

Оптико-электронный комплекс для исследования процессов тепло- и массообмена лазерным бесконтактным методом

А.В. Ведяшкина¹, Б.С. Ринкевичюс², И.Н. Павлов³, И.Л. Расковская⁴, А.В. Толкачев⁵

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

¹ ORCID: 0000-0002-2670-7712, an.vedyashkina@gmail.com

² ORCID: 0000-0001-7336-1315, rinkevbs@mail.ru

³ ORCID: 0000-0002-9014-6294, inpavlov@bk.ru

⁴ ORCID: 0000-0002-1231-9479, raskovskail@mail.ru

⁵ ORCID: 0000-0003-4185-892X, avtolk2008@yandex.ru

Аннотация

Работа посвящена разработке и созданию оптико-электронного комплекса для определения параметров неоднородных конденсированных сред, принцип действия которого основан на методе каустик структурированного лазерного излучения. Описана методика определения параметров диффузионного слоя жидкости по положению каустических поверхностей при продольном зондировании плоским лазерным пучком. Представлено специальное программное обеспечение, позволяющее определять распределение показателя преломления в диффузионном слое жидкости путем сопоставления теоретически рассчитанных и экспериментальных рефрактограмм. Показаны результаты работы комплекса для диффузионного слоя, возникающего между раствором электролита и водой для различных концентраций раствора электролита. Рассмотрены условия возникновения каустических поверхностей и показано изменение их координат в процессе увеличения толщины диффузионного слоя для различных значений градиента показателя преломления. Представлен новый метод определения температуры поверхности холодного тела, помещенного в прозрачную жидкость, основанный на определении местоположения особых точек каустических поверхностей, возникающих при зондировании пограничного слоя горизонтальным элементом структурированного пучка. Результаты работы могут быть использованы при экспериментальном изучении и мониторинге неоднородных конденсированных сред, когда требуется обеспечить невозмущающий контроль полей концентрации, давления, температуры.

Ключевые слова: диффузионный слой жидкости, рефракция, каустика, лазерная рефрактография.

1. Введение

Для невозмущающей дистанционной диагностики процессов тепло- и массообмена в настоящее время хорошо себя зарекомендовали оптические рефракционные методы. Это обусловлено рядом преимуществ, прежде всего, оптические измерения не искажают исследуемую неоднородность, поскольку в большинстве случаев энергия, поглощаемая средой, достаточно мала. Лазерные методы малоинерционны, что позволяет выполнять точные измерения быстропротекающих процессов. Лазерные рефракционные методы позволяют исследовать поле показателя преломления, которое потом посредством косвенных измерений пересчитывается в искомое поле другой физической величины [1].

На основе применения лазеров были разработаны новые методы для диагностики течений жидкости и газа, а именно, метод лазерной доплеровской анемометрии, анемометрия по изображениям частиц, фотолюминесцентные методы, а также ряд других [2]. В настоящее время инструменты, использующие такие методы, широко используются в аэрогидродинамических и теплофизических экспериментах.

В работах [3, 4] было отмечено, что для диагностики стратифицированных сред в условиях существенной рефракции оптического излучения целесообразно использовать метод лазерной рефрактографии, который основан на регистрации рефракционного смещения структурированного лазерного излучения (СЛИ), зондирующего оптическую неоднородность. В данном методе используется СЛИ, формируемое с помощью специальных оптических элементов непосредственно на выходе источника излучения [5]. Такой способ формирования СЛИ дает возможность сохранить его высокую когерентность и обеспечить малую расходимость пучков, что позволяет применять для описания СЛИ понятия геометрической оптики. Структурированные пучки визуализируются в сечении как семейство геометрических фигур, например, окружностей, отрезков или как матрица точек. Возникающее в результате рефракции искажение элементов структурированных пучков является информативным параметром для решения обратной задачи.

Продольное зондирование стратификаций при проведении измерений из-за естественных ограничений в натурном эксперименте используется реже по сравнению с традиционными нормальным или наклонным зондированием, поэтому в литературе преимущественно описываются каустики, возникающие в последних случаях. Тем не менее, при изучении и мониторинге теплофизических, гидродинамических и химических процессов в лабораторных условиях на границах раздела сред часто имеют место условия возникновения стратификаций различной природы [6, 7], сопровождающихся существенными градиентами показателя преломления. В этом случае продольное зондирование оказывается весьма информативным и позволяет осуществлять восстановление параметров среды, в том числе и при использовании геометрических характеристик образующихся при этом каустик.

Исследование стратифицированных сред, а также переходных (диффузионных) слоев – одни из важных задач современной гидрофизики и океанографии. Устойчивая плотностная стратификация типична для природных водоемов, включая Мировой океан [8]. Часто она вызвана неоднородным прогревом толщи воды, а также распределением солености по глубине. Изучение гидрофизических течений в основном базируется на лабораторном моделировании и связано с созданием плотностной стратификации, измерением и контролем ее характеристик. Обычно в модельных лабораторных экспериментах используют солевую стратификацию [9]. Уменьшая концентрацию соли по вертикали, добиваются необходимого распределения плотности. Однако на уникальных установках возможно создание и поддержание достаточно долговременной температурной стратификации [10].

В дальнейшем изложении под стратифицированной средой в общем случае будем понимать двумерно-неоднородную среду, в которой составляющая градиента показателя преломления по одной из координат существенно превышает составляющие по другим координатам. При рефракции СЛИ в стратифицированной среде каустики могут наблюдаться как внутри, так и на выходе из среды, где лучи являются уже прямыми линиями [11].

