

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

УДК 535.326:687.7.01

М.В. Сапронов, Б.С. Ринкевичюс

*Национальный исследовательский университет (Московский энергетический институт),
Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: omfi@mpei.ac.ru*

**РЕФРАКЦИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА В ДИФФУЗИОННОМ
СЛОЕ СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ЖИДКОСТИ**

АННОТАЦИЯ

Исследована рефракция цилиндрического лазерного пучка в диффузионном слое, образующемся на границе раздела двух жидкостей с различными физическими и оптическими характеристиками. Рассмотрен алгоритм расчета траектории пучка в переходном слое стратифицированной жидкости. Методом компьютерного моделирования получены двумерные и трехмерные рефракционные изображения внутри слоя и после выхода из кюветы. Визуализировано изменение моделей рефрактограмм под влиянием параметров пучка и схемы установки. На основе полученных результатов определены оптимальные условия для проведения эксперимента.

**РЕФРАКЦИЯ ДИФФУЗИОННЫЙ СЛОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКИ-СТРУКТУРИРОВАННОЕ
ИЗЛУЧЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКА**

ВВЕДЕНИЕ

Существующие методы исследования оптически неоднородных сред отличаются большим разнообразием [1]. Рефракционные лазерные методы, 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 и химической технологии. 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 цилиндрического лазерного пучка в оптически неоднородной стратифицированной жидкости, которая экспериментально моделируется с помощью водно-солевого раствора с изменением концентрации соли. Такой

способ создания неоднородного переходного слоя является легко реализуемым на практике, широко используется при лабораторном моделировании различных гидрофизических явлений. 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.

В ряде случаев необходимо исследовать изменение концентрации вещества в переходном слое между раствором и растворителем. При этом устанавливается первоначально резкая граница между двумя средами, которая размывается с течением времени. Если необходимо исследовать слой, не вмешиваясь в процесс диффузии (т.е. не отбирая проб), регистрацию изменения концентрации в направлении диффузии целесообразно проводить оптическими методами. Они основаны на том, что при малых концентрациях последние пропорциональны разности показателей преломления раствора и чистого растворителя. Таким образом, задача измерения градиента концентрации сводится к измерению градиента показателя преломления.

МОДЕЛЬ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕХОДНОГО СЛОЯ

В прозрачном переходном слое легко моделируется и экспериментально наблюдается рефракция цилиндрического лазерного пучка, который в соответствии с классификацией структурированного лазерного излучения [4] следует отнести к цилиндрически-структурированному излучению. В приближении геометрической оптики распространение этого пучка в неоднородной среде моделируется на основе его представления семейством лучей, представляющих собой прямые – образующие цилиндра.

Лазерный рефрактографический метод, проиллюстрированный на рисунке 1, заключается в том, что лазерное излучение 1 коллимируется линзой 2, на выходе которой в данном случае получается цилиндрический лазерный пучок (ЦЛП). Он пропускается через неоднородную среду, находящуюся в кювете 3, и наблюдается искажение формы этого пучка на экране 4 вследствие его рефракции в оптически неоднородной среде.

