основано на численном расчёте дифракционного интеграла (1). Он позволяет рассчитать распределение поля в заданной плоскости $U(x_2, y_2)$, зная распределение восстановленного поля $U(x_1, y_1)$ в плоскости голограммы:

$$U(x_2, y_2) = \frac{1}{i\lambda z} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(x_1, y_1) e^{i\frac{2\pi}{T}z} e^{\frac{i\pi}{z\lambda} \left[(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 \right]} dx_1 dy_1, \quad (1)$$

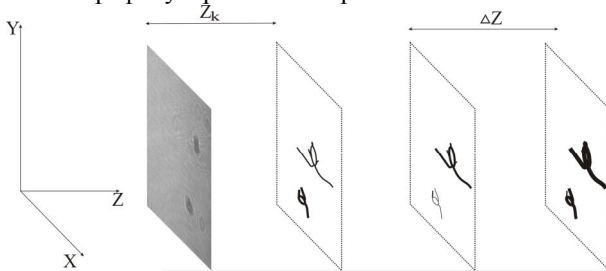
где λ – длина волны, z – расстояние между плоскостью голограммы и плоскостью восстановления.

В процессе восстановления, при изменении расстояния восстановления z_k формируется набор сечений исследуемого объема с

частицами (рис 1). Будем считать, что плоскость наилучшего восстановления (ПНВ) – плоскость, в которой относительная погрешность восстановления формы частицы минимальна.

Численные эксперименты показали, что в плоскости наилучшего восстановления площадь сечения изображения частицы минимальна. Поскольку в реальных экспериментах нет возможности сравнить сечение частицы с сечением изображения частицы, восстановленной с цифровой голограммы, поэтому в реальных экспериментах плоскость наилучшего восстановления соответствует плоскости, в которой площадь сечения изображения частицы минимальна, а продольная координата частицы – расстоянию, соответствующему плоскости наилучшего восстановления изображения частицы.

Процесс перебора поставленных плоскостей можно сравнить с процессом перефокусировки в микроскопе.



Плоскость голограммы Плоскость 1 Плоскость 2 Плоскость 3

Рисунок 1 –Схематичное представление процесса послойного восстановления голографического изображения объема, содержащего планктонные частицы

В практических задачах чаще всего необходимо идентифицировать частицу, идентификация производится по форме.

В работе предложен метод оценки точности восстановления формы частиц с учетом экспериментальных условий. Восстановленное голографическое изображение модельной частицы сравнивается с сечением самой частицы, определяется суммарная площадь областей, которые были ошибочно включены S_{in} и исключены из сечения частицы S_{out} (рис. 2).

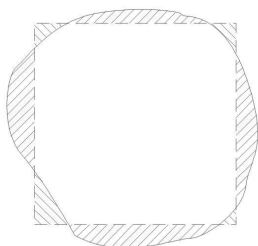


Рисунок 2 – Иллюстрация к методу оценки точности восстановления цифровых голограмм; а – восстановленная форма частицы, б – исходная форма частицы, в – область "ошибочно" включенная в восстановленную частицу, г – область "ошибочно" исключенная из восстановленной частицы.

Общая площадь ошибочных областей, отнесённая к площади сечения частицы S , оценивает относительную погрешность δ отклонения формы восстановленного изображения частицы от формы модельной частицы:

$$\delta = \frac{S_{out} + S_{in}}{S} \quad (2)$$

Результаты численного моделирования показали, что минимум относительной погрешности восстановления формы тестовой частицы соответствует расстоянию, на котором происходила регистрация, другими словами плоскость наилучшего восстановления соответствует расстоянию регистрации. Полученная плоскость совпадает с плоскостью наилучшего восстановления, полученной альтернативными методами (метод среднеквадратичных отклонений и граничного контраста [13]).

Предложенный метод применялся для экспериментального определения погрешности восстановления цифровых голограмм частиц в зависимости от расстояния регистрации.

В качестве тестовых частиц использовались частицы правильной формы (круг, квадрат, шестиугольник, треугольник, ромб и прямоугольник (соотношение сторон 2:1)) с одинаковой площадью 40000 мкм^2 . Частицы нанесены на стеклянную подложку в виде непрозрачных экранов.

Зависимость погрешности восстановления формы частицы от расстояния для трёх методов восстановления представлена на рисунках 3-5.

