

Диагностика характеристик солестратифицированной жидкости методом лазерной рефрактографии

И. Л. РАСКОВСКАЯ*, Д. А. СЕРГЕЕВ**, Е. С. ШИРИНСКАЯ*

* Московский энергетический институт (технический университет),
Москва, Россия, e-mail: RaskovskalL@mail.ru

** Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород,
Россия, e-mail: daniil@hydro.appl.scinno.ru

Для экспериментального исследования устойчивого распределения плотности в жидкости с солевой стратификацией пикноклинового типа применен новый метод невозмущающей дистанционной диагностики — лазерная рефрактография. Изложены теоретические основы метода и принципы построения измерительной системы. С ее помощью осуществлена визуализация и проведена количественная диагностика распределения плотности (солёности) в переходном слое стратифицированной жидкости.

Ключевые слова: лазерный пучок, рефракция, лазерная рефрактограмма.

For experimental study of the density stable distribution in the stratification liquid the new method of remote nonperturbing diagnostic — the laser refractography — is applied. The theoretical basis of the method and the measuring system construction principles are described. By means of this system the visualization is realized and the quantitative diagnostics of density (salinity) distribution in stratified liquid transitional layer are carried out.

Key words: laser beam, refraction, laser refractogram.

Исследование стратифицированных по плотности потоков — один из важных разделов современной гидрофизики. Устойчивая плотностная стратификация типична для природных водоемов, включая Мировой океан [1]. Часто она вызвана неоднородным прогревом толщи воды, а также распределением солёности по глубине. Изучение гидрофизических течений в основном базируется на лабораторном моделировании [2] и связано с созданием плотностной стратификации, измерением и контролем ее характеристик.

Обычно в модельных лабораторных экспериментах используют солевую стратификацию [3]. Уменьшая концентрацию соли по вертикали, добиваются необходимого распределения плотности. Однако на уникальных установках возможно создание и поддержание достаточно долговременной температурной стратификации [2].

Распределение плотности характеризуется частотой плавления Брента—Вайселя:

$$N = \sqrt{-\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x}}, \quad (1)$$

где g — ускорение свободного падения; $\rho(x)$ — распределение плотности; x — вертикальная координата, направленная противоположно силе тяжести.

Методы измерения плотности можно разделить на контактные и дистанционные (оптические). Контактные методы исследования солёности (проводимости), температуры жидкости с помощью датчиков позволяют проводить высокоточные измерения в фиксированной точке [2, 3]. Однако для измерения пространственного распределения физических характеристик необходимо использовать большое количество датчиков либо применять сканирование. Это приводит к сильным возмущениям, вносимым в жидкости. Среди оптических методов наиболее широкое распространение получил метод с использованием рефрактометра Аббе. Одна-

ко это устройство достаточно сложное в эксплуатации, и измерение профиля распределения плотности занимает много времени.

В данной работе для исследования переходного слоя жидкости с градиентом солёности применяется метод лазерной рефрактографии (ЛР) [4—7]. Этот метод основан на зондировании исследуемой среды структурированным лазерным излучением (СЛИ), регистрации рефрагированного в неоднородной среде излучения с помощью цифровых видеокамер и компьютерной обработке рефракционных изображений с последующим восстановлением структуры неоднородности. В методе ЛР используется структурированное лазерное излучение, формируемое с помощью специальных оптических элементов непосредственно на выходе источника излучения [7]. Такой способ формирования СЛИ дает возможность сохранить его высокую когерентность и обеспечить малую расходимость пучков, что позволяет применять для описания СЛИ понятия геометрической оптики. В этом случае модель СЛИ можно представить семействами лучей, образующих поверхности в виде дискретного набора плоскостей, вложенных цилиндров, конусов и др.

Метод ЛР позволяет не только визуализировать оптические неоднородности, но и осуществлять их количественную диагностику. Формулы для моделирования рефрактограмм (рефракционных картин СЛИ) для плоскостной модели и методика диагностики приведены в монографии [4]. В данной работе для зондирования неоднородности используется астигматический лазерный пучок (лазерная плоскость).

