

УДК 535.31: 681.7.069.24

М.В. Есин, И.Л. Расковская, Б.С. Ринкевичюс, А.В. Толкачев

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

ЛАЗЕРНАЯ 3D-РЕФРАКТОГРАФИЯ

АННОТАЦИЯ

Представлен новый метод визуализации и диагностики прозрачных градиентных неоднородностей – лазерная 3D-рефрактография. Данный метод основан на рефракции структурированного лазерного излучения (СЛИ) в прозрачной неоднородной среде, цифровой регистрации и компьютерной обработке двумерных (в прошедшем излучении) и трехмерных (в рассеянном излучении) рефракционных картин. Приведены результаты моделирования трехмерных рефракционных картин (3D-рефрактограмм) для типичных неоднородностей. Представлена схема установки для наблюдения 3D-рефрактограмм в рассеянном излучении. Изложена методика восстановления 3D-рефрактограмм по экспериментальным двумерным рефракционным картинам СЛИ.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наряду с вновь созданными лазерными методами получения информации об исследуемой среде находят дальнейшее развитие и классические рефракционные методы, что обусловлено прежде всего широким использованием лазерной техники и появлением новых цифровых методов обработки изображений. Лазерная техника активно используется в последние годы для диагностики полей акустического давления, температур, плотности, скоростей потоков в прозрачных средах [1-5]. Преимущества оптических методов исследований известны. Прежде всего, такие измерения не возмущают исследуемых полей, поскольку поглощаемая исследуемой средой энергия света, как правило, чрезвычайно мала. Во-вторых, оптические методы практически безынерционны, что позволяет проводить диагностику быстропротекающих процессов. Возможность дистанционных измерений является дополнительным преимуществом оптических лазерных методов.

Рефракционные лазерные методы, как правило, непосредственно используются для определения поля показателя преломления, которое в дальнейшем может быть пересчитано в поле взаимосвязанной с ним другой физической величины.

В [1,4-8] для исследования прозрачных градиентных неоднородностей применяется новый метод – лазерная рефрактография (ЛР). В представленной работе акцент сделан на методике моделирования и экспериментального получения трехмерных рефракционных изображений СЛИ – 3D-рефрактограмм.

ПРИНЦИПЫ ЛАЗЕРНОЙ РЕФРАКТОГРАФИИ

Лазерная рефрактография является методом лазерной диагностики оптически неоднородных сред, основанным на зондировании среды структурированным лазерным излучением.

ем, цифровой регистрации рефракционной картины (рефрактограммы) и ее компьютерной обработке с целью восстановления параметров среды [1].

В лазерной рефрактографии используется структурированное лазерное излучение, формируемое с помощью специальных оптических элементов непосредственно на выходе источника излучения. Такой способ формирования СЛИ дает возможность сохранить его высокую когерентность и обеспечить малую расходимость пучков, что позволяет использовать для описания СЛИ представления геометрической оптики (ГО) и оптики лазерных пучков. В рамках ГО модель СЛИ может быть представлена семействами лучей, образующих поверхности в виде дискретного набора плоскостей, вложенных цилиндров, конусов и др. По виду поверхности проводится классификация СЛИ: это линейно, плоско и цилиндрически (конически) структурированное лазерное излучение.

СЛИ, прошедшее через неоднородность проецируется на экран в плоскости наблюдения, образуя так называемую 2D-рефрактограмму (рис. 1а). Высокая интенсивность СЛИ позволяет наблюдение в рассеянном излучении 3D-рефрактограмм, т.е. поверхностей, образованных рефрагирующими геометрооптическими лучами (рис. 1б).

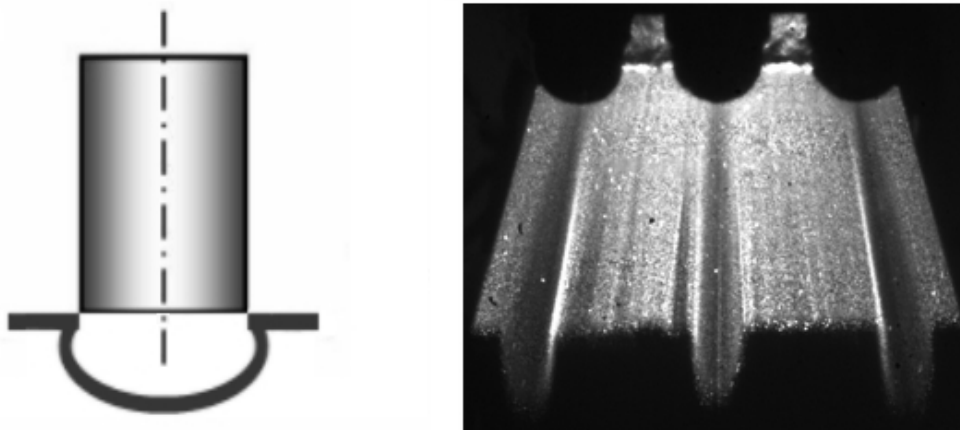


Рис.1. а) Двумерная и б) трехмерная рефрактограммы на основе плоского пучка, прошедшего в пограничном температурном слое под нагретым цилиндром в воде (в случае а) и под тремя цилиндрами (в случае б)