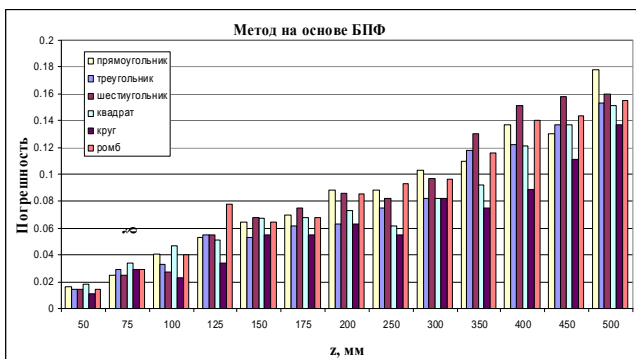


Рисунок 3 – Зависимость погрешности восстановления формы частиц от расстояния регистрации, при восстановлении голограмм методом БПФ

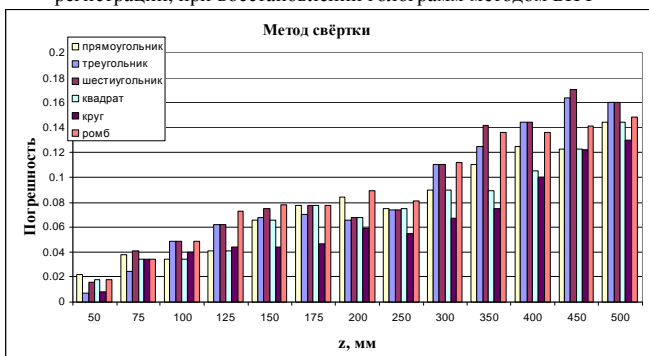


Рисунок 4 – Зависимость погрешности восстановления формы частиц от расстояния регистрации, при восстановлении голограмм методом свёртки

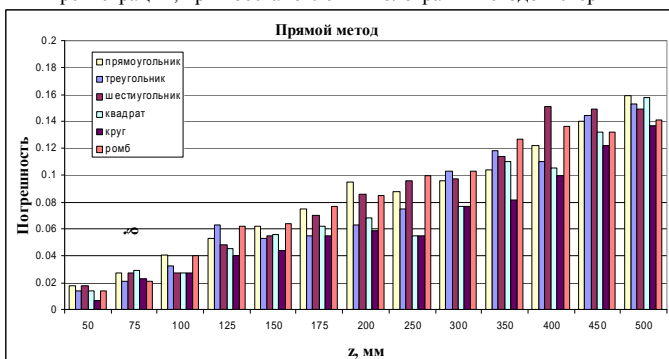


Рисунок 5 – Зависимость погрешности восстановления формы частиц от расстояния регистрации, при восстановлении голограмм прямым методом

Анализ результатов оценки относительной погрешности восстановления формы частицы показал, что методы восстановления цифровых голограмм, основанные на методе свертки, методе БПФ и прямом расчёте дифракционного интеграла восстанавливают форму модельных частиц с одинаковой точностью. Поэтому при выборе метода восстановления цифровых голограмм частиц необходимо основываться на других критериях, например производительности метода или возможности обработки голограмм в процессе восстановления.

Результаты, полученные в эксперименте, показали, что алгоритмы для восстановления цифровых голограмм, основанные на методе свертки, методе БПФ и методе прямого расчёта дифракционного интеграла позволяют восстановить изображение частиц записанных на расстоянии от 10 до 300 мм с погрешностью, не превышающей 10 % (по площади объекта), на расстояниях от 300 до 500 мм с погрешностью, не превышающей 20 % (по площади объекта).

Третья глава посвящена методам обработки и извлечению информации из цифровых голограмм. Численные методы восстановления цифровых голограмм вносят искажения в восстановленные изображения. Рассматривается природа образования описанных искажений и методы их коррекции (фильтрации). В восстановленных голографических изображениях искажения в виде системы полос повторяющих форму кадра, образуются за счёт ограниченности массива данных цифровой голограммы (рис. 5). В теории обработки сигналов для уменьшения краевых эффектов используют методы аналитического продолжения сигналов [14]. Для случая двумерных сигналов (изображений) необходимо корректно согласовать продолжение сигнала по двум координатам. В работе метод аналитического продолжения был реализован следующим образом: голограмма дополнялась со всех сторон по 25 % от её линейного размера, функция распределения интенсивности в голограмме аппроксимировалась бикубическими сплайнами и экстраполировалась на дополненную область, таким образом, чтобы сама функция и её производная на краях дополненного кадра обращались в ноль.

Для оценки эффективности предложенного метода в работе численно моделировалась голограмма пустого кадра (с равномерным распределением интенсивности в кадре). После восстановления находилось среднеквадратичное отклонение интенсивности пустого кадра от изображений, восстановленных из исходной и дополненной

голограммы. Результаты численного эксперимента показывают, что разработанный метод аналитического продолжения цифровой голограммы позволяет на порядок уменьшить искажения при восстановлении. Результат работы разработанного метода на примере планктонных частиц представлен на рисунке 6 б.

