

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

УДК 535.31:681.7.001

М.С. Кузьмичева, И.Л. Расковская

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: m_s_h@mail.ru*

ДИФРАКЦИОННЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ФАЗОВЫХ ОБЪЕКТОВ В СТРУКТУРИРОВАННОМ ЛАЗЕРНОМ ИЗЛУЧЕНИИ

АННОТАЦИЯ

Разработана методика моделирования дифракционных картин, получаемых при зондировании фазовых объектов структурированным лазерным излучением. Получены дифракционные изображения в области Френеля и Фраунгофера для слоистых градиентных неоднородностей при использовании разных типов лазерных пучков. Смоделированные изображения могут быть использованы для качественной и количественной диагностики прозрачных градиентных неоднородностей, в том числе в жидких и газообразных средах, стратифицированных по плотности, температуре и давлению, в частности для диагностики акустического поля.

**ВОЛНОВЫЕ МЕТОДЫ, НЕОДНОРОДНАЯ СРЕДА, ДИФРАКЦИЯ,
СТРУКТУРИРОВАННОЕ ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ

Структурированное лазерное излучение (СЛИ) представляет собой пространственно модулированное по интенсивности излучение, получаемое, с помощью классических оптических элементов, дифракционных оптических элементов (ДОЭ) или структурированного экрана [1].

Критерием наблюдения дифракционных картин различного вида может служить значение волнового параметра p :

$$p = \frac{\sqrt{\lambda b}}{D}, \quad (1)$$

где b – расстояние до экрана;
 D – диаметр неоднородности.

При $p \approx 1$ наблюдается френелевская дифракция. Характерная качественная особенность френелевских дифракционных картин состоит в том, что область наблюдения дифракции приблизительно совпадает с границами геометрической тени. При $p \gg 1$ наблюдается дифракция Фраунгофера. В этом случае дифракционная картина значительно шире размеров геометрической тени. Второй важной особенностью фраунгоферовских

дифракционных картин, в отличие от френелевской дифракции, является то, что при разных положениях плоскости наблюдения дифракционные картины подобны друг другу; при переходе к другой плоскости наблюдения изменяется только масштаб картины.

Отметим также, что неравенство $p \ll 1$ можно рассматривать как критерий применимости геометрической оптики. В этом случае плоскость наблюдения располагается достаточно близко от неоднородности. Методика моделирования волновых изображений структурированных пучков в зоне геометрической оптики (ГО) рассмотрена, например, в докладе [2]. Данная работа посвящена разработке методики моделирования дифракционных картин структурированного лазерного излучения. В отличие от методики получения рефракционных изображений в зоне ГО, когда характерный наименьший размер пучка, как правило, меньше размера неоднородности, в дифракционной зоне наиболее информативные изображения получаются в случае, когда размер пучка превышает размер неоднородности.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИФРАКЦИОННЫХ КАРТИН

Пусть поле пучка на входе в неоднородность равно $A(x,y)$, тогда поле на выходе из неоднородности в приближении фазового экрана

$$U_0(x, y) = A(x, y) \exp[ikn(x, y)l], \quad (2)$$

где $n(x,y)$ – пространственная зависимость показателя преломления, l – длина неоднородности.

Поле в плоскости наблюдения z_e :

$$U(x, y, z_e) = \frac{1}{i\lambda} \iint A(\xi, \eta) \exp[ik_0 n(\xi, \eta)l] \frac{ze^{ik_0 R}}{R^2} d\xi d\eta, \quad (3)$$

где $R = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + z^2}$.

Для моделирования дифракционных картин был использован алгоритм, в основу которого положен метод прямоугольников (ячеек).

Рассмотрим двукратный интеграл по прямоугольнику $G (a \leq x \leq b, \alpha \leq y \leq \beta)$. Функцию приближенно можно заменить на ее значение в центральной точке прямоугольника. Тогда интеграл легко вычисляется

$$\int_{\alpha}^{\beta} \int_a^b f(x, y) dx dy \approx Sf(\bar{x}, \bar{y}), \quad (4)$$

где $S = (b - a)(\beta - \alpha)$, $\bar{x} = \frac{1}{2}(a + b)$, $\bar{y} = \frac{1}{2}(\alpha + \beta)$.