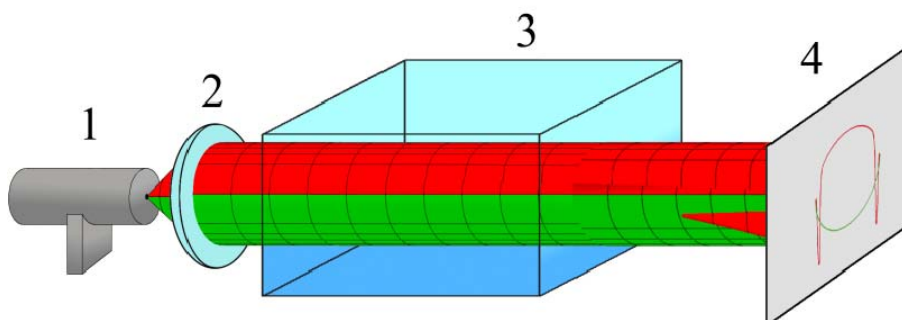


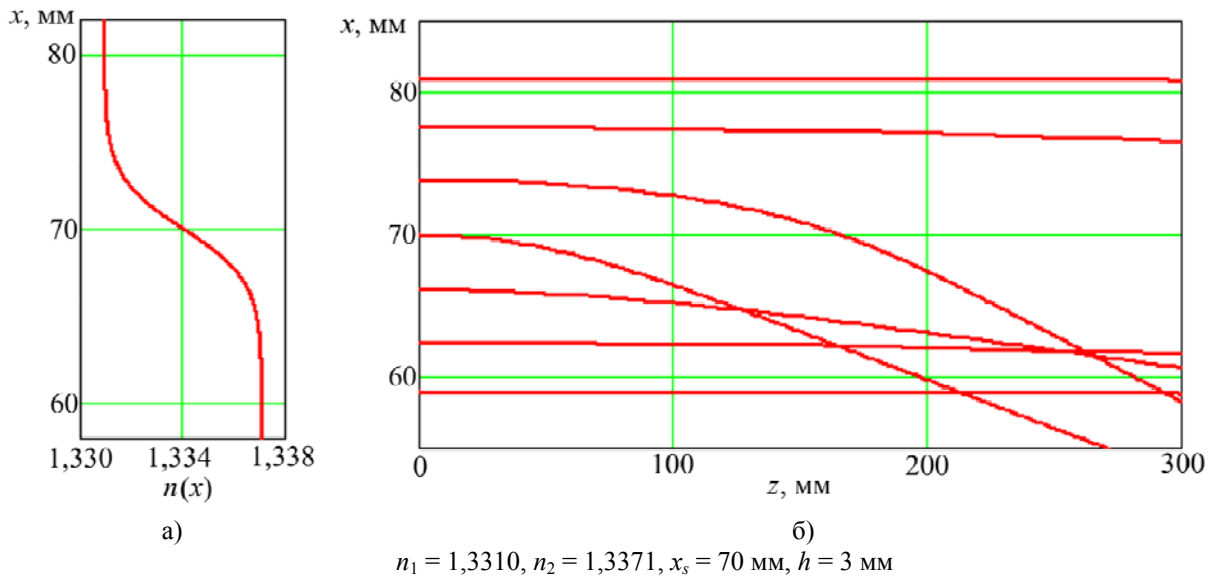
Рис. 1. Схема моделирования рефракции цилиндрического пучка: 1 – двухцветный конусный пучок, 2 – коллимирующая линза, 3 – кювета с неоднородной жидкостью, 4- плоскость наблюдения рефрактограммы

Для различных жидкостей моделируется переходный диффузионный слой, который может описываться различными зависимостями показателя преломления от координаты: например,

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

где n_1, n_2 – показатели преломления верхней и нижней жидкостей соответственно; x_S – положение центра диффузионного слоя; h – характерная полуширина слоя; x – вертикальная координата направленная в сторону, противоположенную силе тяжести.

График распределения показателя преломления (1) представлен на рисунке 2а.



а) распределение показателя преломления, б) траектории лучей для различных точек входа
 Рис. 2/ Распространение лучей в жидкости с диффузионным слоем

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕФРАКЦИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА В ДИФФУЗИОННОМ СЛОЕ

Рассмотрим распространение лучей в переходном слое двух жидкостей. Их траектории описываются известным соотношением для плоскослоистой среды [6]:

$$z(x) = z_0 + \int_x^{x_0} \frac{n_0 \sin(\alpha_0) dx}{\sqrt{n^2(x) - n^2(x_0) \sin^2(\alpha_0)}}, \quad (2)$$

где θ_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 θ_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 (3) относительно x :

$$z_0 + \int_x^{x_0} \frac{n_0 \sin(\alpha_0) dx}{\sqrt{n^2(x) - n^2(x_0) \sin^2(\alpha_0)}} = z_i, \quad (3)$$

где L – длина кюветы.

Полученное в результате значение $x(L)$ соответствует положению луча на внутренней стенке кюветы после рефракции. Для определения положения луча на экране рассчитывается его преломление в прозрачной стенке кюветы и дальнейшее прямолинейное распространение в воздухе до экрана.

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 $n_1 = 1.3310$, $n_2 = 1.3371$, характерная полуширина слоя $h = 3$ мм, середина слоя соответствует координатам $x_s = 69$ мм, длина кюветы $L = 243$ мм, положение экрана наблюдения $l_e = 748$ мм.

Положение пучка было выбрано исходя из следующих соображений.

Для моделирования 2D и 3D-рефрактограмм задаются соответствующие параметры среды и установки, а также профиль показателя преломления (1). Уравнение цилиндрического лазерного пучка на входе кюветы описывается уравнением окружности:

$$x(y) = \begin{cases} \sqrt{r^2 - y^2} + x_c, & x \geq x_c, \\ -\sqrt{r^2 - y^2} + x_c, & x < x_c, \end{cases} \quad (4)$$

где константа x_c – координата центра пучка (по оси y пучок не смещен).

Для каждого значения x с некоторым шагом Δx 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 от 0 до L с некоторым заданным шагом Δz . В результате получается трехмерная сетка координат x , y , z , позволяющая визуализировать трехмерную поверхность, иллюстрирующую рефракцию плоского пучка.

