

УДК 535.31:681.7.001

А.В. Ведяшкина, студ.; рук. Б.С. Ринкевичюс, д.ф-м.н., проф.

*Национальный Исследовательский Университет МЭИ, Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: avedyashkina@rambler.ru*

КОМПЬЮТЕРНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДИНАМИКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА В ОПТИЧЕСКИ-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ

АННОТАЦИЯ

В докладе рассматривается рефракция плоского лазерного пучка, распространяющегося в сферически-неоднородных средах и в диффузионном слое жидкости. Проведен расчет траекторий лазерных лучей в среде и показано местоположения каустик. Для диффузионного слоя жидкости проведено сопоставление расчетных и экспериментальных данных.

ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, РЕФРАКЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ, КАУСТИКА

ВВЕДЕНИЕ

Метод лазерной рефрактографии определения параметров оптически-неоднородных сред заключается в зондировании среды узким лазерным пучком и регистрации угла его отклонения с помощью цифровой видеокамеры [1]. В этом методе подразумевается, что пучки достаточно тонкие и каустики не наблюдаются. Реальные лазерные пучки имеют конечные размеры, что может приводить к появлению каустик и неверным результатам измерений.

Каустики – особые линии и особые поверхности, вблизи которых резко возрастает интенсивность светового поля. Их полное исследование выходит за границы применимости геометрической оптики.

В методе лазерной рефрактографии были определены прямая и обратная задачи. Прямая задача: заданы параметры оптически-неоднородной среды, необходимо найти параметры прошедшего лазерного пучка (получение рефрактограммы); обратная задача: экспериментально получена рефрактограмма, необходимо определить параметры оптически-неоднородной среды (распределение показателя преломления). Каустики мешают получить хорошую рефрактограмму и решить обратную задачу. Поэтому важно знать область образования каустики. В дальнейшем это поможет оптимизировать проводимые эксперименты [3].

РЕФРАКЦИЯ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА В ОПТИЧЕСКИ-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ

Рассмотрим рефракцию лазерного пучка в сферически симметричном температурном поле нагретого шара радиуса R , помещенного в кювету с водой. Расчет проводится для радиальной зависимости температуры, определяемой выражением:

$$T(r) = T_0 + \Delta T \cdot e^{-\frac{(r-R)^2}{a^2}}, \quad (1)$$

где T_0 , ΔT , a – параметры модели температурного поля. Параметр T_0 определяется температурой стенок кюветы с жидкостью, значение $T(R)$ равно температуре на поверхности шара, а отношение $\Delta T/a$ соответствует градиенту температурного поля в пограничном слое толщиной a . Зависимость показателя преломления воды от температуры для лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 0,6328$ мкм определяется аппроксимационной зависимостью

$$n(T) = n_0 - 0,000051 \cdot T - 0,0000011 \cdot T^2, \quad (2)$$

где температура T измеряется в градусах Цельсия.

Геометрия задачи иллюстрируется на рисунке 1. Начало координат совмещено с центром нагретого шара, помещенного в кювету с водой. Положение одной из стенок кюветы определяется значением $z = -z_0$ (вход пучка в среду), а положение второй стенки – значением $z = z_1$ (выход пучка из среды). Лазерный пучок распространяется вдоль оси OZ , входит в кювету на расстоянии x_0 от оси OZ , а выходит на расстоянии x_1 из-за рефракции в тепловом поле шара.

