

Визуализация процессов тепло- и массообмена методом каустик в лазерной рефрактографии*

А.В. Ведяшкина

an.vedyashkina@gmail.com

Москва, Россия, Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Кафедра физики им. В.А. Фабриканта

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. 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. Показана зависимость толщины диффузионного слоя от времени. Следующий тип неоднородности, рассмотренный в работе, – температурное поле около охлажденного шара в воде. Показана возможность использования эмпирических зависимостей положения особых точек каустик от температуры поверхности объекта для бесконтактного контроля теплофизических характеристик процесса.

Ключевые слова: теплообмен, массообмен, лазерная рефрактография, каустика

1. Введение

В настоящее время исследование оптически неоднородных сред представляет большой научный и практический интерес. 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.

Метод лазерной рефрактографии основан 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 (Евтихиева 2008, Raskovskaya 2011). Данный метод имеет принципиальные отличия от ранее разработанных методов исследования оптических неоднородностей, таких как шпирен и теневой фоновый методы (Settles 2001).

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) (Rinkevichyus 2015), формируемые на основе дифракционных оптических элементов (ДОЭ). Использование этих пучков в отличие от широких све-

товых пучков позволяет с высокой точностью оценивать изменения показателя преломления в пограничном слое.

Каустическими поверхностями или, проще, каустиками называют огибающие семейства лучей (Кравцов 1980). 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 (Arnold 2012).

2. Каустики в диффузионном слое жидкости

Диффузионный слой жидкости – 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 декартовой координаты (Vedyashkina 2013, Павлов 2016). Показатель преломления в диффузионном слое может быть описан через функцию гиперболического тангенса (Raskovskaya 2014):

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

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,

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

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 (Vedyashkina 2014, Vedyashkina 2015). 3D-визуализация в методе лазерной рефрактографии позволяет лучше понять структуру неоднородностей в жидкостях. Экспериментальные 3D-рефрактограммы распространения цилиндрического лазерного пучка (ЦЛП) в неоднородной среде показаны на рисунке 1а,б.

На рисунке 2 а,б представлены экспериментальные рефрактограммы при продольном зондировании плоским лазерным пучком диффузионного слоя жидкости (показатель преломления более плотной жидкости $n_1 = 1,3381$ и менее плотной – $n_2 = 1,3311$). Используя оригинальный алгоритм обработки рефрактограмм, можно выделить две каустики. Распределение показателя преломления или толщину слоя можно получить путем сравнения положения, формы каустик и координаты их слияния с теоретически рассчитанными. Регистрация рефрактограмм в различные моменты времени позволяет оценить зависимость толщины слоя от времени.

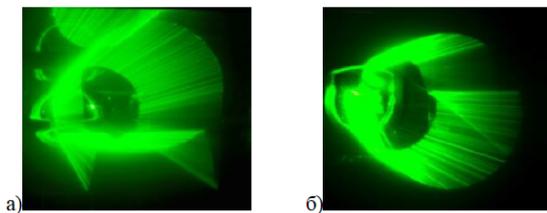


Рис. 1: 3D-визуализация распространения ЦЛП в диффузионном слое жидкости: а) – центр ЦЛП лежит в плоскости верхней границы слоя, б) – центр ЦЛП лежит в плоскости нижней границы слоя.

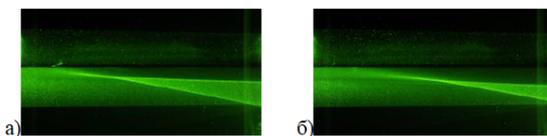


Рис. 2: Экспериментальные рефрактограммы распространения плоского лазерного пучка в диффузионном слое в различные моменты времени: а) – 0 мин, б) – 30 мин.

3. Каустики в температурном поле около охлажденного шара в горячей воде

Для проведения бесконтактного контроля теплофизических характеристик процесса целесообразно использовать эмпирические зависимости положения особых точек каустик от температуры поверх-

ности. Например, при зондировании пограничного слоя горизонтальным элементом СЛП, дистанция z , где располагается «клюв» каустики (рисунок 3) определяется разностью температуры поверхности и жидкости. Эмпирические кривые построены для трех разных значений температуры воды (рисунок 4).

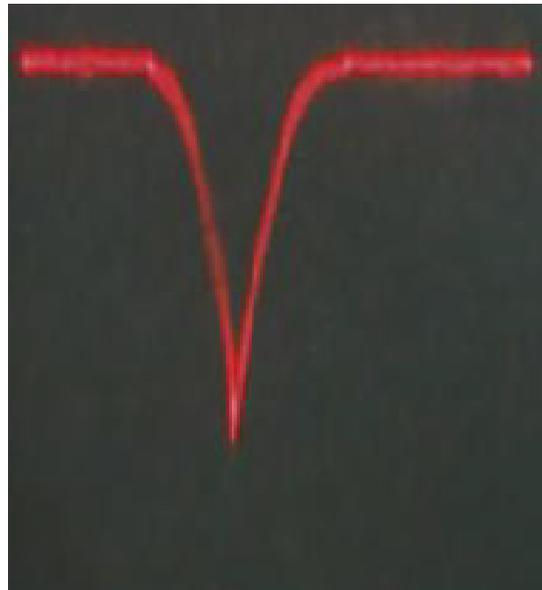


Рис. 3: «Клюв» каустики

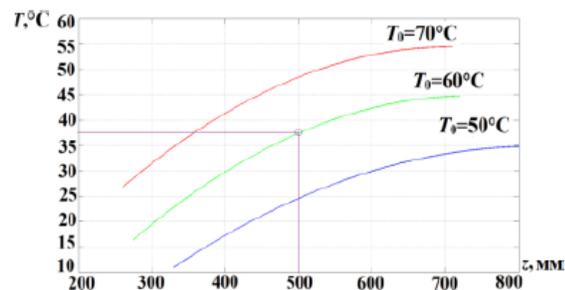


Рис. 4: Эмпирические зависимости положения особой точки каустики от температуры поверхности

4. Заключение

3D-визуализация рефракции СЛП дает возможность увидеть формирование каустик в объеме, а так же получить качественные представления об оптической неоднородности и градиенте показателя преломления. Для решения обратной задачи восстановления свойств среды в методе лазерной рефрактографии необходимо регистрировать 2D-рефрактограммы. Показана возможность использования эмпирических зависимостей положения особых точек каустик от температуры поверхности объекта для бесконтактного контроля теплофизических характеристик процесса.

Литература

- [1] Arnold V.I., Gusein-Zade S.M., Varchenko A.N., *Singularities of Differentiable Maps. Volume I*, Springer, New York, 2012, 393 p.
- [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., 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.
- [4] 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.
- [5] Settles G.S. *Schlieren and Shadowgraph Techniques, Visualizing Phenomena in Transparent Media*, Springer, New York, 2001, P. 387.
- [6] Vedyashkina A.V. Computer modeling of optical rays' refraction in inhomogeneous mediums, *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2013, 22 (1), P. 71-76.
- [7] 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 16th ISFV*, 2014, report ISFV16-1178.
- [8] Vedyashkina A.V., Rinkevichyus B.S. 3D-visualization of Caustics' Formation in Laser Refractography Problems // *Physics Procedia*, 2015. – Vol. 73. – P. 205–210
- [9] Евтихиева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С. *Лазерная рефрактография*. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 176с.
- [10] Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. *Геометрическая оптика неоднородных сред*. М.: Наука, 1980. 304 с.
- [11] 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.