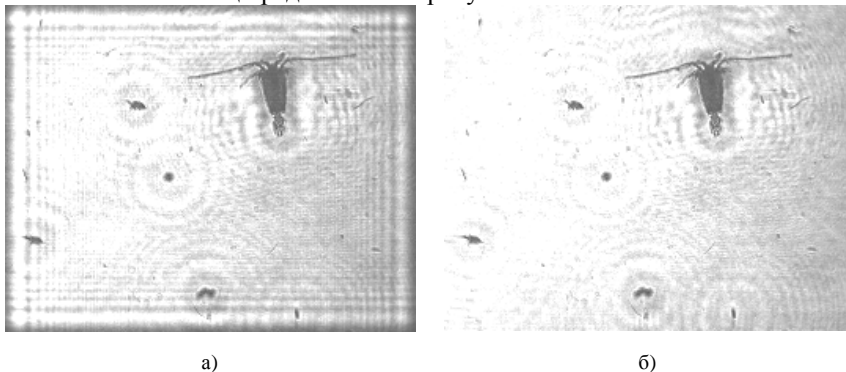


Рисунок 6 – а) восстановленное изображение с исходной цифровой голограммы; б) – восстановленное изображение с дополненной цифровой голограммы

Для определения координат частиц сложной формы разработан метод, в котором продольная координата z определяется по положению плоскости наилучшего восстановления исследуемой частицы, то есть по расстоянию восстановления, на котором площадь сечения изображения частицы минимальна. В качестве поперечных координат использовались координаты центра тяжести изображения частицы в плоскости наилучшего восстановления. Для определения поперечных координат вначале выделялся контур частицы, после выделения, частица описывается следующим образом:

$$F_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{внутри изображения частицы} \\ 0, & \text{вне изображения частицы} \end{cases}$$

где $F_{i,j}$ – бинаризованная интенсивность (i,j) -го пикселя. Координаты центра тяжести изображения рассчитываются по формуле:

$$m_x = \frac{\sum_{j=1}^{N_y} \sum_{i=1}^{N_x} F_{i,j} \cdot i}{\sum_{j=1}^{N_y} \sum_{i=1}^{N_x} F_{i,j}}; \quad m_y = \frac{\sum_{j=1}^{N_y} \sum_{i=1}^{N_x} F_{i,j} \cdot j}{\sum_{j=1}^{N_y} \sum_{i=1}^{N_x} F_{i,j}}$$

где m_x , m_y – координаты центра тяжести изображения частицы по осям Ox и Oy , соответственно, N_x , N_y – количество пикселей по горизонтали и вертикали.

Для оценки точности определения координат по восстановленным голографическим изображениям был проведён следующий эксперимент. При помощи системы позиционирования частица перемещалась на заданное расстояние с продольной точностью 2.5 мкм и поперечной 1 мкм, реализовывалось семь положений частицы. В каждом положении фиксировалась цифровая голограмма. Для статистической обоснованности результатов эксперимент повторялся не менее 10 раз для каждого положения частицы.

Цифровые голограммы восстанавливались, по восстановленным голографическим изображениям определялась продольная координата, которая соответствует плоскости наилучшего восстановления. В плоскости наилучшего восстановления определялись координаты центра тяжести изображения частицы.

После восстановления цифровых голограмм и обработки результатов, данные о пространственном смещении модельной частицы сравнивались с данными, полученными с помощью системы позиционирования. Трёхмерное положение частицы сложной формы можно определить по голографическим изображениям, восстановленным из цифровой голограммы. При этом доверительные интервалы экспериментального определения положения частиц по голографическим изображениям составили для продольной координаты 100 мкм, для поперечной 14.8 мкм.

В практических задачах часто необходимо восстановить не только поступательное, но и вращательное движение исследуемых частиц. Для количественной оценки угла поворота частицы был разработан метод, который заключался в следующем: для определения поворота частицы относительно центра тяжести необходимо добавить дополнительные точки (соответствующие характерным особенностям частиц), тогда по изменению координат дополнительных точек относительно центра тяжести можно оценить угол поворота частицы относительно центра тяжести по формуле:

$$\alpha = \arccos \left(\frac{(x_1 - x_{цт1}) \cdot (x_2 - x_{цт2}) + (y_1 - y_{цт1}) \cdot (y_2 - y_{цт2}) + (z_1 - z_{цт1}) \cdot (z_2 - z_{цт2})}{\sqrt{(x_1 - x_{цт1})^2 + (y_1 - y_{цт1})^2 + (z_1 - z_{цт1})^2} \cdot \sqrt{(x_2 - x_{цт2})^2 + (y_2 - y_{цт2})^2 + (z_2 - z_{цт2})^2}} \right),$$

где (x_1, y_1, z_1) и (x_2, y_2, z_2) – координаты дополнительной точки в два последовательных момента времени, $(x_{цт1}, y_{цт1}, z_{цт1})$ и $(x_{цт2}, y_{цт2}, z_{цт2})$ – координаты центра тяжести изображения частицы в два последовательных момента времени

Апробация метода проходила на тестовых частицах. Для определения поворота шестиугольной частицы использовались её

вершины. С помощью координатного столика изменялся угол между нормалью к сечению частицы и оптической осью. В восстановленных голографических изображениях определялись координаты центра тяжести изображения частицы и её дополнительных точек. Предложенный метод позволяет определить угол поворота частиц с точностью не хуже чем 5° . Как и в предыдущем эксперименте для статистической обоснованности результатов процесс повторялся не менее 10 раз. Результаты эксперимента показали, что в пределах доверительных интервалов угол поворота модельной частицы, полученный из цифровых голограмм, совпадает с углом, полученным по данным системы позиционирования. Точность определения угла составила 15 %.

