

*Тринадцатая Международная научно-техническая конференция  
«Оптические методы исследования потоков»  
Москва, 29 июня — 03 июля 2015 г.*

УДК 535.321.9

А.В. Ведяшкина, С.В. Григорьев

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия,  
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: [avedyashkina@rambler.ru](mailto:avedyashkina@rambler.ru)*

**3D-ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ОБРАЗОВАНИЯ КАУСТИК ПРИ РЕФРАКЦИИ  
СТРУКТУРИРОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ЛАЗЕРНОЙ  
РЕФРАКТОГРАФИИ**

**АННОТАЦИЯ**

Современный и перспективный метод исследования оптически неоднородных сред – метод лазерной рефрактографии, основанный на явлении рефракции структурированного лазерного излучения, зондирующего неоднородную среду, с последующей регистрацией угла его отклонения с помощью цифровой камеры и компьютерной обработкой полученных изображений. В работе исследуются два вида неоднородностей: диффузионный слой жидкости и температурное поле около охлажденного тела. Рассмотрены условия возникновения каустик при продольном зондировании стратифицированных оптически неоднородных сред плоским и цилиндрическим лазерными пучками. Разработана экспериментальная установка для регистрации трехмерных рефрактограм. Получены 3D-рефрактограммы распространения цилиндрического лазерного пучка в диффузионном слое жидкости.

**ОПТИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНЫЕ СРЕДЫ, СТРУКТУРИРОВАННОЕ ЛАЗЕРНОЕ  
ИЗЛУЧЕНИЕ, КАУСТИКА, ЛАЗЕРНАЯ РЕФРАКТОГРАФИЯ, ДИФфуЗИОННЫЙ СЛОЙ**

**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время исследование оптически неоднородных сред представляет большой научный и практический интерес. В таких средах показатель преломления неодинаков в каждой точке, и световой луч в результате рефракции распространяется непрямолинейно. Часто важно знать, что происходит при контакте двух и более сред с различными показателями преломления, как изменяется показатель преломления среды при нагреве или охлаждении. Методы исследования оптически неоднородных сред важны при изучении процессов диффузии, а так же оптимизации работы нагревательных или охлаждающих элементов.

Современный и перспективный метод исследования оптически неоднородных сред – метод лазерной рефрактографии, основанный на явлении рефракции структурированного лазерного излучения (СЛИ), зондирующего неоднородную среду, с последующей регистрацией угла его отклонения с помощью цифровой камеры и обработкой полученных изображений на компьютере [1, 2]. Данный метод имеет принципиальные отличия от ранее разработанных методов исследования оптических неоднородностей, таких как шлирен и классический теневой методы [3].

При применении лазерных методов для реконструкции физических характеристик среды, обуславливающих неоднородность показателя преломления, в условиях существенной рефракции для зондирования целесообразно использовать структурированные лазерные пучки (СЛП), формируемые на основе дифракционных оптических элементов (ДОЭ). Использование этих пучков в отличие от широких световых пучков позволяет с высокой точностью оценивать изменения показателя преломления в пограничном слое.

Яркие световые кривые причудливой формы возникают на освещённом столе, на который поставлен бокал с водой. Движущиеся каустики можно увидеть на дне неглубокого водоёма, водная поверхность которого находится в волнении. Эти кривые – каустики. Каустика – это огибающая совокупности лучей, не сходящихся в одной точке [4]. В методе лазерной рефрактографии под каустиками понимаются особые линии или особые поверхности, вблизи которых интенсивность светового поля резко возрастает [5]. Другие оптические методы с использованием каустик широко применяются при решении различных задач, таких как [6, 7]. При зондировании неоднородной среды СЛП могут возникать каустики, местоположение которых может быть определено с высокой точностью с помощью специально разработанной программы, что в результате позволяет решить обратную задачу восстановления свойств неоднородной среды. Теория каустик напрямую связана с одним из разделов математики – теорией катастроф [8].