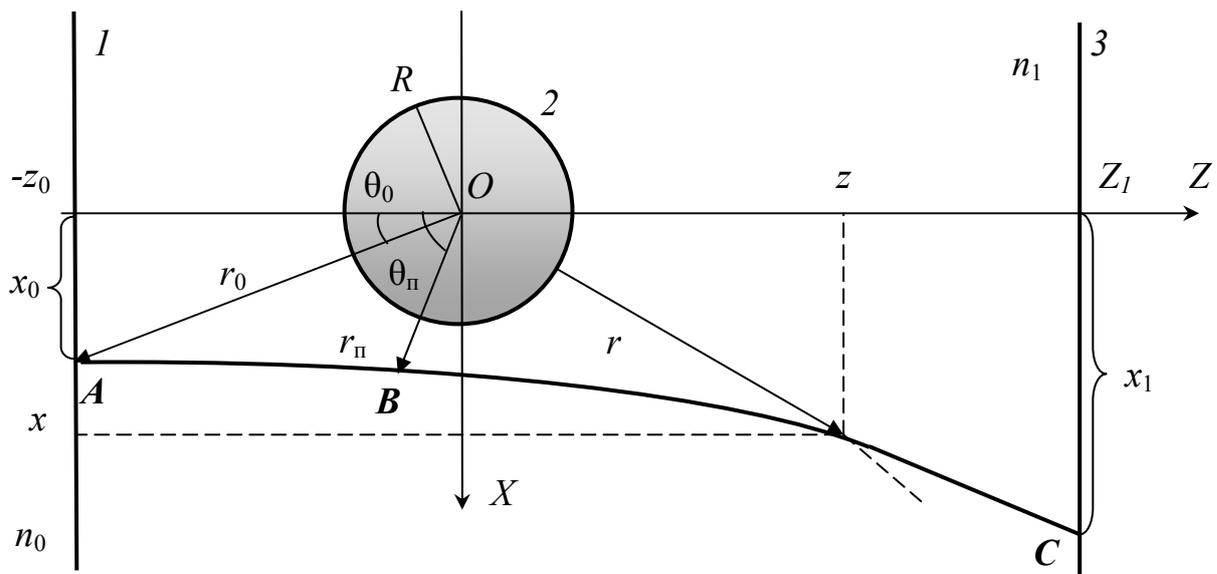


Рис. 1. Геометрический ход лазерного луча в сферически симметричном температурном поле нагретого шара: 1 – кювета, 2 – шар, 3 – экран

Задача распространение лазерного пучка в оптически-неоднородных средах должна решаться методами волновой оптики [4], что достаточно сложно. В данной работе распространение лазерного пучка аппроксимируется пучком геометрооптических лучей, траектории которых рассчитываются по законам геометрической оптики.

Траектория геометрооптического луча задается уравнением

$$\theta = \theta(r), \quad (3)$$

где θ – центральный угол, отсчитываемый от отрицательного направления оси OZ , а r – длина радиус-вектора, проведенного из начала координат к точке, лежащей на траектории луча.

При расчете траектория луча AC разбивается на два участка: от точки входа A до точки поворота B и от точки поворота до плоскости наблюдения C . Точка поворота B в

рассматриваемом случае определяется минимальным расстоянием r_{Π} от луча до начала координат (центра неоднородности) и находится из следующего уравнения

$$r_{\Pi} \cdot n(r_{\Pi}) = n_0 \cdot x_0. \quad (4)$$

Радиальная координата луча при входе в среду (при $z = z_0$) равна

$$r_0 = \sqrt{x_0^2 + z_0^2}, \quad (5)$$

Угол θ_0 характеризует направление луча при входе в среду:

$$\theta_0 = \text{arctg}\left(\frac{-x_0}{z_0}\right). \quad (6)$$

Угол, соответствующий точке поворота:

$$\theta_{\Pi} = \theta_0 + \int_{r_{\Pi}}^{r_0} \frac{n_0 \cdot x_0 dr}{r \sqrt{n^2(r) \cdot r^2 - n_0^2 \cdot x_0^2}}. \quad (7)$$

Уравнение луча до точки поворота:

$$\theta = \theta_0 + \int_r^{r_0} \frac{n_0 \cdot x_0 dr}{r \sqrt{n^2(r) \cdot r^2 - n_0^2 \cdot x_0^2}}. \quad (8)$$