В работах [12, 13] была описана возможность применения метода каустик лазерного излучения для определения параметров стратифицированных сред. В данном подходе при решении обратной задачи восстановления свойств оптических неоднородностей информативными параметрами являются координаты возникающих в результате рефракции каустических поверхностей.

На данном этапе развития науки и техники метод каустик широко применяется для диагностики напряжений и деформаций и остановки трещин в твердых телах [14-16].

2. Определение параметров диффузионного слоя жидкости

Для диагностики диффузионного слоя жидкости могут использоваться различные виды СЛИ, в работе [17] показана компьютерная и экспериментальная 3D-визуализация распространения цилиндрического лазерного пучка в диффузионном слое и формируемые при этом каустики.

С целью наблюдения и регистрации каустик, возникающих при распространении плоского лазерного пучка в диффузионном слое жидкости, был разработан и создан оптико-электронный комплекс, схема и внешний вид которого изображены на рис. 1а и 1б соответственно.

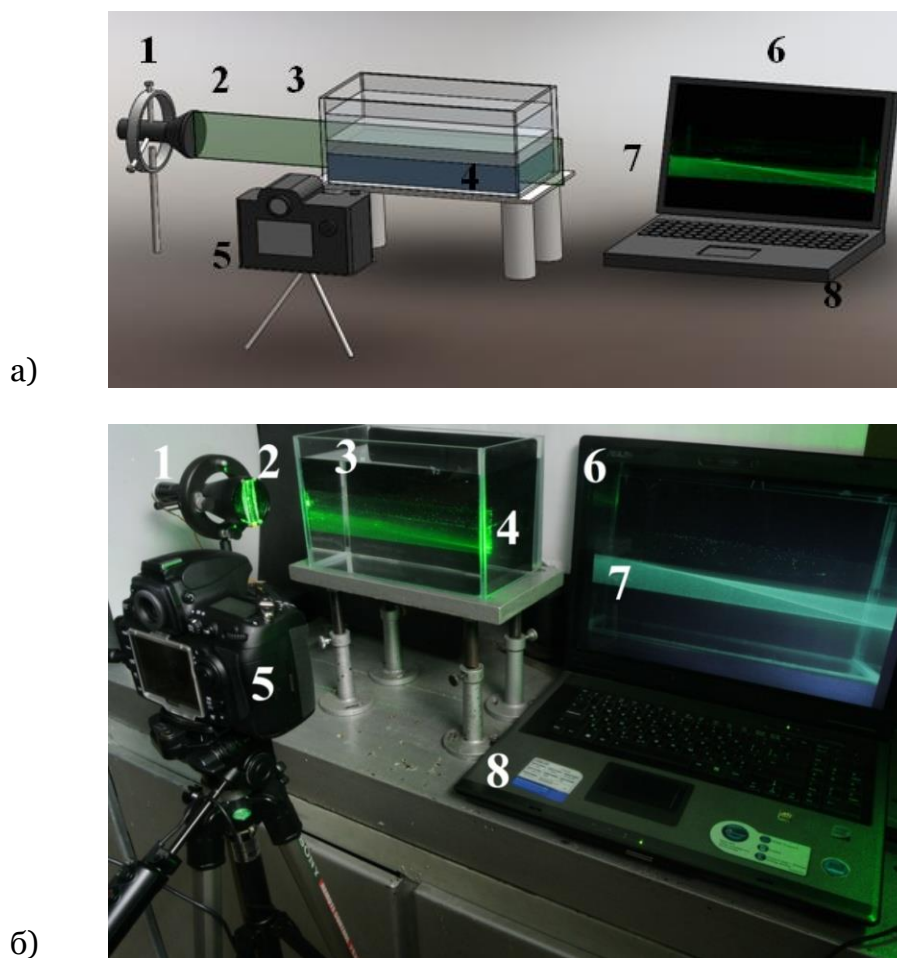


Рис. 1. Оптико-электронный комплекс для регистрации каустик плоского лазерного пучка в диффузионном слое жидкости (а – схема, б – внешний вид)

1 – лазер, 2 – оптическая система, 3 – кювета, 4 – диффузионный слой,
5 – цифровая фотокамера, 6 – ПК, 7 – 2D-рефрактограмма,
8 – программное обеспечение

В качестве источника излучения используется компактный лазерный модуль 1 с длиной волны $\lambda = 532$ нм. На выходе лазера установлена оптическая система формирования структурированного лазерного излучения 2, состоящая из двух цилиндрических линз, взаимное расположение которых подобрано таким образом, что на выходе получен коллимированный плоский лазерный пучок с шириной 48 мм. Пучок направляется на кювету параллельно диффузионному слою жидкости 4, который находится в стеклянной кювете 3. Регистрация рефракции лазерного пучка осуществляется с помощью цифровой фотокамеры 5. Это позволяет производить количественную оценку

рефракции лазерного пучка после обработки полученной рефрактограммы 7 с помощью разработанного программного обеспечения 8 на персональном компьютере 6. Разработанное специальное программное обеспечение позволяет производить моделирование распространения в диффузионном слое жидкости плоского лазерного пучка, визуализировать каустики, возникающие при рефракции лазерного пучка внутри неоднородной среды, и совмещать их с экспериментально полученными рефракционными картинками, определяя тем самым толщину диффузионного слоя жидкости в режиме реального времени. Также программа позволяет производить аналогичные измерения толщины диффузионного слоя в различные моменты времени в ходе эксперимента и строить зависимость толщины диффузионного слоя от времени с последующей интерполяцией.

