

3D-визуализация и количественная диагностика процессов тепло- и массообмена с помощью метода лазерной рефрактографии*

Б.С. Ринкевичюс¹, А.В. Ведяшкина¹, И.Л. Расковская¹, А.В. Толкачев¹, Д.Е. Пудовиков²
 {rinkevbs|raskovskail|dimonpe}@mail.ru|an.vedyashkina@gmail.com|avtolk2008@yandex.ru

¹Кафедра физики им. В.А. Фабриканта

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

²Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, Москва, Россия

Работа посвящена исследованию процессов тепло- и массообмена с помощью метода лазерной рефрактографии, основанного на явлении рефракции структурированного лазерного излучения (СЛИ), зондирующего оптически неоднородную среду, с последующей регистрацией полученных изображений (рефрактограмм) с помощью цифровой камеры и их компьютерной обработкой. При распространении СЛИ в оптической неоднородности могут возникать каустики, координаты которых могут быть определены с высокой точностью, что в результате дает дополнительные возможности для решения обратной задачи восстановления физических свойств среды, обуславливающих неоднородность показателя преломления. Рассмотрены условия возникновения каустик при продольном зондировании стратифицированных оптически неоднородных сред плоским и цилиндрическим лазерными пучками. Представлены результаты компьютерного моделирования 3D-рефрактограмм распространения СЛИ в диффузионном слое жидкости и в температурных полях, возникающих около нагретых или охлажденных объектов. Приведено сравнение экспериментальных и компьютерных рефрактограмм.

Ключевые слова: теплообмен, массообмен, лазерная рефрактография, каустика

1. Введение

Процессы тепло- и массообмена являются чрезвычайно сложными и представляют значительный интерес для исследований на основе комплексного сочетания различных научных подходов. В этом аспекте, оптические методы исследования физических процессов, происходящих в жидкостях и газах, обладают большими преимуществами по сравнению с другими методами, так как они позволяют визуализировать процесс. 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 (Settles 2001). В настоящее время инструменты, использующие такие методы, широко используются в аэрогидродинамических и теплофизических экспериментах. Исследование оптически неоднородных сред представляет существенный интерес, т.к. часто важно знать, как изменяется показатель преломления среды при нагреве или охлаждении, при изучении процессов диффузии, оптимизации работы нагревательных или охлаждающих элементов и др. В случае диагностики протяженных оптически неоднородных сред при наличии сильной рефракции возникают определенные сложности при применении классических теневых и интерференционных методов. Поэтому в такой ситуации целесообразно ис-

пользовать методы, в которых информативным параметром является линейное или угловое рефракционное смещение тонкого пучка или элементов структурированного пучка, формируемого на основе дифракционных оптических элементов (ДОО) (Сойфер 2007). Одним из таких методов является метод лазерной рефрактографии, основанный на явлении рефракции структурированного лазерного излучения, зондирующего неоднородную среду, с последующей регистрацией полученных изображений (рефрактограмм) с помощью цифровой камеры и их компьютерной обработкой (Евтихиева 2008, Raskovskaya 2011).

Использование СЛИ хорошо зарекомендовало себя при количественной диагностике температурных и плотностных стратификаций в жидкостях (Расковская 2015, Rinkevichyus 2015). При рефракции в неоднородной среде происходит искажение элементов структуры пучка, возникающее из-за рефракционного смещения, которое является информативным параметром при решении обратной задачи определения физических параметров среды.

2. Исследование температурного поля в жидкости

Следует отметить, что ряд оптических методов позволяет получить информацию только о распределении показателя преломления $n(x, y)$, которое впоследствии может быть преобразовано с помощью соответствующих расчетов в поле температуры $T(x, y)$ или в поле какого-либо другого параметра среды. В комбинированных процессах тепло- и массообмена изменение показателя преломления зависит от двух величин в соответствии с соотно-

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований (проекты №14-08-00948а и №16-32-00530мол_а). Работа опубликована по гранту РФФИ №16-07-20482.