Для повышения точности можно разбить область на прямоугольные ячейки. Приближенно, вычисляя интеграл в каждой ячейке и обозначая через $S_i, \bar{x}_i, \bar{y}_i$ соответственно площадь ячейки и ее координаты центра, получим

$$I = \iint_G f(x, y) dx dy \approx \sum_i S_i f(\bar{x}_i, \bar{y}_i). \quad (5)$$

Справа стоит интегральная сумма, следовательно, для непрерывной $f(x,y)$ она сходится к значению интеграла, когда периметры ячеек стремятся к нулю.

Данный метод был реализован в среде программирования Delphi:

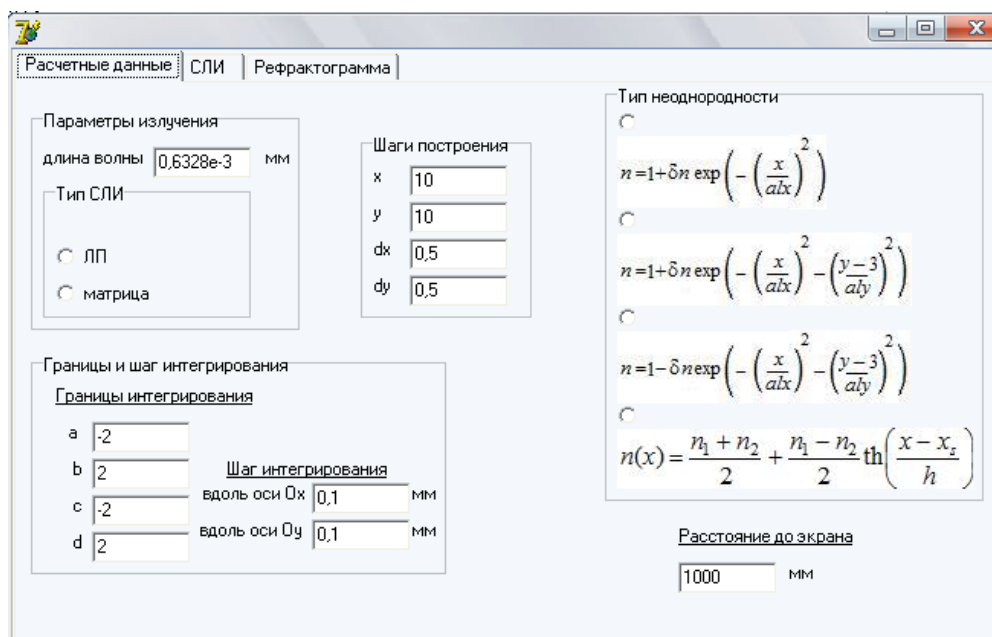


Рис. 1. Внешний вид программы

Программа содержит 3 вкладки, на которых вводятся расчетные данные, а так же строится изображение СЛИ и дифракционной картины на экране. Внешний вид вкладки «Расчетные данные» представлен на Рис. 1. Программа предоставляет возможность моделирования дифракционных картин при прохождении через неоднородность лазерной плоскости (плоско структурированного лазерного излучения) и матрицы точек (точечно структурированное лазерное излучение). При выборе лазерной плоскости появляется окно ввода данных, показанное на Рис. 2.

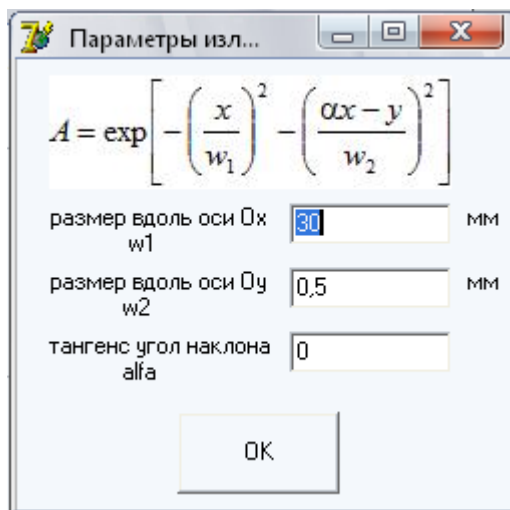


Рис. 2. Окно ввода параметров излучения

Здесь, излучение на входе в неоднородность описывается формулой (22):

$$A(x, y) = \exp \left[- \left(\frac{x}{w_1} \right)^2 - \left(\frac{\alpha x - y}{w_2} \right)^2 \right], \quad (6)$$