Исходная структура лазерного пучка, описываемая рядом информационных параметров, изменяется при его рефракции в оптически неоднородной среде, что позволяет на основе полученных экспериментально рефрактограмм осуществлять количественную диагностику и визуализацию неоднородности.

Элементарной базой преобразования лазерного пучка в структурированный являются дифракционные оптические элементы (ДОЭ), которые представляют собой пропускающую или отражающую пластинку с тонким фазовым микрорельефом, рассчитанным в рамках теории дифракции [9]. Развитие микроэлектроники и лазерной техники сделало практически реализуемой задачу создания ДОЭ со сложным профилем зон и уникальными характеристиками, не достижимыми в рамках традиционной оптики. Наиболее перспективными для использования в ЛР являются ДОЭ, фокусирующие лазерное излучение в тонкие линии или малые области пространства, что соответствует структурированному пучку с модуляцией интенсивности (рис.2). Элементы структуры пучка непосредственно визуализируются в его сечении и рефрактограммы имеют контурный графический характер (например, рис.1а), что собственно и послужило причиной появления термина «рефрактография».

Использование в лазерной рефрактографии пучков с такой структурой существенным образом расширяет возможности традиционных лазерных градиентных методов.

Во-первых, надлежащий выбор конфигурации элементов структуры пучка позволяет *адаптировать* измерения для определенного типа неоднородностей, например, исследовать

пограничные микро слои у поверхностей разной формы.

Во-вторых, множественность элементов структуры пучка и их пространственная протяженность позволяет проводить измерения *одновременно* в избранных областях исследуемой среды, что существенно при диагностике динамических неоднородностей, например, нестационарных конвективных течений.

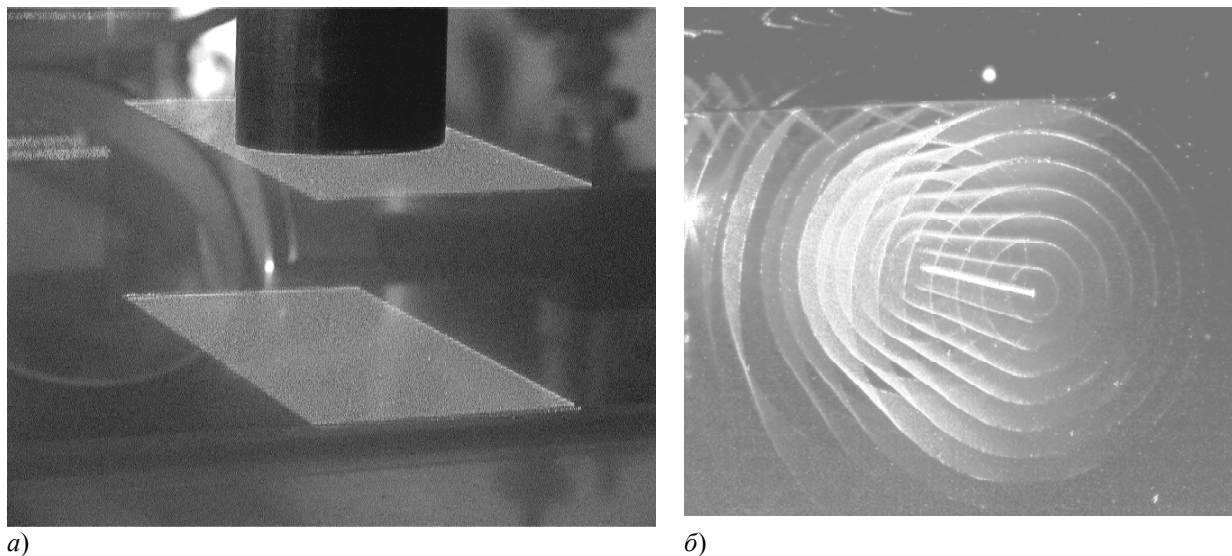


Рис.2. Структурированное лазерное излучение: а) – плоско структурированные пучки; б) – конически структурированный пучок

В-третьих, основным информативным параметром при количественной диагностике является смещение элемента структуры пучка из-за рефракции в неоднородности. Измерение этого смещения оказывается возможным благодаря *идентификации* элементов, так как дискретный и регулярный характер структуры пучка позволяет определять, какому элементу структуры в исходном пучке соответствует тот или иной элемент рефрактограммы.