Для создания диффузионного слоя использовались вода и раствор электролита КОН различных концентраций (таблица 1), описание распределения показателя проводилось по параметрической модели (1) [18]:

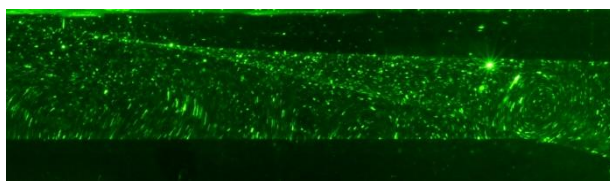
Таблица 1 – Показатели преломления для различных концентраций электролита КОН

Концентрация	Показатель преломления
2 моль/л	1,3511
4 моль/л	1,3670
5 моль/л	1,3735
6 моль/л	1,3800
7 моль/л	1,3857

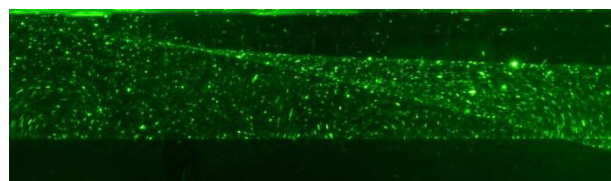
$$n(x) = \frac{n_1 + n_2}{2} - \frac{n_1 - n_2}{2} \operatorname{th} \left(\frac{x - x_s}{h} \right), \quad (1)$$

где h – характеристическая полуширина слоя, x_s – середина слоя.

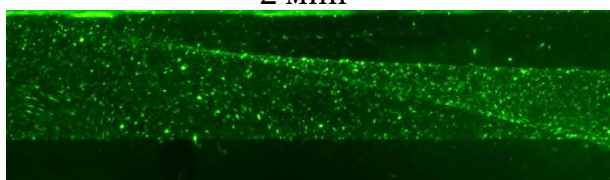
Динамика экспериментальных рефрактограмм для диффузионного слоя, возникающего между раствором электролита с концентрацией 7 моль/л и водой, полученных в ходе эксперимента в различные моменты времени от начала создания слоя, представлена на рис. 2.



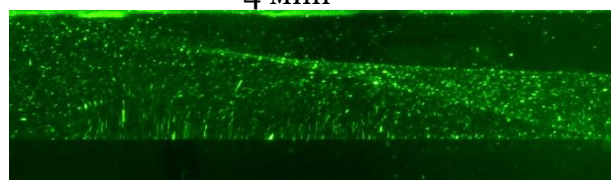
2 мин



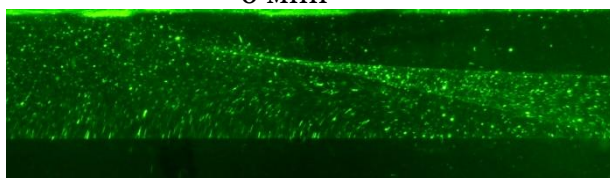
4 мин



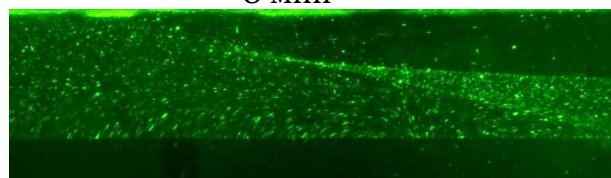
6 мин



8 мин



10 мин



12 мин

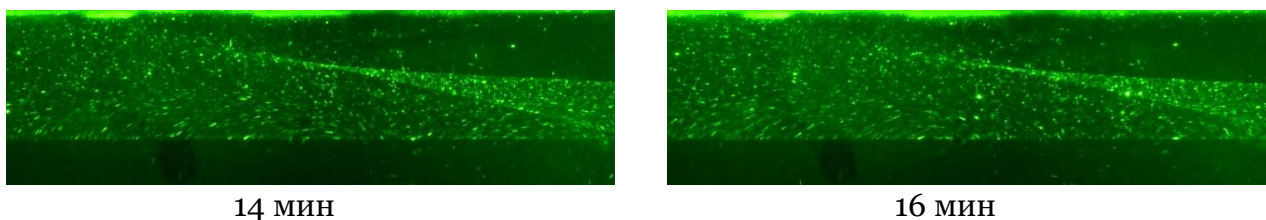


Рис. 2. Экспериментальные 2D-рефрактограммы плоского лазерного пучка в диффузионном слое жидкости в различные моменты времени ($\Delta t = 2$ мин)

На рис. 3 представлены экспериментальные графики зависимости толщины слоя d от времени для различных $\Delta n = n_1 - n_2$.

