

## ФИЗИКА ЗЕМЛИ, АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

**Применение метода фотометрии изображений  
в некоторых задачах гидродинамики**Н. И. Шевцов<sup>1,a</sup>, Е. В. Степанова<sup>2,b</sup><sup>1</sup> *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики моря и вод суши. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*<sup>2</sup> *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики имени А. Ю. Ишлинского РАН. Россия, 119526, Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1.*E-mail: <sup>a</sup> red3991@ya.ru, <sup>b</sup> step@ipmnet.ru

Статья поступила 21.12.2014, подписана в печать 25.02.2015.

В работе приводятся результаты использования метода фотометрии, применяемого к изображениям картин течений, полученных в ходе экспериментальных исследований трех различных гидродинамических процессов. На основе полученных данных вычисляются характерные параметры исследуемых течений. Проводится сравнение методики, предложенной авторами, с имеющимися программными продуктами.

*Ключевые слова:* фотометрия, лабораторное моделирование течения, волны, примесь.

УДК: 532. PACS: 92.05.Вс.

**Введение**

В современной гидродинамике существуют экспериментальные задачи, непосредственные измерения в которых невозможно выполнить по ряду причин технического и методического характера. В первую очередь это размеры существующих измерительных приборов и датчиков, которые при помещении их внутрь исследуемого объема жидкости могут существенно повлиять на характер течения. Также имеются вопросы теоретического характера к основным методам измерения скорости потока жидкости. Применяемые в настоящее время методики измерения скорости течения основываются на предположении о тождественности скорости частиц примесей, содержащихся в исследуемой жидкости или целенаправленно в нее добавленных, со скоростью жидкости. Исследования последних лет [1, 2] показывают, что справедливость этого утверждения нуждается в дополнительной проверке.

Существующие бесконтактные методы измерения скорости потока жидкости и ее направления фактически основаны на измерениях скорости движения частиц примеси, присутствующих практически в любой жидкости. Самый известный на сегодня метод — лазерная доплеровская анемометрия (ЛДА). Прохождение частицы через точку, где когерентные лазерные лучи создают интерференционную картину, вызывает доплеровский сдвиг частоты рассеянного света, измерив который становится возможным определить скорость движения такой частицы [3]. Существуют данные, что даже такие измерения могут влиять на величину измеренной скорости частиц. Для малых измеряемых скоростей [4] светодинамический эффект применяемого излучения с высокой плотностью энергии может вызывать изменение измеряемой скорости на 3–10%, а также изменение траектории частицы, что может влиять на структуру течения.

При визуализации картины течения с помощью PIV-метода (Particle Image Velocimetry), частицы скапливаются в отдельных областях течения (см. рис. в [5]), что свидетельствует об отсутствии тождества полей плотности жидкости и частиц, а следовательно, о возможных отличиях полей скорости частиц и несущей жидкости. Подход к измерению скорости течения, основанный на маркировании отдельных жидких частиц, предполагающий сохранение состава частицы при изменении ее формы, не выдерживает проверки экспериментом.

Необходимо упомянуть о ряде задач, где предположение о тождественности скорости частиц и жидкости опровергается, и характер поведения частиц примеси в объеме и на поверхности жидкости можно считать самостоятельным объектом исследования. Существуют течения со сложной многомасштабной структурой, некоторые элементы которой наиболее легко детектируются оптическими методами при высоком разрешении применяемых техник визуализации. Например, с применением оптических инструментов, разрешение которых превышает 0.5 мм, в течении за препятствием [6] были обнаружены элементы, непосредственно не контактирующие с источником возмущения, — висящие разрывы. Контактные измерения подтвердили существование этих разрывов, но их пространственная структура наиболее полно визуализировалась с помощью оптических инструментов. Также было выяснено, что такие сложные элементы течений являются аттракторами для примесей, ранее диффузно распределенных в объеме жидкости.

Исследования течений разреженных дисперсных смесей показали, что движение среды и частиц примеси имеет различный характер. Полученные численные решения уравнений движения для течения и примеси [7] описывают в том числе сечения трубок тока течения основной фазы и частиц, а также их траектории. Показано, что при определенных

условиях траектории частиц имеют множественные пересечения как между собой, так и с траекториями движения несущей фазы.