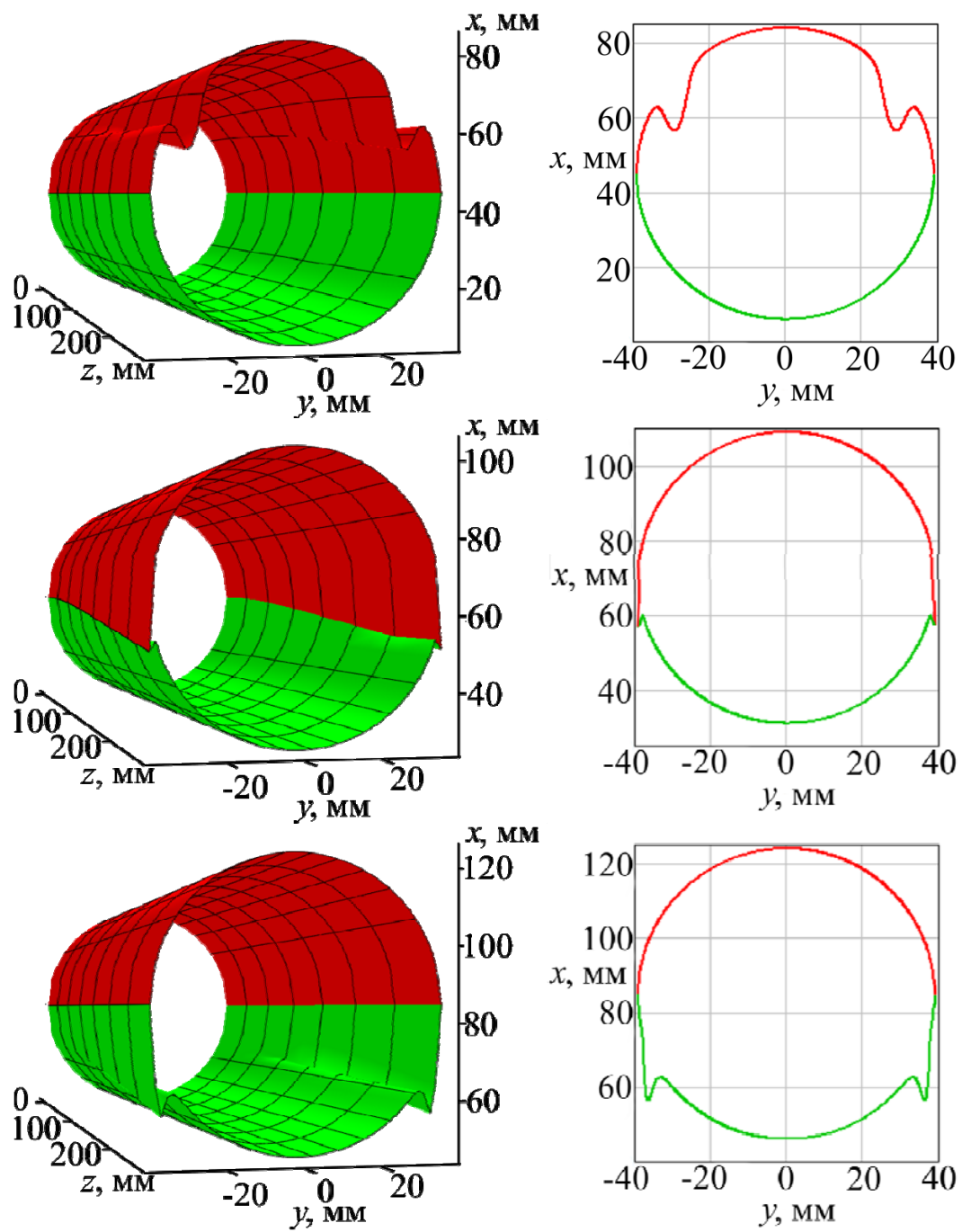
Вид рефрактограммы очень чувствителен к профилю показателя преломления, особенно величина максимального отклонения луча, координата падения которого на переходной слой жидкости приблизительно соответствует середине переходного слоя. Как было показано в [6] профиль (1) переходного слоя наиболее точно описывает экспериментальную рефрактограмму, наблюдаемую в водно-солевом растворе.

На рисунках 3,4 приведены результаты компьютерного моделирования при заданных параметрах среды и кюветы: n_1 , n_2 – показатели преломления среды соответственно менее оптически плотной и более оптически плотной жидкости; x_s – положение центра слоя; h – характерная полуширина слоя; x – вертикальная координата направленная в сторону, противоположенную силе тяжести; r – радиус пучка; L – длина кюветы; x_c – координата центра пучка.

КОМПЬЮТЕРНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ РЕФРАКЦИОННЫХ КАРТИН ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЕГО ПАРАМЕТРОВ

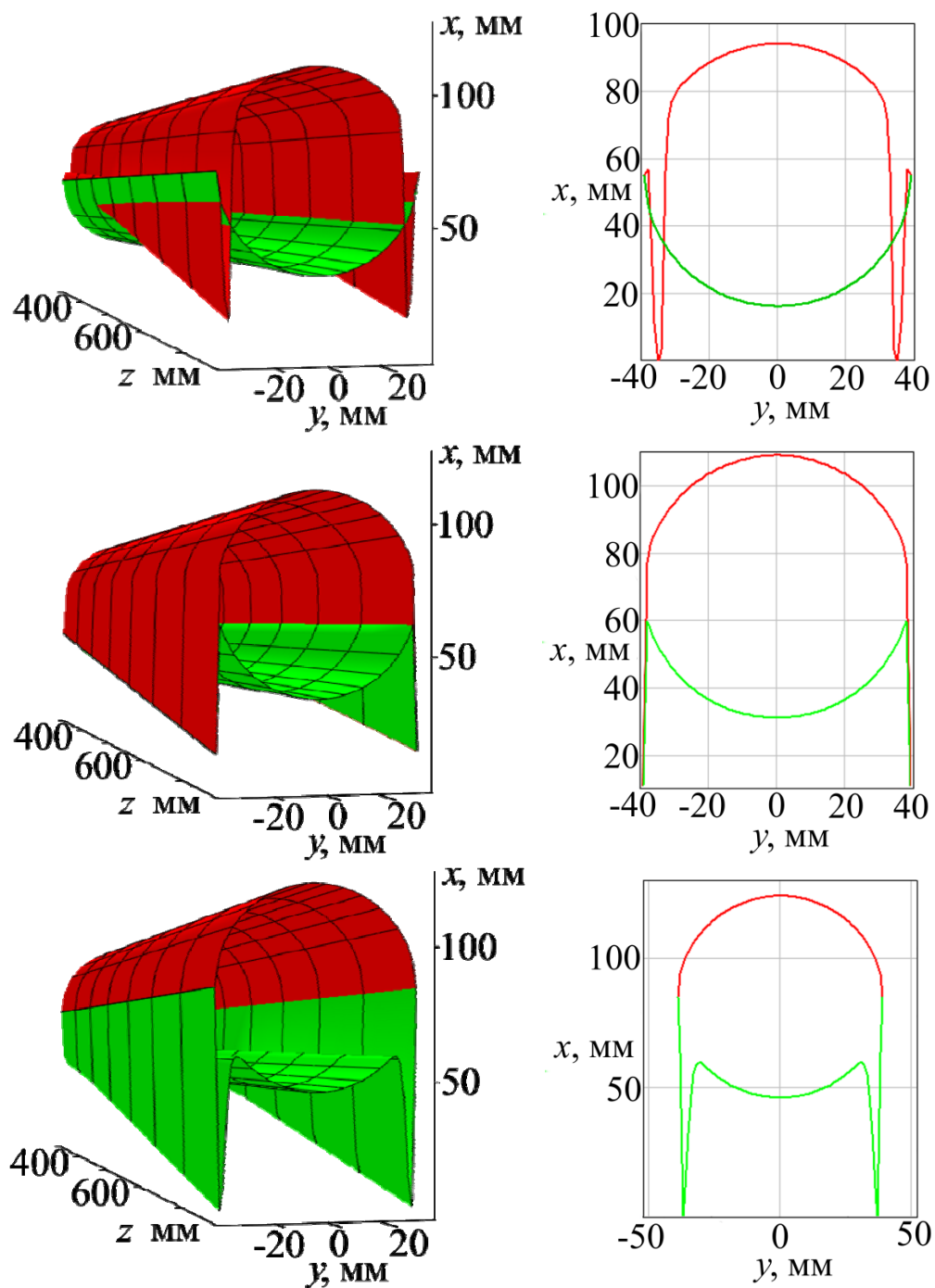
Описанный выше алгоритм позволяет получать модели рефрактограмм при различных параметрах как лазерного пучка, так и неоднородной среды, что позволяет отследить изменение рефракционных явлений в динамике.

Визуализирована динамика изменения геометрической формы пучка в среде с диффузионным слоем, на экране, находящимся на определенном расстоянии от среды, а также в пространстве между ними при увеличении радиуса пучка с некоторым шагом, а также при увеличении координаты центра пучка с некоторым шагом. Результаты приведены в виде анимации 1 – 6.



