

М. А. Воробьев¹✉, А. О. Кархов^{1,2}

Применение теневого фонового метода для измерения плотностной стратификации в водно-соляном растворе

¹Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: vorobyev@itp.nsc.ru

Аннотация. Исследование стратифицированных жидкостных сред имеют важное научное и практическое значение, поскольку такие среды широко распространены как в природных системах, так и в промышленных технологиях. Особый интерес приобретают экспериментальные методы, позволяющие воспроизводить устойчивые градиенты плотности. В данной работе применение теневого фонового метода в сочетании с PIV-анализом позволили не только визуализировать процесс диффузии и перераспределения соли в растворе, но и количественно отследить динамику стратификации. Полученные результаты демонстрируют переход от ступенчатого распределения плотности к линейному, а также увеличение концентрации соли у дна сосуда при длительном наблюдении.

Ключевые слова: синтетический теневой метод, плотностная стратификация, PIV

М. А. Vorobyev¹✉, А. О. Karhov^{1,2}

Application of the BOS technique for measuring density stratification in a water-salt solution

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: vorobyev@itp.nsc.ru

Abstract. The study of stratified fluid media holds significant scientific and practical importance, as such environments are widespread in both natural systems and industrial technologies. Experimental methods capable of reproducing stable density gradients are of particular interest. In this work, the application of the BOS technique combined with PIV analysis not only enabled visualization of the diffusion and redistribution processes of salt in the solution but also allowed for quantitative tracking of stratification dynamics. The obtained results demonstrate a transition from a step-like density distribution to a linear one, as well as an increase in salt concentration near the vessel bottom during prolonged observation.

Keywords: background oriented schlieren technique, density stratification, PIV

Введение

Стратифицированные жидкостные среды определяют динамику океанических течений и атмосферных процессов. В промышленности стратифицированные потоки используются для разделения веществ, повышения эффективности теплообмена и создания многослойных материалов. Однако, управление такими системами остается сложной задачей из-за их чувствительности к внешним воз-

действиям и турбулентным возмущениям. Особый интерес представляют течения в стратифицированных жидкостях, где баланс между плавучестью и вязкостью формирует сложные гидродинамические структуры – внутренние волны, слоистые струи и зоны устойчивой стратификации. Для экспериментального изучения стратифицированных сред важно создавать устойчивые градиенты, сохраняющиеся в течение достаточно длительного времени. Существует ряд способов получения стратифицированных сред: 1) смешивание газов с различной плотностью; 2) дифференциальный нагрев слоев жидкости или газа; 3) создание градиента концентрации растворенного вещества. Главным недостатком первых двух способов является высокая скорость диффузии ($D \approx 0,1 - 1 \text{ см}^2/\text{с}$). При создании раствора с градиентом концентрации растворенного вещества (например, раствор хлорида натрия в воде) $D \approx 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ при комнатной температуре, что обеспечивает характерные времена существования стратифицированного раствора порядка $t = L^2 / (\pi^2 D)$ [1], что при высоте столба жидкости $L = 150 \text{ мм}$ превышает 20 суток.

Для детального исследования стратификации жидкостей применяются различные оптические методы, среди которых особенное место занимает синтетический теневой фоновый метод, известный в англоязычной литературе как Background Oriented Schlieren (BOS) method. Этот метод позволяет визуализировать и количественно оценить градиенты показателя преломления в прозрачных средах с высокой точностью, что особенно важно при изучении тонких слоев смешения в водно-соляных растворах.

Таким образом, целью данной работы, является экспериментальное исследование плотностной стратификации в водно-соляном растворе с применением теневого фонового метода.

Методы и материалы

Экспериментальная установка представляла собой видеокамеру DMK 33GX264 33G Series (фокусное расстояние объектива 50 мм), стеклянную кювету $160 \times 13 \times 170 \text{ мм}$, и светодиодную панель, расположенные, как показано на рис. 1. К светодиодной панели была прикреплена прозрачная пленка с фоновым изображением. В качестве фонового изображения был выбран случайный паттерн (рис. 2) с характерным шагом 0,5 мм, в работе [2] показано, что применение такого фона позволяет избежать артефактов обработки, появляющихся при использовании фонов с регулярными изображениями. Кювета при помощи шприцевого насоса и капиллярной трубки медленно заполнялась слоями водного раствора хлорида натрия, в каждом следующем слое концентрация соли была выше, чем в предыдущем. Так как плотность водного раствора хлорида натрия растет пропорционально массовой концентрации соли [3], то слои с большей концентрацией вытесняют слои с меньшей концентрацией вверх. В процессе эксперимента температура рабочей жидкости и окружающей среды была равна 20°C .