шением (Rinkevichyus 2014)

$$dn = (dn/dT)dT + (dn/dC)dC \quad (1)$$

где dn/dT является производной от показателя преломления по температуре и dn/dC – по концентрации. Даже если частные производные в выражении (1) известны, в общем случае распределение температуры и концентрации трудно определить путем измерения только показателя преломления. Часто прибегают к измерению одного из этих распределений путем вычислений или применением неоптических методов. При выборе подходящей рабочей среды, может быть использовано следующее соотношение:

$$(dn/dT)\Delta T \gg (dn/dC)\Delta C \quad (2)$$

где ΔT и ΔC – наибольшие отклонения температуры и концентрации соответственно, например, между значениями температуры и концентрации в пристеночном слое и во внешнем потоке. В случае нестационарных задач следует учитывать тот факт, что процессы теплообмена и массообмена протекают с различной скоростью, поскольку в жидкой среде коэффициент теплопроводности значительно выше, чем коэффициент диффузии. Температурная зависимость показателя преломления воды для длины волны лазерного излучения 0,6328 мкм определяется по формуле:

$$n(T) = 1,3328 - 0,000051T - 0,0000011T^2. \quad (3)$$

На рисунке 1 показана траектория луча, распространяющегося в оптически неоднородной среде, показатель преломления которой изменяется только в одном, вертикальном, направлении. Луч падает на среду под углом θ_1 в точке с координатой $x_{\text{ВХ}}$ и выходит из среды в точке $x_{\text{ВЫХ}}$ под углом θ_2 . Зная закон изменения показателя преломления, $n(x)$, а также параметры падающего луча, можно определить параметры выходящего луча по следующей формуле:

$$\sin \theta_2 = \sqrt{\frac{n^2(x_{\text{ВЫХ}}) - n^2(x_{\text{ВХ}}) + n_{\text{ВХ}}^2(x_{\text{ВХ}}) \sin^2 \theta_1}{n_{\text{ВЫХ}}^2}} \quad (4)$$

Эти формулы позволяют также решать обратную задачу восстановления закона распределения показателя преломления среды от известных (измеряемых) параметров падающих и выходящих лучей. На рисунке 2 показаны проекции плоских лазерных пучков, проходящих под горячим шаром, помещенным в холодную воду. Расчет производился с использованием формул геометрической оптики.

3. Экспериментальная регистрация рефрактограмм

На рисунке 3 приведена схема лазерной рефрактографической системы. Излучение лазера 1 преобразуется

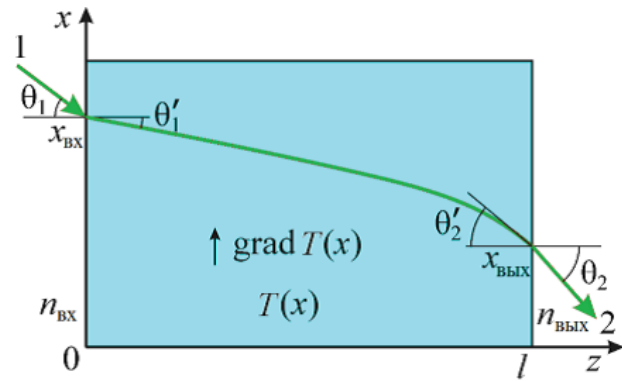


Рис. 1: Траектория луча в плоскослоистой среде с убывающим показателем преломления: 1 – падающий луч, 2 – выходящий луч.

