

УДК 533.6.011.72

Знаменская И.А., Винниченко Н.А., Глазырин Ф.М.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет,
Россия,

119991 Москва, Ленинские горы, д.1, стр.2; E-mail: znamen@phys.msu.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕНЕВОГО ФОНОВОГО МЕТОДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЯ ТЕЧЕНИЯ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ

Представлены результаты экспериментального исследования теневым фоновым методом (ТФМ) процессов конвекции и теплопроводности в воде. Векторное поле смещений ТФМ определялось кросскорреляционным методом. Поле плотности получалось из решения уравнения Пуассона со специальными граничными условиями. Показано, что ТФМ дает хорошее качественное отображение структуры течения, получаемые количественные данные о поле температуры согласуются с прямыми измерениями.

**ТЕНЕВОЙ ФОНОВЫЙ МЕТОД, КОНВЕКТИВНЫЕ ПОТОКИ, ТЕМПЕРАТУРА,
ПОКАЗАТЕЛЬ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ВОДЫ**

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы быстрыми темпами идет развитие модификаций метода количественной оптической диагностики потоков ТФМ (теневого фонового метода). Преимуществами ТФМ являются скромные требования к оборудованию и возможность получить не только качественные, но и количественные данные о потоке. Подавляющая часть работ по ТФМ на сегодняшний день касается анализа потоков газа, в том числе конвективных, сверхзвуковых, струйных течений [1]. Между тем, на основе ТФМ возможно визуализировать и исследовать процессы в оптически прозрачных жидкостях [2]. Применение этого метода к процессам, происходящим в жидкости, является актуальной задачей, как научной, так и методической.

Целью данной работы было исследование процессов конвекции и теплопередачи в жидкости с получением количественных полей термодинамических параметров.

ТЕНЕВОЙ ФОНОВЫЙ МЕТОД

Суть теневого фонового метода заключается в сравнении двух изображений одного и того же фона, снятых при отсутствии и при наличии между фотоаппаратом и фоном исследуемого прозрачного объекта с неоднородностями [3].

Изменение показателя преломления в плоскости наблюдения в случае съемки фона через течение приводит к несовпадению исходного (реперного) и «рабочего» изображений (рис. 1). Проанализировав смещение характерных элементов фона на снимках, можно получить количественную информацию об интегральных показателях преломления исследуемой среды вдоль оптического луча.

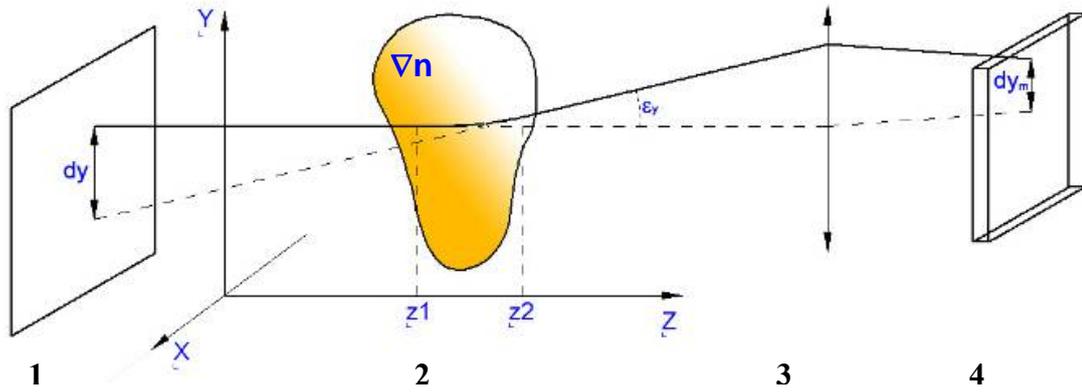


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема теневого фонового метода: 1 – фон, 2 – исследуемый объект, 3 – линза/объектив, 4 – CCD/CMOS матрица

