



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](mailto: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).

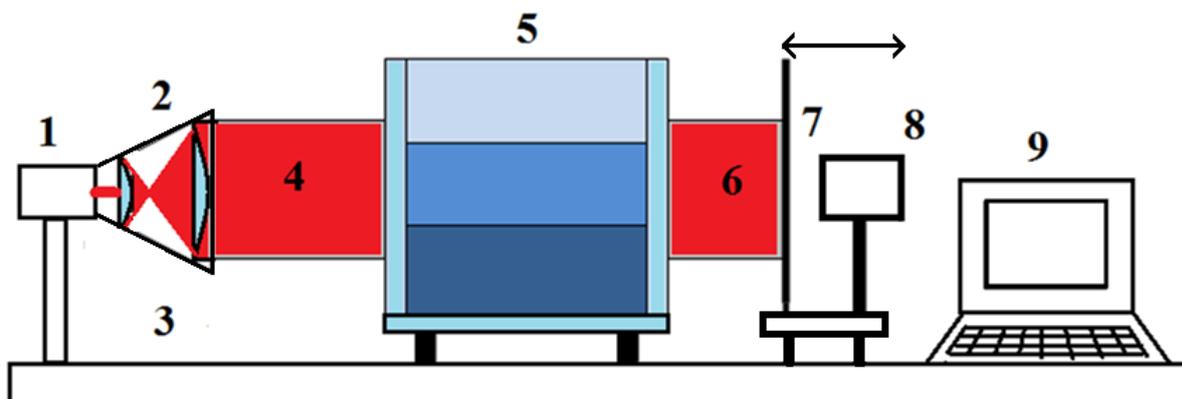


Рис. 1. Схема установки для получения рефрактограмм: 1 – лазер, 2 – система формирования лазерной плоскости, 3 – оптическая скамья, 4 – плоский пучок, 5 – стеклянная кювета, 6 – лазерный пучок после прохождения диффузионного слоя, 7 – экран, 8 – цифровая фотокамера, 9 – персональный компьютер

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.

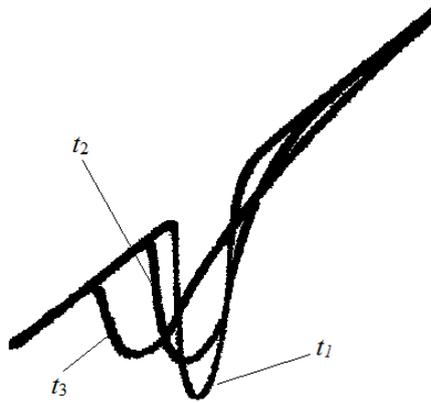


Рис. 2. Экспериментальные рефрактограммы при различных временах фотографирования в течение 44 часов:  $t_1 < t_2 < t_3$

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.

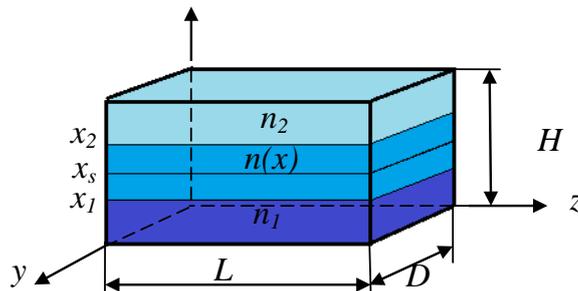


Рис. 3. Модель кюветы с диффузионным слоем жидкости

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 ( $\alpha_0$ ).
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,  $n_1 = 1,4630$ ,  $n_2 = 1,3315$ ,  $\alpha = 45^\circ$ ):

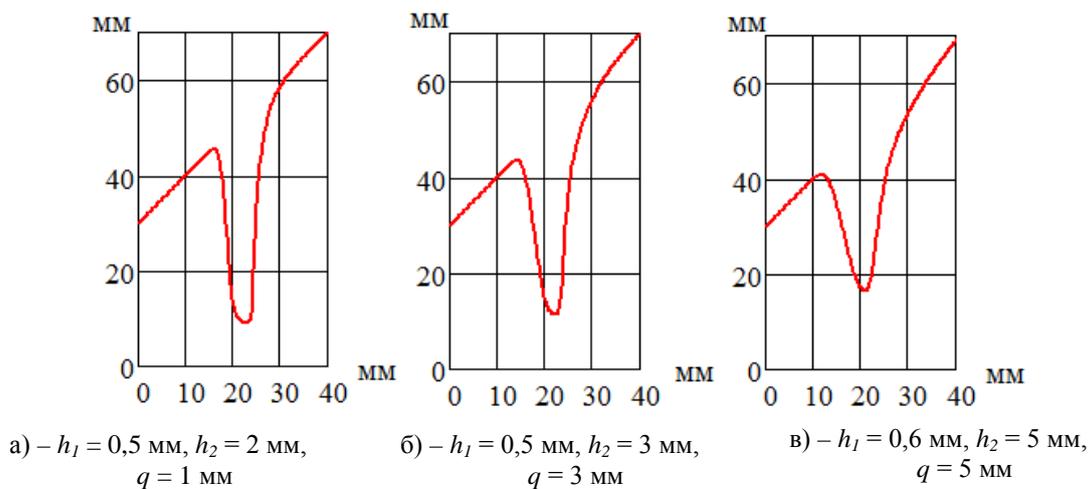


Рис. 4. Расчетные рефрактограммы с экспоненциальным профилем показателя преломления