где w_1 и w_2 – размеры излучения вдоль осей Ox и Oy соответственно, α – тангенс угла наклона лазерной плоскости.

При выборе первых трех появляется окно ввода параметров неоднородности (Рис. 5).

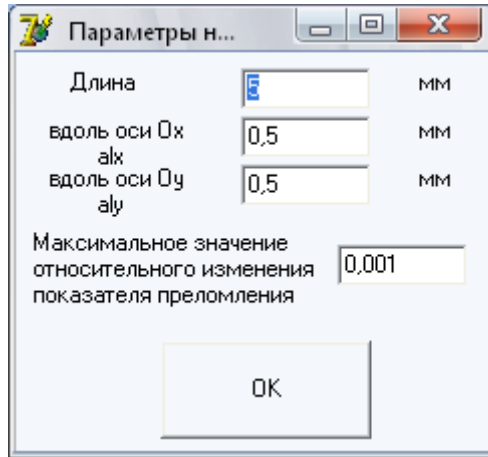


Рис. 3. Окно ввода параметров неоднородности

Также необходимо ввести расстояние, на котором наблюдается дифракционная картина, шаги и границы интегрирования, а также величину шага, необходимого для графического представления данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ ПРОГРАММЫ

Далее в таблицах 1-2 представлены дифракционные картины в зоне Френеля для одного элемента линейно-структурированного лазерного излучения [1] в случае двух разных типов слоистой неоднородности (соответственно с минимумом и максимумом показателя преломления в центре слоя). Кроме визуализации дифракционной картины при моделировании проводится построение графика интенсивности дифракционного поля.