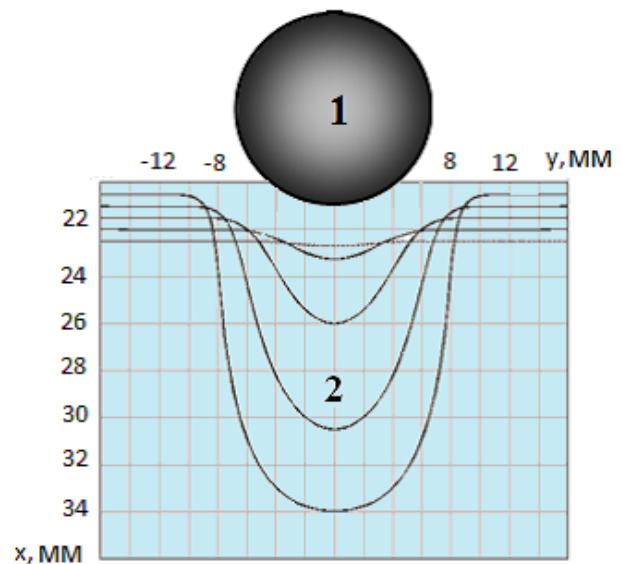


Рис. 2: Компьютерное моделирование 2D-рефрактограмм плоских лазерных пучков в сферически неоднородной среде: 1 – нагретый шар, помещенный в холодную воду, 2 – рефрактограммы.

зается оптической системой, содержащей ДОЭ 2, в структурированное лазерное излучение 3, проходящее через оптически неоднородную среду 4, содержащую нагретое или охлажденное тело, погруженное в жидкость. Полученная на полупрозрачном экране 5 2D-рефрактограмма записывается с помощью цифровой фотокамеры 6 и вводится в компьютер 7, где она обрабатывается специальным программным обеспечением 8. Изображения в нижней строке иллюстрируют этапы формирования рефрактограмм из узкого лазерного луча, а также участок, полученный для построения температурной зависимости в пограничном слое. Обработка 2D-рефрактограмм позволяет производить количественную диагностику оптической неоднородности в данной среде, вызвавшей рефракцию лазерных

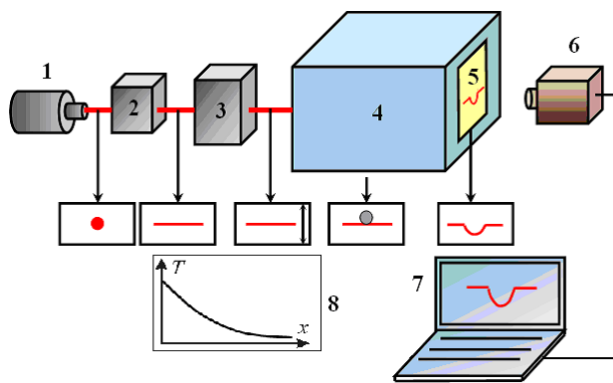


Рис. 3: Схема лазерной рефрактографической системы: 1 – лазер, 2 – ДОО, 3 – блок формирования СЛИ, 4 – исследуемая среда, 5 – диффузный экран, 6 – цифровая фотокамера, 7 – ПК, 8 – график распределения температуры.

лучей, т.е. получить информацию о распределении температуры в исследуемом потоке. Для определения температуры жидкости в непосредственной близости от нагретых тел, был разработан специальный алгоритм для обработки экспериментальных рефрактограмм и метод для их сравнения с теоретическими аналогами (рис. 4) (Nguen 2009). Путем сравнения рефрактограмм можно опреде-

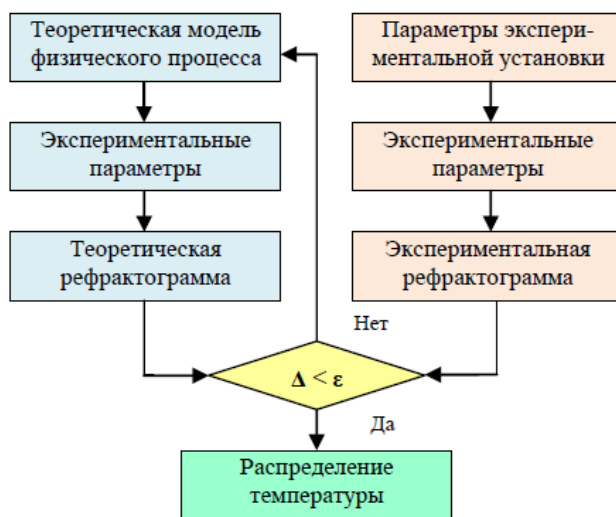


Рис. 4: Алгоритм для сравнения расчетных и экспериментальных рефрактограмм.