Результаты полученные в настоящей работе показали, что точность определения продольных координат меньше точности определения поперечных координат.

Для повышения точности определения координат частиц может быть использована двухракурсная схема записи голограмм. В работе использовалась двухракурсная схема регистрации цифровых голограмм, которая представляет собой две осевые схемы на просвет со взаимно перпендикулярными оптическими осями (рис 7).

В проведенных экспериментах использовались две идентичные камеры Видеоскан-2020 (размер пикселя 7.4×7.4 мкм, размер матрицы 11840×8880 мкм). В качестве источника излучения использовался непрерывный твердотельный лазер DTL-317 с длиной волны излучения 532 нм и регулируемой мощностью до 20 мВт.

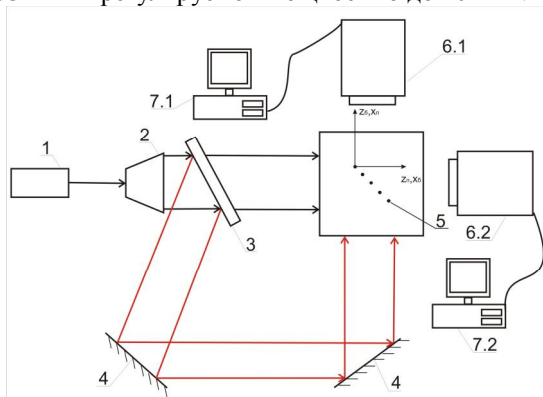


Рисунок 7 – Двухракурсная схема для регистрации цифровых голограмм: 1 – лазер; 2 – коллиматор; 3 – светоделитель; 4- зеркала; 5 – начало координат; 6.1 – «боковая», 6.2 – «прямая» ПЗС-камеры; 7.1, 7.2 – компьютеры

В качестве объектов были использованы острия иглоочек, диаметр острия равнялся 50 мкм, следовательно, минимальная точность определения положения острия иглоочек не может быть меньше этой величины. Статистическая погрешность определения поперечных координат острия иглоочек по восстановленным изображениям из цифровых голограмм равнялась 14.8 мкм, поэтому в экспериментах её нельзя использовать.

Для сопоставления данных, полученных с «прямой» и «боковой» камер выбиралось общее начало координат – одна из крайних иглоочек (рис. 7). Из геометрических соображений продольная координата $z_{п}$ для «прямого ракурса» равна поперечной координате $x_{б}$ «бокового ракурса» и наоборот продольная координата $z_{б}$ для «бокового ракурса» равна поперечной координате $x_{п}$ «прямого ракурса». Поперечные координаты $y_{б}$ и $y_{п}$ должны быть равны. Результаты определения координат (относительно центра координат) приведены в таблице 1. В эксперименте статистическая погрешность определения продольных координат равнялась $\sigma_z = 0.2$ мм.

Таблица 1 – Координаты иглоочек, определённые по восстановленным голографическим изображениям с «бокового» и «прямого» ракурсов и погрешности определения координат

«Боковой» ракурс						
	zб, мм	σ_y , мм	xb, мм	σ_z , мм	yб, мм	σ_x , мм
1	0	±0.2	0	±0.05	0	±0.05
2	1.4		1.69		-0.28	
3	3.3		2.52		-0.32	
4	4		3.23		-0.41	
5	5.8		4.43		-0.28	
«Прямой» ракурс»						
	zp, мм	σ_y , мм	xп, мм	σ_z , мм	yп, мм	σ_x , мм
1	0	±0.2	0	±0.05	0	±0.05
2	1.8		1.34		-0.28	
3	2.7		3.28		-0.28	
4	3.4		4.19		-0.38	
5	4.5		5.71		-0.25	

Полученные результаты показывают, что использование второго ракурса позволяет уменьшить погрешность определения пространственного положения объектов.

В **четвертой главе** приведены результаты экспериментальной апробации методов, разработанных в третьей главе.

В ряде работ [1,2] голографическим видео называется видеофильм, созданный на основе голографических данных. Для этого при помощи

ПЗС (или КМОП) камеры производится непрерывная (с частотой следования кадров камеры) регистрация видео картины интерференции опорной и предметной волн и запись этой информации в компьютер, каждый кадр такого видео представляет собой цифровую голограмму.