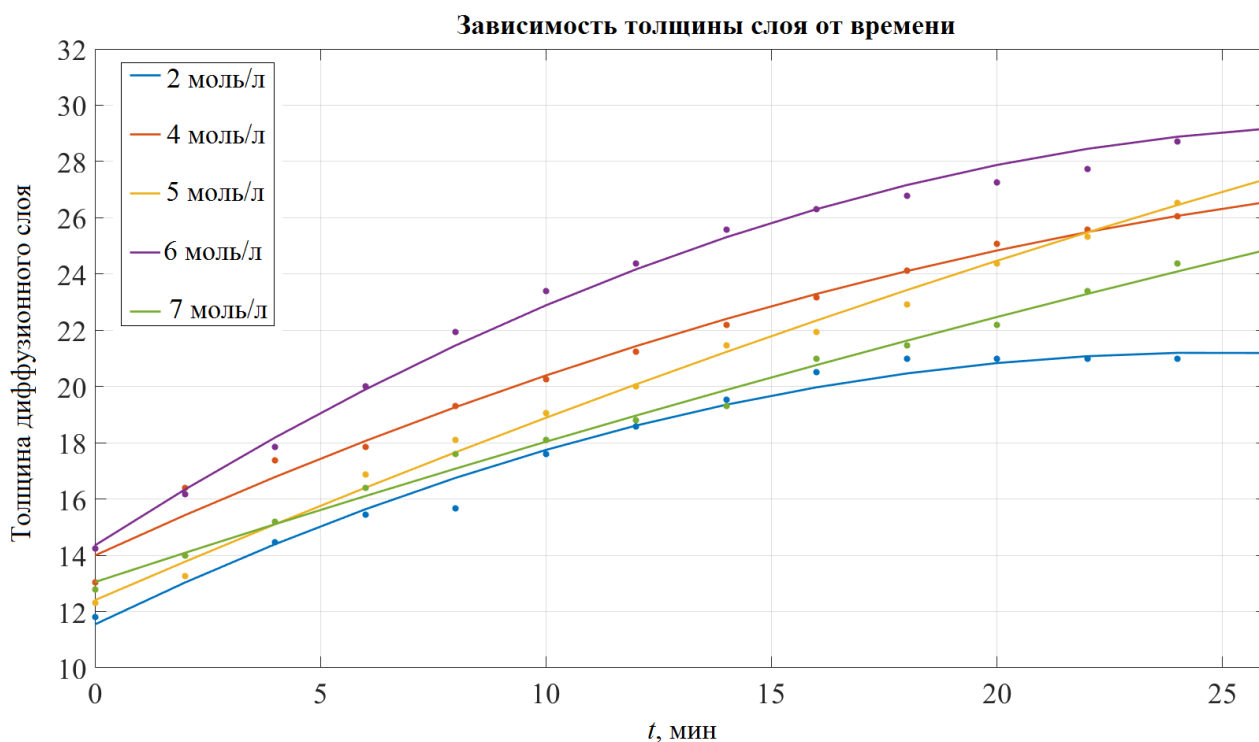


Рис. 3. Графики зависимости толщины диффузионного слоя жидкости от времени для различных значений концентрации электролита KOH

Таким образом, регистрация рефрактограмм в различные моменты времени с равными промежутками позволяет оценить зависимость толщины слоя от времени.

Графики изменения распределения показателя преломления и градиента показателя преломления представлены на рис. 4.