Аналитически описаны течения в океане, где возникают области, препятствующие диффузии примеси [8], что подчеркивает важность изучения примеси как самостоятельного объекта. Появление областей сложной формы, занятых примесью (например, в результате аварийных разливов нефтепродуктов [9]), прослеживание их эволюции, численное и аналитическое моделирование процессов переноса в природных водоемах может базироваться на данных спутникового мониторинга, включающих получение и обработку изображений соответствующих областей на поверхностях водоемов.

В настоящее время получение количественных данных о характере движения частиц примеси и их скоплений с помощью контактных методов измерений затруднено и может быть связано с искажением картины течения. Метод визуального наблюдения и фотофиксации процессов, происходящих в исследуемом объеме жидкости, традиционно используется для качественного описания эксперимента, для количественного описания течений или их элементов — начал применяться совсем недавно. Последующая обработка полученных изображений, результатом которой являются количественные данные о зарегистрированном процессе, позволяет получить количественные характеристики эффектов, которые ранее были описаны лишь качественно. Примером может служить «стена краски» (в оригинале — «ink wall») [10], возникающая при распространении примеси из капли, внесенной на свободную поверхность вращающейся жидкости.

Обработка изображений, полученных в ходе регистрации картины исследуемого течения, может производиться различными методами. Используемый авторами метод базируется на сравнении зарегистрированных освещенностей различных участков изображения течения между собой. Измерение освещенности проводится как чтение данных о яркости точки изображения, переведенного в цифровую форму. Методика измерений параметров течения предполагает наличие фото- или видеозаписи, где различные участки течения и их характерные элементы обладают различной освещенностью и изображаются контрастно: яркость участков изображения, соответствующих различным областям течения, должна различаться настолько, чтобы позволить их идентифицировать однозначно [11].

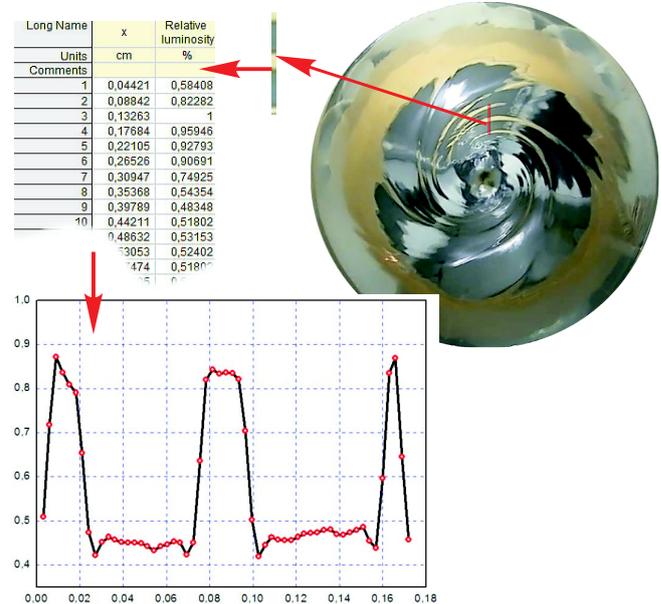
Видеозапись эксперимента разбивается на отдельные кадры, интервал времени между которыми фиксирован и выбирается с учетом динамики исследуемого процесса. Далее производится пакетная обработка всей полученной серии изображений. Для упрощения применения методов фотометрии изображения переводятся из трехцветного 24-битного формата в 2-, 4- или 8-битный монохромный формат. Выбор количества уровней дискретизации зависит от конкретной задачи. Далее полученное изображение или его участок интерпретируется как матрица соответствующего размера, элементами которой являются значения яркости точек. В дальнейшем

полученная матрица подвергается необходимым процедурам, спецификация которых определяется тем, какие характеристики течения необходимо получить в итоге. Описанный метод применялся авторами для трех разных задач.

