



УДК 53.072.001.57

А.В. Крикунов, И.Л. Расковская, Б.С. Ринкевичюс

*Московский энергетический институт (технический университет), Россия,  
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: krikunovav@gmail.com*

## **ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И ПОСТРОЕНИЕ 3D-РЕФРАКТОГРАММ В ОБЪЕМЕ ЖИДКОСТИ**

*В работе рассмотрена методика визуализации и построение 3D-рефрактограмм в объеме жидкости. Проведено исследование переходного слоя на границе двух жидкостей с различными оптическими характеристиками. Описан способ исследования диффузионного слоя лазерным рефрактографическим методом. Разработан алгоритм и программа моделирования 3D-рефрактограмм в объеме жидкости, позволяющая визуализировать распространение плоского лазерного пучка в жидкости. Построены 3D-рефрактограммы для различных углов наклона лазерной плоскости, а также для различных значений показателя преломления нижнего слоя.*

**ДИФфуЗИОННЫЙ СЛОЙ, РЕФРАКЦИЯ, ПЛОСКИЙ ЛАЗЕРНЫЙ ПУЧОК,  
РЕФРАКТОГРАММА, ПОКАЗАТЕЛЬ ПРЕЛОМЛЕНИЯ, КАУСТИКА**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Рефракционные лазерные методы [1], как правило, непосредственно используются для определения поля показателя преломления, которое может быть пересчитано в поле взаимосвязанной с ним другой физической величины. Одним из перспективных методов исследования оптически неоднородных сред является лазерная рефрактография [2 – 5], основанная на использовании для зондирования исследуемой среды пространственно структурированного лазерного излучения, с последующей цифровой регистрацией и компьютерной обработкой полученной рефракционной картины (рефрактограммы).

Исследование переходного (диффузионного) слоя между различными жидкостями необходимо для решения многих задач химии. Исследование стратифицированных по плотности потоков – один из важных разделов современной гидрофизики. Изучение гидрофизических течений в основном базируется на лабораторном моделировании и связано с созданием плотностной стратификации, измерением и контролем ее характеристик. Применение метода лазерной рефрактографии для диагностики таких сред требует детального анализа рефракции лазерных пучков в них.

В данной работе исследуется рефракция плоского лазерного пучка в оптически неоднородной стратифицированной жидкости, которая экспериментально моделируется с помощью водно-солевого раствора с изменением концентрации соли [6]. Такой способ создания неоднородного переходного слоя является легко реализуемым на практике, широко используется при лабораторном моделировании различных гидрофизических явлений [7]. Например, среда, состоящая из двух слоев: нижний – солевой раствор, верхний – чистая вода. На их границе наблюдается переходный слой, в котором показатель преломления плавно изменяется от большего значения в соленой воде (более плотной среде) к меньшему значению в чистой.

Визуализация 3D-рефрактограмм в объеме жидкости осуществлялась на основе схемы, изображенной на рисунке 1.

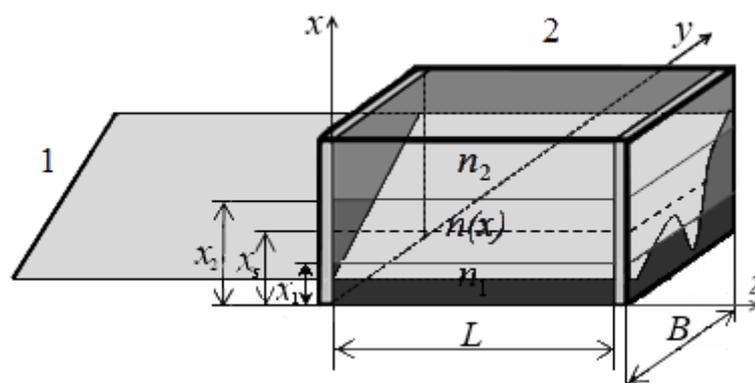


Рис. 1. Схема исследования 3D-рефрактограмм в объеме жидкости: 1 – плоский лазерный пучок; 2 – кювета с исследуемой средой

Плоский лазерный пучок 1 пропускается через неоднородную среду под некоторым углом наклона, находящуюся в кювете 2. Длина кюветы –  $L$ , ширина –  $B$ , граница раздела жидкостей находится на расстоянии  $x_s$ . В данной работе математически моделируются 3D-рефрактограммы плоского лазерного пучка, позволяющие визуализировать рассеянное в жидкости излучение для различных параметров установки и исследуемой среды.