В результате восстановления каждой такой одиночной цифровой голограммы формируется набор восстановленных изображений сечений объема. На основе восстановленных изображений можно создать так называемы голографическое видео [14*-16*]. Существуют различные способы создания голографического видео. Так, например, если при восстановлении изображения с каждой голограммы (кадра) определяется плоскость наилучшего изображения для конкретной исследуемой частицы, то эта частица всегда будет изображаться резко и появляется возможность анализировать ее перемещение со временем во всем исследуемом объеме. При закреплении плоскости восстановления изображения на одном расстоянии обеспечивается возможность наблюдения всех частиц, проходящих через эту плоскость объема за время записи. Используя один набор голограмм можно создать несколько голографических фильмов для каждой частицы в объеме среды.

Апробация определения трехмерных координат частицы по данным, полученным с цифровых голограмм, была проведена для случая планктонной частицы. Объектом была живая планктонная частица *Epischura baicalensis* отобранная во время работы в составе экспедиции Лимнологического института СО РАН на оз. Байкал. Для регистрации цифровых голограмм использовалась осевая схема на просвет. В качестве источника излучения использовался He-Ne-лазер с длиной волны $\lambda=633$ нм. Цифровые голограммы регистрировалась ПЗС-камерой «Видеоскан-2020» (размер пикселя 7.4×7.4 мкм, размер матрицы 11840×8880 мкм, кадровая частота 3.4 кадров/с).

На рисунке 8 представлена траектория движения планктонной частицы, голографическое изображение которой приведено на рисунке 9.

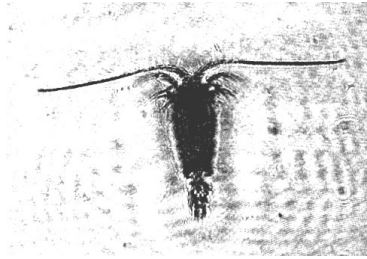
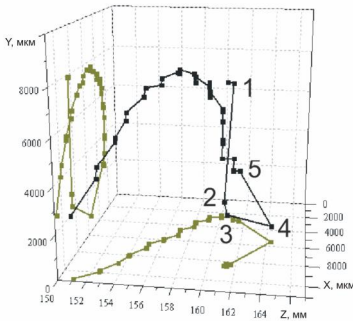


Рисунок 8 – Траектория движения планктонной особи, построенная по данным цифрового голографического видео

Рисунок 9 – Изображение планктонной частицы, восстановленное с цифровой голограммы

Зная координаты частицы для двух последовательных кадров, легко рассчитать ее перемещение за время между кадрами ($t=0.29$ с) и скорость частицы на этом участке траектории движения:

$$V_n = \frac{\sqrt{(x_n - x_{n-1})^2 + (y_n - y_{n-1})^2 + (z_n - z_{n-1})^2}}{t}. \quad (3)$$

Здесь V_n – «мгновенная» скорость между n и $(n-1)$ кадрами (голограммами), (x_n, y_n, z_n) – координата частицы для n -го кадра (голограммы), $(x_{n-1}, y_{n-1}, z_{n-1})$ – координата частицы для $(n-1)$ -кадра (голограммы).

В работе применяется разработанный метод определения угла поворота на примере двух последовательных голограмм планктонной частицы (рис 10):

В эксперименте выбирались три характерные точки – это левый «усик» точка 1, правый «усик» точка 2, хвост – точка 3 (рис 10). После определения координат всех точек были рассчитаны углы поворота для каждой из трёх точек: $\hat{\alpha}_1 = 27.93^\circ$, $\hat{\alpha}_2 = 51.96^\circ$ и $\hat{\alpha}_3 = -20.19^\circ$.

Схематически модель поворота частицы представлена на рисунке 11.

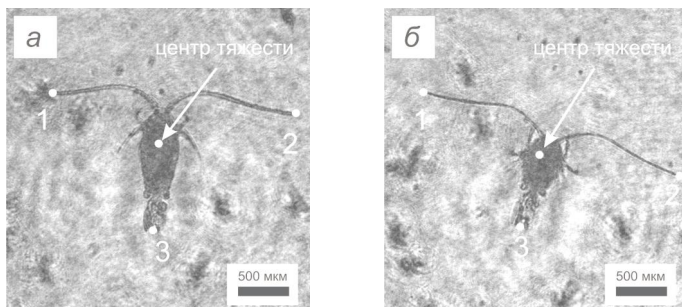


Рисунок 10 – Восстановленные голографические изображения, характеризующие вращательное движение частицы

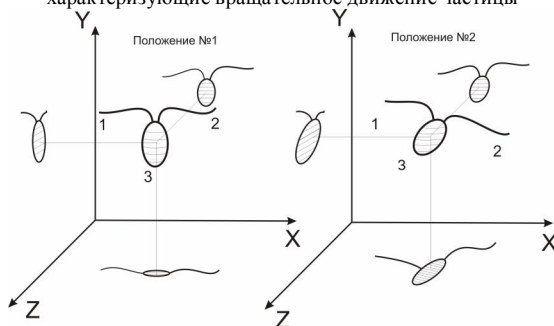


Рисунок 11 – Трёхмерная модель поворота частицы, справа – первое положение частицы, слева – второе

Для повышения достоверности идентификации планктонных частиц и уточнения их координат может быть использована двухкамерная схема записи голограмм, один из вариантов которой представлен в настоящей работе.