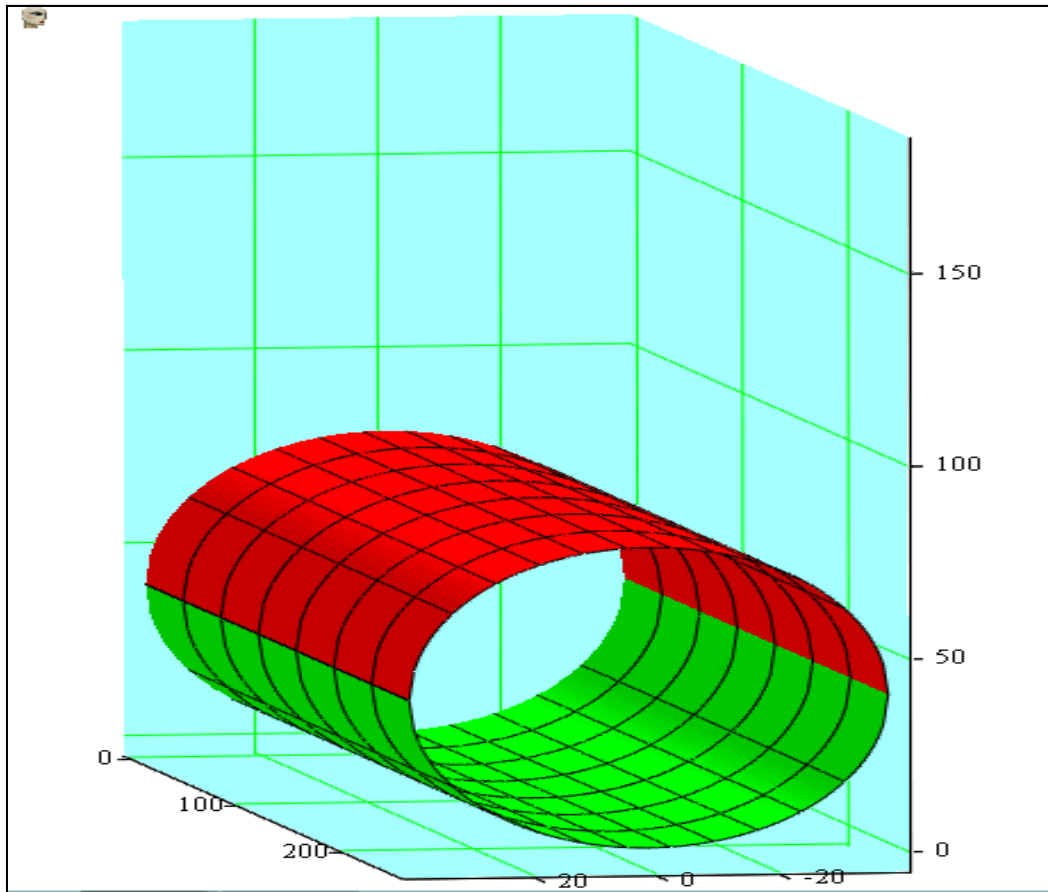
$$n_1 = 1,3310, n_2 = 1,3371, x_s = 69 \text{ мм}, h = 3 \text{ мм}, r = 38 \text{ мм}, x_c = 45 \text{ мм}, L = 243 \text{ мм}$$

Рис. 3. Рефракционные изображения цилиндрического лазерного пучка внутри диффузионного слоя