Перечисленные особенности ЛР позволяют говорить о том, что этот метод дает возможность не только визуализировать оптически неоднородные среды, но и осуществлять их количественную диагностику.

ЛАЗЕРНАЯ 3D-РЕФРАКТОГРАФИЯ НА ОСНОВЕ СЛИ

Как было сказано выше, высокая интенсивность СЛИ позволяет наблюдение в рассеянном излучении 3D-рефрактограмм – поверхностей, образованных рефрагирующими геометрооптическими лучами.

3D-рефрактограмма представляет собой изображение трехмерной поверхности, образованной рефрагирующими в среде лучами от источника СЛИ. Она может быть получена на основе совокупности экспериментальных или расчетных двумерных рефрактограмм в разных сечениях с помощью специальных методов обработки [1], либо экспериментально визуализирована в рассеянном излучении (рис. 1б, рис. 2). Использование цифровых методов регистрации и обработки рефрактограмм позволяет решать обратную задачу восстановления профиля неоднородности и проводить ее количественную диагностику одновременно с визуализацией.

На рис. 3 показана структурная схема лазерной 3D-рефрактографической системы. Излучение лазера 1 преобразуется оптической системой 2 в СЛИ 3 и, проходя через неоднородную среду 4, образует трехмерные рефрактограммы 5, наблюдаемые в рассеянном свете. Изображение 3D-рефрактограмм регистрируется камерой 6 и обрабатывается компьютером 7 с помощью специального программного обеспечения 8. 3D-рефрактограммы позволяют получить дополнительную информацию об исследуемой среде по сравнению с классически-

ми двумерными рефракционными картинками, так как фактически они позволяют визуализировать траектории семейства геометрооптических лучей, образующих СЛИ. Последующая специальная компьютерная обработка и оцифровка этих траекторий позволяет проводить количественную диагностику градиентной неоднородности в среде, послужившей причиной рефракции этих лучей.

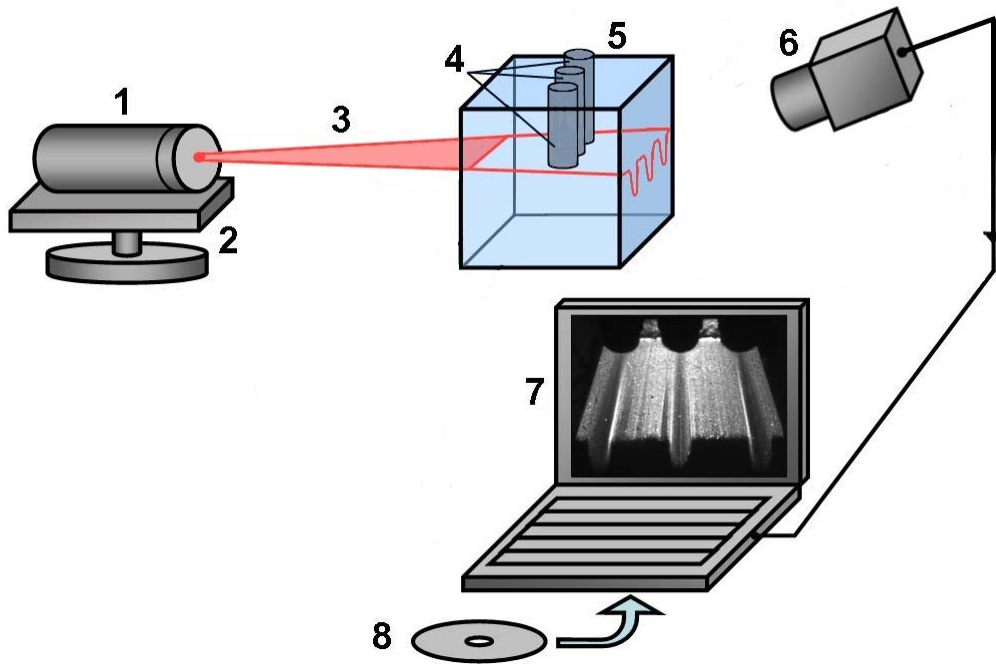


Рис.3. Структурная схема лазерной 3D-рефрактографической системы: 1- лазер с ДОО, 2- юстировочный столик, 3 – СЛИ, 4 – нагретые цилиндры, 5 – кювета с холодной водой, 6 – ПЗС фотокамера, 7 – ПК, 8 – специальное программное обеспечение

ГЕОМЕТРООПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И РЕФРАКЦИЯ СЛИ

Основные типы СЛИ можно классифицировать по форме пространственных геометрических фигур, образованных семействами лучей, соответствующих источникам линейно-структурированного, плоско-структурированного, цилиндрически или конусно-структурированного лазерного излучения. На рис. 4 показаны сечения основных типов пучков в рамках геометрооптической модели [6], где ρ , φ – координаты полярной системы, совмещенной с декартовой системой координат; i и j – номера элементов структуры пучка.