### 3D-ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КАУСТИК ПРИ ПРОДОЛЬНОМ ЗОНДИРОВАНИИ ДИФфуЗИОННОГО СЛОЯ ЖИДКОСТИ

Диффузионный слой жидкости – особый вид неоднородности, который возникает при контакте двух сред с различными физическими характеристиками. В данной работе рассматриваются среды с различными показателями преломления. Диффузионный слой является стратифицированной средой, то есть показатель преломления зависит только от одной декартовой координаты. Таким образом, если медленно наливать тонким слоем менее плотную жидкость с показателем преломления  $n_1$  на поверхность более плотной жидкости с показателем преломления  $n_2$ , то со временем между ними образуется диффузионный слой, показатель преломления в котором может быть описан через функцию гиперболического тангенса [9]:

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

где  $h$  – характеристическая полуширина слоя,  $x_s$  – середина слоя. 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: линией, матрицей точек, набором конических колец, 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 работе [10]. 3D-визуализация в методе лазерной рефрактографии позволяет лучше понять структуру неоднородностей в жидкостях.

Формула (2) – это уравнение траектории луча в плоскостной среде с распределением показателя преломления  $n(x)$  и начальными условиями  $z_0 = z(0)$ ,  $\alpha_0$  – угол под которым луч входит в среды,  $n_0$  – показатель преломления в точке входа луча в среду:

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

Используя это выражение, было произведено компьютерное моделирование распространения параллельного цилиндрического лазерного пучка в диффузионном слое

жидкости. Пусть в среде создан диффузионный слой со следующими параметрами:  $n_1 = 1,3380$ ,  $n_2 = 1,3320$ ,  $x_s = 50$  мм,  $h = 1,1$  мм. Для визуализации каустик используем три основных положения центра лазерного пучка: центр лежит в плоскости верхней, нижней границ слоя и в плоскости середины слоя. На рисунке 1 показаны эти случаи, разными цветами показаны пучки различных радиусов, имеющих общий центр (красный – 8 мм, зеленый – 16 мм).

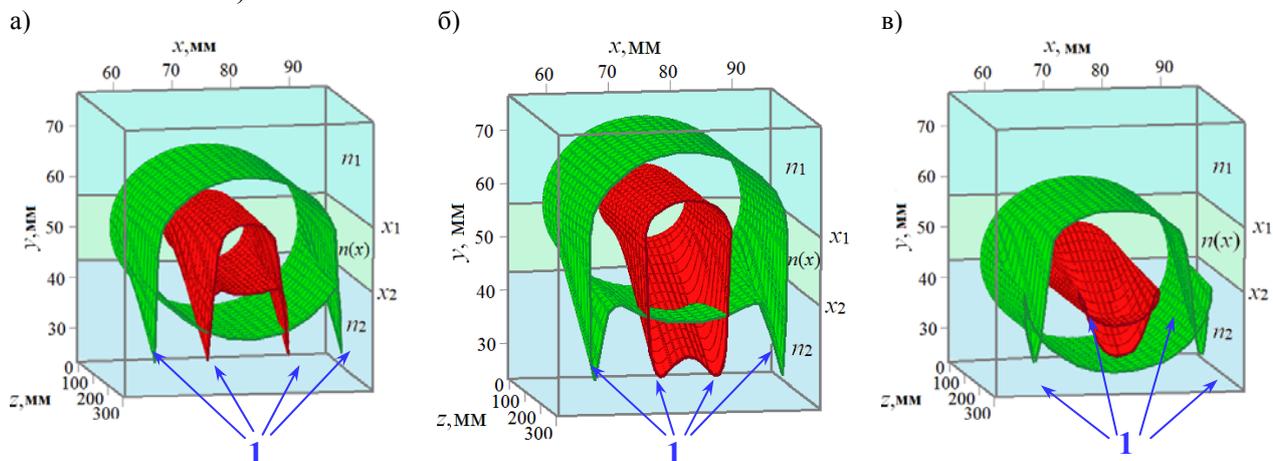


Рис. 1. Компьютерная визуализация рефракции цилиндрического лазерного пучка в диффузионном слое жидкости и формирование каустик (1): (а) центр лазерных пучков лежит в плоскости середины слоя, (б) центр лазерных пучков лежит в плоскости верхней границы слоя, (в) центр лазерных пучков лежит в плоскости нижней границы слоя

С целью наблюдения и регистрации рефрактограм распространения цилиндрического лазерного пучка в неоднородных средах была использована экспериментальная установка, изображенная на рисунке 2. Для формирования цилиндрического лазерного пучка создана оптическая система, состоящая из лазера 1, линзы 2, фокусирующей излучение в область регистрации, ДОЭ 3 и линзы 4, позволяющей получить параллельный пучок. Для получения 3D-рефрактограм без искажений предложено использовать 2 кюветы [11]. Диффузионный слой создается в кювете 5, а регистрация рефрактограм 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 –  $n_2 = 1,3320$ .