Уравнение луча после точки поворота:

$$\theta = \theta_{\Pi} + \int_{r_{\Pi}}^r \frac{n_0 \cdot x_0 dr}{r \sqrt{n^2(r) \cdot r^2 - n_0^2 \cdot x_0^2}}. \quad (9)$$

Переход к декартовым координатам осуществляется следующим образом:

$$x = r \cdot \sin(\theta(r)), \quad (10)$$

$$z = -r \cdot \cos(\theta(r)). \quad (11)$$

Построим алгоритм расчета хода лазерного пучка в сферически-неоднородной среде. Пусть ширина пучка H , координата нижней границе пучка при входе в среду H_0 , пучок состоит из N лучей, тогда шаг, показывающий расстояние между пучками $h = H/N$.

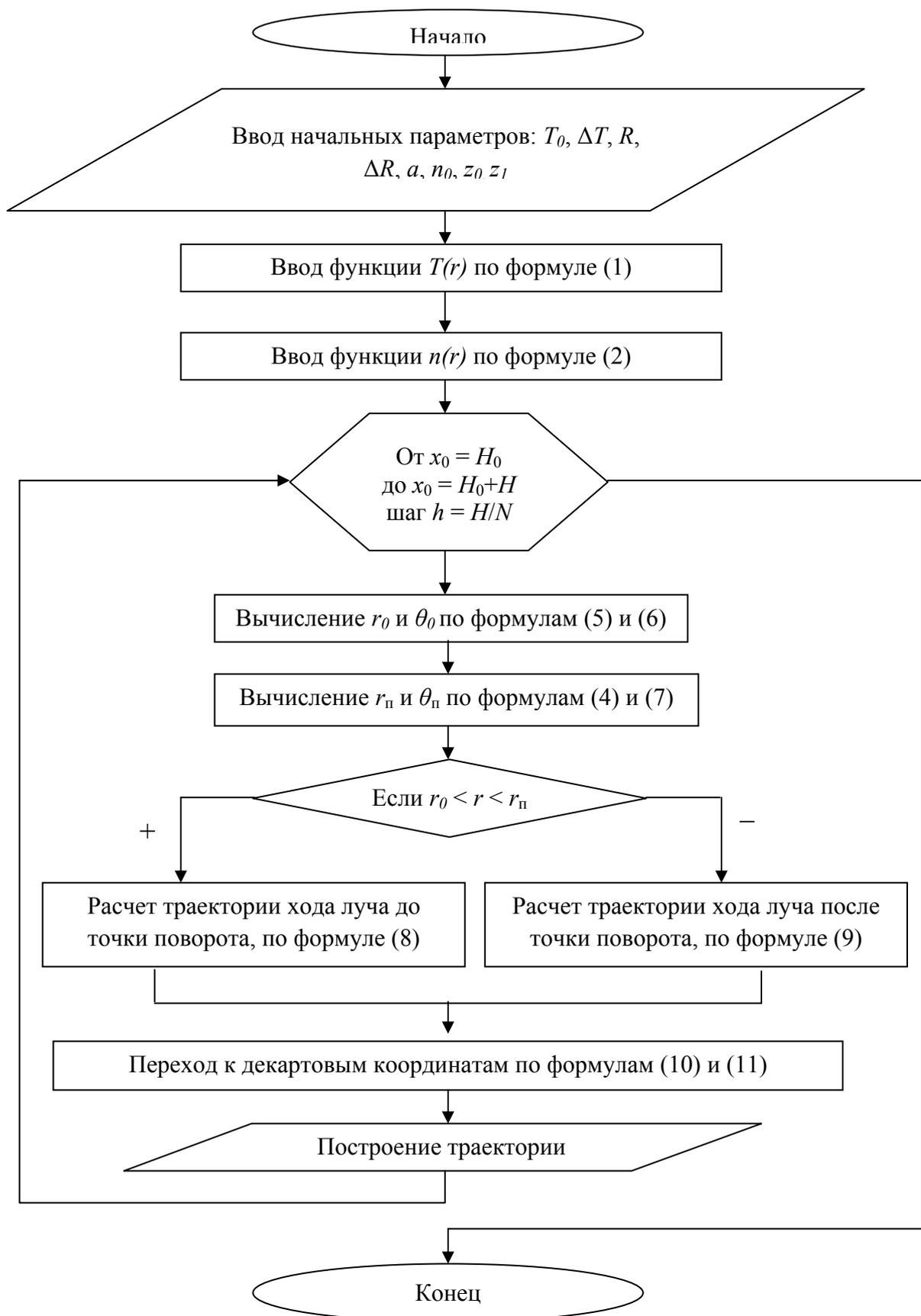


Рис. 2. Алгоритм расчета траектории лазерного луча в сферически симметричном температурном поле нагретого шара