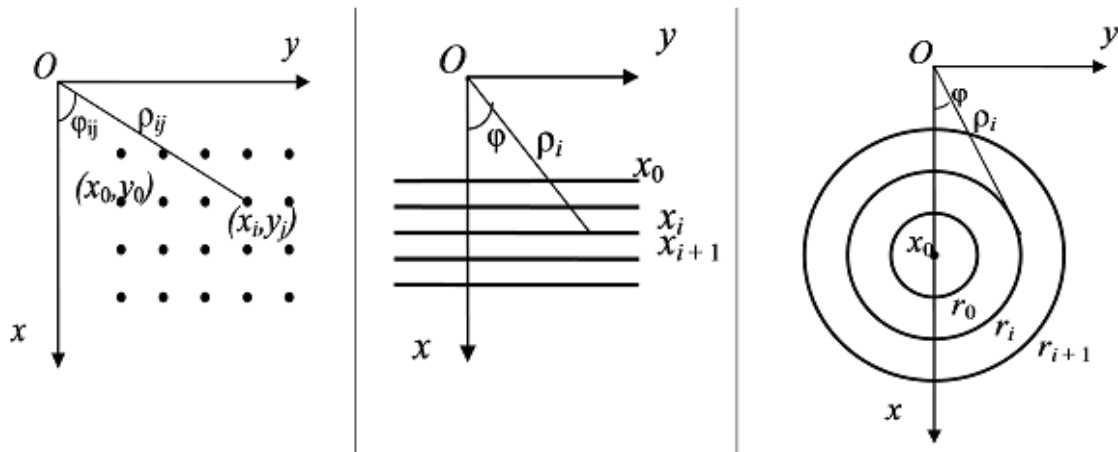


Рис.4. Основные виды СЛИ: а) линейное б) плоское, в) цилиндрическое

Математические модели 3D-рефрактограмм могут быть получены аналитически для традиционных случаев сферически-слоистой и плоско-слоистой неоднородностей.

Пусть, например, плоско-структурированный пучок распространяется вдоль оси OZ в сферически неоднородной среде с показателем преломления $n(r)$, где r – расстояние от центра неоднородности. Для определенности можно считать, что неоднородность представляет собой температурный пограничный слой у нагретого или охлажденного шара с радиусом R . В отсутствие неоднородности (на достаточном удалении от шара) показатель преломления равен n_0 . После прохождения через неоднородную среду рефрагированное СЛИ попадает на экран (рис. 5).

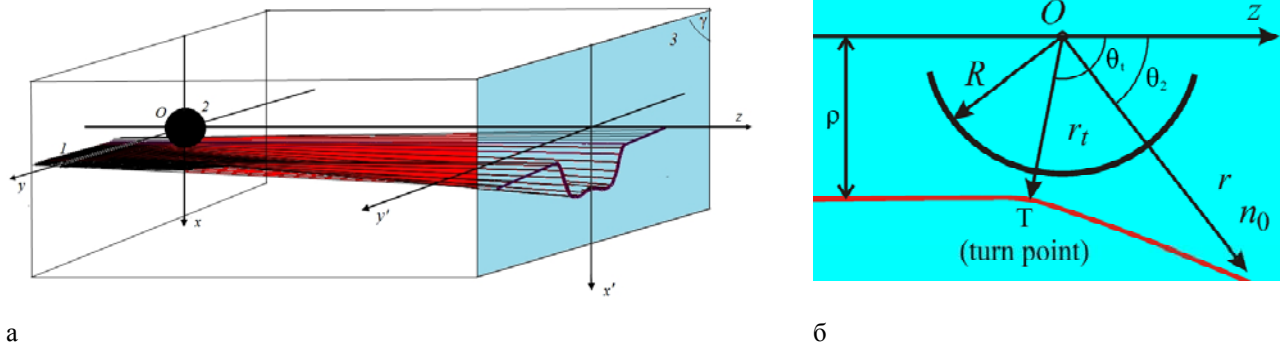


Рис. 5. Рефракция плоского пучка в сферически неоднородной среде:
а) 1 – плоский пучок; 2 – нагретый шар в жидкости; 3 – экран
б) геометрические параметры задачи

Связь между декартовыми и сферическими координатами задается соотношениями

$$\begin{aligned} x &= r \sin \theta \cos \varphi, \\ y &= r \sin \theta \sin \varphi, \\ z &= r \cos \theta. \end{aligned} \quad (1)$$

При $z = z_0$ уравнение плоского пучка: $x = x_0$. Прицельный параметр луча [10], принадлежащего пучку, определяется параметром φ и равен:

$$\rho_i(\varphi) = \frac{x_i}{\cos \varphi} \quad (2)$$

При сферической симметрии этот луч остается в плоскости, задаваемой параметром φ , и его траектория определяется зависимостью $\theta_i(r, \varphi)$. Траектории лучей рассчитываются на основе соотношений, описывающих распространение луча в сферически слоистой неоднородности [10].