Y-компонента отклонения луча, идущего от фона, выражается из закона рефракции следующим образом:

$$\varepsilon_y = \int_{z_1}^{z_2} \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial x} dz \approx \frac{1}{n_2} \left\langle \frac{\partial n}{\partial x} \right\rangle (z_1 - z_2)$$

$$dy = \operatorname{tg} \varepsilon_y \cdot L_b \approx \varepsilon_y L_b$$

Связь между плотностью однородной среды и ее показателем преломления дает соотношение Гладстона-Дейла:

$$\frac{n-1}{\rho} = G \quad (1)$$

где G – постоянная Гладстона-Дейла, характерная для данной среды. Для воды $G = 3,3 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$. В рассматриваемом диапазоне температур и оптическом спектре её можно считать неизменной.

Связь плотности с температурой выражается эмпирическим уравнением состояния IAPWS-95 [4].

Температурный коэффициент $\frac{dn}{dT}$ для воды имеет порядок 10^{-4} , для воздуха – 10^{-6} [5].

Таким образом, использование ТФМ представляется весьма перспективным для анализа поля температур в жидкости, так как позволяет получить даже большую чувствительность.

КОМПЬЮТЕРНАЯ ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ТФМ

Полученные ТФМ снимки единообразно обрезались, переводились в оттенки серого и сравнивались попарно. Для сравнения использовался кросскорреляционный метод. Реперное изображение делилось на квадратные области опроса, для каждой из которых определялся вектор сдвига данного элемента фона на рабочем изображении относительно реперного (рис. 2).

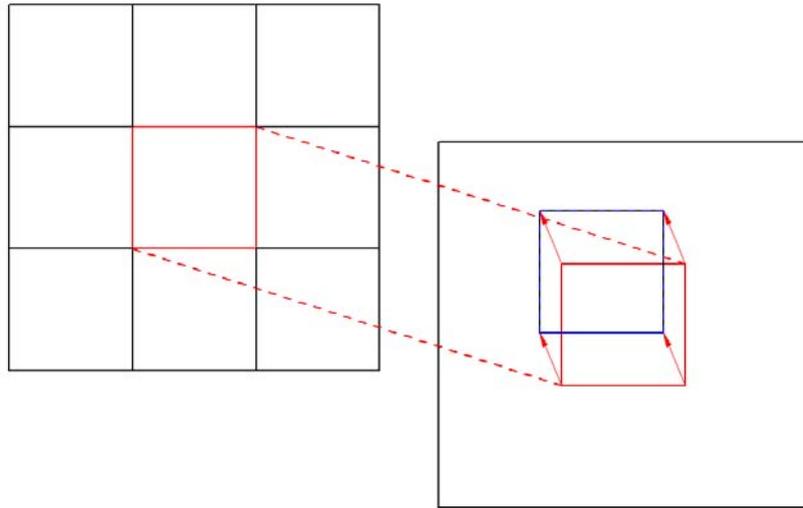


Рис. 2. Схема ТФМ анализа

Такой метод не позволяет достаточно уверенно фиксировать смещения больше половины размера области опроса, а увеличение области опроса не позволяет разрешить мелкую структуру исследуемого течения. Поэтому рабочий алгоритм включал в себя многопроходный вариант метода (рис. 3) когда каждая пара сравнивалась несколько раз с уменьшающимся размером области опроса, и результирующее поле смещения определялось как сумма смещений на разных шагах. Возможные ошибки в определении смещений на каждом шаге отбраковывались по методу нормированной медианы. На последнем проходе применялась гауссова аппроксимация формы пика коэффициента корреляции для получения субпиксельной точности.