### 1. Определение яркости изображения свободной поверхности составного вихря

Одна из этих задач — определение характеристик поверхностных волн, наблюдаемых в экспериментах, направленных на изучение составного вихревого течения, проводимых на установке «Вихревые течения с кручением» (далее — ВТК). Течение создается в вертикально ориентированном цилиндрическом объеме жидкости, индуктором течения служит вращающийся с постоянной угловой скоростью диск, расположенный на дне этого объема (подробное описание которой можно найти в [12]).

Метод фотометрии применяется для измерения пространственного периода и средней частоты волн, образующихся на свободной поверхности составного вихря, возникающего в установке ВТК. Основой измерений служит видеозапись эксперимента, переведенная в цифровую форму, отдельные кадры из которой подвергались обработке. Для каждого кадра выделялся участок изображения, где на поверхности течения различимы волны. С фотометрической точки зрения такой участок свободной поверхности — область изображения с сильно различающимися значениями яркости, которые соответствуют гребням и впадинам поверхностных волн (рис. 1).



жение имело ширину три пикселя, следовательно, соответствующая матрица содержала три столбца значений. Значение яркости вычислялось как среднее арифметическое элементов строки. Значения нормировались на величину максимального элемента полученного столбца значений яркости. Номера элементов столбца, соответствующие номерам пикселей выделенного участка изображения, пересчитываются в единицы длины. Коэффициент пересчета определялся как отношение измеренного на изображении (в пикселях) диаметра рабочей области установки к его реальному значению (в метрах). Нормировка значений длины проводилась на радиус рабочей области установки. Определение пространственного периода поверхностных волн производилось на основе полученного графика зависимости усредненных и нормированных значений яркости от приведенных координат. Также в зависимости от формы свободной поверхности, которая существенно отличается от плоскости, в формулу расчета координат вносились поправки, связанные с локальной величиной угла ее наклона к горизонту.

Для определения средней величины частоты волн видеозапись эксперимента разбивалась на кадры через равные промежутки времени, на каждом изображении серии выделялась область, соответствующая одному и тому же для всех кадров конкретному участку свободной поверхности. Последо-

вательность выбранных участков изображения переводилась с использованием специализированного программного обеспечения в матрицу соответствующего размера, элементами которой становились значения яркости точек в восьмибитном формате (рис. 2, а). В дальнейшем полученная матрица значений подвергалась преобразованиям, аналогичным производимым при вычислении пространственного периода поверхностных волн. На основе полученных усредненных значений яркости строился график (рис. 2, б), с помощью которого была определена средняя частота поверхностных волн, которая для представленного примера ( $R = 14.0$  см,  $H = 30$  см) равна  $\nu = 1.52$  с<sup>-1</sup>.

Измеренные значения длин волн — мгновенные. Для каждой серии экспериментов значение длины волны измерялось многократно. На основе сравнения этих измерений с рассчитанными для условного эксперимента характерными длинами волн было установлено, что волны, наблюдаемые на поверхности составного вихря, относятся к типу гравитационно-капиллярных.

## 2. Расчет площади поверхностного пятна

Другая задача — расчет площади свободной поверхности, покрытой нефтяной пленкой, а также мониторинг скорости уменьшения площади пятна нефти в результате применения сорбирующего вещества. Проблема удаления легких примесей с поверхности воды стоит достаточно остро в связи с частым возникновением локальных экологических кризисов при разливах нефтепродуктов на обширных акваториях. Моделирование процесса ликвидации поверхностных загрязнений проводится в лабораторных условиях. Установка представляет собой прозрачный контейнер, заполненный водой, на свободную поверхность которой помещается фиксированное количество несмешивающейся примеси.

Первоначальная постановка задачи включала изучение поведения фиксированного объема легкой несмешивающейся примеси в вихревом течении. Особенности такого течения, содержащего добавку, подробно описаны в [13]. Наряду с исследованием течения с небольшой добавкой несмешивающейся примеси проводятся исследования по ликвидации загрязнений — сбору легких несмешивающихся примесей, таких как подсолнечное и касторовое масло, дизельное топливо, нефть — с помощью органического сорбента. Проводятся исследования впитывающей способности сорбента в зависимости от соотношения количеств впитывающего и впитываемого веществ.