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

$$r_{0i}(\varphi) = \sqrt{\rho_i^2(\varphi) + z_0^2}. \quad (3)$$

Угол θ_0 характеризует направление луча при входе в среду:

$$\theta_0(\varphi) = \frac{\dot{r}_0}{r_0} + \arctg \frac{z_0}{\dot{r}_i(\varphi)}. \quad (4)$$

Угол $\theta = \theta_i$, соответствующий радиальной координате $r_{ti}(\varphi)$ точки поворота:

$$\hat{r}_i(\varphi) = \hat{r}_i(\varphi) + \int_{r_{0i}(\varphi)}^{r_i(\varphi)} \frac{n_0 \hat{r}_i(\varphi) dr}{r \sqrt{n^2(r)r^2 - n_0^2 \hat{r}_i^2(\varphi)}}, \quad (5)$$

где $r_{0i}(\varphi)$ определяется из условия $r_{0i}(\varphi)n(r_{0i}(\varphi)) = n_0 \rho_i(\varphi)$.

Уравнения луча до точки поворота и после точки поворота имеют вид:

$$\hat{r}_i(r, \varphi) = \hat{r}_i(\varphi) + \int_{r_{0i}(\varphi)}^r \frac{n_0 \hat{r}_i(\varphi) dr}{r \sqrt{n^2(r)r^2 - n_0^2 \hat{r}_i^2(\varphi)}}, \quad (6)$$

$$\hat{r}_i(r, \varphi) = \hat{r}_i(\varphi) + \int_r^{r_i(\varphi)} \frac{n_0 \hat{r}_i(\varphi) dr}{r \sqrt{n^2(r)r^2 - n_0^2 \hat{r}_i^2(\varphi)}}. \quad (7)$$

Формулы (6, 7) составляют основу для расчета рефракции структурированного излучения в радиальной неоднородности. Угол φ является параметром, задающим луч в пучке, что позволяет описать все семейство лучей, принадлежащих пучку. На экране, расположенном на дистанции z_1 , радиальная координата $r_i(z_1, \varphi)$ определяется из уравнения

$$r_i \cos \hat{r}_i(r_i, \varphi) = z_1, \quad (8)$$

а координаты проекции пучка на экране

$$\begin{aligned} x_i(z_1, \varphi) &= r_i(z_1, \varphi) \sin \hat{r}_i(r_i(z_1, \varphi), \varphi) \cos \varphi, \\ y_i(z_1, \varphi) &= r_i(z_1, \varphi) \sin \hat{r}_i(r_i(z_1, \varphi), \varphi) \sin \varphi. \end{aligned} \quad (9)$$

Соотношения (9) определяют структуру наблюдаемой на экране 2D-рефрактограммы для заданной сферической неоднородности.

Математическая модель 3D-рефрактограммы, наблюдаемой в рассеянном свете, представляет собой поверхность, образованную семейством лучей (6-7) при непрерывном изменении параметра φ .

В плоско-слоистой неоднородности (рис.6) траектория луча может быть описана соотношением [1]:

$$z(x) = \int_{x_0}^x \frac{n(x_0) \sin(\hat{r}_0)}{(n(x) - n(x_0)^2 \sin^2(\hat{r}_0))^{1/2}} dx, \quad (10)$$

где θ_0 – угол входа луча в неоднородность, x_0 – координата входа луча в неоднородность, $n(x)$ – показатель преломления в точке x .

В дальнейшем при моделировании трехмерных рефрактограмм будем рассматривать случай, когда $\theta_0 = 90^\circ$, а сечение плоского пучка с одним структурным элементом $i=0$ на входе в неоднородную среду, которое представляет собой отрезок прямой (в геометрикооптическом приближении считаем пучок бесконечно тонким), лежит в плоскости XOY . В общем случае сечение может составлять некоторый угол α с осью OY . При этом $x_0 = x_0(y)$, т.е. y является параметром семейства лучей, принадлежащих данному пучку, и луч изначально принадлежащий плоскости, проходящей через точку с координатой y , остается в этой плоскости при распространении через неоднородность. Поэтому поверхность трехмерной рефрактограммы будет задаваться соотношением

$$z(x, y) = \int_{x_0}^x \frac{n(x_0(y))}{(n(x) - n(x_0(y)))^{1/2}} dx. \quad (11)$$