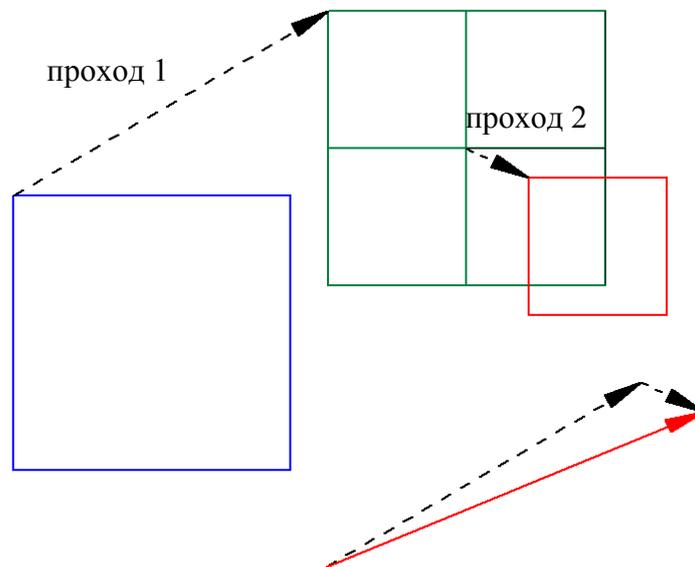


Рис. 3. Многопроходная схема обработки

После получения поля градиента показателя преломления в исследуемом объекте, поле дифференцировалось ещё раз по координатам, и показатель преломления находился из решения уравнения Пуассона [6]:

$$\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n}{\partial y^2} = \Delta n = f(x, y)$$

Плотность определялась из соотношения Гладстона-Дейла, а затем для получения поля температуры из поля плотности использовалось уравнение состояния воды IAPWS-95.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследовалась возможность применения теневого фонового метода к регистрации различных неизотермических процессов в жидкостях. Исследования включали в себя экспериментальную работу (съёмка различных объектов с помощью ТФМ) и отладку программной части метода. В качестве жидкости использовалась фильтрованная вода.

Оптическая схема включала в себя фон и фотоаппарат, закреплённые на оптической скамье. Использовался цифровой зеркальный фотоаппарат Nikon D50 со стандартным объективом 18 – 55 мм, съёмка производилась с дистанционным спуском.

В качестве фона использовалось изображение т.н. вейвлет-шума (рис. 4). Это фоновое изображение имеет контрастные элементы различных масштабов, что позволяет с помощью одного и того же фона разрешать и мелкую, и крупную структуру исследуемого течения, а также получать численные данные с участков изображения, где фон сильно размыт либо деформирован. На целесообразность использования такого фонового изображения было указано в работе [7].

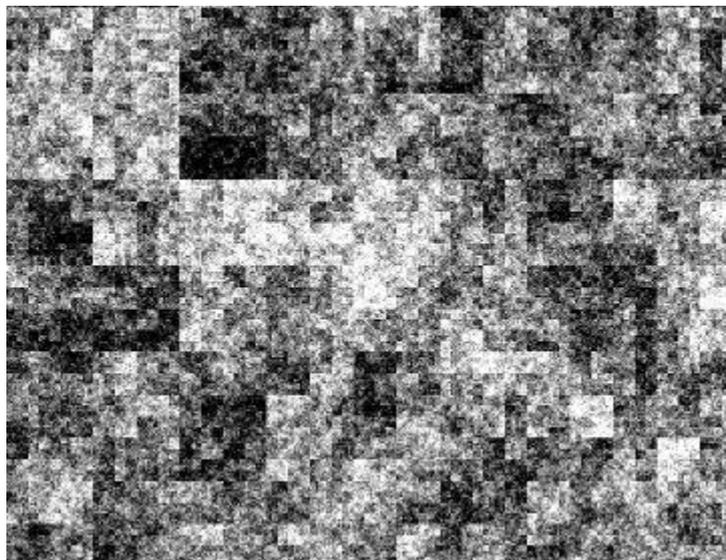


Рис. 4. Элемент фонового изображения (вейвлет-шум), использованного при съёмках

При наличии температурной неоднородности даже небольшие создаваемые градиенты в исследуемом объёме ведут к возникновению конвективных потоков. Для снимаемого объёма с характерным размером 10 см и разностью температур 10 К число Рэлея уже превышает 10^8 . Основным исследуемым объектом являлись области жидкости с положительным вертикальным градиентом температур и устойчивой стратификацией. Для корректного определения полей плотности и температуры при помощи ТФМ необходимо было создать течение жидкости, близкое к двумерному.