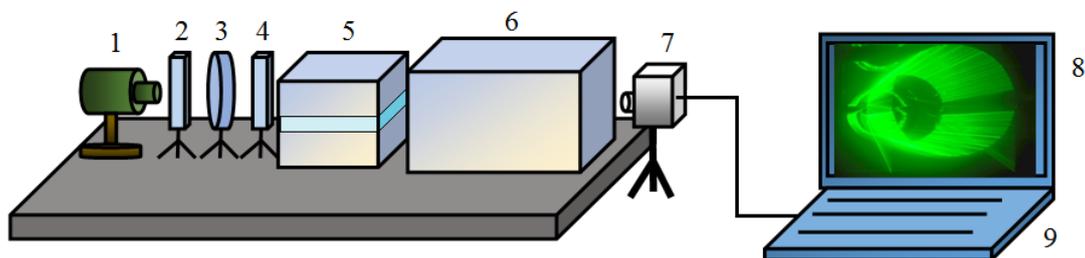


Рис. 2. Экспериментальная установка: 1 лазер, 2, 4 – линзы, 3 – ДОЭ, 5 – кювета, содержащая диффузионный слой, 6 – кювета, содержащая рассеивающие частицы, 7 – цифровая камера, 8 – 3D-рефрактограмма, 9 – ПК

3D-рефрактограммы распространения лазерного пучка в неоднородной среде показаны на рисунке 3.