лить температурные поля в граничных слоях жидкости, т.е. получить количественную информацию. На рис. 5а приведена экспериментальная рефрактограмма для нагретого шара диаметром 50 мм, погруженного в холодную воду, и восстановленный профиль температуры в пограничном слое воды (рис. 5б).

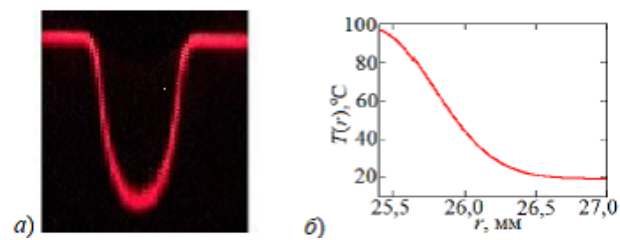


Рис. 5: Обработка экспериментальной рефрактограммы:

- а) – экспериментальная рефрактограмма,
б) – восстановленный профиль распределения температуры

4. 3D-Рефрактограммы

Каустическими поверхностями или, проще, каустиками называют огибающие семейства лучей (Кравцов 1980). При зондировании неоднородной среды с помощью СЛИ могут возникать каустики, координаты которых могут быть определены с высокой точностью, что в результате дает дополнительные возможности для решения обратной задачи восстановления свойств неоднородной среды (Raskovskaya 2014, Raskovskaya 2015). 3D-визуализация рефракции структурированного лазерного излучения дает возможность увидеть формирование каустик в объеме, а также получить качественные представления об оптической неоднородности и градиенте показателя преломления. Компьютерное моделирование 3D-рефрактограмм позволяет оптимизировать проводимые эксперименты.

Первый тип оптической неоднородности, в котором рассматривается 3D-визуализация рефрактограмм – диффузионный слой жидкости – это особый вид неоднородности, который возникает при контакте двух сред с различными физическими характеристиками. Диффузионный слой является стратифицированной средой, то есть показатель преломления зависит только от одной координаты (Vedyashkina 2013, Павлов 2016). Распределение показателя преломления в диффузионном слое может быть описано через функцию гиперболического тангенса (Vedyashkina 2015):

$$n(x) = \frac{n_1 + n_2}{2} + \frac{n_1 - n_2}{2} \operatorname{th} \left(\frac{x - x_s}{h} \right) \quad (5)$$

где n_1 – показатель преломления более плотной жидкости, n_2 – показатель преломления менее плотной жидкости, h – характеристическая полуширина слоя, x_s – середина слоя. Границы слоя x_1 и x_2 определяются по уровню отклонения показателя преломления от значений n_1 и n_2 на 10^{-5} соответственно. Этот тип неоднородности может быть зондирован СЛИ различной формы: плоскостью, матрицей точек, набором конических ко-