В эксперименте была использована схема, описанная выше (рис.7). Для согласования координат с двух камер в исследуемом объёме помещался маркер, который являлся началом координат для обеих камер.

На рисунках 12 а, б представлены примеры изображений *Daphnia magna*, восстановленных с голограмм, одновременно зарегистрированных прямой камерой и боковой камерой (рис. 7).

Как правило, регистрация цифровых голограмм планктонных частиц в лабораторных или натуральных условиях проводится либо в кювете, либо через иллюминаторы погружаемой голографической камеры. В этом случае можно считать, что регистрация голограммы производится через оптическую систему вода-стекло-воздух, а восстановление голографических изображений производится в

воздухе, в отсутствие этой системы. Тогда для рассматриваемого случая освещения объема с частицами «на просвет» и нормального падения предметного пучка на плоскость регистрации осевой голограммы продольная координата d_1 восстановленного в воздухе голографического изображения частицы не совпадает с реальной координатой частицы в воде. Авторами работы [15] был предложен метод учёта влияния дополнительной оптической системы для фотоголографических методов. При известных параметрах: толщина стенки стеклянной кюветы d_2 , расстояние между регистрирующим устройством (фотопластина или ПСЗ-камера) и границей раздела сред стекло-воздух d_3 , показатели преломления стекла n_2 , воды n_1 и воздуха n_3 можно рассчитать разницу между положениями частицы d на этапе регистрации и положением частицы d_1 , определённого по голографическим изображениям:

$$\Delta = d - d_1 = d - d_3 \left(\frac{n_1}{n_3} - 1 \right) - d_2 \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right). \quad (4)$$

По восстановленным голографическим изображениям планктонной частицы (рис. 11) были определены координаты центра тяжести частицы относительно начала координат без учёта поправки для прямого ракурса $x_{\text{п}} = 3041.4 \pm 14.8$ мкм, $y_{\text{п}} = 2324 \pm 44.4$ мкм, $z_{\text{п}} = 1090 \pm 200$ мкм и для бокового ракурса $x_{\text{б}} = 1700 \pm 37$ мкм, $y_{\text{б}} = 2239 \pm 51$ мкм, $z_{\text{б}} = 2450$ мкм.

Из геометрии схемы (рис. 7) очевидно, что вертикальные координаты для обоих ракурсов должны быть равны, а поперечная координата для «прямого» ракурса должна равняться продольной координате «бокового» ракурса и наоборот. Без учёта оптической системы вода-стекло-воздух на этапе регистрации согласование координат не выполняется. Координаты частицы учётом поправки (по формуле 4) для прямого ракурса равняются: $x_{\text{п}} = 3041.4 \pm 14.8$ мкм, $y_{\text{п}} = 2324 \pm 44.4$ мкм, $z_{\text{п}} = 1700 \pm 200$ мкм, с боковой камеры $x_{\text{б}} = 1700 \pm 37$ мкм, $y_{\text{б}} = 2239 \pm 51$ мкм, $z_{\text{б}} = 2900 \pm 200$ мкм. Таким образом, полученные результаты демонстрируют эффективность предложенного метода в работе [15] для цифровых голограмм.

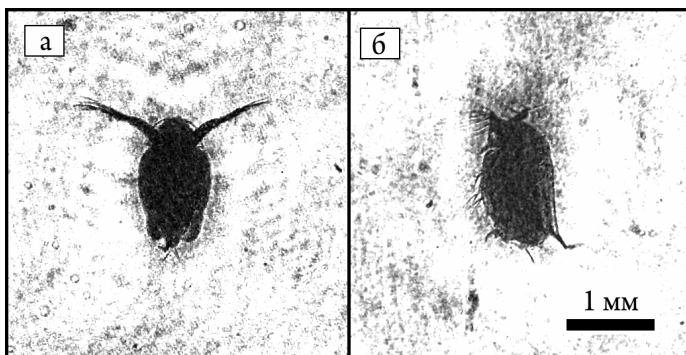


Рисунок 12 – Два ракурса планктонной частицы: а – изображение, восстановленное с голограммы, записанной прямой камерой; б – боковой камерой

Эксперименты по двухракурсной регистрации цифрового голографического видео планктонных частиц позволяют утверждать, что такая схема регистрации цифровых голограмм повышает информативность голографических методов и достоверность идентификации частиц.