Расположим шар на расстоянии 40 мм от левой стенки кюветы, то есть $z_0 = -40$ мм. Направим два пучка на расстоянии $x_0 = \pm 10$ мм от центра шара сверху и снизу. Экран

располагается на расстоянии 160 мм от центра шара. Выберем шар $R = 10$ мм, температуру воды $T = 20^\circ\text{C}$.

При расчетах рассмотрим два случая ($\Delta T = 40^\circ$, $\Delta T = 70^\circ$). Траектории лазерного луча представлены на приведенных ниже рисунках 3,4.

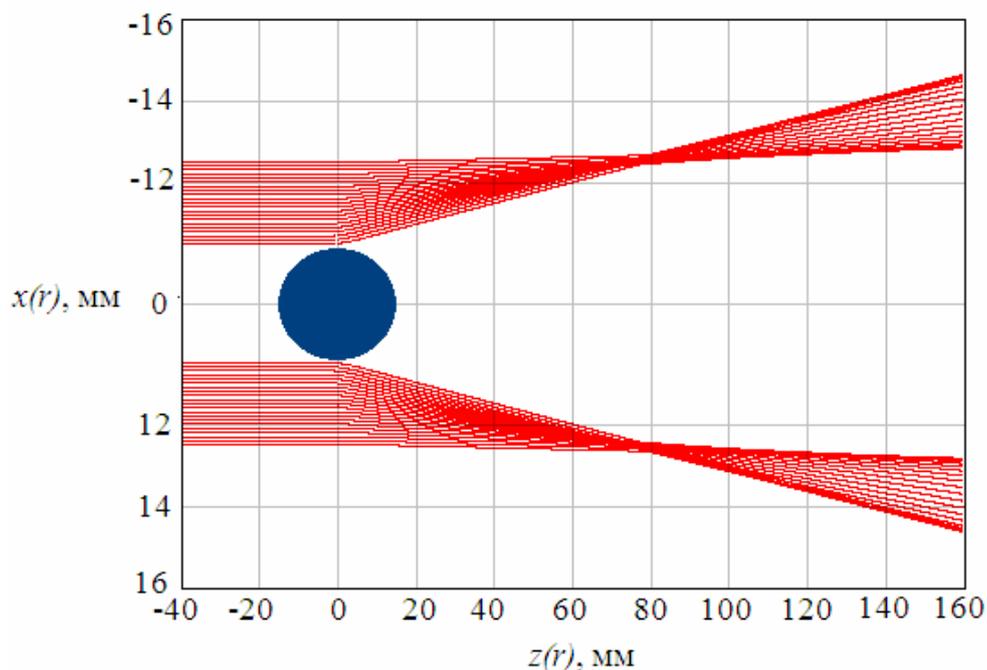


Рис. 3. Распространение лазерного пучка в сферически симметричном температурном поле нагретого шара. Разность температур $\Delta T = 40^\circ$