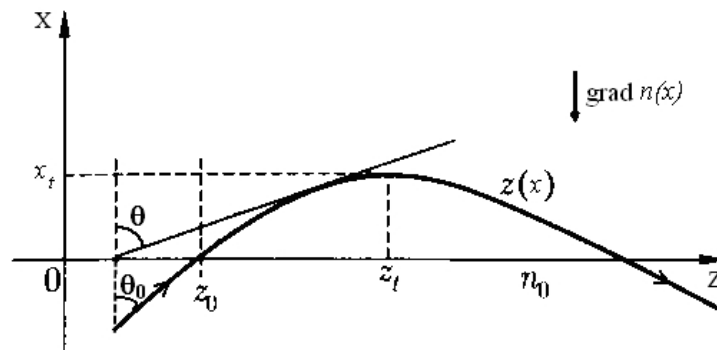


Рис. 6. Пример траектории луча в плоскостой среде

3D-РЕФРАКТОГРАММЫ СЛИ В СФЕРИЧЕСКОЙ И ПЛОСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТЯХ

На рис.7 показаны 3D-рефрактограммы плоского лазерного пучка, прошедшего, соответственно, через сферический слой с положительным градиентом (показатель преломления увеличивается при увеличении радиальной координаты) и сферический слой с отрицательным градиентом показателя преломления.

Типичной особенностью сферической неоднородности с отрицательным градиентом является петлеобразная рефрактограмма. Формирование петли связано с наличием осевой каустики [10], которая может быть визуализирована экспериментально [1].

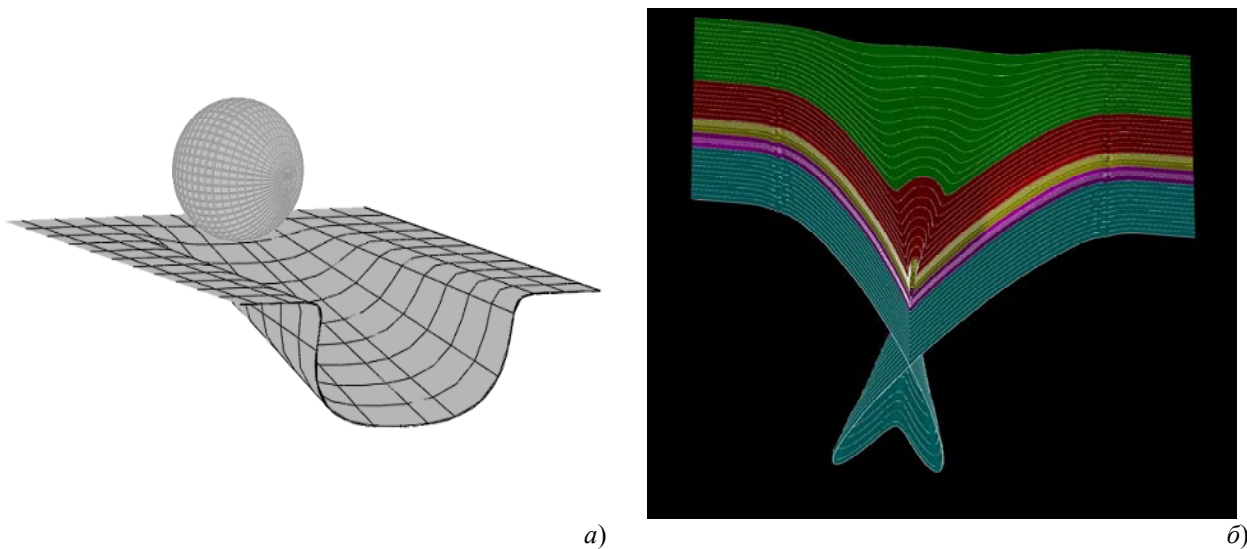


Рис. 7. Модели 3D-рефрактограмм лазерной плоскости, распространяющейся вблизи горячего (а) и холодного (б) шара

На рис. 8 показаны типичные 3D-рефрактограммы цилиндрического СЛИ для сферического слоя с положительным градиентом, образованным температурной неоднородностью в пограничном слое шара, в соответствии с моделью, описанной в [1]. На рис.8а изображена рефрактограмма, наблюдаемая в направлении, встречном распространению пучка, которая фактически соответствует двумерному изображению, наблюдаемому на экране в прошедшем

излучении. На рис. 9б,в показана та же рефрактограмма, что и на 9а, но в других ракурсах, на рис. 9г изображен увеличенный элемент этой рефрактограммы.