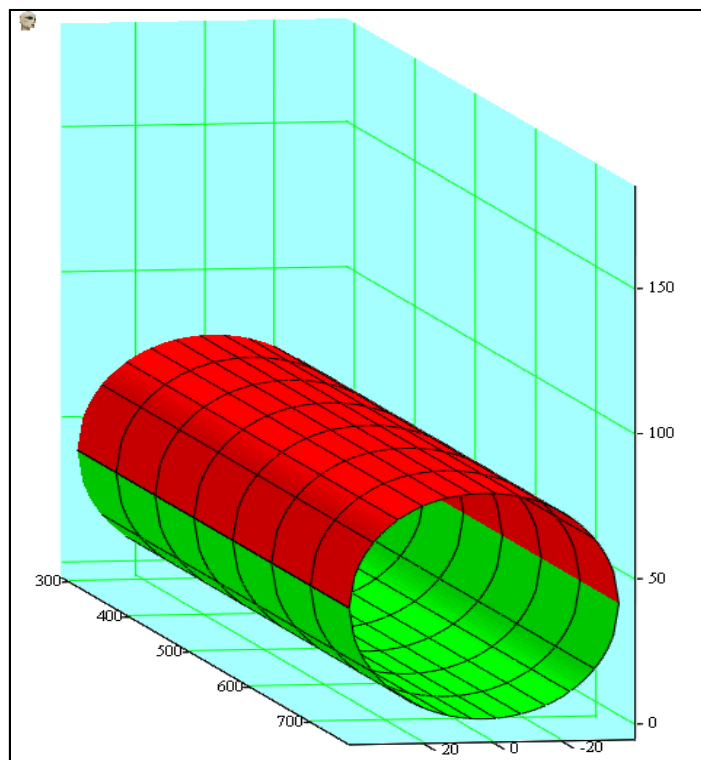


$n_1 = 1,3310, n_2 = 1,3371, x_s = 69 \text{ мм}, h = 3 \text{ мм}, r = 38 \text{ мм}, x_c = 45 \text{ мм}, L = 243 \text{ мм}, l_e = 748 \text{ мм};$

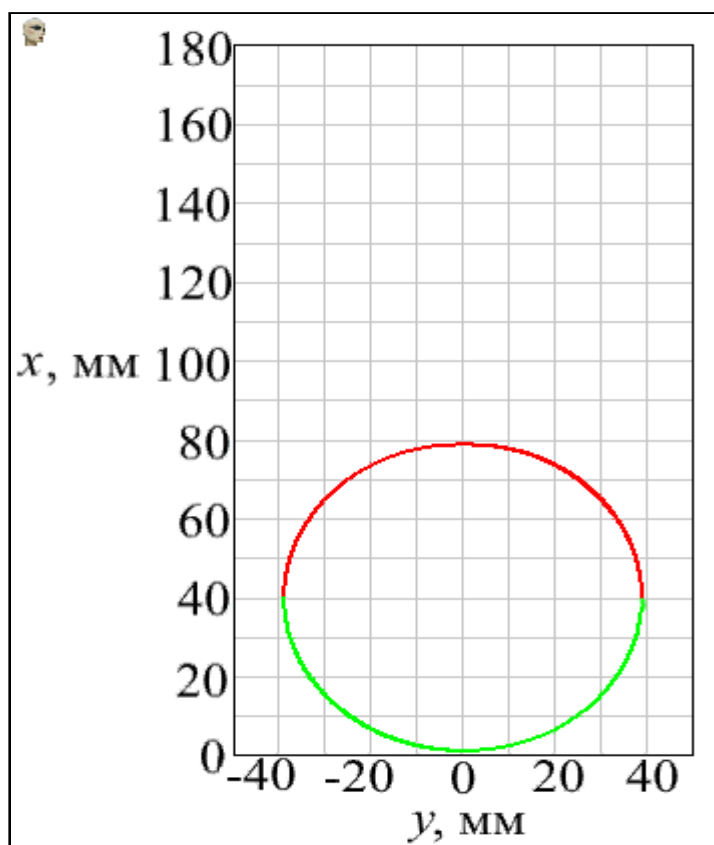
Рис. 4. Модели рефрактограмм цилиндрического лазерного пучка, прошедшего диффузионный слой



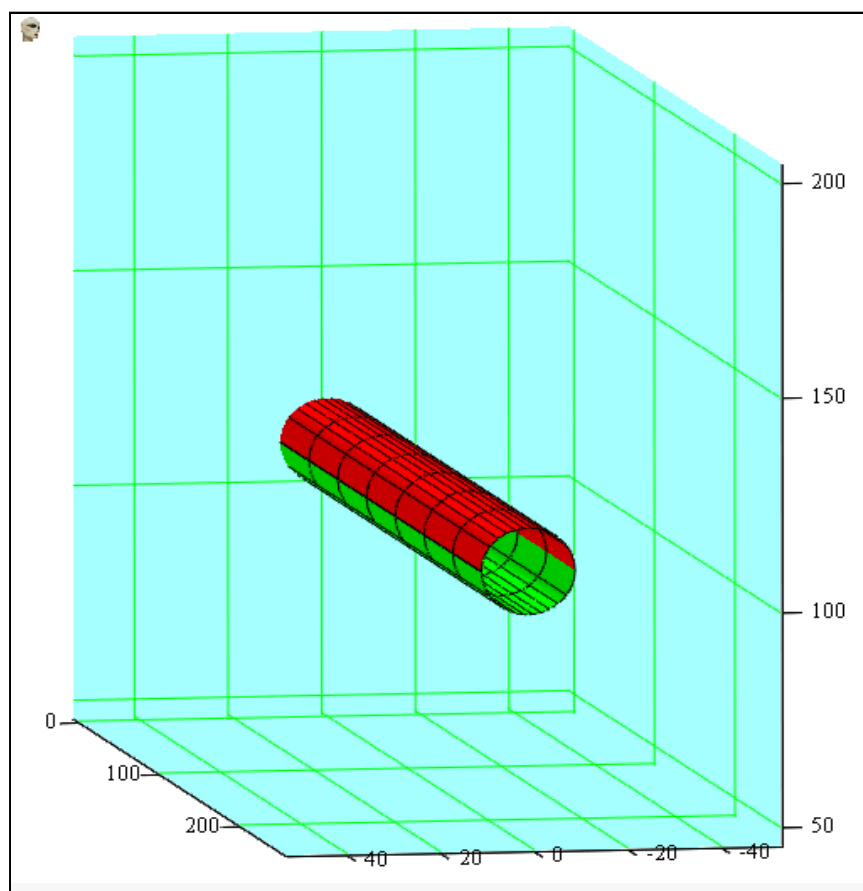
Анимация 1 – Динамика изменения внешнего вида рефракционного изображения внутри диффузионного слоя при изменении координаты центра пучка