Методика оценки скорости сорбции основывается на измерении площади первоначального пятна загрязнения и изменении со временем площади этого пятна при внесении на его поверхность сорбирующего вещества. Метод фотометрии здесь применим вследствие различия яркости изображения пятна примеси и чистой воды. Полученный в ходе эксперимента ряд изображений подвергается обработке таким образом, что участки, содержащие примесь, отображаются как черные, а чистую воду — как белые. Каждое полученное монохромное изображение

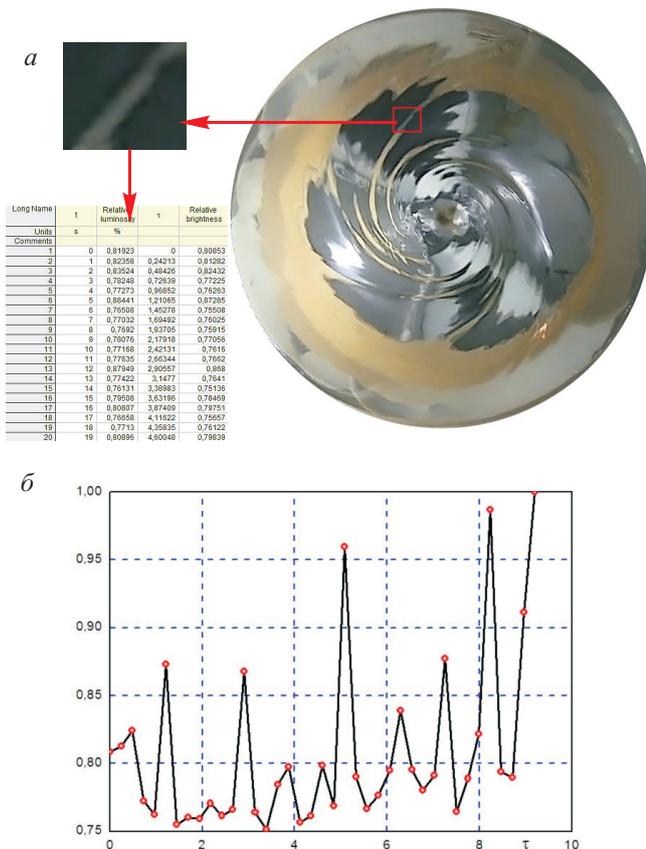


Рис. 2. Схема расчета (а) и график (б) зависимости относительной освещенности (значения нормированы на максимальное в серии) одного и того же участка каждого кадра в серии от времени (нормировано на частоту). Параметры экспериментальной установки:  $R_0 = 4.7$  см,  $R = 4.0$  см,  $H = 0$ ,  $\Omega = 0$

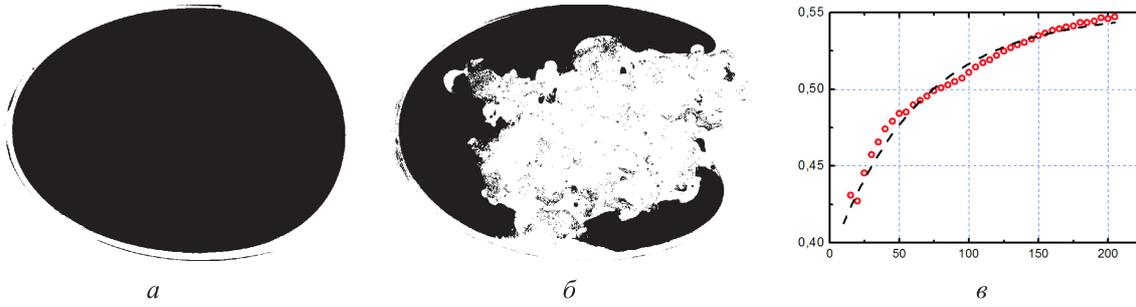


Рис. 3. Схема расчета площади пятна примеси на свободной поверхности: изображение пятна в момент времени  $t=0$  (а),  $t=10$  с (б) и график зависимости относительной площади примеси на свободной поверхности воды от времени (в)