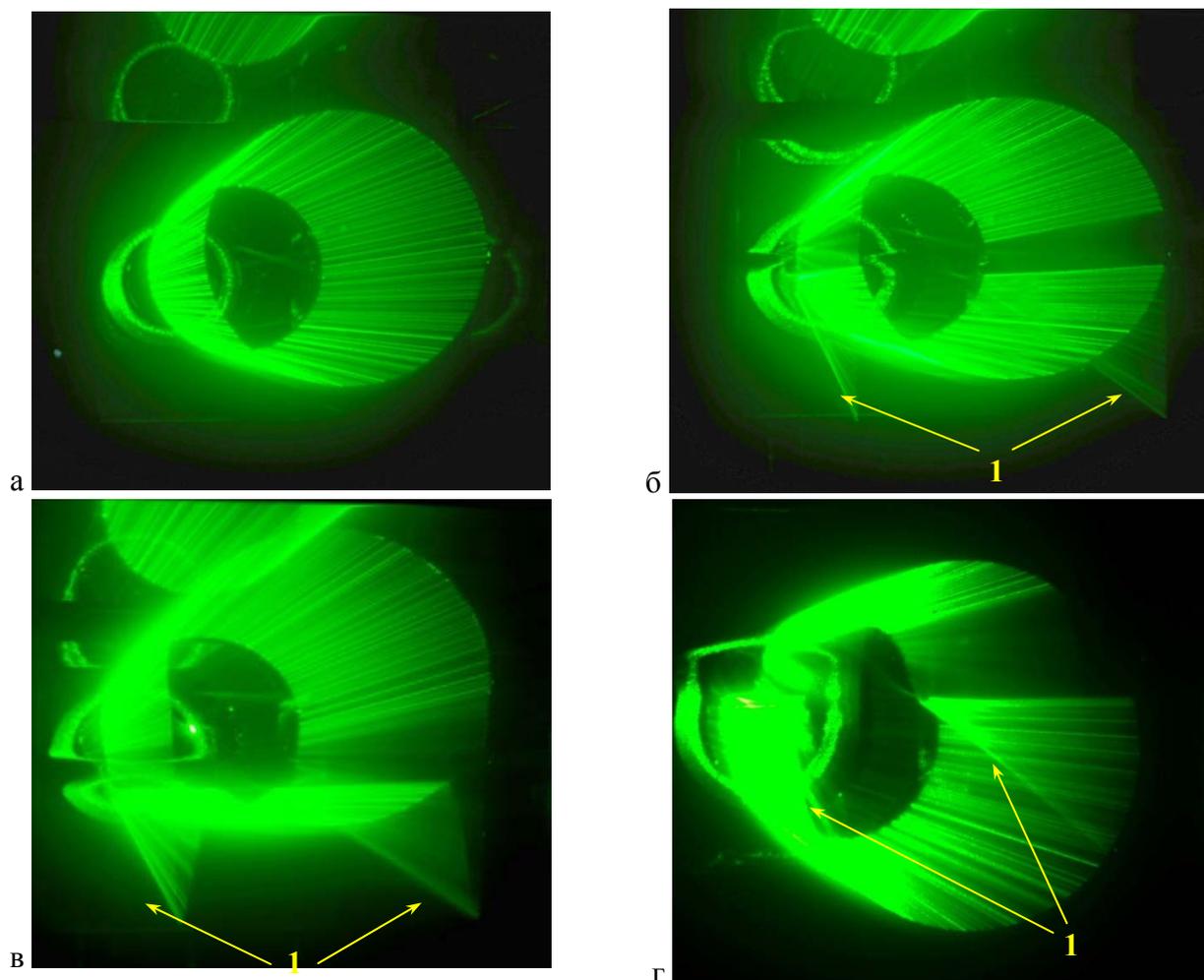


Рис. 3. Экспериментальные 3D-рефрактограммы цилиндрического лазерного пучка в диффузионном слое жидкости и формирование каустик (1): (а) распространение лазерного пучка в однородной среде, (б) центр лазерного пучка лежит в плоскости середины слоя, (в) центр лазерного пучка лежит в плоскости верхней границы слоя, (г) центр лазерного пучка лежит в плоскости нижней границы слоя

### 3D-ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КАУСТИК В СФЕРИЧЕСКИ СИММЕТРИЧНОМ ТЕМПЕРАТУРНОМ ПОЛЕ ОХЛАЖДЕННОГО ШАРА В ГОРЯЧЕЙ ВОДЕ

Распределение показателя преломления в сферически симметричном температурном поле около холодного шара радиуса  $R$  в горячей воде может быть описано с помощью радиальной температурной зависимости:

$$T(r) = T_0 + \Delta T \cdot e^{-\frac{(r-R)^2}{a^2}}, \quad (3)$$

где  $T_0$ ,  $\Delta T$ ,  $a$  – параметры модели температурного поля,  $T_0$  – параметр, определяющий температуру воды и стенок кюветы, отношение  $\Delta T/a$  соответствует градиенту показателя преломления в пограничном слое толщиной  $a$ . Переход к зависимости показателя преломления от температуры осуществляется с помощью следующего выражения [12]:

$$n(T) = n_0 - 0,000051 \cdot T(r) - 0,0000011 \cdot (T(r))^2. \quad (4)$$

3D-рефрактограммы распространения плоского лазерного пучка, проходящего над холодным шаром с радиусом 8,4 мм, представлены на рисунке 4.

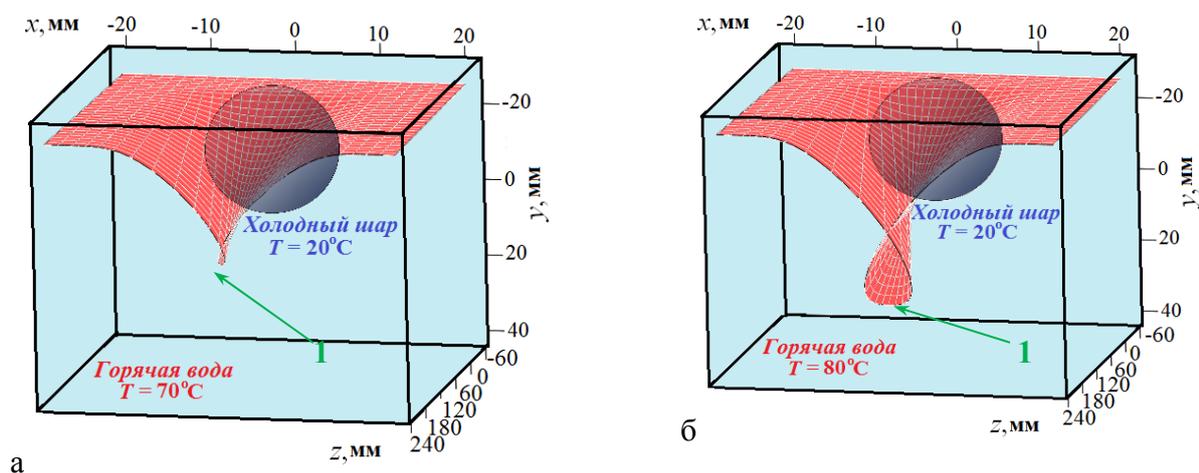


Рис. 4. 3D-рефрактограмма распространения плоского лазерного пучка над холодным шаром в горячей воде и формирование каустик (1): (а) разность температур  $\Delta T = 50^\circ\text{C}$ ; (б) разность температур  $\Delta T = 60^\circ\text{C}$