В плоском сосуде (рис. 5) исследовались процессы конвекции и теплопередачи, возникающие при локальном нагреве. Две боковые стенки сосуда – стеклянные, размером 23,7×21,4 см. Толщина сосуда между этими стенками – 9,8 мм. Таким образом, вода в сосуде представляет собой тонкий вертикальный слой жидкости, удобный для организации течений, близких к двумерным.

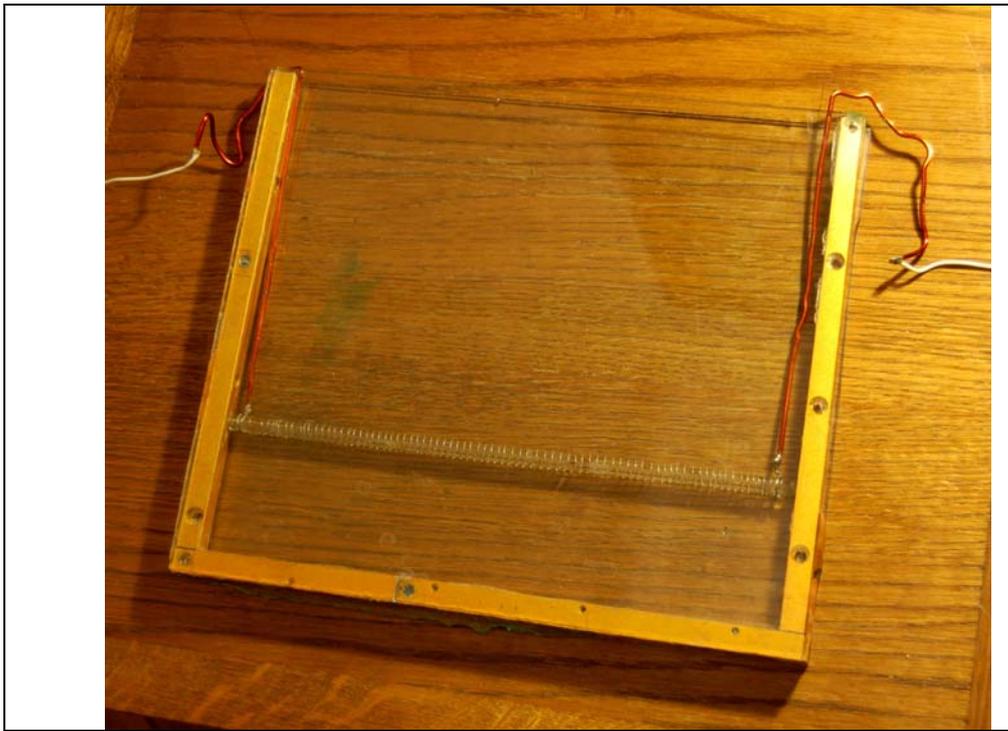


Рис. 5 Плоский сосуд с нагревателем

Использовался горизонтально расположенный нагревательный элемент – нихромовая спираль на кварцевом стержне, нагреваемая переменным током. Выделяемая тепловая мощность варьировалась от 2 до 15 ватт на сантиметр длины нагревателя.

При этих параметрах развиваются две чётко различающиеся картины течений: в жидкости над нагревателем происходит конвекция (в большинстве случаев турбулентная), а в слое ниже нагревательной спирали устанавливается стационарный вертикальный градиент температуры, обусловленный теплопроводностью воды. Если первый случай интересен в основном для демонстрации визуализационных возможностей метода, то второй представляет собой весьма удобный объект для тестирования и калибровки возможностей метода по получению количественных данных.