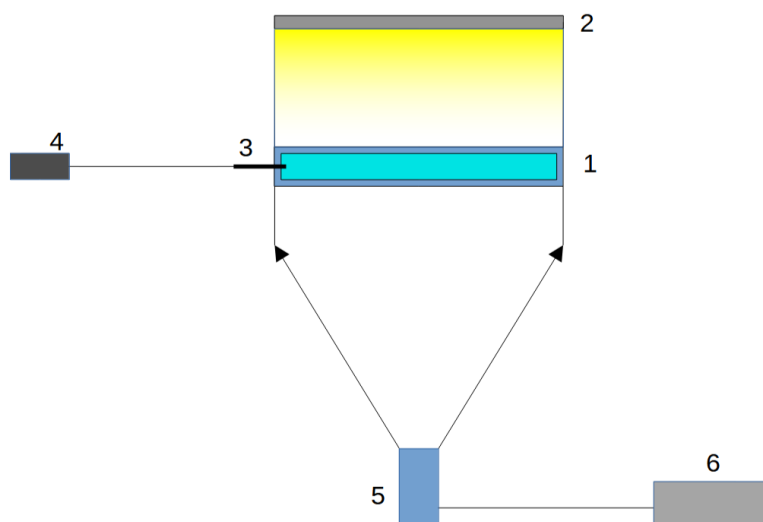


Рис. 1. Схема установки: 1 – кювета; 2 – источник света; 3 – капилляр; 4 – шприц; 5 – камера; 6 – компьютер



Рис. 2. Элемент фонового изображения

Так как показатель преломления соляного раствора линейно связан с его плотностью [1], для исследования плотностной стратификации солевого раствора применяется оптический метод, чувствительный к показателю преломления среды. Принцип используемого синтетического теневого метода состоит в следующем: видеокамера фокусируется на экране с некоторым рисунком, между камерой и экраном расположен исследуемый объект. Световые лучи, проходящие от фона через исследуемый объект, отклоняются в связи с оптической неоднородностью объекта. Таким образом, изображения фона, снятые камерой при наличии неоднородности на оптическом пути, будут отличаться от опорных изображений фонового рисунка, полученных при однородном оптическом пути. Исходя из сравнения текущего и опорного изображения, могут быть рассчитаны величины виртуального смещения пикселей фонового изображения. Для количественного измерения малых смещения пикселей фонового изображения использовался кросскорреляционный алгоритм, применяемый при PIV (particle image velocimetry) анализе. Обработка проводилась с использованием программного пакета PIVLab в среде MatLab.

На рис. 3 представлена схема движения лучей в экспериментальной установке. Как показано в работе [4] в приближении малых углов координату светового луча по вертикальной оси Z в случае его прохождения через две стенки кюветы и стратифицированную среду в ней, можно записать в виде:

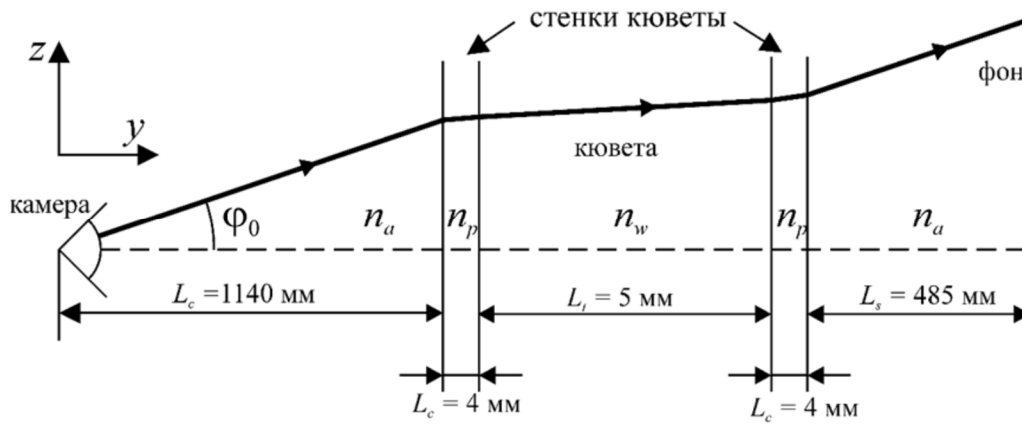


Рис. 3. Схема движения световых лучей

$$z\left(\frac{dn}{dz}, \varphi_0\right) \approx L_c \varphi_0 + L_p \left(n_a / n_p\right) \varphi_0 + L_t \left(n_a / n_w\right) \varphi_0 + \frac{1}{2n_w} \frac{dn}{dz} L_t^2 +$$

$$+ L_p \left(n_a / n_p\right) \varphi_0 + L_p \left(n_w / n_p\right) \varphi_0 \frac{1}{n_w} \frac{dn}{dz} L_t + L_s \left(n_w / n_a\right) \frac{1}{n_w} \frac{dn}{dz}, \quad (1)$$