Из рисунков видно, как изменяются 3D-рефрактограммы: лазерная плоскость отклоняется в сторону увеличения градиента показателя преломления. 2D-рефрактограмма на выходе из среды в этом случае представляет собой петлю, размер которой увеличивается с увеличением градиента показателя преломления (разности между температурами).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

3D-визуализация рефракции структурированного лазерного излучения дает возможность увидеть формирование каустик в объеме, а так же получить качественные представления об оптической неоднородности и градиенте показателя преломления. Компьютерное моделирование 3D-рефрактограмм позволяет оптимизировать проводимые эксперименты. Для решения обратной задачи восстановления свойств среды в методе лазерной рефрактографии необходимо регистрировать 2D-рефрактограммы, производя съемку через фронтальную стенку кюветы.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-08-00948а).

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Rinkevichyus B.S., Evtikhieva O.A., Raskovskaya I.L.**, Laser Refractography, Springer, New York, 2011, 189 p.
2. **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.
3. **Settles G.S.**, Schlieren and Shadowgraph Techniques, Visualizing Phenomena in Transparent Media, Springer, New York, 2001, 387 p.
4. **Born M., Wolf E.**, Principles of optics, Cambridge University Press, 1999, 987 p.
5. **Vedyashkina A.V.**, Computer modeling of optical rays' refraction in inhomogeneous mediums // Journal of Beijing Institute of Technology, 2013, 22 (1), P. 71-76.
6. **Pazis D.N., Agioutantis Z., Kourkoulis S.K.**, The optical method of reflected caustics applied for a plate with a central hole: critical points and limitations // An international journal for experimental mechanics, 2011, 47(6), P. 489-498.

7. **Guiyun Gao, Zheng Li, Mehrdad Negehbani**, Dynamic fracture analysis of polycarbonate by the optical method of caustics // *Procedia materials science* (2014), P. 165-176.
8. **Arnold V.I., Gusein-Zade S.M., Varchenko A.N.**, Singularities of Differentiable Maps. Volume I., Springer, New York, 2012, 393 p.
9. **Raskovskaya I.L.**, Refractometry of optical inhomogeneous media by registration of caustics position with used of structured laser radiation // *Avtometriya*, 2014, 50(5), P. 92-98.
10. **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, Okinawa, Japan, 2014*, report ISFV16-1178.
11. **Yesin M.V., Raskovskaya I.L., Rinkevichyus B.S., Tolkachev A.V.**, Three-dimensional refractograms and its applications for diagnosis of gradient inhomogeneities // *Radoitechnics and electronics*, 2012, 57(4), P. 485-491.
12. **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 – *Proceedings of the 12th International Conference on Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment (HTE'14, Geneva, Switzerland)*, 2014, P. 98-104.

A.V. Vedyashkina, S.V. Grigoryev  
*National research university MPEI, Russia,*  
 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: [avedyashkina@rambler.ru](mailto:avedyashkina@rambler.ru)

### **3D-VIZUALIZATION OF CAUSTICS' FORMATION AT STRUCTURED RADIATION REFRACTION IN LASER REFRACTOGRAPHY PROBLEMS**

*One actual and promising method of researching optically inhomogeneous media is the method of the laser refractography. It is based on the phenomenon of refraction of structured laser radiation in optically inhomogeneous media and registration of its form deviations with the digital camera. Two types of optical inhomogeneities are researched in this work: a diffusion layer of liquids and temperature fields near heated or cooled objects. It was considered conditions for the occurrence of caustics in longitudinal probing of optical stratified inhomogeneous media by plane and cylindrical laser beams in this paper. Experimental setup for 3D-visualization of laser beams' refraction was created. 3D-refractograms of cylindrical laser beam propagation in the diffusion layer of liquid were obtained.*

OPTICALLY INHOMOGENEOUS MEDIA, STRUCTURED LASER RADIATION,  
 GEOMETRICAL OPTICS, CAUSTICS, LASER REFRACTOGRAPHY, DIFFUSIVE LAYER