

УДК 535.31

*Двенадцатая международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 25 — 28 июня 2013 г.*

П.Ю. Суровцев, рук. д.ф.-м.н. Б.С.Ринкевичюс

*Национальный Исследовательский Университет МЭИ, Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: petr.surovtsev@bk.ru*

РЕФРАКЦИЯ ПЛОСКОГО ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА В ДИФФУЗИОННОМ СЛОЕ ВОДЫ С ГЛИЦЕРИНОМ

АННОТАЦИЯ

В докладе рассматривается рефракция плоского лазерного пучка в диффузионном слое жидкости. Показаны результаты расчета и эксперимента для слоя, состоящего из глицерина и воды.

ЛАЗЕРНЫЙ ПУЧОК, РЕФРАКЦИЯ, ДИФФУЗИЯ, ГЛИЦЕРИН

ВВЕДЕНИЕ

Исследование оптически неоднородных жидкостей представляет большой научный и практический интерес. Часто необходимо знать, что происходит при контакте сред с различными показателями преломления или как изменяется показатель преломления среды при нагревании или охлаждении.

В последнее время для диагностики в прозрачных средах солёности, температуры, плотности применяют лазерные методы. Это объясняется тем, что лазерные методы имеют ряд преимуществ перед другими методами. Они производят дистанционные измерения, не вносят существенного влияния в среду, практически не имеют инерционных погрешностей.

Одним из методов исследования оптически неоднородных сред является метод лазерной рефрактографии, основанный на использовании структурированного лазерного излучения (СЛИ), зондирующего исследуемую среду, с последующей цифровой регистрацией и обработкой полученного изображения компьютерными методами[1]. Структурированное лазерное излучение представляет собой пространственно-модулированное по интенсивности излучение, получаемое, в основном, с помощью дифракционных оптических элементов (ДОЭ).

Дифракционные оптические элементы, которые стали выпускаться промышленностью в последние годы, представляют собой тонкую фазовую пластинку, на которой с помощью лазера нанесен специальный фазовый рельеф. При дифракции лазерного пучка на таком оптическом элементе получается пространственно-модулированное излучение различного вида, которое получило название структурированного лазерного излучения.

Прошедшее через исследуемую среду СЛИ создает на экране 2D-рефрактограмму, вид которой определяется типом СЛИ и распределением показателя преломления в исследуемой среде.

Регулярный и дискретный характер СЛИ дает возможность количественной диагностики параметров среды на основе экспериментально полученных рефрактограмм. Количественная диагностика подразумевает решение обратной задачи и заключается в определении параметров неоднородности.

В данной работе приведены теоретические и экспериментальные исследования параметров диффузионного слоя жидкости, возникающего на границе раздела двух жидкостей с различными физическими характеристиками.

Исследуется рефракция плоского лазерного пучка в оптически неоднородной жидкости, которая состоит из двух слоев: нижний – раствор глицерина, верхний – чистая вода. При их контакте наблюдается переходный слой, в котором показатель преломления плавно изменяется от большего значения в глицерине к меньшему значению в чистой. При этом устанавливается первоначально резкая граница между двумя средами, которая размывается с течением времени. Когда требуется исследовать слой, не вмешиваясь в процесс диффузии, регистрацию изменения концентрации в направлении диффузии целесообразно проводить оптическими методами. Таким образом, при известной зависимости показателя преломления раствора от концентрации растворенного вещества в жидкости, задача измерения градиента концентрации сводится к измерению градиента показателя преломления.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследования рефракции плоского лазерного пучка в диффузионном слое жидкости проводились на следующей установке (рис. 1).