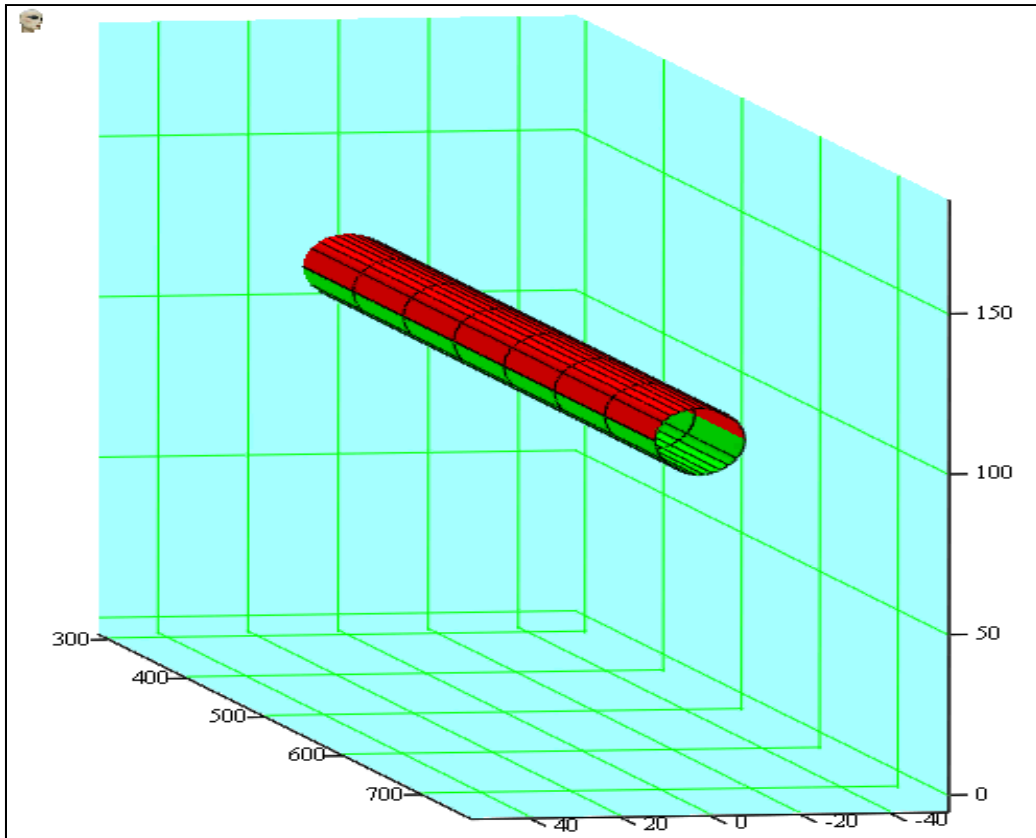
Анимация 2 – Динамика изменения внешнего вида 3D-рефрактограммы вне диффузионного слоя при изменении координаты центра пучка