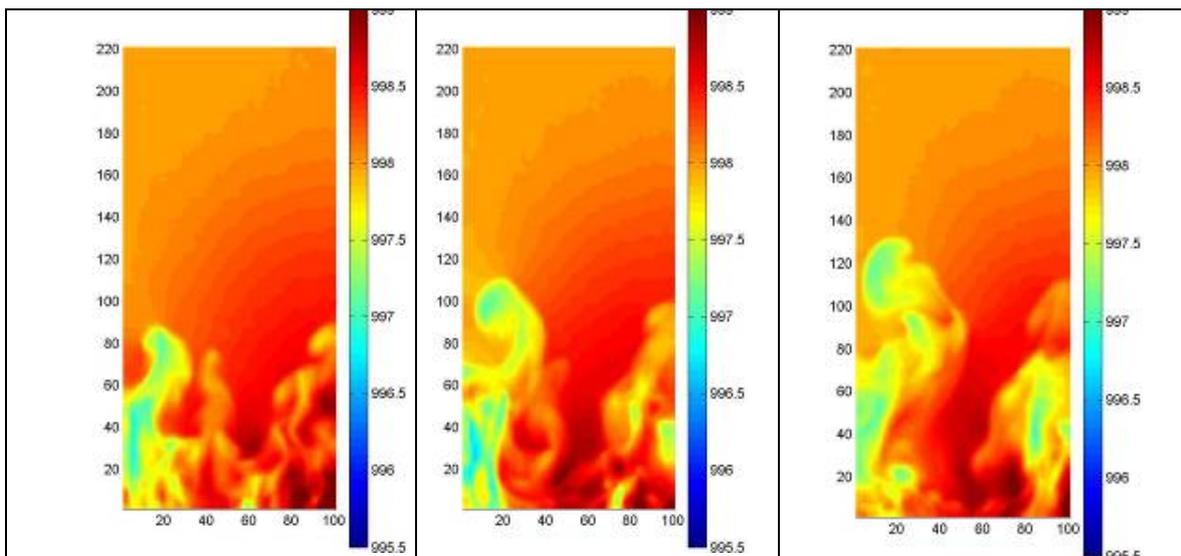


Рис. 6. Конвективные потоки в слое над нагревателем (поле плотности, $\text{кг}/\text{м}^3$)

ТФМ изображения конвективного течения над нагревателем не могут быть источником точных количественных данных о распределении плотности и температуры, поскольку потоки в данном случае являются в значительной мере пространственными. Течение

нестационарно; через 1 – 2 секунды после подачи тока из области нагрева начинают подниматься тепловые потоки: визуализируются восходящие термики над нагревательным элементом. Последовательные снимки конвективного течения в вертикальном слое приведены на рис. 6. Нагреватель находится под нижним обрезом кадра, выделяемая тепловая мощность – около 9 Вт/см. Интервал между кадрами – около 1 сек.

На рис. 7 приведены изображения полей смещения и полей температуры в слое ниже нагревательной спирали при различных уровнях нагрева. Спираль находится над верхним краем кадра. Температура, измеренная термопарой непосредственно рядом с нагревателем: а) $T = 27^{\circ}\text{C}$, б) $T = 55^{\circ}\text{C}$.