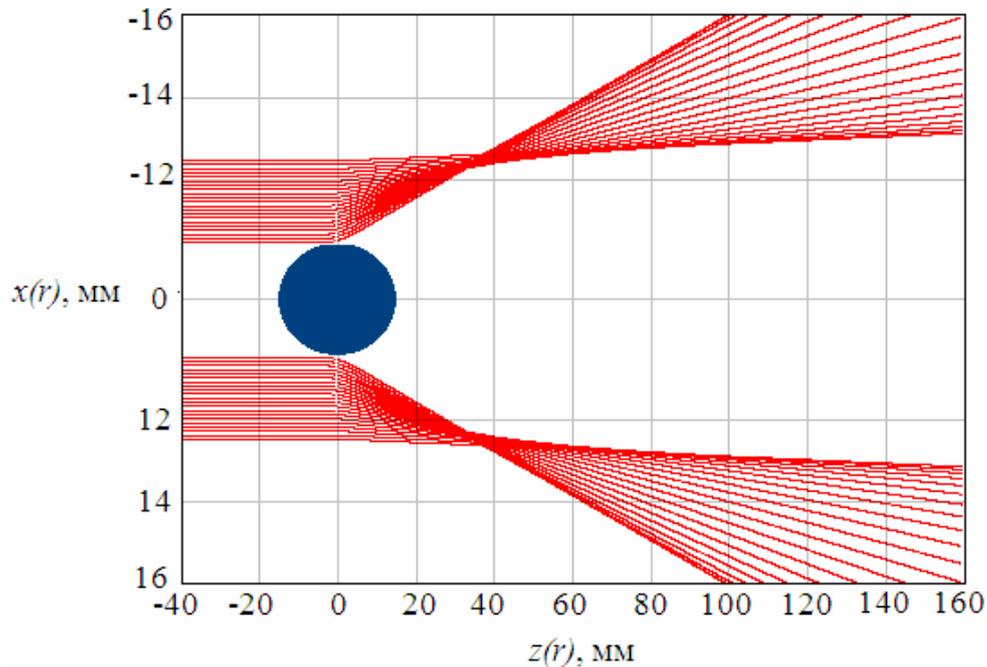


Рис. 4. Распространение лазерного пучка в сферически симметричном температурном поле нагретого шара. Разность температур $\Delta T = 70^\circ$

Анализ рисунков 3,4 показывает местоположение каустик, где лучи, первоначально идущие параллельно, пересекаются в неоднородной среде и образуют каустические поверхности. При увеличении разности температур между жидкостью и нагретым шаром область каустики приближается к шару.

По рисункам 3,4 можно сделать вывод, что для экспериментального определения градиента температур в пограничном слое по методу лазерной рефрактографии необходимо располагать фотоприемник вне зоны каустик или использовать тонкие пучки.

Рассмотрим среду, в которой профиль показателя преломления определяется выражением:

$$n(r) = n_0 + \Delta n \exp\left(-\frac{r^2}{a^2}\right), \quad (12)$$

где n_0 – показатель преломления однородной среды; Δn – отклонение от значения n_0 в центре неоднородности; a – характерный размер неоднородности. Для принятой модели положительное значение Δn соответствует ситуации, когда показатель преломления убывает от центра неоднородности к ее периферии. Данной модели может соответствовать холодный шар, погруженный в горячую воду. Расчет траектории луча, идущего около холодного шара проводится аналогично описанному выше.

Расположим шар на расстоянии 40 мм от левой стенки кюветы, то есть $z_0 = -40$ мм. Направим два пучка на расстоянии $x_0 = \pm 10$ мм от центра шара сверху и снизу. Экран располагается на расстоянии 160 мм от центра шара. Выберем шар $R = 10$ мм.

При расчетах рассмотрим два случая ($\Delta n = 0,03$, $\Delta n = 0,06$). Траектории лазерного луча представлены на приведенных ниже рисунках 5,6.