Исходные данные

$$\lambda = 0,6328 \text{ мкм}$$

$$w = 2 \text{ мм}$$

Закон изменения показателя преломления

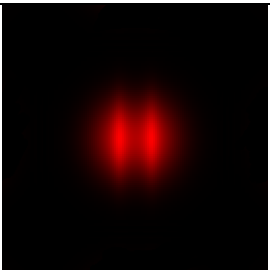
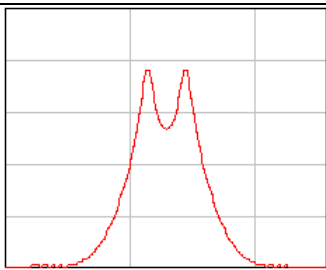
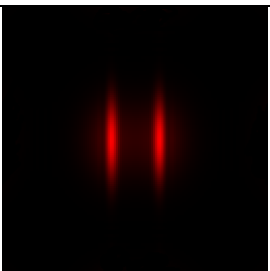
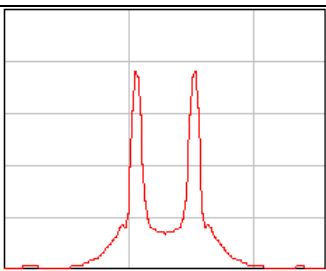
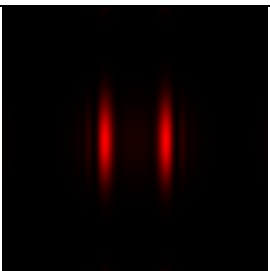
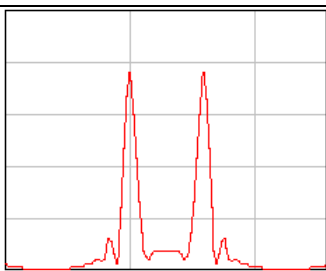
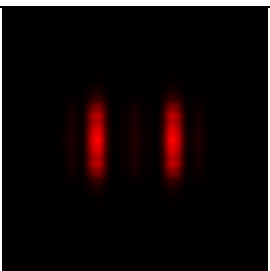
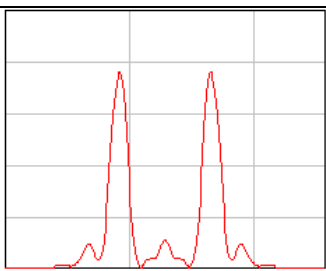
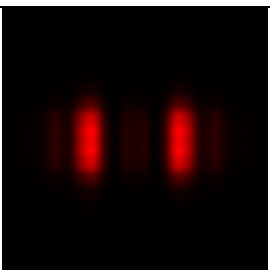
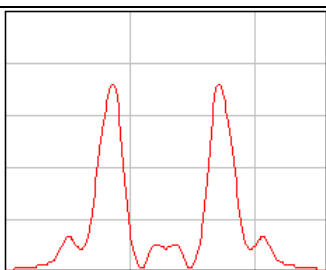
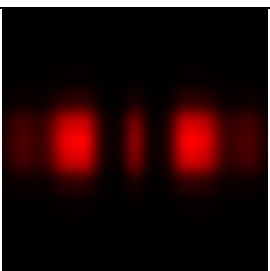
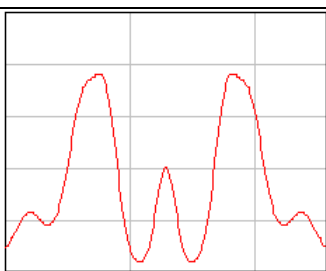
$$n(x) = 1 - \delta n \exp \left[- \left(\frac{x}{alx} \right)^2 \right]$$

$\delta n = 0,001$ – максимальное значение относительного изменения показателя преломления.

$alx = 0,5 \text{ мм}$ – размер неоднородности вдоль оси Ox

$l = 0,5 \text{ мм}$ – длина неоднородности

Таблица 1. Вид дифракционной картины в зависимости от положения экрана

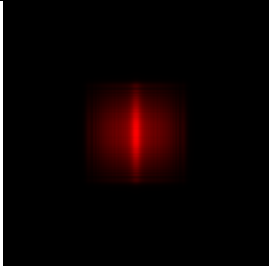
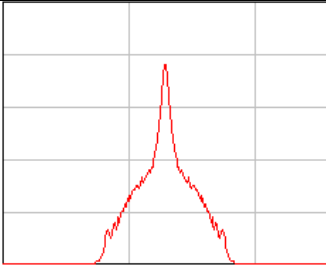
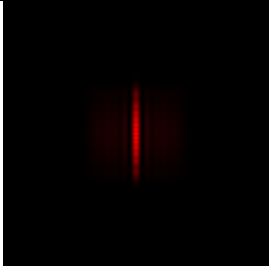
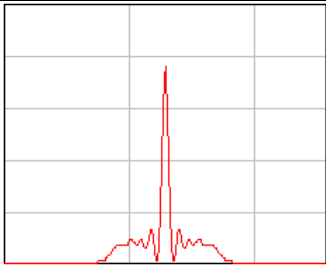
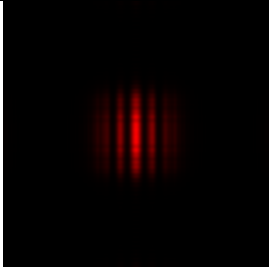
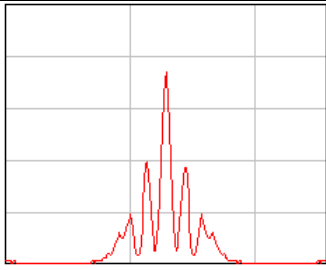
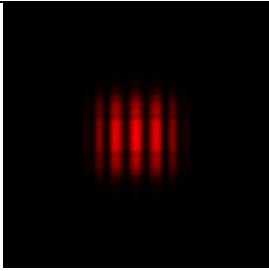
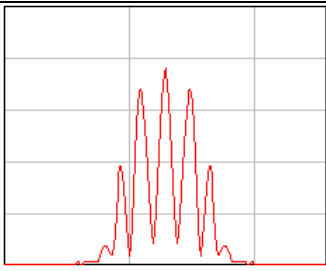
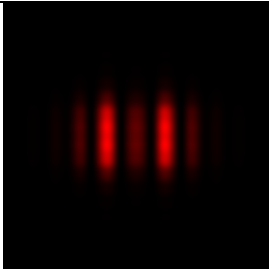
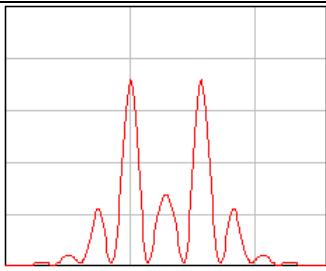
Расстояние до экрана	Изображение на экране	Распределение интенсивности	Значение волнового параметра
$z=100$ мм			0,503
$z=500$ мм			1,125
$z=1000$ мм			1,591
$z=2000$ мм			2,25
$z=3000$ мм			2,756
$z=5000$ мм			3,558