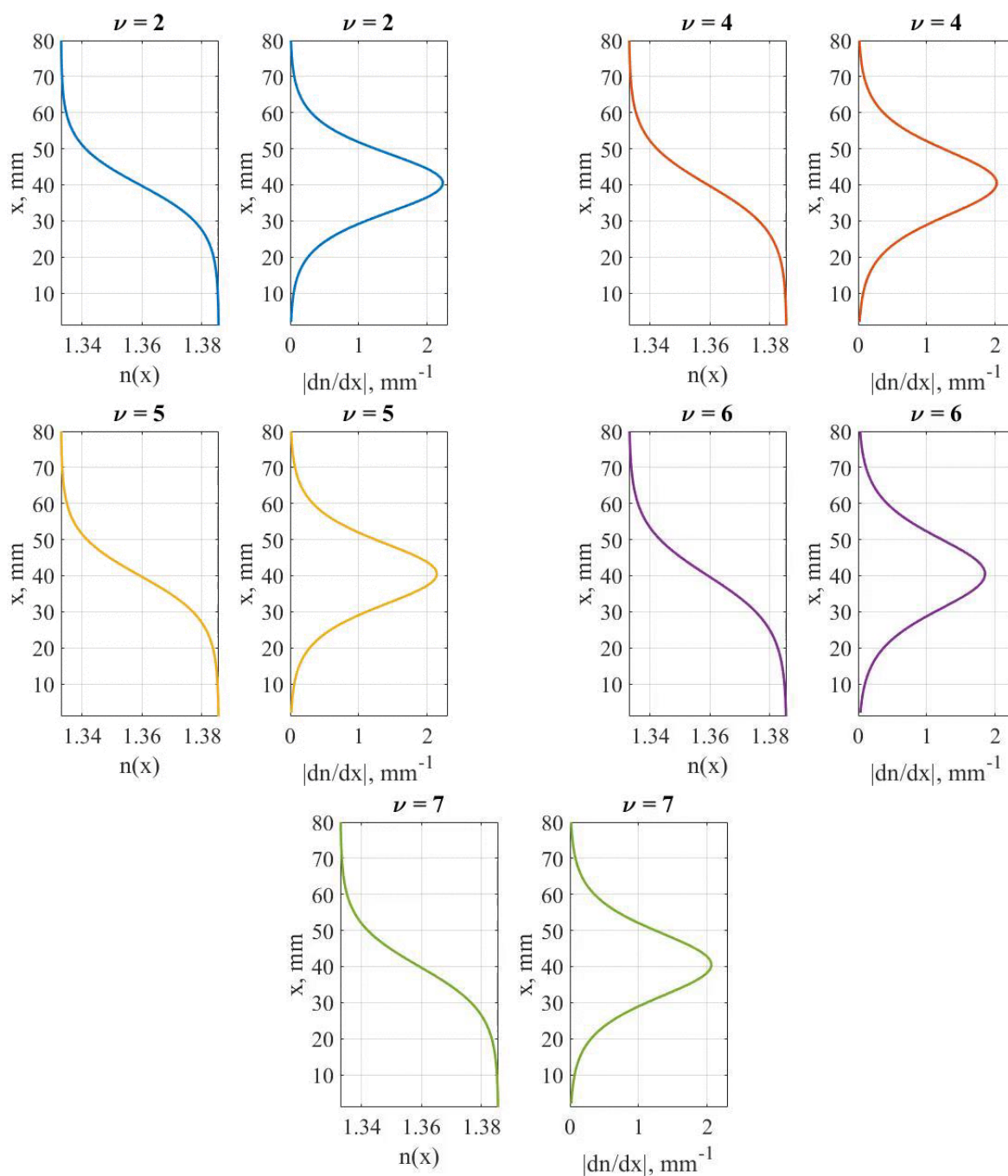


Рис. 4. Изменение распределения показателя преломления и градиента показателя преломления в диффузионном слое жидкости во времени для различных значений концентрации электролита КОН

3. Бесконтактное определение температуры поверхности тела по положению особых точек каустики

При исследовании конвективных процессов у поверхности нагретых или охлажденных тел в жидкости корреляционная обработка рефракционных изображений структурированных пучков позволяет восстанавливать распределение температуры в пограничном слое. Однако в ряде практических приложений требуется только знание собственно температуры поверхности тела. В этом случае для проведения бесконтактного контроля теплофизических характеристик процесса целесообразно использовать эмпирические зависимости температуры поверхности от положения особых точек наблю-

даемых каустик [3]. Для определения положения особых точек каустики используется структурированное лазерное излучение.

В работе [11] было показано, что вид рефрактограммы зависит от разности температур шара и воды. При зондировании пограничного слоя около охлажденного шара горизонтальным элементом структурированного пучка, на дистанции, где располагается «клюв» каустики, на рефрактограмме возникает особая точка (рис. 5). На рис. 6 показаны теоретические зависимости положения особой точки каустики от температуры поверхности шара при различных значениях температуры воды.

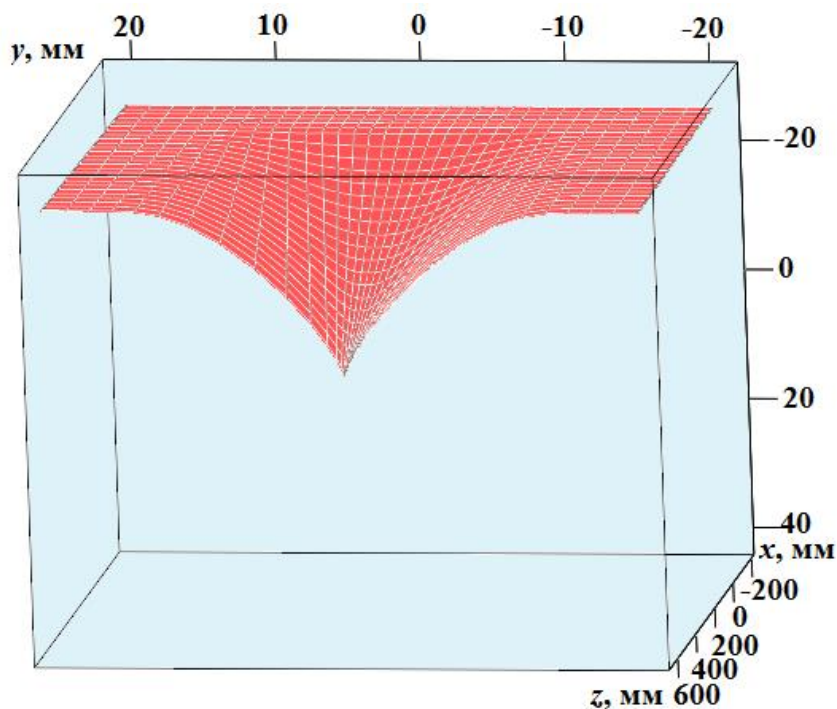


Рис. 5. Вид рефрактограммы, характеризующий положение «клюва» каустики

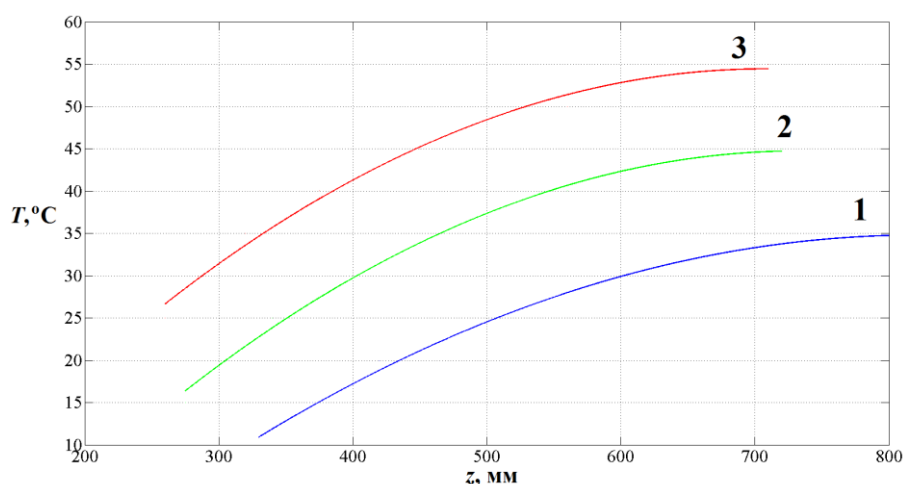


Рис. 6. Теоретические зависимости положения особой точки каустики от температуры поверхности тела при различных значениях температуры воды
 1 – $T_0=50^{\circ}\text{C}$, 2 – $T_0=60^{\circ}\text{C}$, 3 – $T_0=90^{\circ}\text{C}$

Для регистрации каустик и получения зависимости положения «клюва» от температуры поверхности была создана экспериментальная установка, схема которой изображена на рис. 7.