где n_a , n_p и n_w – показатели преломления воздуха, стекла и воды. В качестве опорного изображения использовался кадр с кюветой, наполненной чистой водой. Таким образом, смещение светового луча относительно опорного изображения можно представить, как:

$$\Delta z\left(\frac{dn}{dz}, \varphi_0\right) \approx \frac{1}{2n_0} \frac{dn}{dz} L_t^2 + L_p \left(n_w / n_p\right) \varphi_0 \frac{1}{n_0} \frac{dn}{dz} L_t + L_s \left(n_w / n_a\right) \frac{1}{n_0} \frac{dn}{dz} L_t =$$

$$= \frac{1}{2n_0} \frac{dn}{dz} L_t \left(L_t + 2L_p \left(n_w / n_p\right) \varphi_0 + 2L_s \left(n_w / n_a\right)\right). \quad (2)$$

Выразив из уравнения (2) градиент показателя преломления, получим:

$$\frac{dn}{dz} \approx \frac{2n_0 \Delta z}{L_t \left(L_t + 2L_p \left(n_w / n_p\right) \varphi_0 + 2L_s \left(n_w / n_a\right)\right)}, \quad (3)$$

где φ_0 можно представить, как $\varphi_0 = z / (L_c + L_p + L_s)$.

Результаты

При проведении эксперимента кювета была наполнена слоями растворов соли с возрастающей относительной концентрацией: 0; 0,1; 0,2; 0,3 и 0,5 от предельной растворимости $C_0 = 36\%$ (36 г соли на 100 г воды). Высота каждого слоя составляла 2,5 см, за исключением раствора с концентрацией 0,3, для которого использовался слой высотой 5 см. Результаты PIV анализа приведены на рис. 4. Цветовая шкала соответствует величине сдвига пикселей вдоль оси Z между текущим и опорным изображениями. В начальный момент (рис. 4 а) видна четкая стратификация растворов различной концентрации, что визуально подтверждается наличием выраженных границ между слоями. С течением времени (рис. 4а-г) происходит постепенное размытие границ слоев, обусловленное процессом диффузии. Через 76 часов (рис. 4 г) границы между слоями стали практически неразличимыми, сформировав раствор с линейной стратификацией практически по всей высоте кюветы.

По значениям смещений пикселей, полученных при PIV обработке экспериментальных данных, и с помощью соотношения (3) были рассчитаны градиенты показателя преломления по высоте кюветы. Исходя из линейной связи плотности раствора и его показателя преломления, а также считая, что в верхней точке концентрация соли равна нулю и, соответственно, плотность раствора равна плотности чистой воды, были рассчитаны значения плотности раствора на различных высотах (рис. 5).