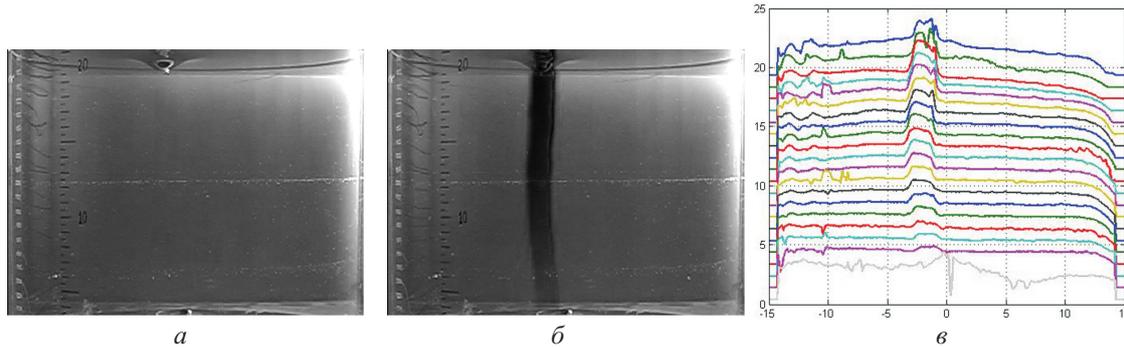


Рис. 4. Результат обработки изображений ( $\Omega = 600$  об/мин, глубина жидкости  $H=0$ , радиус диска  $R_d = .0$  см): а — начальный момент времени  $t=0$ , б — сформировавшийся окрашенный столб на выбранных уровнях

в 1-битовом формате сравнивается с изображением исходного пятна.

Площадь поверхности, занятой примесью, пропорциональна количеству точек изображения, окрашенных в черный цвет. Площадь исходного пятна принимается равной единице (рис. 3, а). При сравнении площади пятна на каждом кадре (рис. 3, б) последовательно с эталонной площадью была получена зависимость относительной площади примеси на свободной поверхности воды от времени (рис. 3, в). Характерный вид этой зависимости описывается соотношением  $S = Ae^{-Bt} + S_0$ , где  $S$  — площадь поверхности, занятой примесью;  $S_0$  — исходная площадь пятна примеси;  $t$  — время, отсчитываемое от внесения сорбента;  $A, B$  — эмпирические коэффициенты, зависящие от соотношения количеств сорбента и примеси, рассчитываемые по методу наименьших квадратов.

### 3. Определение скорости проникновения красителя в толщу составного вихря

Наиболее сложной задачей, стоявшей перед авторами, был расчет скорости проникновения растворимого красителя в толщу жидкости в составном вихре (рис. 4, а). Перенос окрашивающего вещества из капли, внесенной на свободную поверхность, в толщу первоначально происходит вдоль спиральных и винтовых линий [14], которые со временем стягиваются в две области — центральный окрашенный столб и тонкую цилиндрическую оболочку вокруг него. Размер цилиндрической оболочки недостаточно велик для надежного определения ее положения

на основе зафиксированных яркостей точек изображения. В то же время центральный окрашенный столб (рис. 4, б) поддается детектированию даже при небольшом различии между яркостями соответствующих ему точек и точек, соответствующих окружающей жидкости. Видеозапись эксперимента с внесением примеси на свободную поверхность составного вихря разбивалась на кадры с частотой дискретизации один кадр в секунду. Для определения характеристик перемещения примеси в толще жидкости, на полученных изображениях выделялся цветовой канал, соответствующий цвету красителя. Далее с помощью специального программного обеспечения на нескольких (пятнадцати-двадцати в зависимости от разрешения изображения и глубины слоя жидкости) уровнях по вертикали строились графики зависимости интенсивности цвета от горизонтальной координаты (рис. 4, в).

По пикам на этих графиках были определены области наибольшей концентрации красителя и сделаны выводы о характере его распространения в вертикальном направлении.

### Заключение

Исследования процессов переноса, происходящих в различных течениях, играют важную роль для наиболее полного понимания их структуры.