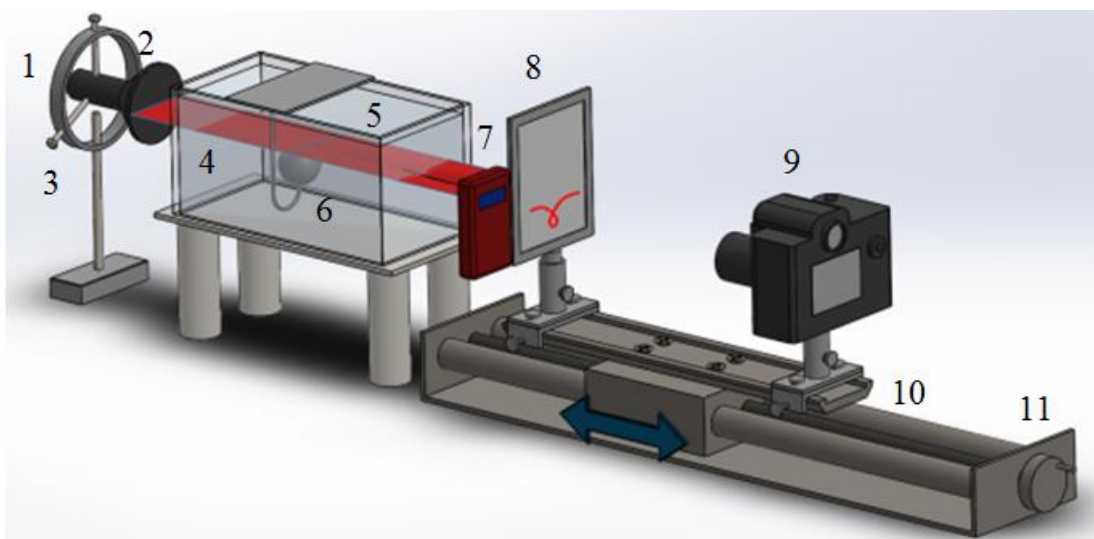


Рис. 7. Схема экспериментальной установки для получения зависимости положения «клюва» каустики от температуры поверхности объекта

- 1 – лазер; 2 – оптическая система формирования плоского лазерного пучка;
 3 – штатив; 4 – лазерная плоскость, 5 – прозрачная кювета с водой,
 6 – металлический шар с впаянной внутрь термопарой, 7 – лазерный дальномер,
 8 – экран, 9 – цифровая видеокамера, 10 – оптические рельсы,
 11 – линейный транслятор

В качестве источника излучения использовался полупроводниковый лазер 1 с длиной волны $\lambda = 650$ нм. На выходе лазера установлена оптическая система 2, формирующая лазерную плоскость 4. Штатив 3 обеспечивает прецизионное двухкоординатное позиционирование лазерной плоскости по отношению к поверхности шара 6, находящегося в прозрачной кювете с водой 5. Лазерный пучок должен идти в непосредственной близости над шаром, куда фокусировалась лазерная плоскость. На экран 8 был закреплен лазерный дальномер с уголковым отражателем, измеряющим расстояние от экрана до центра шара 8. Регистрация «клюва» каустики производилась с помощью цифровой видеокамеры 9. Помимо рефрактограмм записывались на видео показания лазерного дальномера. Видеокамера и экран были установлены на оптический рельс 10, расстояние между ними оставалось постоянным на протяжении всего эксперимента. Оптический рельс плавно перемещался с помощью линейного транслятора 11. Скорость вращения винта подбиралась таким образом, чтобы в каждый момент времени на экране отображался «клюв» каустики.

На рис. 8 представлены характерные виды экспериментальных рефрактограмм.

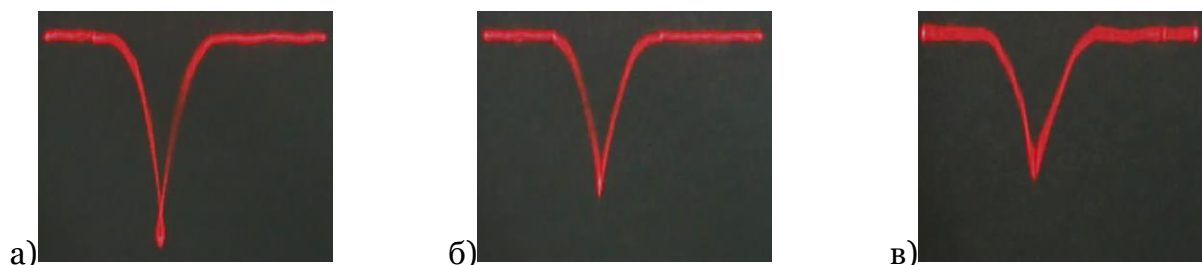


Рис. 8. Характерные виды экспериментальных рефрактограмм лазерной плоскости над охлажденным шаром: а) петля, б) «клюв» каустики, в) отсутствие каустики

4. Заключение

В данной работе было показано, что информация о локализации каустик и их геометрических параметрах дает дополнительные возможности для решения обратной задачи восстановления свойств исследуемой среды. Сопоставление экспериментальной и теоретически рассчитанной каустической поверхности позволяет подобрать параметры модели, описывающей распределение показателя преломления в диффузионном слое жидкости. Таким образом, можно сделать вывод о том, что разработанный метод для диагностики диффузионного слоя жидкости позволяет не только наглядно визуализировать характер оптической неоднородности, но и определять ее количественные характеристики.