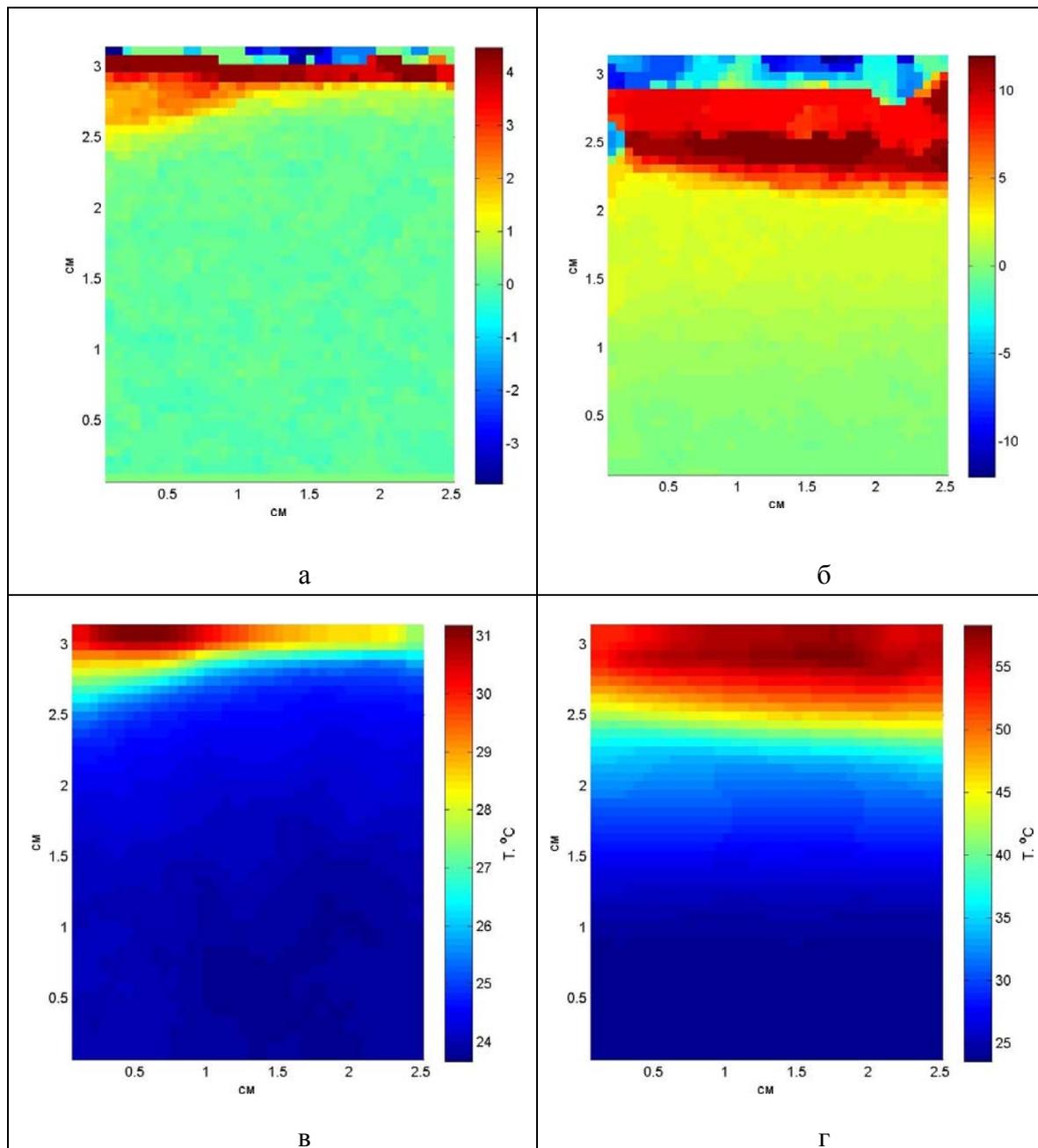


Рис. 7. Поля вертикальных смещений (а,б) и температур (в,г) под нагревателем

Зарегистрировано стационарное неизотермическое течение, определяющееся теплопроводностью воды и конвективным выносом нагретой жидкости наверх. Качественно картина течения согласуется с теоретическими анализом и оценками. Количественные значения температуры, полученные с помощью ТФМ, согласуются с прямыми измерениями, проведенными термистором. Также получена хорошая повторяемость в сериях снимков.