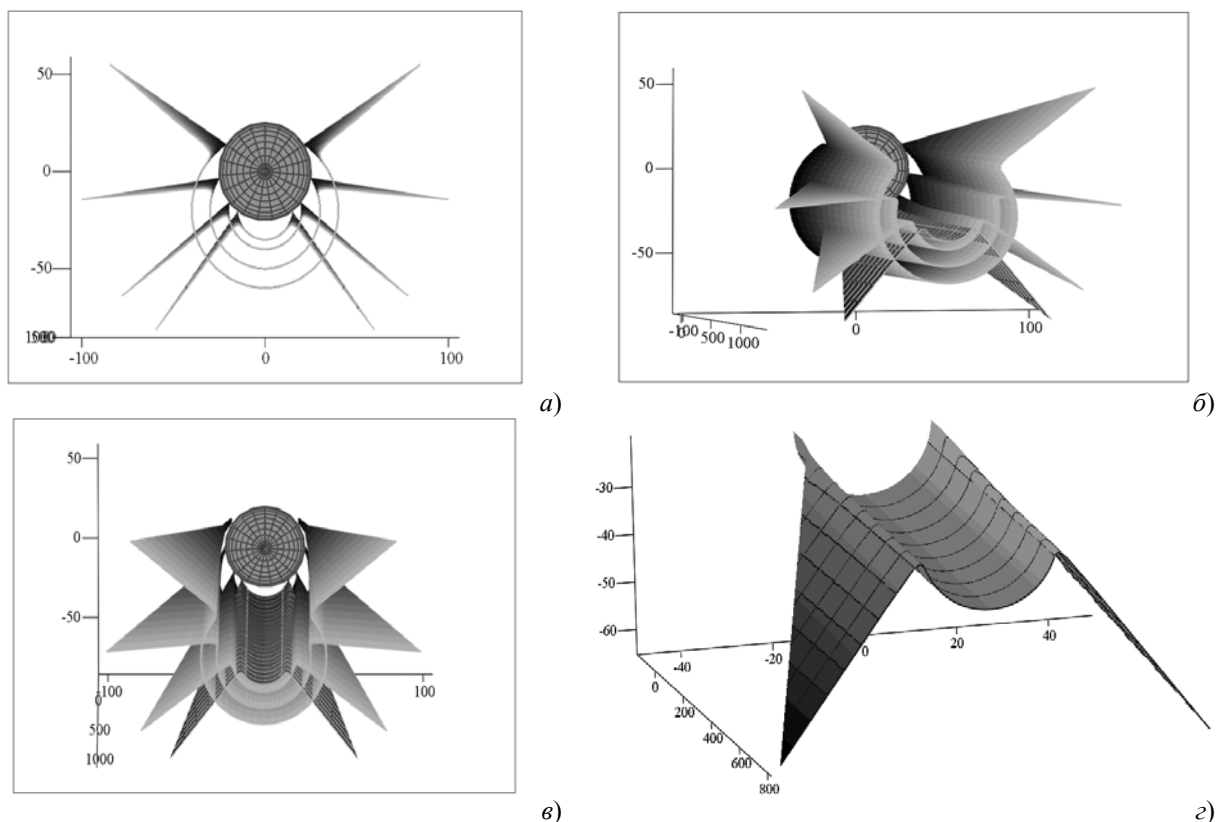


Рис. 8. Модели 3D-рефрактограмм цилиндрического СЛИ в воде под горячим шаром

Для рефрактограмм, изображенных на рис. 7-8 характерно то, что они моделировались для ситуации, когда СЛИ уже прошло область градиентной неоднородности, поэтому образующими рефрактограмм являются прямые линии, представляющие собой семейство геоетрооптических лучей, образующих исходную ЛП или цилиндрический пучок, и отклонившихся в неоднородности на разные углы в плоскости φ . В такой ситуации возможно однозначное восстановление трехмерных рефрактограмм, по экспериментальным 2D рефрактограммам, рассчитанным или полученным экспериментально в разных сечениях.

Наиболее актуально использование трехмерных рефрактограмм в ситуации, когда они моделируются или визуализируются экспериментально непосредственно в объеме неоднородности. Далее приведены 3D- рефрактограммы плоского и цилиндрического СЛИ (рис.9-10) в плоско-слоистой среде, изменение показателя преломления которой моделируется на основе формулы

$$n(x) = \frac{n_1 + n_2}{2} + \frac{n_1 - n_2}{2} \tanh\left(\frac{x - x_s}{h}\right), \quad (12)$$

где n_1 – показатель преломления верхней среды, n_2 – показатель преломления более плотной нижней среды, h - характерная полуширина слоя, x_s - положение центра слоя, $n_1 = 0,1332$, $n_2 = 0,1335$, $h = 5$ мм, $x_s = 20$ мм. Такая зависимость показателя преломления характерно для солестратифицированных сред [5] и рефрактограммы используются для определения распределения солёности в слоях жидкости. Заметим, что восстановление зависимостей показателя преломления в среде для неоднородностей, допускающих использование сферических и плоских моделей, возможно и на основе 2D-рефрактограмм [1,6], но при более сложной струк-

туре неоднородности для локального определения показателя преломления требуется непосредственная визуализация СЛИ в ее объеме, т. е. использование 3D-рефрактограмм.