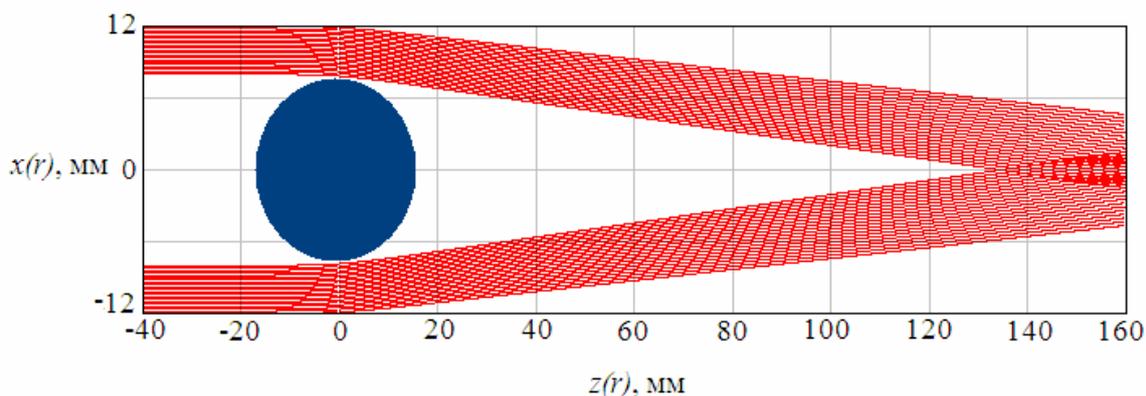


Рис. 5. Распространение лазерного пучка в сферически-неоднородной среде. Изменение показателя преломления $\Delta n = 0,03$

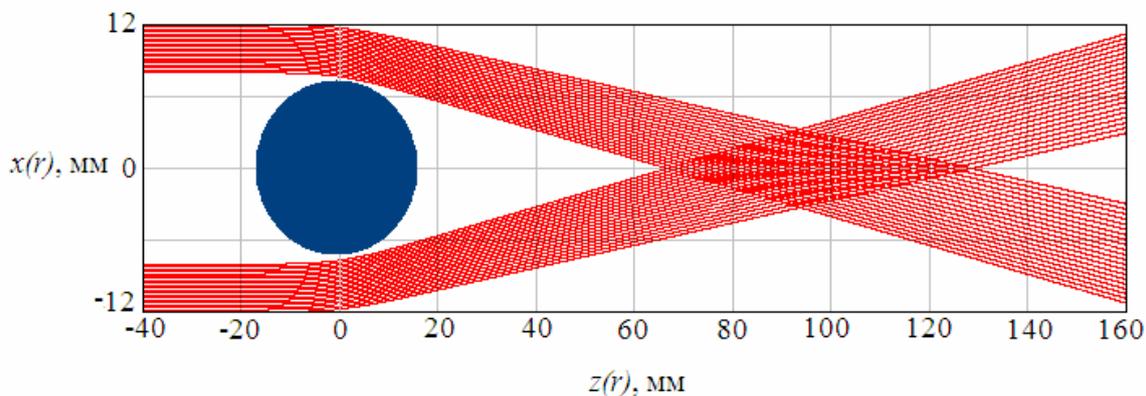


Рис. 6. Распространение лазерного пучка в сферически-неоднородной среде. Изменение показателя преломления $\Delta n = 0,06$

По рисункам 5,6 видно, что лучи, первоначально идущие параллельно, расходятся. В данном случае каустические поверхности не наблюдаются.

Рассмотрим плоско-неоднородную среду, в которой имеется диффузионный слой со следующими параметрами: показатель преломления нижней жидкости $n_1 = 1,3456$ (соленая вода), показатель преломления верхней жидкости $n_2 = 1,3312$ (чистая вода). Параметры диффузионного слоя: середина слоя $x_s = 50$ мм, параметр полуширины слоя $h = 1,5$ мм, за параметр n_0 принимается показатель преломления в точке входа луча в среду.