Дополнительно производилась съёмка пространственного нестационарного течения неизотермической жидкости: импульсной затопленной струи, инжектированной в объем. В большой сосуд в форме параллелепипеда, заполненный водой комнатной температуры, инжектировалась струя воды с температурой 50 – 70°C. В этом случае получение количественных данных о распределении полей термодинамических параметров невозможно без многоакурсной регистрации: течение существенно трехмерно. Была проведена визуализация динамики развития импульсной затопленной струи. Получены четкие изображения импульсного процесса инъекции (2 – 3 сек) и конвективного всплывания нагретой области (3 – 10 сек). На рис. 8 приведена серия результатов обработки изображений полей течения: абсолютные смещения элементов изображения. Время между первым и последним снимком – 5 сек.

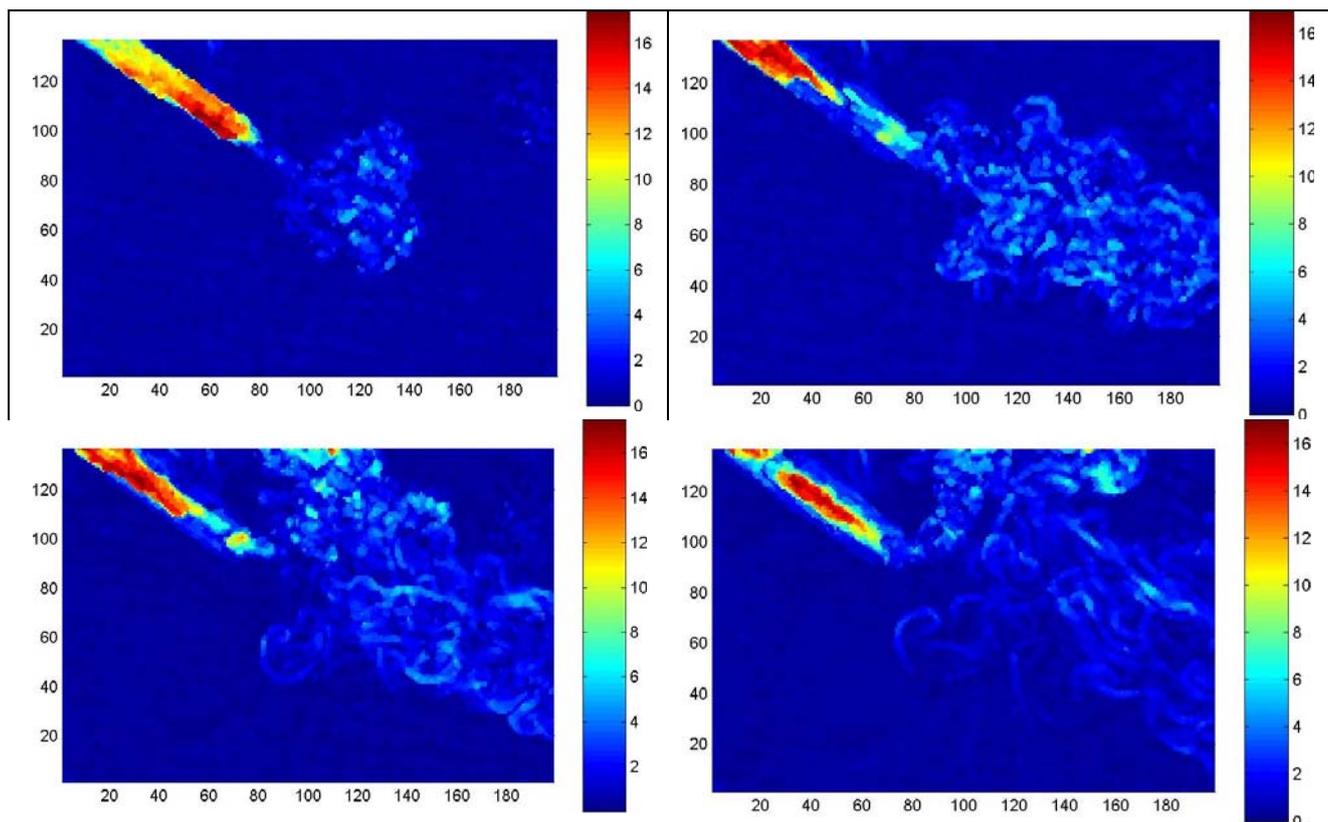


Рис. 8. Последовательные изображения тёплой струи, впрыскиваемой в более холодную жидкость (поля абсолютных смещений)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования тепловых течений в воде показало состоятельность теневого фонового метода для качественного и количественного анализа потоков неизотермической жидкости. Получены хорошие качественные изображения исследуемых течений, в том числе с разрешением мелкой структуры конвективных потоков. Для квазидвумерных течений получены количественные данные о полях термодинамических параметров, согласующиеся с данными контактных измерений.

Расхождение с результатами контактных измерений температуры может быть обусловлено погрешностью используемых граничных условий, недостаточным пространственным разрешением, а также турбулизацией областей жидкости с большими градиентами температур.

Авторы выражают благодарность Уварову А.В. за ценные консультации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Leopold F., Sourgen F., Klatt D., Jagusinski F.** The Application of the Colored Background Oriented Schlieren Technique to the Reconstruction of the Density Field // Proceedings of 14th International Symposium on Flow Visualization (ISFV-14): Daegu, Korea, 2010.