лец, крестом и т.д. Компьютерная и экспериментальная 3D-визуализация рефракции плоского лазерного пучка и динамика образования каустик при изменении угла наклона лазерной плоскости и градиента показателя преломления представлены в (Vedyashkina 2014). С целью наблюдения и регистрации рефрактограмм распространения цилиндрического лазерного пучка (ЦЛП) в диффузионном слое была использована экспериментальная установка, изображенная на рис. 6. Для формирования ЦЛП создана оптическая система, состоящая из лазера 1, линзы 2, фокусирующей излучение в область регистрации, ДООЭ 3 и линзы 4, позволяющей получить параллельный пучок. Для получения 3D-рефрактограмм без искажений было предложено использовать 2 кюветы (Yesin 2012). Диффузионный слой создается в кювете 5, а регистрация рефрактограмм производится в кювете 6, содержащей воду с рассеивающими частицами. Регистрация 3D-рефрактограммы 8 производится с помощью цифровой камеры 7, а затем обрабатывается на персональном компьютере 9. Для создания диффузионного слоя используется дистиллированная вода и раствор NaCl. Параметры среды: показатели преломления соленой воды $n_1 = 1,3410$, дистиллированной – $n_2 = 1,3320$. Эксперименталь-

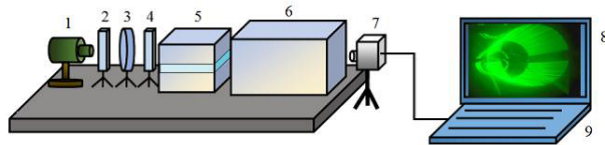


Рис. 6: Экспериментальная установка: 1 лазер, 2, 4 – линзы, 3 – ДООЭ, 5 – кювета, содержащая диффузионный слой, 6 – кювета, содержащая рассеивающие частицы, 7 – цифровая камера, 8 – 3D-рефрактограмма, 9 – ПК.

ные 3D-рефрактограммы распространения ЦЛП в диффузионном слое жидкости показаны на рис. 7а. С помощью уравнения 6 может быть описана траектория луча в плоскослоистой среде с распределением показателя преломления $n(x)$ и начальными условиями $z_0 = z(0)$, α_0 – угол под которым луч входит в среду, n_0 – показатель преломления в точке входа луча в среду:

$$z(x) = z_0 + \int_0^x \frac{n_0 \sin \alpha_0 dx}{\pm \sqrt{n^2(x) - n_0^2 \sin^2 \alpha_0}} \quad (6)$$

Используя это выражение и экспериментальные параметры среды, было произведено компьютерное моделирование распространения ЦЛП в диффузионном слое жидкости. Результат моделирования для радиусов пучка 8 мм и 16 мм представлен на рис. 7б. Следующий тип оптической неоднородно-

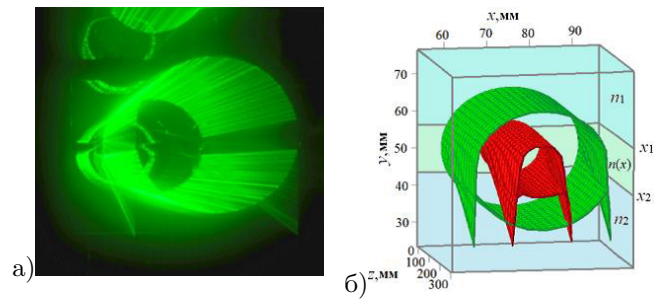


Рис. 7: 3D-визуализация распространения ЦЛП в диффузионном слое жидкости и формирование каустик (1):

а) – экспериментальная рефрактограмма, б) – расчетная рефрактограмма.

сти, в котором рассматривается 3D-визуализация рефрактограмм – температурное поле около нагретых или охлажденных объектов, погруженных в воду. Результаты компьютерного моделирования представлены на рис. 8а,б.