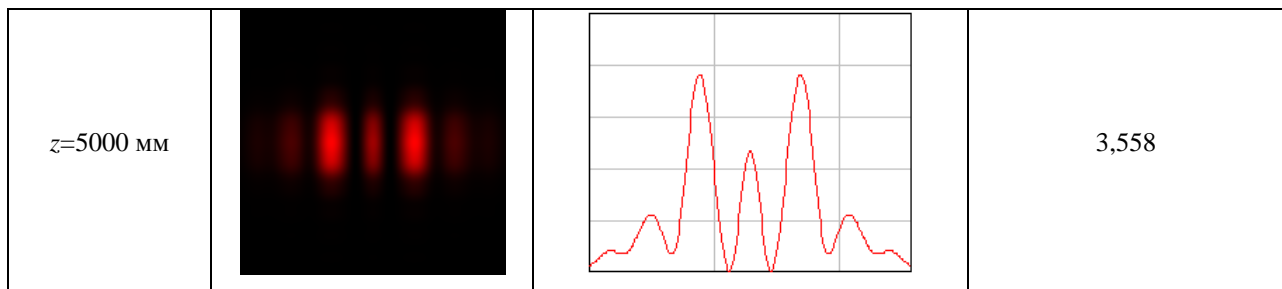
Закон изменения показателя преломления

$$n(x) = 1 + \delta n \exp\left[-\left(\frac{x}{ax}\right)^2\right]$$

Проведем моделирование для аналогичных исходных данных.

Таблица 2. Вид дифракционной картины в зависимости от положения экрана

Расстояние до экрана	Изображение на экране	Распределение интенсивности	Значение волнового параметра
$z=100$ мм			0,503
$z=500$ мм			1,125
$z=1000$ мм			1,591
$z=1500$ мм			1,949
$z=3000$ мм			2,756



Как следует из таблицы 1 при наличии минимума показателя преломления в центре неоднородности, зондирующее излучение отклоняется в сторону наибольших его значений, т.е. к краям неоднородности, образуя два симметричных максимума интенсивности. Таблица 2 демонстрирует обратную ситуацию, т.к. в этом случае излучение отклоняется к центру неоднородности, образуя центральный максимум, а затем расходится, образуя дополнительно боковые максимумы интенсивности.

Следующие таблицы 3-4 иллюстрируют дифракцию лазерной плоскости (плоско-структурированного лазерного излучения) на неоднородности второго типа, причем характерный наименьший (поперечный) размер пучка сравним с размером неоднородности или немного больше, что обеспечивает получение наиболее информативных изображений в зоне Фраунгофера.

Исходные данные

$$\lambda = 0,6328 \text{ мкм}$$

$$w_1 = 20 \text{ мм}$$

$$w_2 = 2 \text{ мм}$$

Закон изменения показателя преломления

$$n(x) = 1 + \delta n \exp \left[- \left(\frac{x}{alx} \right)^2 \right]$$

$$\delta n = 0,001;$$

$$alx = 0,5 \text{ мм};$$

$$l = 50 \text{ мм};$$

z = 60000 мм – расстояние до экрана.