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

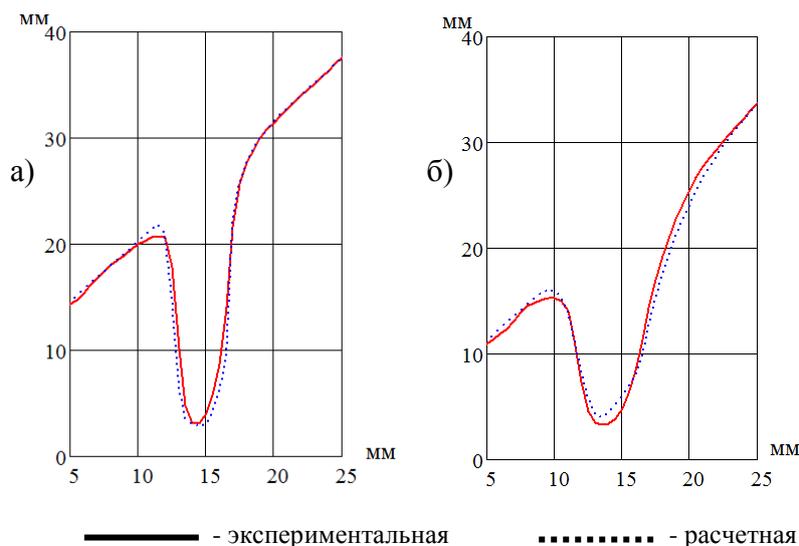


Рис. 5. Сравнение рефрактограмм в различное время после создания слоя: а) –  $t = 1,5$  час.; б) –  $t = 4$  час.

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.

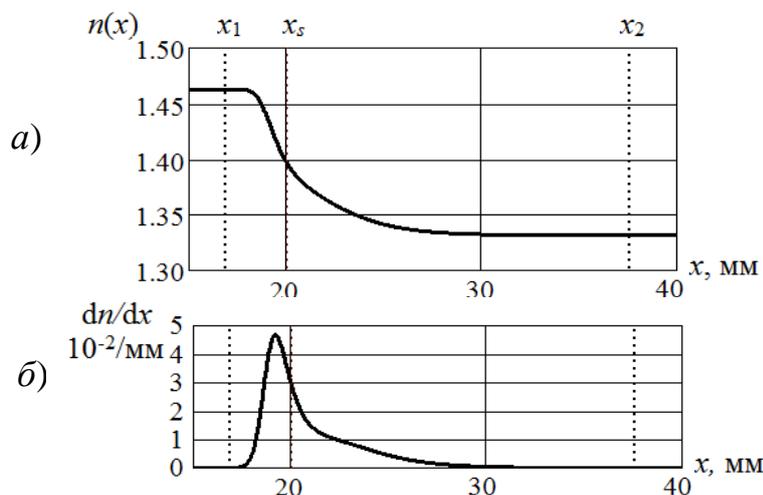


Рис. 6. Расчетная модель диффузионного слоя: а) – распределение показателя преломления; б) – градиент показателя преломления,  $n_1 = 1,4630$ ,  $n_2 = 1,3315$ ,  $x_s = 20$  мм,  $h_1 = 0,2$  мм,  $h_2 = 2$  мм,  $q = 0,7$  мм

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.

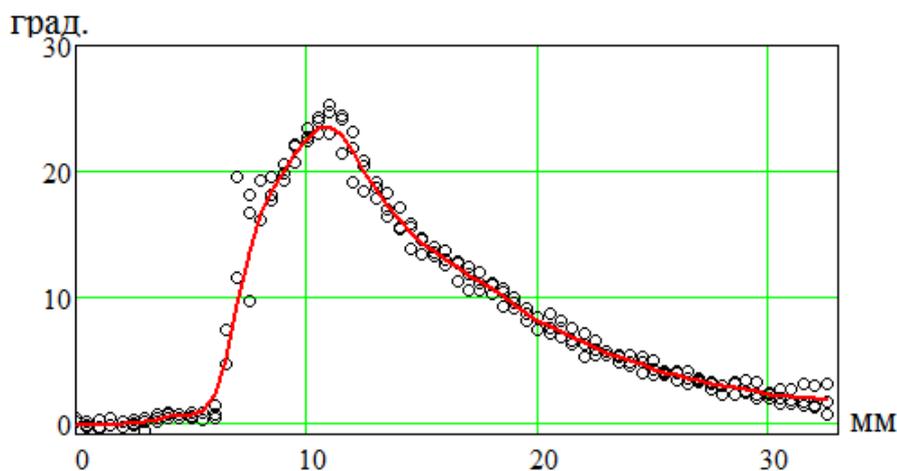


Рис. 7. Распределение угла отклонения в рефрагированном пучке

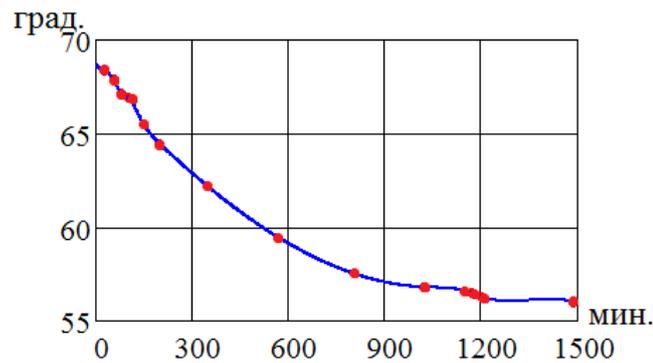


Рис. 8. Изменение угла в точке с максимальным отклонением от времени

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](mailto: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