Распределение показателя преломления в среде описывается зависимостью вида (13). Зависимость показателя преломления от координаты показана на рис.7. Траектории луча, распространяющегося в плоскости XOZ , рассчитываются по формуле (14). Рассчитанные для указанных параметров среды траектории лучей изображены на рис. 8.

$$n(x) = n_1 + (n_1 + n_2) / \left[1 + \exp\left(\frac{x - x_s}{h}\right) \right], \quad (13)$$

$$z(x) = z_0 + \int_0^x \frac{n_0 dx}{\sqrt{n^2(x) - n_0^2}}, \quad (14)$$

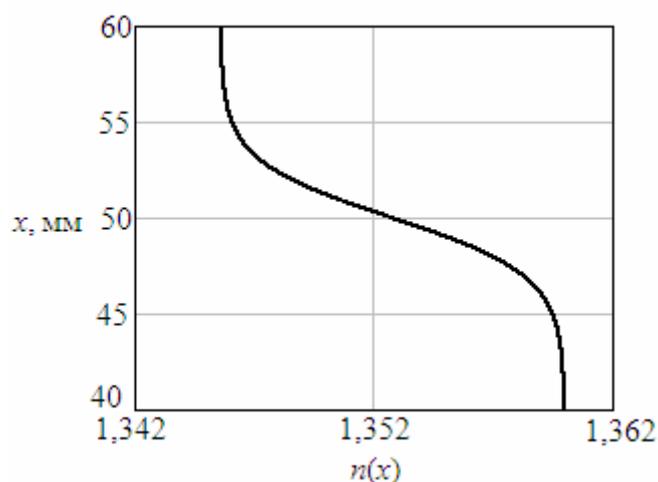


Рис. 7. Зависимость показателя преломления от координаты для диффузионного слоя жидкости

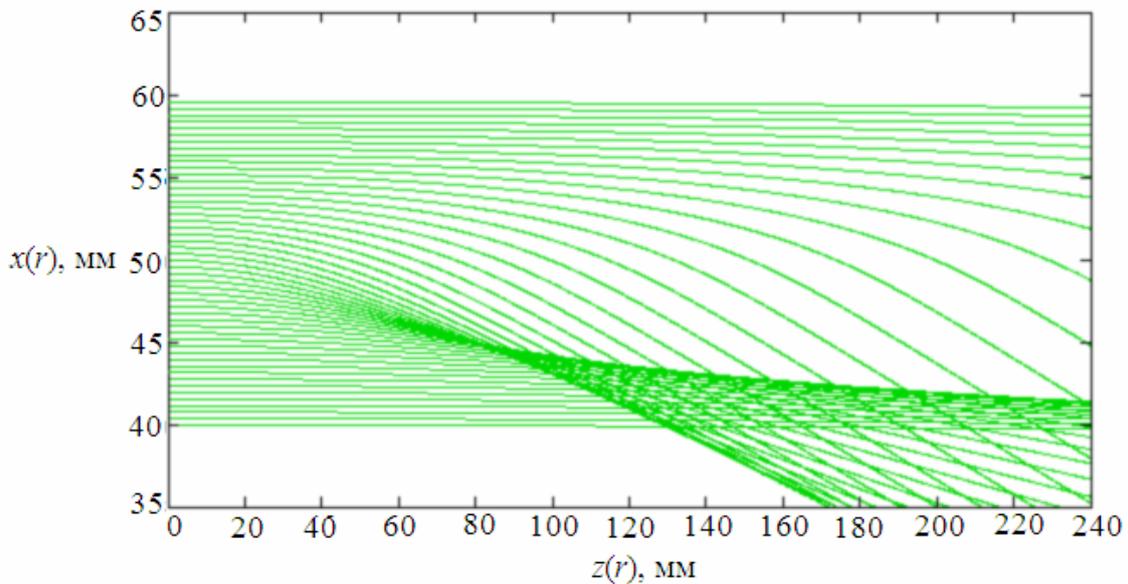


Рис. 8. Расчетные траектории лучей в диффузионном слое жидкости (увеличенный масштаб)

Экспериментальное исследование каустики плоского лазерного пучка проводилось на установке, состоящей из лазера, оптической системы (сферическая и цилиндрическая линза), кюветы с неоднородной средой (параметры среды описаны выше), цифровой фотокамеры и персонального компьютера. На рис. 9 приведена фотография распространения плоского лазерного пучка внутри среды с диффузионным слоем жидкости.