Значение волнового параметра $p = 12,324$.

Таблица 3. Вид дифракционной картины в зависимости от размеров одномерного гауссова пучка

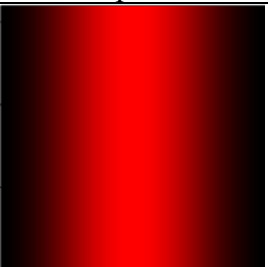
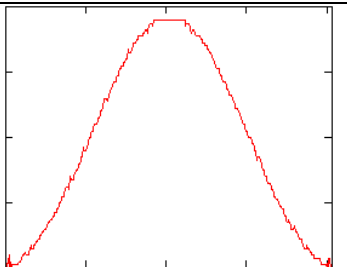
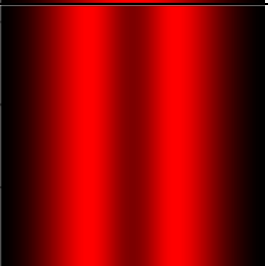
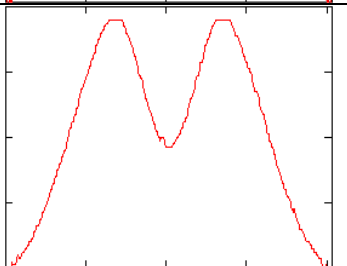
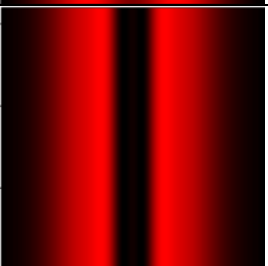
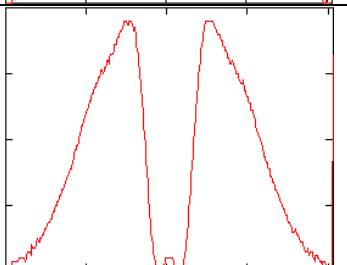
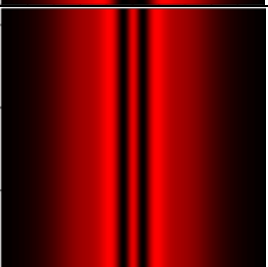
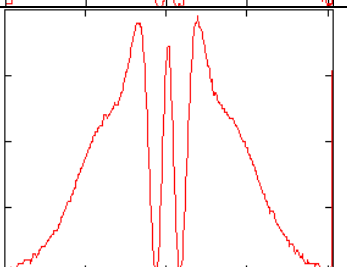
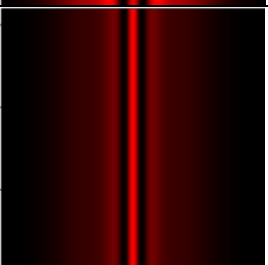
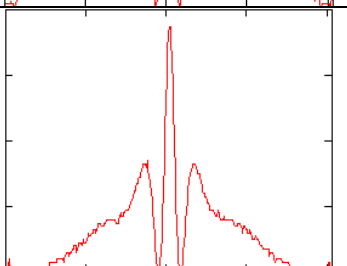
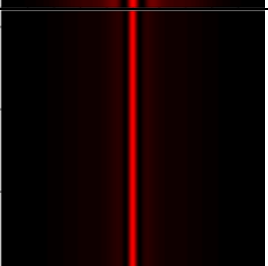
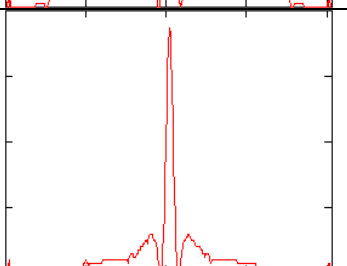
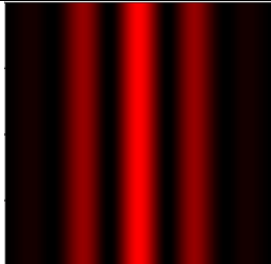
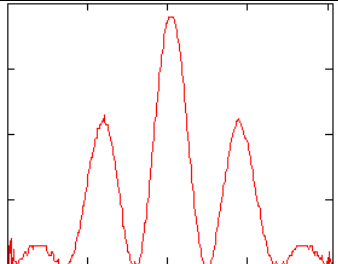
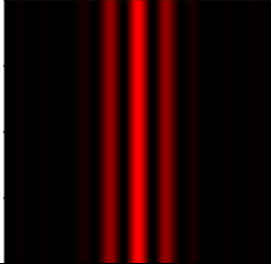
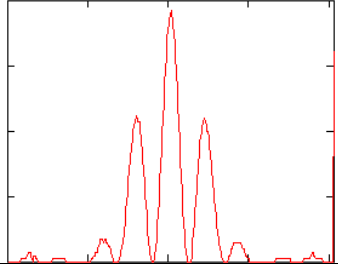
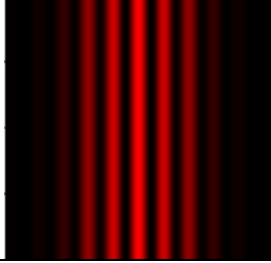
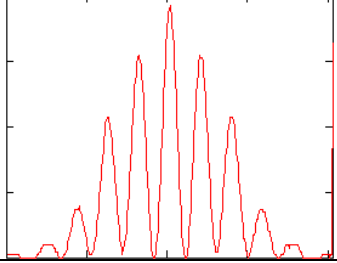
Ширина гауссова пучка	Изображение на экране	Распределение интенсивности
0,3 мм		
0,5 мм		
1 мм		
1,5 мм		
2 мм		
3 мм		