Применение метода каустик в лазерной рефрактографии для диагностики неоднородности в жидкостях показало возможность определения параметров неоднородной среды бесконтактным способом.

Представлен новый метод определения температуры поверхности холодного тела, помещенного в прозрачную жидкость, основанный на определении местоположения особых точек каустических поверхностей, возникающих при зондировании пограничного слоя горизонтальным элементом структурированного пучка. Положение особой точки каустики зависит от разности температуры поверхности тела и жидкости. Дополнительным достоинством указанного подхода определения температуры поверхности при практических измерениях является отсутствие необходимости задания параметрической модели среды. Результаты работы могут быть использованы при экспериментальном изучении и мониторинге неоднородных конденсированных сред, когда требуется обеспечить невозмущающий контроль полей концентрации, давления, температуры.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых МК-6361.2018.8.

Список литературы

1. Евтихиева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С. Лазерная рефрактография. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 176 с.
2. Settles G.S. Schlieren and Shadowgraph Techniques, Visualizing Phenomena in Transparent Media, Springer, New York, 2001, P. 387
3. Расковская И.Л. Рефрактометрия оптически неоднородных сред на основе регистрации положения каустик при использовании структурированного лазерного излучения // Автометрия, 2014, 50(5), С. 92-98.
4. Raskovskaya I.L. Specific Imaging of Caustics upon Refraction of Structured Laser Radiation in Stratified Media // Technical Physics, 2015, 60(6), P. 911–916.
5. Дифракционная компьютерная оптика / Под ред. В.А.Сойфера. М.: Физматлит, 2007. 736 с.
6. Vedyashkina A.V., Rinkevichyus B.S. 3D-visualization of Caustics' Formation in Laser Refractography Problems // Physics Procedia, 2015, Vol. 73, P. 205–210.
7. Ринкевичюс Б.С., Ведяшкина А.В., Павлов И.Н., Расковская И.Л., Толкачев А.В. Визуализация динамических тепловых процессов в прозрачных средах с помощью структурированного лазерного излучения // Научная визуализация, 2016, Т. 8, № 4, С. 50-66.
8. Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В. Лазерный рефракционный метод визуализации и количественной диагностики диффузионного слоя жидкости при наличии внутренних волн // Научная визуализация, 2015, Т. 7, № 4, С. 76-86.

9. Крикунов А.В., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С. Рефракция астигматического лазерного пучка в переходном слое стратифицированной жидкости, *Оптика и спектроскопия*, 2011, Т. 111, № 6, С. 1020-1026.
10. Raskovskaya I.L., Rinkevichyus B.S., Tolkachev A.V. Laser refraction thermometry of transparent solids with inhomogeneous heating // *Measurement Techniques*, 2017, Vol. 59. No 10. P. 1084-1087.
11. Расковская И.Л., Ведяшкина А.В., Зелепукина Е.В. Определение параметров стратифицированных сред с помощью регистрации каустик при рефракции структурированного лазерного излучения // *Оптические методы исследования потоков: XIII МНТК: труды конференции*, 2015, С.78–86.
12. Vedyashkina A.V., Pavlov I.N., Raskovskaya I.L., Rinkevichyus B.S. Experimental and computer 3D-visualization's dynamics of optical caustics in inhomogeneous mediums // *Proceedings of 16 ISFV*, 2014, report ISFV16-1178.
13. Vedyashkina A.V., Rinkevichyus B.S., Raskovskaya I.L., Pavlov I.N. Laser radiation caustics method for quantitative diagnostic of transparent inhomogeneous media // *Progress in Electromagnetics Research Symposium 2017*, P. 754-758.
14. Gdoutos E.E. The optical method of caustics for the solution of fracture mechanics problems // *15th International Conference on Experimental Mechanics*, 2012, Paper 3819.
15. Gao G., Li Z., Negahban M. Dynamic fracture analysis of polycarbonate by the optical method of caustics // *Procedia Materials Science*, 2014, No 3, P. 165-176.
16. Markides C., Kourkoulis S. Revisiting the Reflected Caustics Method: the Accurate Shape of the "Initial Curve" // *Engineering transactions*, 2013, 61(4), P. 265-287.
17. Vedyashkina A.V., Rinkevichyus B.S. 3D-visualization of caustics' formation in laser refractography problems // *Physics Procedia "4th International Conference of Photonics and Information Optics, PhIO 2015"*, 2015, P. 205-210.
18. Крикунов А.В., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С. Рефракция астигматического лазерного пучка в переходном слое стратифицированной жидкости // *Оптика и спектроскопия*, 2011, Т. 111, № 6. С. 1001-1006.