Использование методов фотометрии позволило качественно улучшить и в целом изменить подход к решению задач определения параметров течений. Преимущество метода фотометрии заключается в получении данных без использования дополни-

тельных измерительных элементов, вносящих искажения и неопределенность в получаемые результаты (изменение геометрии течения и состава жидкости, пусть и незначительные, ведут к усложнению картины течения и необходимости учета их влияния на параметры потока).

Сравнение предложенного метода с реализованными в других программных продуктах, в том числе и на основе открытого исходного кода [15], показывает полное совпадение получаемых характеристик изображений. В отличие от общих алгоритмов, применяемых в готовом программном обеспечении, разработки авторов, специализированные и адаптированные под конкретную задачу, позволяют сразу получать необходимые результаты и контролировать все этапы преобразования изображений.

Авторы выражают благодарность профессору К. В. Показееву и доктору физ.-мат. наук В. А. Калиниченко за плодотворное обсуждение в ходе работы над материалом.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 14-05-00714-а).

#### Список литературы

1. Степанова Е.В., Чашечкин Ю.Д. // Докл. РАН. 2008. **423**, № 4. С. 474.
2. Чашечкин Ю.Д. // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естеств. науки. 2014. № 6. С. 67.
3. [http://www.laser-portal.ru/content\\_183](http://www.laser-portal.ru/content_183).
4. Дубнищев Ю.Н., Павлов В.А. // Письма в ЖТФ. 1998. **24**, № 17. С. 53.
5. Escudier M.P. Experiments in Fluids. 1984. **2**. P. 189.
6. Миткин В.В., Чашечкин Ю.Д. // ПМТФ. 1999. **40**, № 5. С. 40.
7. Лебедева Н.А., Осипцов А.Н. // Изв. РАН. МЖГ. 2009. № 1. С. 83.
8. Кшель К.В., Пранц С.В. // Успехи физ. наук. 2006. **176**, № 11. С. 1177 (Koshel K.V., Prants S.V. // Phys. Usp. 2006. **49**. P. 1151).
9. [http://news.bbc.co.uk/hi/russian/sci/tech/newsid\\_2823000/2823425.stm](http://news.bbc.co.uk/hi/russian/sci/tech/newsid_2823000/2823425.stm).
10. Taylor G.I. // Roy. Soc. Proc. A. 1921. **100**. Pl. 2. P. 114.
11. Физическая энциклопедия. В 5 т. М., 1988.
12. Чаплина Т.О., Степанова Е.В., Чашечкин Ю.Д. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2012. № 4. С. 69 (Chaplina T.O., Stepanova E.V., Chashechkin Yu.D. // Moscow University Phys. Bull. 2012. **67**, N 4. P. 391).
13. Чаплина Т.О., Степанова Е.В., Чашечкин Ю.Д. // Докл. РАН. 2010. **432**, № 2. С. 185.
14. Степанова Е.В., Чашечкин Ю.Д. // Изв. РАН. МЖГ. 2010. № 6. С. 12.
15. <http://soft.mydiv.net/win/download-ImageJ.html>.

#### Application of photometry method to some hydrodynamic objectives

N. I. Shevtsov<sup>1,a</sup>, E. V. Stepanova<sup>2,b</sup>

<sup>1</sup>Department of Marine and Inland Water Physics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

<sup>2</sup>A. Yu. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences, Moscow 119526, Russia.

E-mail: <sup>a</sup>red3991@ya.ru, <sup>b</sup>step@ipmnet.ru.

Presented paper contains the results of applying the photometry method to the flow pattern images obtained in the experimental investigation of three different hydrodynamic processes. Characteristic parameters of the currents are calculated on the basis of the obtained data. Comparison of the methods proposed by the authors, with the available software products is held.

*Keywords:* photometry, laboratory simulation of flows, waves, admixture.

PACS: 92.05.Bc.

Received 21 December 2014.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 3(2015).

#### Сведения об авторах

1. Шевцов Николай Иванович — студент; e-mail: red3991@ya.ru.

2. Степанова Евгения Вячеславовна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: step@ipmnet.ru.