Экспериментальная установка и методика измерений. Измерительная система для исследования оптической неоднородности методом ЛР должна содержать следующие основные элементы: источник лазерного излучения, оптический блок формирования лазерной плоскости (ЛП) и систему ее позиционирования, диффузно рассеивающий по-

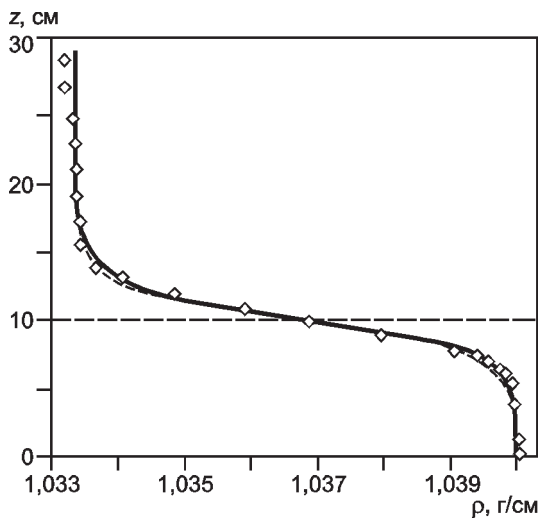


Рис. 1. Профиль плотности в солевой стратификации [3]. Штриховая линия — аппроксимация с помощью функции (2), сплошная — с помощью формул (3), (4)

лупрозрачный экран, цифровую фотокамеру и персональный компьютер. Объект исследования помещается между оптической системой формирования ЛП и матовым экраном. Рефрактограмма ЛП может визуально наблюдаться на отражающем или прозрачном матовом экране и регистрироваться цифровой фотокамерой. Далее в результате компьютерной обработки рефрактограммы можно получить информацию о распределении показателя преломления в исследуемой области, по которому может быть восстановлена соответствующая функция распределения исследуемой характеристики среды.

В данном случае такой характеристикой является плотность ρ жидкости, которая определяется концентрацией s растворенной в ней соли. Существуют таблицы, по которым можно найти показатель преломления n для видимого излучения (с различной длиной волны λ) для разных соленостей. Однако следует отметить, что в одном из наиболее полных справочников по этой теме [8] данных недостаточно: значения n приводятся с большими промежутками по солености и всего для нескольких длин волн. Поэтому универсальных формул зависимости показателя преломления от солености в широком диапазоне для разных длин волн в настоящее время не существует. С точки зрения этой проблемы, проводимые в данной работе исследования также являются актуальными.

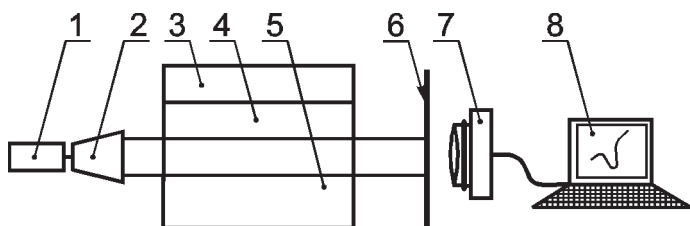


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

1 — лазер; 2 — система формирования лазерной плоскости 4; 3 — слой пресной воды; 5 — слой соленой воды; 6 — матовый экран; 7 — цифровая видеокамера; 8 — компьютер

Исследуемой средой в экспериментах была жидкость, в которой создана солевая стратификация пикноклинного типа, т. е. двухслойное распределение с ярко выраженным скачком на определенном горизонте. Подобное распределение плотности, измеренное с помощью датчика электропроводности, показано на рис. 1 [3]. В ходе проведения экспериментов в кювету вначале наливали нижний слой соленой воды (жидкость с большим показателем преломления), а затем сверху с помощью специальных приспособлений аккуратно — слой пресной воды (жидкость с меньшим показателем преломления). Полученное распределение плотности (солености) приводит к тому, что показатель преломления также меняется по высоте.

Для описания профилей характеристик среды ρ , s , а также n в стратификации пикноклинного типа обычно используют формулу

$$n(x) = \frac{a_1 + a_2}{2} + \frac{a_1 - a_2}{2} \operatorname{th} \left(\frac{x - x_s}{h} \right), \quad (2)$$

где a_1 , a_2 — параметры среды (ρ , s , n) соответственно менее плотной (верхней) и более плотной (нижней) жидкостей; x_s — положение центра пикноклина; h — характерная полуширина слоя. Данный профиль имеет симметричное распределение, однако в реальных условиях обычно профиль представляет собой асимметричную функцию.