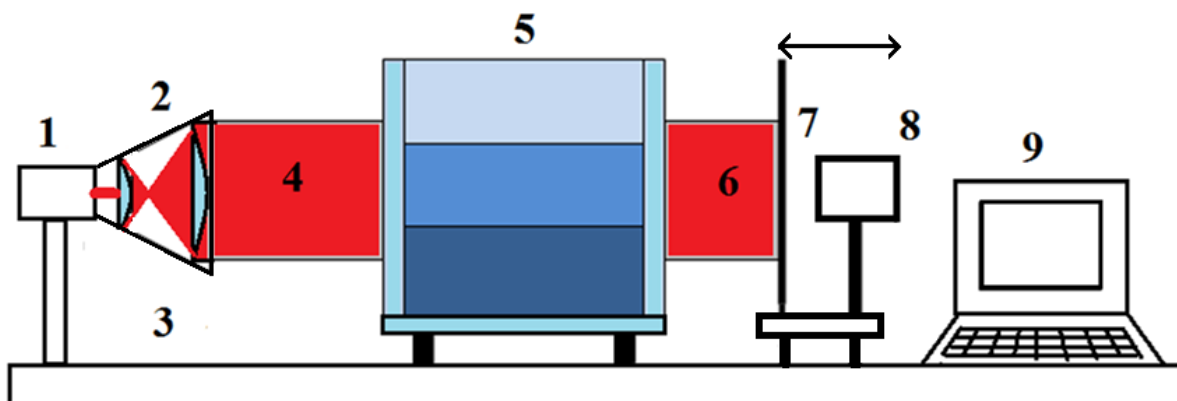


Рис. 1. Схема установки для получения рефрактограмм: 1 – лазер, 2 – система формирования лазерной плоскости, 3 – оптическая скамья, 4 – плоский пучок, 5 – стеклянная кювета, 6 – лазерный пучок после прохождения диффузионного слоя, 7 – экран, 8 – цифровая фотокамера, 9 – персональный компьютер

В качестве источника излучения используется полупроводниковый лазер UTL5 ($\lambda = 658$ нм). После прохождения лазерного излучения через систему формирования 2, образуется плоский лазерный пучок 4. После кюветы 5 на экран 7 попадает рефрагированный пучок 6, который регистрируется с помощью камеры 8, и обрабатывается на персональном компьютере 9. Экран 7 представляет собой лист из прозрачного материала, на котором прикреплена миллиметровая бумага, что позволяет нам производить количественную оценку рефракции. Все элементы установки закреплены на оптической скамье 3.

На рис. 2 представлены экспериментальные рефрактограммы для трех интервалов времени. Между первой рефрактограммой и последней интервал времени – 44 часа.

При проведении эксперимента были следующие параметры установки: $L = 44$ мм – рабочая длина кюветы, $z_e = 5$ мм – положение экрана, $n_1 = 1,463$, $n_2 = 1,3315$ – показатели преломления глицерина и воды соответственно, $T = 24^\circ$ – температура жидкости, $\alpha = 48^\circ$ – угол наклона плоского пучка.

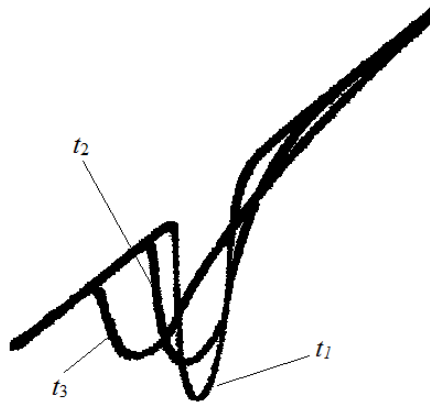


Рис. 2. Экспериментальные рефрактограммы при различных временах фотографирования в течение 44 часов: $t_1 < t_2 < t_3$

Из анализа рис. 2 видно, как диффузионный слой изменяется во времени. Процесс диффузии протекает медленно, даже спустя двое суток слой сохраняется. Так же заметна несимметричность рефрактограммы на границах диффузионного слоя.

РАСЧЕТ РЕФРАКЦИИ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА В ДИФФУЗИОННОМ СЛОЕ

На рис. 3 изображена кювета длиной L , шириной D и высотой H . Середина диффузионного слоя жидкости находится на расстоянии x_s от дна кюветы, x_1 и x_2 соответственно нижняя и верхняя границы диффузионного слоя жидкости.