Optical-electronic complex for investigation of the processes of heat and mass transfer by laser contactless method

A.V. Vedyashkina¹, B.S. Rinkevichyus², I.N. Pavlov³, I.L. Raskovskaya⁴, A.V. Tolkachev⁵

National Research University "MPEI"

¹ ORCID: 0000-0002-2670-7712, an.vedyashkina@gmail.com

² ORCID: 0000-0001-7336-1315, rinkevbs@mail.ru

³ ORCID: 0000-0002-9014-6294, inpavlov@bk.ru

⁴ ORCID: 0000-0002-1231-9479, raskovskail@mail.ru

⁵ ORCID: 0000-0003-4185-892X, avtolk2008@yandex.ru

Abstract

The work is devoted to development and creation of an optoelectronic complex for determination of the inhomogeneous condensed media parameters, principle of which is based on the method of structured laser radiation caustics. This method is described for determining the parameters of diffusion layer of liquid according to the position of caustic surfaces during longitudinal probing by a plane laser beam. Special software is presented that allows determining the distribution of the refractive index in the diffusion layer of liquid by comparing theoretically calculated and experimental refractograms. The results of the complex operation for the diffusion layer arising between the electrolyte solution and water for different concentrations of the electrolyte solution are shown. New method for determining the temperature of the surface of a cold body placed in a transparent liquid is presented, it is based on determining the location of the singular points of caustic surfaces arising when the boundary layer is probed by the horizontal element of structured beam.

Keywords: diffusion layer of liquid, refraction, caustic, laser refractography.

References

1. Evtikhieva O.A., Raskovskaya I.L., Rinkevichyus B.S. Laser refractography. M.: FIZMATLIT, 2008. 176 p.
2. Settles G.S. Schlieren and Shadowgraph Techniques, Visualizing Phenomena in Transparent Media, Springer, New York, 2001, P. 387
3. Raskovskaya I.L. Refractometry of optically inhomogeneous media based on recording the position of caustics by using structured laser radiation. *Avtometriya*, 2014, 50 (5), P. 92-98.
4. Raskovskaya I.L. Specific Imaging of Caustics upon Refraction of Structured Laser Radiation in Stratified Media // *Technical Physics*, 2015, 60(6), P. 911-916.
5. *Diffraction Computer Optics* / Ed. V.A. Soyfer. M.: Fizmatlit, 2007. 736 p.
6. Vedyashkina A.V., Rinkevichyus B.S. 3D-visualization of Caustics' Formation in Laser Refractography Problems // *Physics Procedia*, 2015, Vol. 73, P. 205-210.
7. Rinkevichyus B.S., Vedyashkina A.V., Pavlov I.N., Raskovskaya I.L., Tolkachev A.V. Visualization of dynamic thermal processes in transparent media using structured laser radiation // *Scientific Visualization*, 2016, vol. 8, no. 4, p. 50-66.
8. Raskovskaya I.L., Rinkevichyus B.S., Tolkachev A.V. Laser refraction method of visualization and quantitative diagnosis of diffusion layer of liquid in the presence of internal waves // *Scientific Visualization*, 2015, vol. 7, No. 4, p. 76-86.

9. Krikunov A.V., Raskovskaya I.L. B.S. Rinkevichus. Refraction of an astigmatic laser beam in a transition layer of a stratified fluid, *Optics and Spectroscopy*, 2011, Vol. 111, No. 6, P. 1020-1026.
10. Raskovskaya I.L., Rinkevichyus B.S., Tolkachev A.V. Laser refraction thermometry of transparent solids with inhomogeneous heating // *Measurement Techniques*, 2017, Vol. 59. No 10. P. 1084-1087.
11. Raskovskaya I.L., Vedyashkina A.V., Zelepukina E.V. Determination of parameters of stratified media using caustic registration with the refraction of structured laser radiation // *Optical methods for studying fluxes: XIII ISTC: conference proceedings*, 2015, p. 78–86.
12. Vedyashkina A.V., Pavlov I.N., Raskovskaya I.L., Rinkevichyus B.S. Experimental and computer 3D-visualization's dynamics of optical caustics in inhomogeneous mediums // *Proceedings of 16 ISFV*, 2014, report ISFV16-1178.
13. Vedyashkina A.V., Rinkevichyus B.S., Raskovskaya I.L., Pavlov I.N. Laser radiation caustics method for quantitative diagnostic of transparent inhomogeneous media // *Progress in Electromagnetics Research Symposium 2017*, P. 754-758.
14. Gdoutos E.E. The optical method of caustics for the solution of fracture mechanics problems // *15th International Conference on Experimental Mechanics*, 2012, Paper 3819.
15. Gao G., Li Z., Negahban M. Dynamic fracture analysis of polycarbonate by the optical method of caustics // *Procedia Materials Science*, 2014, No 3, P. 165-176.
16. Markides C., Kourkoulis S. Revisiting the Reflected Caustics Method: the Accurate Shape of the "Initial Curve" // *Engineering transactions*, 2013, 61(4, P. 265-287.
17. Vedyashkina A.V., Rinkevichyus B.S. 3D-visualization of caustics' formation in laser refractography problems // *Physics Procedia "4th International Conference of Photonics and Information Optics, PhIO 2015"*, 2015, P. 205-210.
18. Krikunov A.V., Raskovskaya I.L., Rinkevichus B.S. Refraction of an astigmatic laser beam in the transition layer of a stratified fluid // *Optics and Spectroscopy*, 2011, Vol. 111, No. 6. P. 1001-1006.