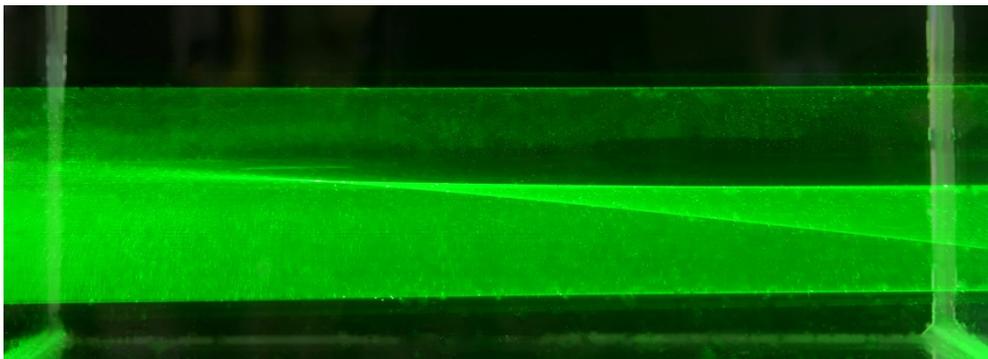


Рис. 9. Распространение плоского лазерного пучка внутри оптически-неоднородной среды с диффузионным слоем жидкости

Анализируя рисунки 8, 9, можно сделать вывод о хорошем соответствии расчетных и экспериментальных каустик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы были разработаны алгоритмы для компьютерного моделирования динамики образования каустик в плоскослоистой и сферически-неоднородных средах. Выбранные модели сферически-неоднородных сред соответствуют нагретому и охлажденному шарам. Для диффузионного слоя жидкости проведено сопоставление расчетных каустик и экспериментальных. Расчеты проводились для параметров, реализуемых в лабораторных условиях.

Автор выражает благодарность профессору Б.С. Ринкевичюсу за постановку задачи и полезные советы и аспиранту И.Н. Павлову за консультации и помощь в проведении экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Евтихиева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С.** Лазерная рефрактография. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 176 с.
2. **Ведяшкина А.В.** Компьютерная визуализация каустик лазерного пучка в оптически-неоднородной среде // VI Международная заочная научно-практическая конференция «Теоретические и практические аспекты развития современной науки», 2012. С. 18-22
3. **Крикунов А.В., Ринкевичюс Б.С. Расковская И.Л.** Рефракция астигматического лазерного пучка в переходном слое стратифицированной жидкости // Оптика и спектроскопия, 2011, Т.111, № 6. С.1020-1026.
4. **Kuzmicheva M.S., Raskovskaya I.L.** Computer visualization of structured laser radiation refractograms // The 15th International Symposium on Flow Visualization, Belarus, Minsk, 2012. Paper 095. – ISBN 978-985-6456-75-9.

A.V. Vedyashkina, B.S. Rinkevichyus

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

COMPUTER MODELING OF LASER BEAMS DYNAMICS IN OPTICAL INHOMOGENEOUS MEDIUMS

In this report we consider the refraction of plane laser beam, distributing in spherical inhomogeneities and diffusive layer. Likewise the calculation of laser rays' paths in medium are considered, the location of caustic surfaces is indicated. Comparison of calculated and experimental refractograms for diffusive layer is presented.

LASER RADIATION, REFRACTION, OPTICAL INHOMOGENEITIES, CAUSTICS.