## ПОСТРОЕНИЕ 3D-РЕФРАКТОГРАММ В ОБЪЕМЕ ЖИДКОСТИ

Моделирование 3D-рефрактограмм осуществлялось в математическом пакете MathCAD. Алгоритм программы моделирования следующий: вначале задаются геометрические размеры кюветы, показатели преломления двух сред, положение центра рефрактограммы, угол ее наклона, а также модель градиента показателя преломления в диффузионном слое [7]:

$$n(x) = n_1 + \frac{n_2 - n_1}{1 + \exp\left(-\frac{x - x_s}{h_0}\right)}, \quad (1)$$

где  $n_1$  – показатель преломления нижнего солевого раствора,  $n_2$  – показатель преломления верхней жидкости (вода),  $x_s$  – середина диффузионного слоя,  $h_0$  – параметр полуширины слоя. Данная модель наиболее точно описывает распределение показателя преломления в переходном слое двух жидкостей.

Границы  $x_1$  и  $x_2$  для экспоненциального слоя определяются по уровню, при котором значения производной показателя преломления по координате  $x$  становятся равными  $10^{-5}$  1/м.

Рассмотрим распространение лучей в переходном слое двух жидкостей. Их траектории описываются известным соотношением для плоскослоистой среды [4]

$$z(x) = \int_x^{x_0} \frac{n(x_0) \sin(\theta_0)}{\sqrt{n^2(x) - n^2(x_0) \sin^2(\theta_0)}} dx, \quad (2)$$

где  $\theta_0$  – угол входа луча в слой,  $x_0$  – координата входа луча в слой,  $n(x)$  – показатель преломления в точке  $x$ ,  $n(x_0)$  – показатель преломления в точке  $x_0$ .

Из (2) следует, что если известно распределение показателя преломления  $n(x)$  в слое, то можно рассчитать траектории лучей, задавая точку входа в слой  $x_0$  и угол входа  $\theta_0$  (в наших расчетах и в эксперименте всегда  $\theta_0 = 90^\circ$ ). Соответственно можно определить координаты луча на выходе из слоя, т.е. на внутренней стенке кюветы. Для этого необходимо решить уравнение (5) относительно  $x$ :

$$\int_x^{x_0} \frac{n(x_0)}{\sqrt{n^2(x) - n^2(x_0)}} dx = L, \quad (3)$$

где  $L$  – длина кюветы. Полученное в результате значение  $x(L)$  соответствует положению луча на внутренней стенке кюветы после рефракции.

Далее будем исследовать рефракцию в стратифицированной жидкости, когда имеется распределение плотности с резко выраженным скачком на определенной глубине. Исследуемой средой является жидкость, состоящая из двух слоев: нижний – жидкость с большим показателем преломления, верхний – жидкость с меньшим показателем преломления. Для расчета примем показатели преломления сред  $n_1 = 1.3375$ ,  $n_2 = 1.3320$ , характерная полуширина слоя  $h = 2$  мм, середина слоя соответствует координатам  $x_s = 50$  мм,  $y_s = 75$  мм, длина кюветы  $L = 292$  мм, угол наклона плоского пучка  $\alpha = 45^\circ$ .

Для моделирования 3D-рефрактограмм [8,9] задаются соответствующие параметры среды и установки, а также профиль показателя преломления (1). Уравнение плоского лазерного пучка на входе кюветы описывается уравнением прямой (4):

$$y = \operatorname{tg}(\alpha) x + b, \quad (4)$$

где константа  $b$  определяется положением центра слоя.

Для каждого значения  $x$  с некоторым шагом  $\Delta x$  решается уравнение (3). Таким образом, получается двумерный массив точек координат  $x$  и  $y$  на расстоянии  $L$ , представляющий собой двумерную рефрактограмму.

Для построения трехмерной рефрактограммы в правую часть уравнения (2) подставляются значения  $z(x)$  от 0 до  $L$  с некоторым заданным шагом  $\Delta z$ . В результате получается трехмерная сетка координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , позволяющая визуализировать трехмерную поверхность, иллюстрирующую рефракцию плоского пучка.