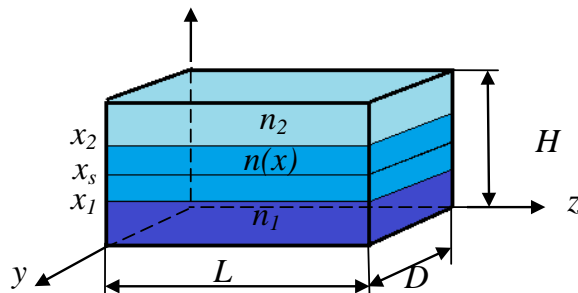


Рис. 3. Модель кюветы с диффузионным слоем жидкости

Переходный диффузионный слой может описываться различными зависимостями показателя преломления от координаты [2]. В предыдущих работах использовалась симметричная зависимость распределения показателя преломления в диффузионном слое [3]. Экспериментальным путем было выяснено, что на границе диффузионного слоя с глицерином h имеет меньшее значение, чем на границе диффузионного слоя с водой. Исходя из этих соображений, были выбраны экспоненциальные зависимости для $n(x)$ и $h(x)$ вида:

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

$$h(x) = h_2 + \frac{h_1 - h_2}{1 + \exp\left(\frac{x - x_s}{q}\right)}, \quad (2)$$

где n_1 – показатель преломления более плотной (нижней) жидкости, n_2 – показатель преломления менее плотной (верхней) жидкости, h – характерная полуширина слоя, зависящая от координаты x , x_s – положение центра слоя.

Алгоритм расчета рефракции плоского лазерного пучка в диффузионном слое жидкости состоит из следующих этапов.

1. Задаются исходные данные установки и исследуемой среды: длина кюветы L , положение экрана (z_e), показатели преломления верхней и нижней жидкости (n_1, n_2), середина диффузионного слоя (x_s), параметр полуширины диффузионного слоя (h), и угол падения лучей (α_0).
2. Задается зависимость показателя преломления диффузионного слоя $n(x)$.
3. Определяются границы диффузионного слоя (x_1, x_2).
4. Задаются координаты плоского лазерного пучка на входной стенке кюветы (x, y).
5. Для координаты x рассчитывается отклоненное значение координаты на выходной стенке кюветы. Координата y остается неизменной.
6. Далее рассчитывается координата x луча на экране, координата y остается неизменной.

На рисунке 4 показаны рефрактограммы при различных параметрах диффузионного слоя ($L = 44$ мм, $z_e = 41$ мм, $n_1 = 1,4630$, $n_2 = 1,3315$, $\alpha = 45^\circ$):

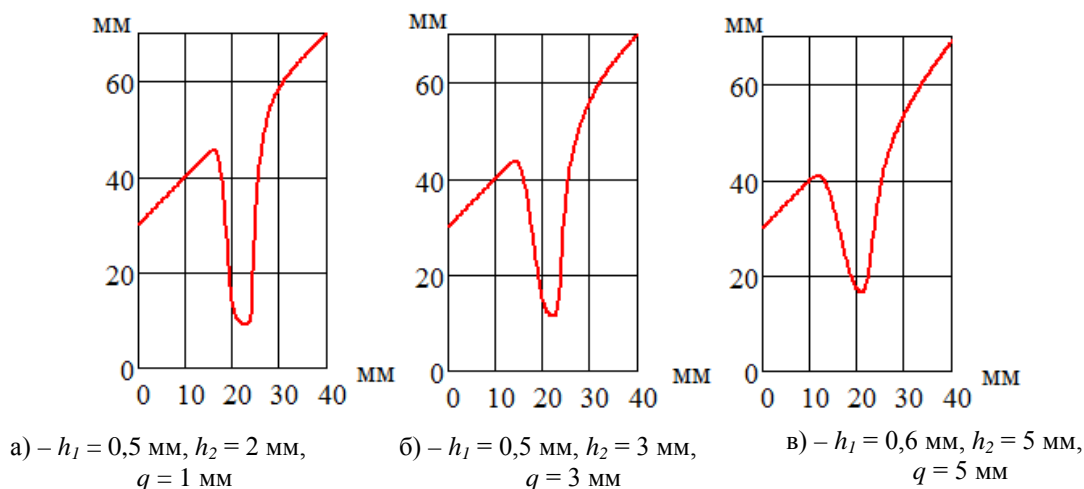


Рис. 4. Расчетные рефрактограммы с экспоненциальным профилем показателя преломления

Проведем сравнение рефрактограмм, полученных в ходе эксперимента и после расчета. Построим рефрактограмму со следующими параметрами: $n_1 = 1,467$, $n_2 = 1,331$, $x_s = 14,5$ мм