Таблица 4. Вид дифракционной картины при различных параметрах

Расчетные данные	Изображение на экране	Распределение интенсивности	Значение волнового параметра
$alx = 1 \text{ мм}$ $z = 60000 \text{ мм}$			6,162
$alx = 1 \text{ мм}$ $z = 300000 \text{ мм}$			13,778
$alx = 1,5 \text{ мм}$ $z = 300000 \text{ мм}$			9,185

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный алгоритм позволяет моделировать дифракционные изображения элементов структурированного излучения в зоне Френеля и Фраунгофера для слоистых неоднородностей среды. Показано, что наиболее информативные дифракционные изображения получаются в случае, когда размер пучка сравним с размером неоднородности. В этом случае, в отличие от зоны ГО, когда при рассмотрении рефракции используются пучки с размером, меньшим, чем размер неоднородности, принципиальным является использование волновых методов. Смоделированные изображения могут быть использованы для качественной и количественной диагностики прозрачных градиентных неоднородностей, в том числе в жидких и газообразных средах, стратифицированных по плотности, температуре и давлению, в частности для диагностики акустического поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евтихиева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С.. Лазерная рефрактография. – М.: Изд-во Физматлит, 2008 – 173 с.
2. 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.
(Кузьмичева М.С., Расковская И.Л. Компьютерная визуализация рефрактограмм структурированного лазерного излучения // 15 Международный симпозиум по визуализации потоков [Электронный ресурс]: труды конференции. – Электрон. дан. – Беларусь, Минск, 2012. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Доклад № 095, 11 с.)

M.S. Kuzmicheva, I.L. Raskovskaya

National Research University «MPEI», Russia,

111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: m_s_h@mail.ru

DIFFRACTION IMAGES OF THE PHASE OBJECTS IN THE STRUCTURED LASER RADIATION

The technique of modeling of diffraction patterns obtained by probing phase objects with structured laser radiation was developed. Diffraction images for Fresnel's and Fraunhofer's region for layered gradient inhomogeneous were obtained using different types of laser beams. Modeled images can be used for qualitative and quantitative diagnostic transparent gradient inhomogeneous, including liquid and gas media, stratified density, temperature, pressure and acoustic field.

WAVE METHODS, INHOMOGENEOUS MEDIUM, DIFFRACTION, STRUCTURED LASER RADIATION