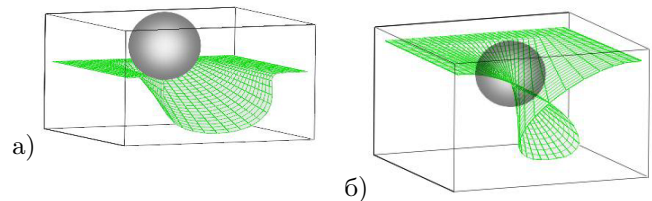


Рис. 8: 3D-визуализация распространения плоского лазерного пучка в температурном поле около: а) нагретого шара $T = 70^\circ\text{C}$ в холодной воде $T = 20^\circ\text{C}$, б) охлажденного шара $T = 20^\circ\text{C}$ в горячей воде $T = 70^\circ\text{C}$

5. Заключение

В работе описано применение метода лазерной рефрактографии для количественной диагностики процессов тепло- и массообмена. Представлены результаты компьютерного моделирования 3D-рефрактограмм распространения СЛП в диффузионном слое жидкости и в температурных полях, возникающих около нагретых или охлажденных объектов. Описаны экспериментальные установки для регистрации двумерных и трехмерных рефрактограмм. Приведено сравнение экспериментальных и расчетных рефрактограмм, посредством которого было восстановлено распределение температурного поля в пограничном слое жидкости

Литература

- [1] Nguen V.T., Raskovskaya I.L., Rinkevichyus B.S. Algorithms of quantitative diagnosis of

- optical inhomogeneities by laser refractography // Measurement techniques, 2009, No. 4, pp. 24-28.
- [2] Raskovskaya I.L. Refractometry of optical inhomogeneous media by registration of caustics position with used of structured laser radiation, *Avtometriya*, 2014, 50(5), 92-98.
- [3] Raskovskaya I.L. Specific Imaging of Caustics upon Refraction of Structured Laser Radiation in Stratified Media // *Technical Physics*. – 2015. – 60(6). – P. 911–916.
- [4] Raskovskaya I.L., Rinkevichyus B.S., Tolkachev A.V., Structured Beams in Laser Refractography Applications. In books: *Laser Beams Theory, Properties and Applications*. Nova Science Publishers, Inc., New York, 2011, P.399-414.
- [5] Rinkevichyus B. S., Raskovskaya I. L., Tolkachev A. V., Vedyashkina A. V. Structured Laser Radiation in Optical Inhomogeneous Media Refractography PIERS Proceedings, Prague, Czech Republic, July 6-9, 2015. – P. 2660–2664.
- [6] Rinkevichyus B.S., Pavlov I.N., Raskovskaya I.L., Tolkachev A.V. Laser Refractography: Principles and Applications in Studies of Thermophysical Processes in Liquids, *Recent Advances in Fluid Mechanics and Thermal Engineering* // *International journal of energy and environment*. – 2015. – Vol. 9. – P. 102-111.
- [7] Settles G.S. *Schlieren and Shadowgraph Techniques, Visualizing Phenomena in Transparent Media*, Springer, New York, 2001, P. 387.
- [8] Vedyashkina A.V. Computer modeling of optical rays' refraction in inhomogeneous mediums, *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2013, 22 (1), P. 71-76.
- [9] 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 International Symposium on Flow Visualization*, 2014, report ISFV16-1178.
- [10] Vedyashkina A.V., Rinkevichyus B.S. 3D-visualization of Caustics' Formation in Laser Refractography Problems // *Physics Procedia*, 2015. – Vol. 73. – P. 205–210
- [11] Yesin M.V., Raskovskaya I.L., Rinkevichyus B.S., Tolkachev A.V. Three-dimensional refractograms and its applications for diagnosis of gradient inhomogeneities // *Radiotechnics and electronics*, 2012, 57(4), P. 485-491.
- [12] *Дифракционная компьютерная оптика* / Под ред. В.А.Сойфера. М.: Физматлит, 2007. 736 с.
- [13] Евтихиева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С. *Лазерная рефрактография*. – М.: ФИЗМАТ-ЛИТ, 2008. – 176с.
- [14] Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. *Геометрическая оптика неоднородных сред*. М.: Наука, 1980. 304 с.
- [15] Павлов И.Н., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В., Сапронов М. В. Лазерная визуализация динамических процессов в жидкости при тепло- и массопереносе // XV Минский международный форум по теплообмену, Минск, 2016, доклад 1-26.
- [16] 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.