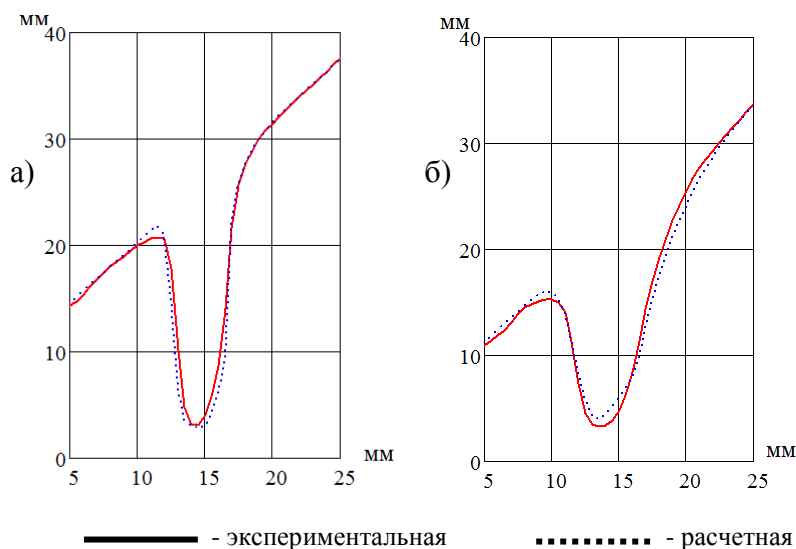


Рис. 5. Сравнение рефрактограмм в различное время после создания слоя: а) – $t = 1,5$ час.; б) – $t = 4$ час.

Анализ рис. 5 показывает, что расчетные рефрактограммы хорошо совпадают с экспериментальными.

На рис. 6 показаны восстановленные распределения показателя преломления в диффузионном слое и его градиент, которые показывают отличие от распределения $n(x)$ в слое соленой и пресной воды [2]. Так же на графике указаны границы слоя x_1 и x_2 , которые определяются по уровню отклонения производной показателя преломления от нуля на значение 10^{-5} 1/мм.

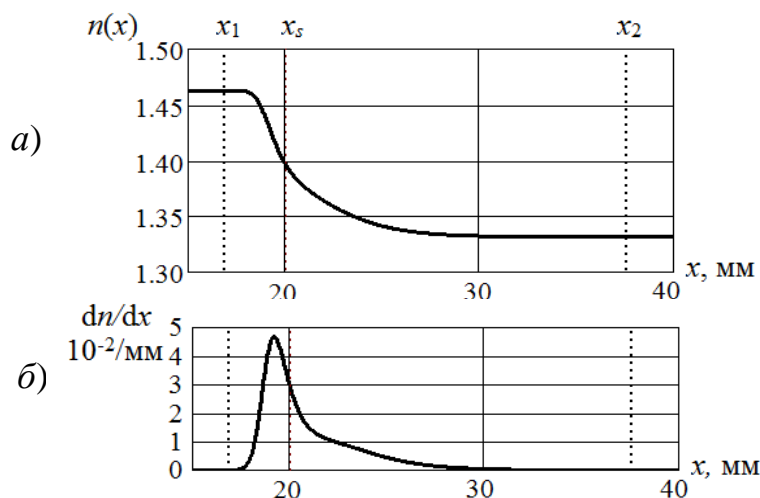


Рис. 6. Расчетная модель диффузионного слоя: а) – распределение показателя преломления; б) – градиент показателя преломления, $n_1 = 1,4630$, $n_2 = 1,3315$, $x_s = 20$ мм, $h_1 = 0,2$ мм, $h_2 = 2$ мм, $q = 0,7$ мм

На рис. 5 показано решение обратной задачи лазерной рефрактографии с помощью подбора параметров оптической неоднородности, в результате которого восстанавливается профиль показателя преломления рис.6. Так же обратную задачу можно решать и другим способом. Для этого необходимо знать угол пучка на входе в оптическую неоднородность и определить угол на выходе из нее, зная эти два угла, однозначно определяется профиль показателя преломления в среде. На рис. 7 показана зависимость угла отклонения на выходе из кюветы от горизонтальной координаты в плоском пучке. На рис.8 изображена зависимость угла в точке с максимальным отклонением от времени.