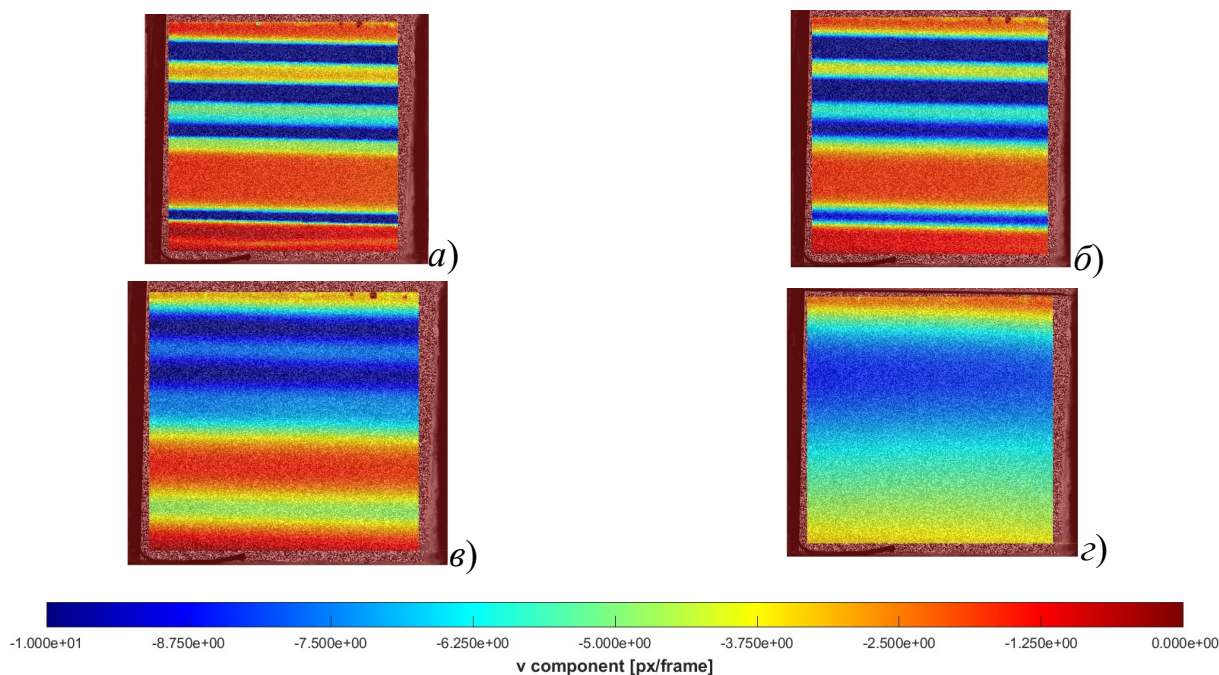


Рис. 4. Изменение границ раздела слоев с течением времени:

а) начало эксперимента; б) 1 час; в) 5,5 часов; г) 76 часов

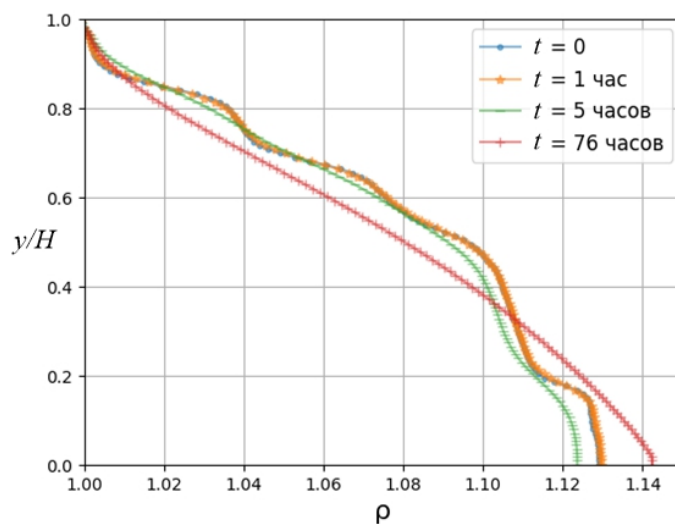


Рис. 5. Зависимость плотности раствора от высоты

Заключение

В данной работе была исследована применимость теневого фонового метода в сочетании с PIV анализом для изучения плотностной стратификации в водно-соляном растворе. Теневой фоновый метод позволил визуализировать процесс диффузии и перераспределения соли в растворе, а также количественно отслеживать процесс изменения стратификации среды. Результаты демонстрируют переход от ступенчатого распределения плотности к линейному профилю по высоте сосуда. Так же обнаружено увеличение концентрации у дна сосуда при длительном времени наблюдении.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках государственного задания для Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. D.E. Mowbray, The use of schlieren and shadowgraph techniques in the study of flow patterns in density stratified liquids, J. Fluid Mech. 27 (1967) 595–608. <https://doi.org/10.1017/S0022112067000564>.
2. М.А. Воробьев, С.В. Двойнишников, В.Г. Меледин, В.В. Рахманов, Тестирование быстрого алгоритма для BOS метода с различными фоновыми паттернами, Interexpo GEO-Siberia. 8 (2024). <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2024-8-1-112-117>.
3. K.M. Aly, E. Esmail, Refractive index of salt water: effect of temperature, Opt. Mater. (Amst). 2 (1993) 195–199. [https://doi.org/10.1016/0925-3467\(93\)90013-Q](https://doi.org/10.1016/0925-3467(93)90013-Q).
4. B.R. SUTHERLAND, S.B. DALZIEL, G.O. HUGHES, P.F. LINDEN, Visualization and measurement of internal waves by ‘synthetic schlieren’. Part 1. Vertically oscillating cylinder, J. Fluid Mech. 390 (1999) 93–126. <https://doi.org/10.1017/S0022112099005017>.

© М. А. Воробьев, А. О. Кархов, 2025