На рисунке 2 представлена блок-схема алгоритма программы построения 3D-рефрактограмм. Для нахождения корня уравнения (3) используется встроенная функция `root`, которая численно находит решение на отрезке  $[x_1, x_2]$ .

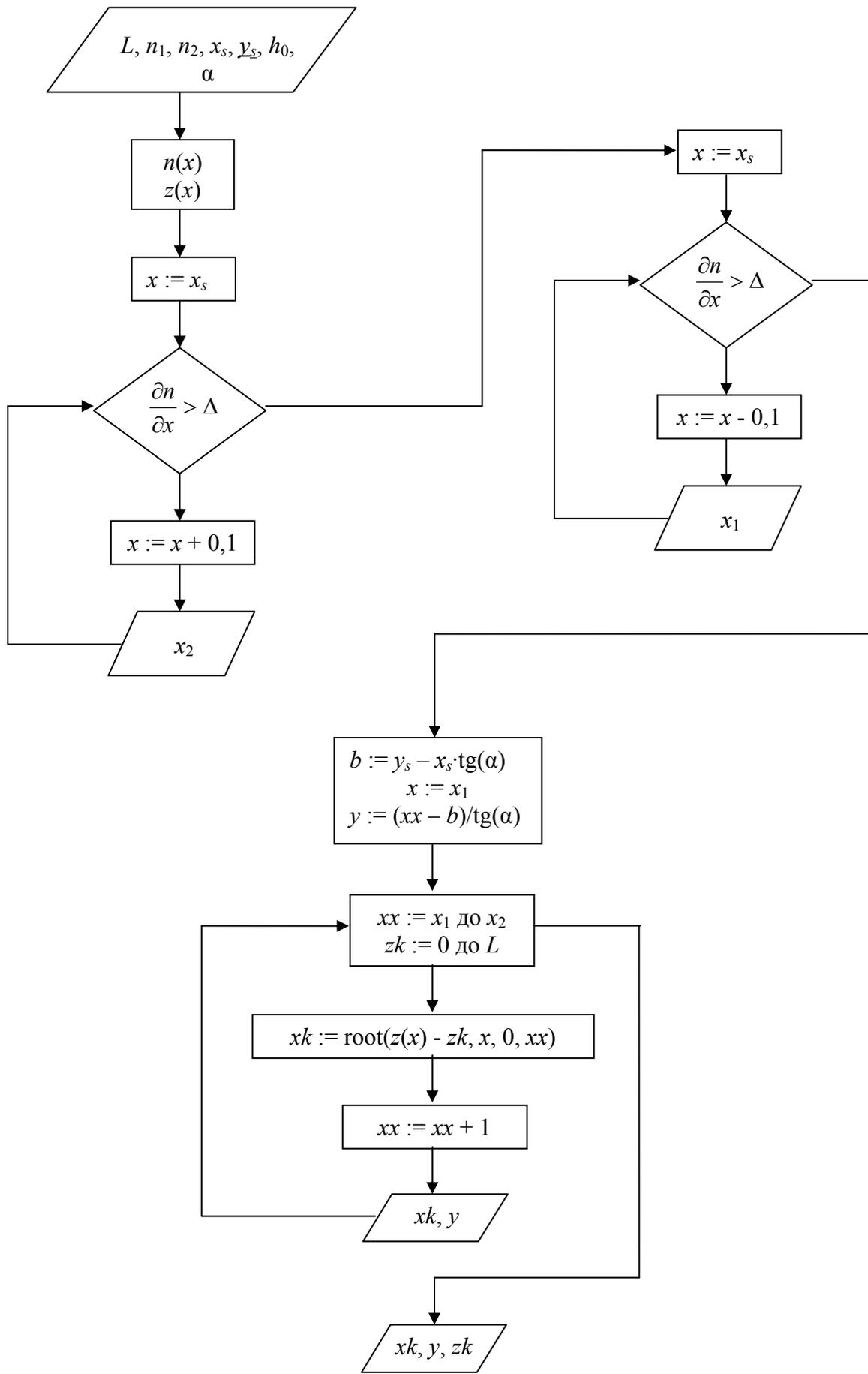
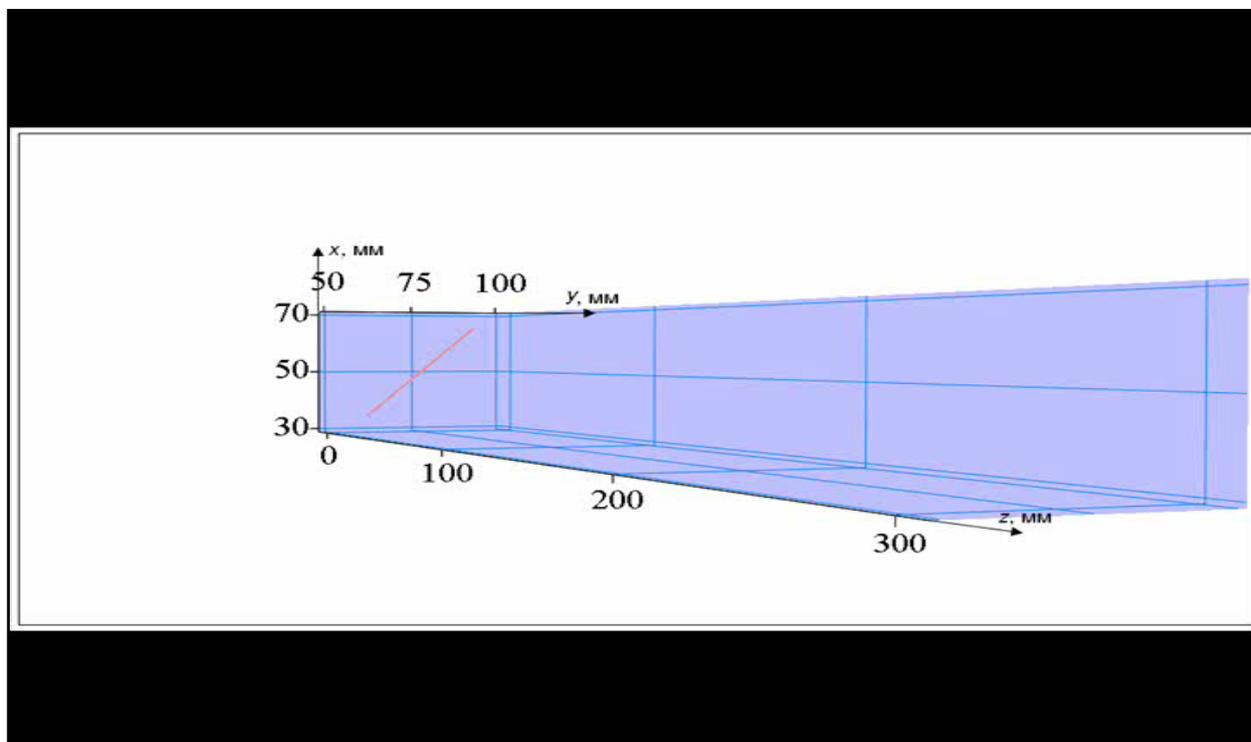