Для учета этой асимметрии в более общей модели слоя предполагается, что и параметр h является переменной величиной $h(x)$, т. е.

$$n(x) = \frac{a_1 + a_2}{2} + \frac{a_1 - a_2}{2} \operatorname{th} \left(\frac{x - x_s}{h(x)} \right); \quad (3)$$

$$h(x) = h_0 + kx. \quad (4)$$

С использованием формул (3), (4) удастся точнее описать распределение плотности (см. рис. 1) в области нижней границы скачка.

На рис. 2 показана структурная схема лазерной рефрактографической системы на основе плоскоструктурированного лазерного излучения. Она состоит из лазера 1 (длиной волны 633 нм) с установленной на его корпусе оптической системой 2 формирования ЛП 4. Лазерная плоскость 4 зондирует переходный слой между соленой 5 и пресной 3 водой в кювете. Рефрактограмма визуализируется на матовом экране 6, регистрируется цифровой видеокамерой 7 и обрабатывается на компьютере 8 с помощью специального программного обеспечения.

Параметры установки: размеры кюветы 150×250×290 мм, толщина ее стенки 3,6 мм, расстояние от кюветы до экрана 295 мм, температура жидкости 19 °С. Лазерная плоскость направлена под углом $\alpha = 41^\circ$ и расположена так, чтобы ее середина примерно совпадала с центром неоднородности. В ходе измерений с помощью рефрактометра Аббе контролировались показатели преломления верхнего и нижнего слоев жидкости. Рефрактограмма в отсутствие неоднородности, т. е. неискаженная ЛП, регистрировалась после проведения эксперимента.

На рис. 3, а представлена одна из экспериментальных рефрактограмм, полученная для солености нижнего слоя 18 ‰.

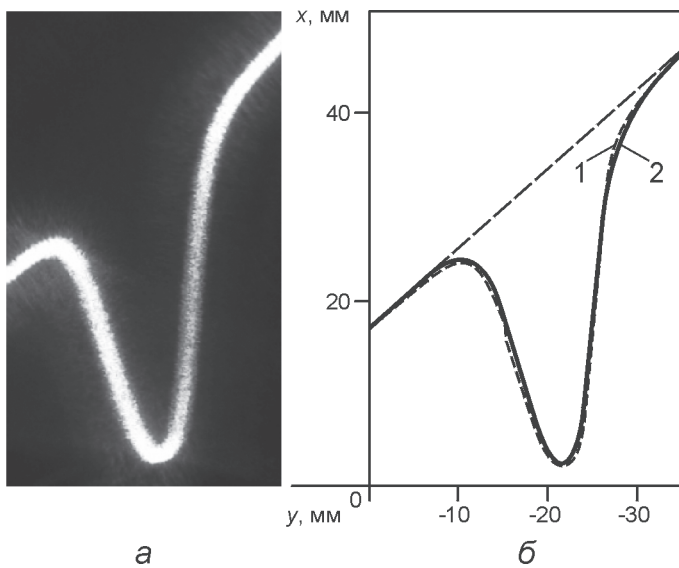


Рис. 3. Сравнение экспериментальной и расчетной рефрактограмм: а — экспериментальная рефрактограмма, б — оцифрованная экспериментальная 1 и расчетная 2 рефрактограммы

Методика восстановления профиля солёности. Дискретный и регулярный характер СЛИ обеспечивает возможность количественной диагностики среды на основе экспериментально полученных рефрактограмм. Под количественной диагностикой подразумевается решение обратной задачи, которая заключается в определении параметров неоднородности. С этой целью решается прямая задача рефракции семейства лучей, образующих СЛИ, и рассчитываются соответствующие рефрактограммы. Последующая компьютерная обработка экспериментальных рефрактограмм и сравнение их с расчетными позволяют подобрать такой закон изменения показателя преломления (и соответственно солёности), который обеспечивает совпадение расчетных и экспериментальных данных. На рис. 3, б показаны оцифрованная экспериментальная и расчетная рефрактограммы. Расчет проводился с использованием формул (3), (4).