В заключении формулируются основные результаты работы:

1. Разработанный метод, который заключается в оценке погрешности восстановления формы тестовых объектов, позволяет оперативно и количественно оценить точность методов восстановления цифровых голограмм с учётом реальных экспериментальных условий.
2. Показано, что для определения пространственного положения частицы сложной формы в качестве продольной координаты может быть использовано расстояние, соответствующее плоскости наилучшего восстановления голографического изображения частицы, а в качестве поперечных координат – координаты центра тяжести изображения в указанной плоскости.
3. Разработан и реализован в лабораторных и экспедиционных условиях метод создания цифрового голографического видео, который позволяет исследовать динамику каждой частицы в объеме с течением времени – координаты, траектория перемещения, вращательные движения.
4. Для случая регистрации цифровых голограмм частиц расположенных в воде продемонстрировано, что методика учёта искажений продольного положения объектов в восстановленных изображениях, вызванных «оптической системой» вода-стекло-воздух на этапе регистрации цифровых голограмм, позволяет совмещать

изображения частиц, восстановленных с голограмм, которые зарегистрированы по двухракурсной схеме.

5. Разработан метод количественной оценки угла поворота частицы относительно центра тяжести по восстановленным изображениям частицы с цифровых голограмм.

6. Разработанный метод аналитического продолжения цифровой голограммы и последующего восстановления позволяет уменьшить искажения, которые возникают за счёт ограниченности цифровой голограммы.

Основные публикации по теме диссертации:

1*. Ольшук А.С., Макаров А.В., Мазур В.А. Цифровая голография для регистрации оседающих частиц в жидкости // Известия вузов. Физика. – 2005. – Т 48. – № 6. – С.137–138

2*. Демин В.В., Ольшук А.С., Наумова Е.Ю., Мельник Н.Г. Цифровая голография планктона // Оптика атмосферы и океана – 2008. – Т. 21. – № 12. – С. 1089 – 1095.

3*. Демин В.В., Ольшук А.С., Дзюба Е.В. Цифровое голографическое видео для исследования динамики планктона // Известия вузов. Физика. – 2010. – № 8. – С. 81 – 89.

4*. Демин В.В., Ольшук А.С. Повышение точности определения координат и достоверности идентификации планктонных частиц путем двухракурсного голографического видео // Известия вузов. Физика. – 2010. – № 9/3. – С. 38 – 41.

5*. Ольшук А.С. Процесс записи и восстановления цифровых голограмм. // Сборник трудов V региональной школы-семинара молодых ученых "Современные проблемы физики, технологии и инновационного развития", Томск 2004. – С. 136 – 139

6*. Ольшук А.С., Макаров А.В., Мазур В.А. Методы цифровой голографии для регистрации микрообъектов // Материалы IV Международной школы молодых учёных и специалистов. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2005. С. 69 – 72.

7*. Ольшук А.С., Макаров А.В., Мазур В.А. Разработка программного обеспечения для восстановления и обработки голографических изображений частиц // Труды 1^й конференции студенческого научного - исследовательского инкубатора / под ред. В.В. Дёмина. – Томск: НТЛ – 2005. – С. 9 – 16.

8*. Ольшук А.С., Макаров А.В., Мазур В.А. Цифровое голографическое видео живых организмов // Сборник тезисов

Одиннадцатой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых: Тезисы докладов. – Екатеринбург: издательство АСФ России., –2005. – Т.1 – С.349 – 350.

9*. Мазур В.А., Макаров А.В., Ольшуков А.С. Повышение качества изображений, восстановленных с цифровых голограмм // Труды 2^{ой} конференции студенческого научного - исследовательского инкубатора / под ред. В.В. Дёмина. – Томск: НТЛ. – 2005. – С. 9 –15.

10*. Дёмин В.В., Макаров А.В., Мазур В.А., Ольшуков А.С. Цифровая голография объемных ансамблей частиц // Сборник тезисов докладов конференции: Фундаментальные проблемы физики – Казань: Изд. Физико-технического института. – 2005. – С. 22.

11*. Dyomin V.V., Mazur V.A.,Makarov A.V., Olshukov A.S. Improvement of the images quality at reconstruction of digital holograms // Proceedings of the ICO Topical Meeting on Optoinformatics/Information Photonics. – St. Petersburg – 2006. – P.164-166.

12*. Dyomin V.V., Olshukov A.S. Technique for Estimation of quality of the particles images reconstructed from digital holograms [electron resource] // Adaptive Optics: Analysis and Methods; Computational Optical Sensing and Imaging; Digital Holography and Three-Dimensional Imaging; and Signal Recovery and Synthesis on CD-ROM (The Optical Society of America, Washington, DC, 2007) – DTuB2. – ISBN 1-55752-838-1.