Рис. 2. Блок-схема алгоритма программы построения 3D-рефракограмм

### 3D-рефрактограммы распространения лазерного пучка внутри жидкости

На видео показано распространение плоского лазерного пучка внутри объема жидкости вдоль оси  $oz$ . В данном случае визуализируется произвольное сечение рефрактограммы в объеме жидкости.



### 3D-рефрактограммы в зависимости от угла наклона плоского лазерного пучка

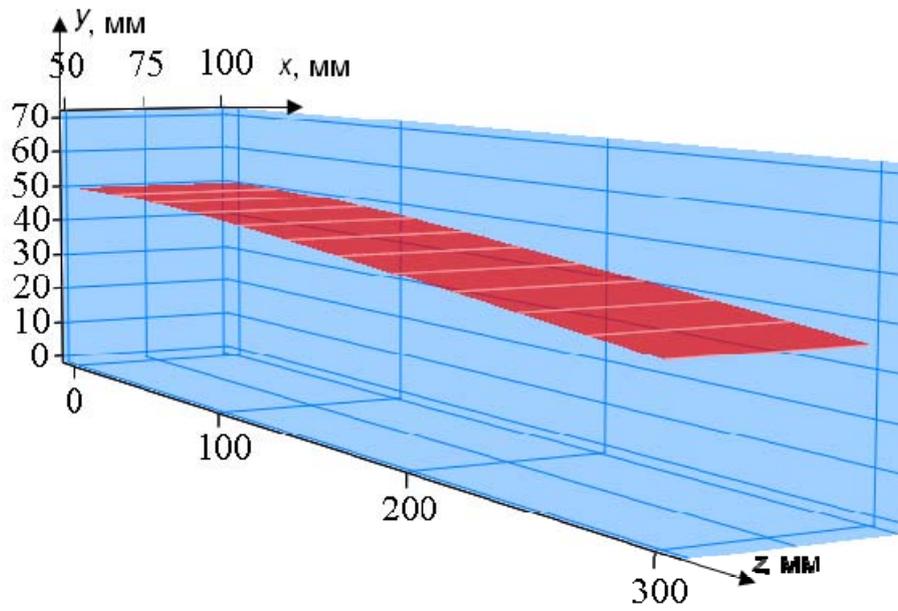
Угол наклона плоского лазерного пучка определяет область зондирования пограничного слоя. На рис. 3 показаны 3D-рефрактограммы для пяти углов наклона лазерного пучка:  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  и  $90^\circ$ .

Если пучок расположен в горизонтальной плоскости  $\alpha = 0$ , то все лучи будут отклоняться одинаково, и на экране получим плоский пучок, смещенный по вертикальной оси. При этом величина смещения пучка будет зависеть от координаты  $x_0$  входа его в неоднородный слой и распределения показателя преломления в слое.

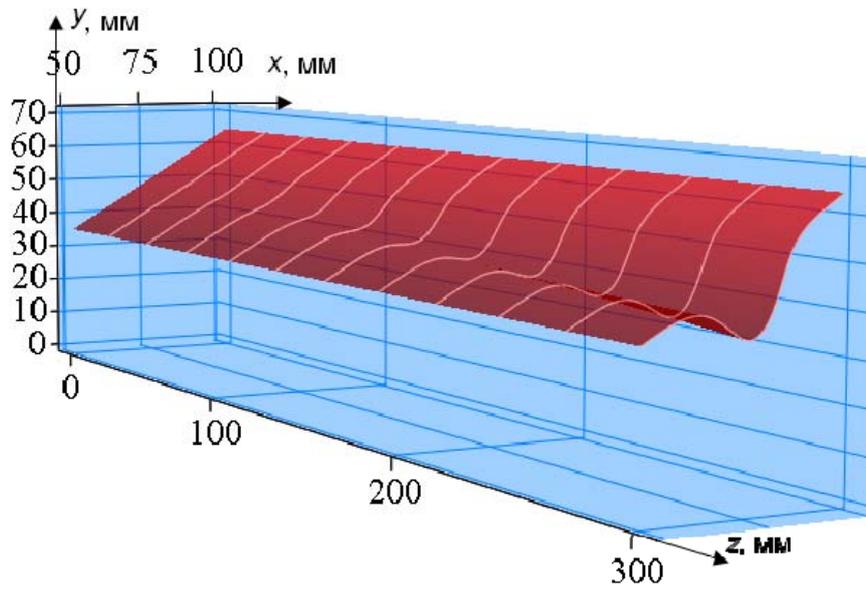
Если пучок будет расположен в вертикальной плоскости, то все лучи будут отклоняться вниз в одной плоскости. В этом случае информация о распределении показателя преломления среды в слое будет содержаться в перераспределении интенсивности в пучке вдоль вертикальной линии. Это соответствует классическому прямотеневому рефракционному методу, который не нашел широкого распространения из-за большой погрешности измерения локальной интенсивности пучка. На рис. 3 для угла  $\alpha = 90^\circ$  более темная область соответствует области многолучевости, ограниченной каустикой – огибающей геометрических лучей.

Наиболее информативной является схема, в которой плоский лазерный пучок наклонен, т.е.  $0 < \alpha < \pi/2$ , так как измерение смещения лучей определяется с меньшей погрешностью, чем измерения распределения интенсивности.