Наилучшее совпадение (по критерию минимизации среднего квадратического отклонения) расчетной и экспериментальной рефрактограмм наблюдается при следующих параметрах модели (3), (4): $n_1 = 1,3316$, $n_2 = 1,3346$, $h_0 = 1$ мм, $k = 0,077$. На рис. 4. представлена зависимость производной показателя преломления, полученная на основе обработки рефрактограммы.

Измеренный показатель преломления в верхнем слое близок к табличным данным для пресной воды $n = 1,3314$, что является подтверждением правильности результатов. Значение солёности нижнего слоя, восстановленное по показателю преломления n_2 с помощью табличных данных из [8], составило 17,4 ‰, что также близко к значению 18 ‰, вычисленному через объем воды и массу растворенной соли.

На основе полученных данных можно по формулам (1) — (4) оценить максимальное значение частоты плавучести: $N_{\max} \approx 8$ рад/с.

Таким образом, выполненные исследования подтверждают возможность использования метода лазерной рефрактографии для количественной диагностики профиля распределения плотности в солевой стратификации пикно-

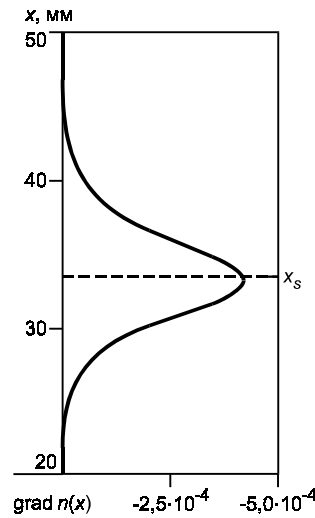


Рис. 4. Восстановленный по экспериментальной рефрактограмме профиль градиента показателя преломления

клинного типа. Следует отметить, что метод также можно адаптировать для изучения устойчивой стратификации произвольного профиля, в том числе, температурной стратификации.

Технология исследований методом лазерной рефрактографии обеспечивает дистанционность, практическую безынерционность, возможность невозмущающих измерений и измерений в тонких переходных слоях. Принципиально новыми особенностями метода являются: адаптация к форме исследуемой поверхности, возможность получения трехмерного информативного изображения, одновременность измерений в различных пространственных

областях (что существенно для исследования нестационарных процессов), количественная диагностика, возможность непосредственной информативной визуализации в процессе мониторинга.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проект 2010—1.2.2.—121—018—011).

Л и т е р а т у р а

1. **Океанология** / Под ред. В. М. Каменковича, А. С. Мони-на. М.: Наука, 1978. Т. 1.
2. **Арабаджи В. В. и др.** Лабораторное моделирование гидрофизических процессов в верхнем слое океана (Большой термостратифицированный бассейн ИПФ РАН) // Приповерхностный слой океана. Физические процессы и дистанционное зондирование: Сб. трудов / Под ред. В. И. Таланова, Е. Н. Пелиновского. Н. Новгород: ИПФ РАН, 1999. Т. 2. С. 231—251.
3. **Дружинин О. А., Сергеев Д. А., Троицкая Ю. И.** Лабораторное и численное моделирование течения в дальнем следе в стратифицированной жидкости // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 5. С. 1—18.
4. **Евтихиева О. А., Расковская И. Л., Ринкевичюс Б. С.** Лазерная рефрактография. М.: Физматлит, 2008.
5. **Расковская И. Л., Ринкевичюс Б. С., Толкачев А. В.** Лазерная рефрактография оптически неоднородных сред // Квантовая электроника. 2007. № 12. С. 1176—1180.
6. **Rinkevichyus B. S., Raskovskaya I. L., Tolkachev A. V.** Laser refractography — the new technology of the transparent heterogeneities quantitative visualization // CD Room Proc. 13th Intern. Symp. Flow Visualization FLUVISU 12. Nice (France), 2008. Paper 085. P. 1—12.
7. **Методы компьютерной оптики** / Под ред. В. А. Сойфера. М.: Физматлит, 2003.
8. **Попов Н. И., Федоров К. Н., Орлов В. М.** Морская вода. М.: Наука. 1979.

Дата принятия 08.07.2010 г.