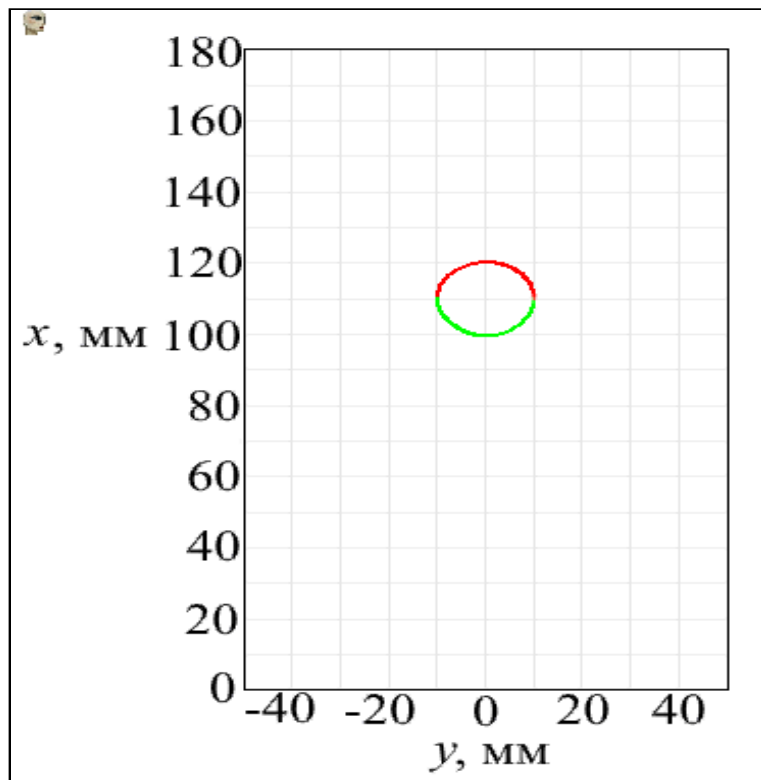
Анимация 3 – Динамика изменения внешнего вида 2D-рефрактограммы в плоскости наблюдения при изменении координаты центра пучка



Анимация 4 – Динамика изменения внешнего вида рефракционного изображения внутри диффузионного слоя при изменении радиуса пучка



Анимация 5 – Динамика изменения внешнего вида 3D-рефрактограммы вне диффузионного слоя при изменении радиуса пучка



Анимация 6 – Динамика изменения внешнего вида 2D-рефрактограммы в плоскости наблюдения при изменении радиуса пучка

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе компьютерного моделирования рефракции цилиндрического лазерного пучка в диффузионном слое был разработан алгоритм расчета траекторий семейства лучей, составляющих цилиндрический пучок, 2D- и 3D-рефрактограмм. На основе этого была создана программа, позволяющая визуализировать динамику изменения моделей рефрактограмм в зависимости от различных параметров как самого лазерного пучка, так и исследуемой среды.

Компьютерное моделирование рефракции цилиндрического пучка в неоднородной среде позволяет исследовать влияние различных параметров установки и диффузионного слоя на внешний вид рефрактограмм, сравнивать модели и экспериментальные результаты, подбирать оптимальные условия проведения эксперимента.

Работа выполнялась при поддержке гранта РФФИ № 14-08-00948-а.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В. Лазерная рефрактография оптически неоднородных сред. // Квантовая электроника, 2007. Т.37. № 12. С.1176 – 1180.
2. Евтихиева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С. Лазерная рефрактография. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. С. 176 + 24 цветных вклейки.
3. Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В. // Диагностика конвективных процессов в пограничном слое жидкости методом лазерной рефрактографии. // Инженерно-физический журнал. Т.83. № 6. Минск: 2010. С.1149 – 1156.
4. 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.
5. Расковская И.Л., Сергеев Д.А., Ширинская Е.С. Диагностика профиля солености в переходном слое жидкости методом лазерной рефрактографии. // Измер.техн., 2010. №10. С. 36 – 38.
6. Крикунов А.В., Ринкевичюс Б.С., И.Л.Расковская. Рефракция астигматического лазерного пучка в диффузионном слое жидкости // Оптика и спектроскопия, 2011. Т.111. №6. С.1001.

M.V. Sapronov , B.S. Rinkevichyus

*National Research University (Moscow Power-Engineering Institute) , Russian,
111250 , Moscow , Krasnokazarmennaya Str. 14 , E-mail: omfi@mpei.ac.ru*

REFRACTION CYLINDRICAL LASER BEAM IN THE DIFFUSION LAYER STRATIFIED FLUID

ABSTRACT

Studied cylindrical refraction of the laser beam in a diffusion layer formed at the interface between two fluids with different physical and optical characteristics. The algorithm for calculating the beam path in the transition layer stratified fluid . Obtained by computer simulation and three-dimensional image within the refractive layer, and after coming out of the cell. Visualize changing patterns refractograms influenced by the beam parameters and mode of installation . Based on the results of the optimal conditions for the experiment .

REFRACTION DIFFUSION LAYER CYLINDRICAL-STRUCTURED COMPUTER
SIMULATION OF RADIATION DYNAMICS