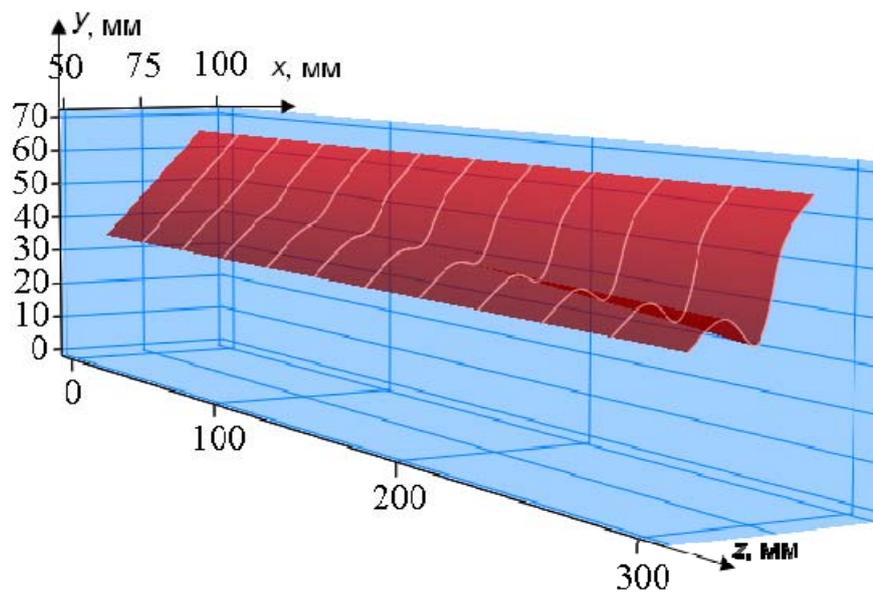
1



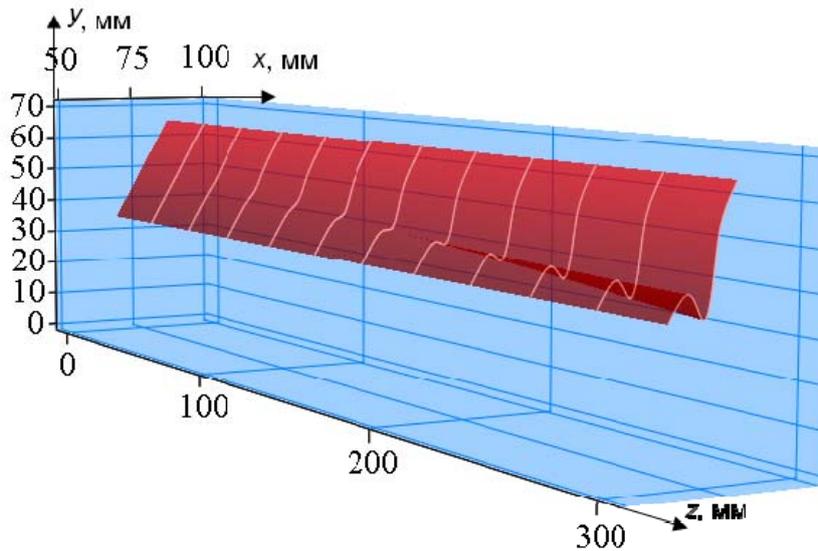
2



3



4



5

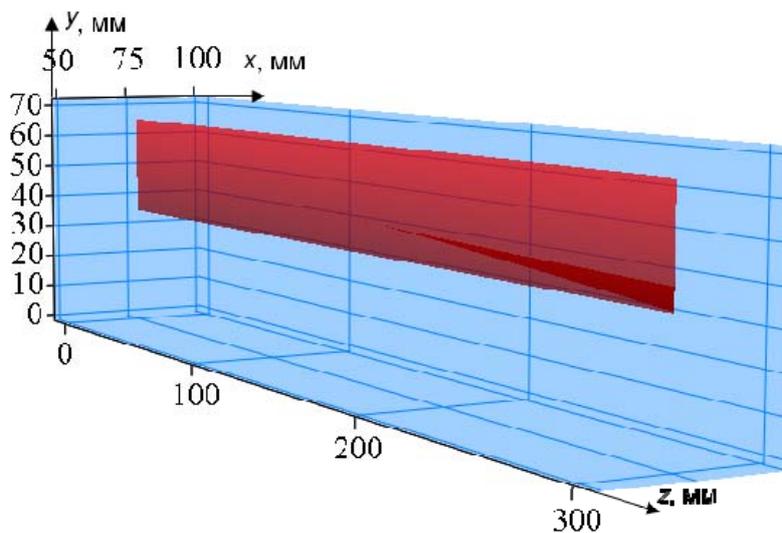


Рис. 3. 3D-рефрактограммы для различных углов наклона лазерной плоскости: 1 – 0°; 2 – 30°; 3 – 45°; 4 – 60°; 5 – 90°