13*. Дёмин В.В. Ольшуков А.С. Голографические методы исследования частиц и биологических объектов в прозрачных средах // Голография: фундаментальные проблемы исследования, инновационные проекты и нанотехнологии / Материалы XXVI школы по когерентной оптике и голографии / под редакцией профессора, д.ф.м. н. Малова А.Н. – Иркутск: Издательство «Папирус». – 2008. – С. 131 – 136.

14*. Dyomin V.V., Olshukov A. S., Digital holographic video of plankton, Application of Digital Image Processing XXXI / Edit by Tescher, Andrew G. Proceedings of the SPIE/ – 2008. –Vol 773. – P 70732B - 70732B-7.

15*. Ольшуков А.С., Каменев Д.В., Старинщикова А.Ю., Козлова А.С. Методы цифровой голографической регистрации частиц, расположенных в объеме среды // Труды Томского государственного университета. – Томск: Изд. ТГУ. – 2010. Т. 273. Вып. 2. – С. 390-392.

16*. Демин В.В., Ольшуков А.С. Цифровое голографическое видео для исследования биологических частиц // Сборник трудов Международной конференции и семинаров. Т.1. «Фундаментальные проблемы оптики – 2010» Т.2. «Всероссийский семинар по терагерцовой оптике и спектроскопии» Т.3. «Всероссийский семинар

по оптическим метаматериалам, фотонным кристаллам и наноструктурам». Санкт-Петербург. 18-22 октября 2010 / Под ред. проф. В.Г. Беспалова, проф. С.А. Козлова – СПб. – 2010 – Т.3.–С. 162-164.

17*. Dyomin V.V., Olshukov A.S., and Kamenev D.V. Evaluation of the plankton species coordinates from digital holographic video // Conference Proceedings of the “Oceans’11”, Santander, Spain, 06-09 June 2011. Paper No. 110131-015 (2011). IEEE Catalog Number: CFP11OCF-CDR; ISBN: 978-1-4577-0087-3; ISBN of Paper: 978-1-61284-4577-0088-0/11.

Список цитируемой литературы:

1. Pfitsch D.W., Malkiel E., Ronzhes Y., King S.R., Sheng J., Katz J. Development of a free-drifting submersible digital holographic imaging system // Proc. MTS/IEEE OCEANS. – 2005. – P. 690-696.
2. Sun H., Hendry D.C., Player M.A., Watson J. In situ underwater electronic holographic camera for studies of plankton // IEEE J. Ocean. Eng. 2007. – V. 32. – P. 373-382.
3. Сойфер В.А. Методы компьютерной обработки изображений./ Сойфер В.А. – М. Мир, 2003. – 780 с.
4. Schnars U., Jueptner W. Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction and Related Techniques – Berlin: Springer. – 2005. – 164 p.
5. Yan Yang, Bo-seon Kang, Yeon-jun Choo Application of the correlation coefficient method for determination of the focal plane to digital particle holography // APPLIED OPTICS. – 2008. – V. 47, №. 6.–P. 817-824.
6. Yan Yang, Boseon Kang Measurements of the characteristics of spray droplets using in-line digital particle holography // J. Meas. Sci. Technol. – 2009. – V. 23. – P. 1670-1679.
7. Lei Tian, Nick Loomis, José A. Domínguez-Caballero, George Barbastathis, Quantitative measurement of size and three-dimensional position of fast-moving bubbles in air–water mixture flows using digital holography // APPLIED OPTICS. – 2010. – V. 49. – № 9. – P 1549- 1554.
8. Бородин А.Н., Малов А.Н., Сычевский А.В. Оптимизация схемы Д. Габо́ра для записи компьютерных голограмм // Компьютерная оптика. – 2009– Т. 33. – № 3. – С. 249 - 253.
9. Choo Y J, Kang B S The characteristics of the particle position along an optical axis in particle holography // Meas. Sci. Technol.– 2006. – № 17. – P. 761–770.
10. Cristina Buraga-Lefebvre, SeHbastien CoeKtmellec, Denis Lebrun, Cafer OG Cafer-OFgkul Application of wavelet transform to hologram analysis: three-dimensional location of particles // Optics and Lasers in Engineering. – 2000. – V.33 – P. 409-421.
11. Taslima Khanam, Mohammad Nurur Rahman, Arvind Rajendran, Vinay Kariwala, Anand K. Asundi Accurate size measurement of needle-shaped particles using digital holography // Chemical Engineering Science.–2011.– V. – 66. –№3. – P. 2699–2706.

12. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. – М.: Мир. – 1979. – 686 с.
13. Демин В.В., Каменев Д.В. Критерии качества голографических изображений частиц различной формы // Известия вузов. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 9. – С. 46 – 53.
14. Богнера Р., Константи́нидис А. введение в цифровую фильтрацию пер. Л.И Филипов. – М.:Мир.– 1977 216с.
15. Демин В.В., Степанов С.Г. Голографические исследования прозрачных микрочастиц // Оптика атмосферы и океана. – 1998. – Т. 11. – № 7. – С. 671-676.