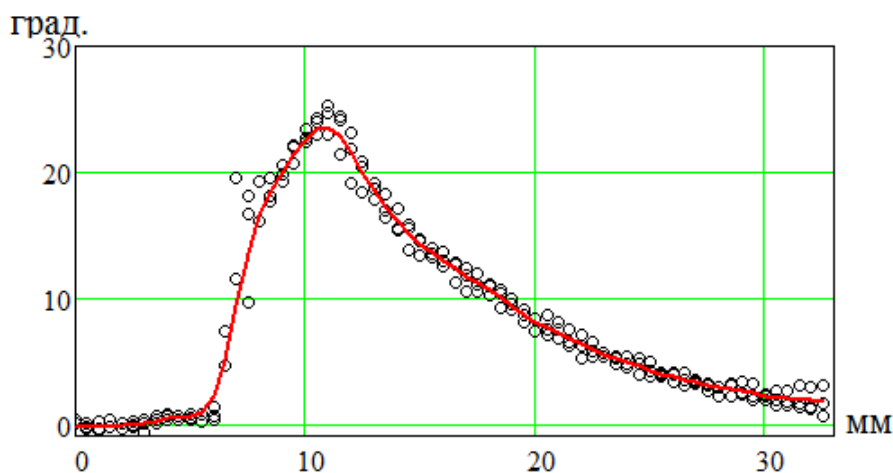


Рис. 7. Распределение угла отклонения в рефрагированном пучке

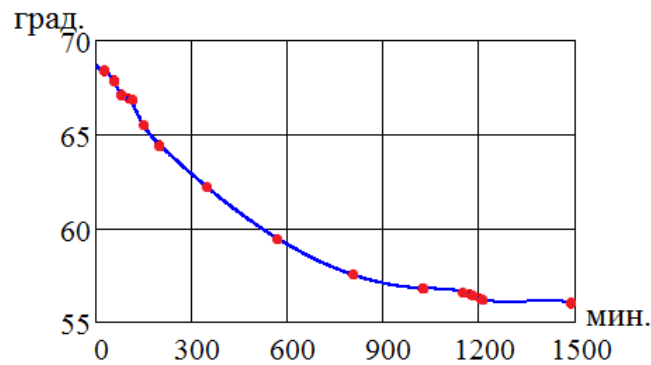


Рис. 8. Изменение угла в точке с максимальным отклонением от времени

Из рис. 8 видно, что процесс диффузии имеет не линейный характер, спустя 20 часов он сильно замедляется, но не прекращается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен эксперимент по рефракции плоского лазерного пучка в диффузионном слое жидкости – глицерин и дистиллированная вода. Была выбрана новая ассиметричная экспоненциальная зависимость (1.1 – 1.2), с помощью которой получаются хорошие результаты при сравнении. Разработана программа по обработке рефрактограмм и восстановлению профиля показателя преломления слоя. Если жидкости, из которых создаются диффузионный слой, одинаковы или различны по своим физико-химическим параметрам, то можно использовать формулы (1.1 – 1.2) с аккуратным подбором параметров $h(x)$. В данной работе глицерин и вода отличались по показателю преломления ($n_{\text{гл}} = 1,463$, $n_{\text{в}} = 1,3315$), плотностью ($\rho_{\text{гл}} = 1,261 \text{ г/см}^3$, $\rho_{\text{в}} = 0,998 \text{ г/см}^3$) и вязкостью. Поэтому диффузия проходила не симметрично вдоль вертикальной оси слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евтихиева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С. Лазерная рефрактография. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 176 с.
2. Крикунов А.В., Ринкевичюс Б.С. Исследование рефракции плоского лазерного пучка в переходном слое стратифицированной жидкости // Вестник МЭИ, № 4, 2011 г. С. 97 -101.
3. Расковская И.Л., Сергеев Д.А., Ширинская Е.С. Диагностика характеристик солестратифицированной жидкости методом лазерной рефрактографии // Измерительная техника. 2010. №10. С. 36 – 38.

P.Y. Surovtsev, B.S.Rinkevichyus

*National Research University Moscow Power Engineering Institute, Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: petr.surovtsev@bk.ru*

REFRACTION OF A PLANE LASER BEAM IN DIFFUSIVE LAYER OF WATER WITH GLYCEROL

The refraction of plane laser beam in diffusive layer of liquid is described. The results of the experiment and calculating is shown.

LASER BEAM, REFRACTION, DIFFUSION, GLYCEROL