### 3D-рефрактограммы в зависимости от показателя преломления нижней среды

На видео показано изменение 3D-рефрактограммы в зависимости от показателя преломления нижнего слоя, диапазон изменения соответствует значениям 1,335÷1,362. Чем больше разница между показателями преломления двух сред, тем сильнее отклонение лазерного пучка в среде.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Рассмотрена рефракция плоского лазерного пучка в переходном (диффузионном) слое, возникающем на границе раздела двух жидкостей с различными показателями преломления. Компьютерное моделирование рефракции плоского лазерного пучка в неоднородной среде позволяет визуализировать 3D-рефрактограммы для различных параметров установки и неоднородного слоя, исследовать влияние этих параметров на внешний вид рефрактограмм, сравнивать их с экспериментальными данными, подбирать оптимальные условия проведения эксперимента.

## **БЛАГОДАРНОСТИ**

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проекты ГК № 02.740.11.0449 и ГК-14.740.11.0594).

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. **Евтихийев Н.Н., Евтихьева О.А., Компанец И.Н. и др.** Информационная оптика.– М.: Издательство МЭИ, 2000. 612 с.
2. **Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В.** Лазерная рефрактография оптически неоднородных сред. // Квантовая электроника, 2007. Т.37. № 12. С.1176 – 1180.
3. **Евтихьева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С.** Лазерная рефрактография. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 176 с. + 24 цветных вклейки.
4. **Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В.** Диагностика конвективных процессов в пограничном слое жидкости методом лазерной рефрактографии. // Инженерно-физический журнал. 2010. Т.83. № 6. С.1149 – 1156.
5. **Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В., Ширинская Е.С.** Рефракция цилиндрического лазерного пучка в температурном пограничном слое. // Оптика и спектроскопия. 2009. Т.106. №6. С.1016 – 1022.
6. **Расковская И.Л., Сергеев Д.А., Ширинская Е.С.** Диагностика профиля солёности в переходном слое жидкости методом лазерной рефрактографии. // Измер. техн., 2010. №10. С. 36 – 38.
7. **Фелсен Л., Маркувиц Н.** Излучение и рассеяние волн. Т.2. Изд-во Мир, М.: 1978.
8. **Rinkevichyus B.S., Evtikhieva O.A., Yesin M.V., Raskovskaya I.L. and Tolkachev A.V.** 3D-laser refractography new chapter of information optics. // Journal of Physics: Conference Series, Volume 206, 2010. 8th International Workshop on Information Optics (WIO 09) 20 – 24 July 2009. Paris. France.
9. **Нгуен В.Т., Крикунов А.В.** Моделирование 3D-рефрактограмм. // Оптические методы исследования потоков: Тр. 10-й Международной научно-технической конференции./ Под ред. Ю.Н. Дубнищева, Б.С. Ринкевичюса. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. С.560-563.

A.V. Krikunov, I.L. Raskovkaya, B.S. Rinkevichyus

*Moscow Power Engineering Institute (technical university), Russia,  
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: [krikunovav@gmail.com](mailto:krikunovav@gmail.com)*

## **VISUALIZATION AND CONSTRUCTION 3D-REFRACTION PATTERNS IN LIQUID VOLUME**

*The method of visualization and construction of 3D-refraction patterns in liquid volume is considered in this work. The research of transitional layer on the edge of the two liquids with the different optical characteristics is provided. The manual of the procedure for researching the diffusive layer by the laser refraction method is given. The developed algorithm and the program for modeling 3D-refraction patterns in the liquid volume allows to visualize the flat laser beam spreading in liquid. The 3D-refraction patterns for the different angles of the flat laser beam and numerous gradient index meaning of the lower layer is built.*

**DIFFUSIVE LAYER, REFRACTION, FLAT LASER BUNCH, REFRACTION PATTERN, GRADIENT INDEX, CAUSTIC**