2. **Попова Е.М., Скормыкова Н.М., Толкачев А.В.** Visualization of the heat-mass exchange processes in solid optically transparent substances and in liquids // Proceedings of 12th International Symposium On Flow Visualization: German Aerospace Center (DLR), Göttingen, Germany, 2006.
3. **Meier G.E.A.** Computerized background-oriented schlieren // Exp. Fluids. 2002. Vol. 33. Pp. 181-187.
4. **Wagner W., Pruss A.** The IAPWS formulation 1995 for the thermodynamic properties of ordinary water substance for general and scientific use // J. Phys. Chem. Ref. Data. 2002. Vol. 31. Pp. 387-535.
5. **Евтихиева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С.** Лазерная рефрактография. М.: Физматлит, 2008, 175с.
6. **Jin J., Lutsky A.E., Mursenkova I.V., Vinnichenko N.A., Znamenskaya I.A.** Application of BOS method for analysis of the flow after surface discharge // Proceedings of the 21st International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-2010): Kaohsiung City, Taiwan, 2010. CD Proceedings, IS10-05.pdf.
7. **Atcheson B., Heidrich W., Ihrke I.** An evaluation of optical flow algorithms for background oriented schlieren imaging // Exp. Fluids. 2009. Vol. 46. Pp. 467-476.

I.A. Znamenskaya, N.A. Vinnichenko and F.N. Glazyrin

*Faculty of Physics, Moscow State University, Moscow, Russia,
119991, Moscow, Leninskie Gory, 1/2, E-mail: znamen@phys.msu.ru*

APPLICATION OF BACKGROUND ORIENTED SCHLIEREN METHOD TO THE STUDIES OF FLOWS OF NON-ISOTHERMAL FLUID

The work presents the results of experimental studies of heat conductivity and convection in water by means of background oriented schlieren (BOS) method. Vector field of displacement between two images is evaluated using cross-correlation technique. The density is obtained by solving Poisson equation with special boundary conditions. It is shown that BOS method provides qualitatively reliable data for the structure of flow field corresponding to theoretical predictions, and the quantitative temperature data obtained matches the direct measurements well.

BACKGROUND ORIENTED SCHLIEREN, CONVECTION, TEMPERATURE, WATER REFRACTION INDEX