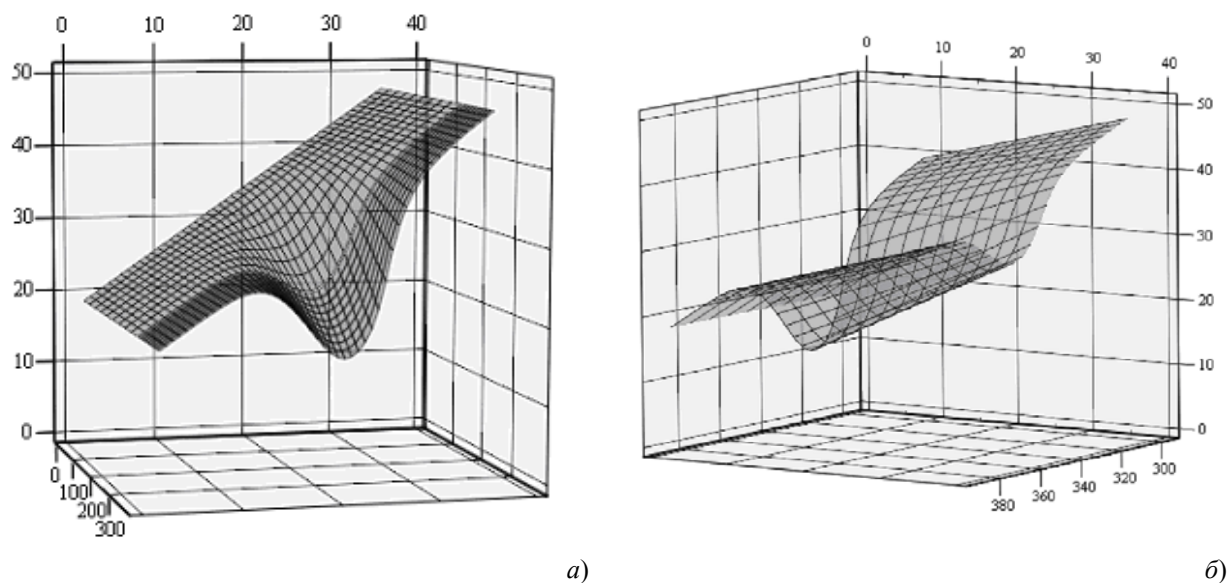


Рис.9. 3D-рефрактограммы плоского пучка в плоском неоднородном слое

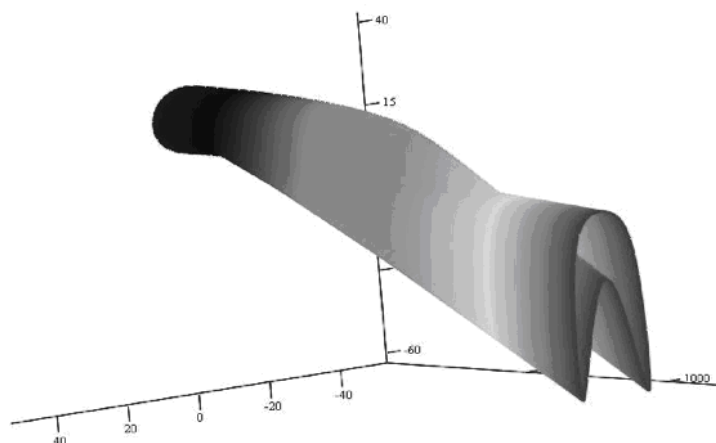


Рис.10. 3D-рефрактограмма цилиндрического пучка в плоском неоднородном слое

Рис. 11 иллюстрирует одну из ситуаций, в которой использование 3D-рефрактограмм дает новые возможности диагностики сред: это определение местоположения локальных неоднородностей. Например, при исследовании нестационарной конвекции в пограничном слое у нагретого тела, актуальным является определение момента возникновения и местоположения так называемых «термиков» - локальных восходящих конвективных потоков у поверхности тела. На рис. 11 показана схема определения местоположения локальных неоднородностей с помощью двух скрещенных плоских пучков.

МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ 3D-РЕФРАКТОГРАММ ПО ДВУМЕРНЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

Метод восстановления трехмерных изображений был ранее описан в [12]. В этой работе он применен для восстановления трехмерной поверхности рефрагировавшего пучка по набору изображений двумерных сечений. Метод условно можно разбить на три этапа.

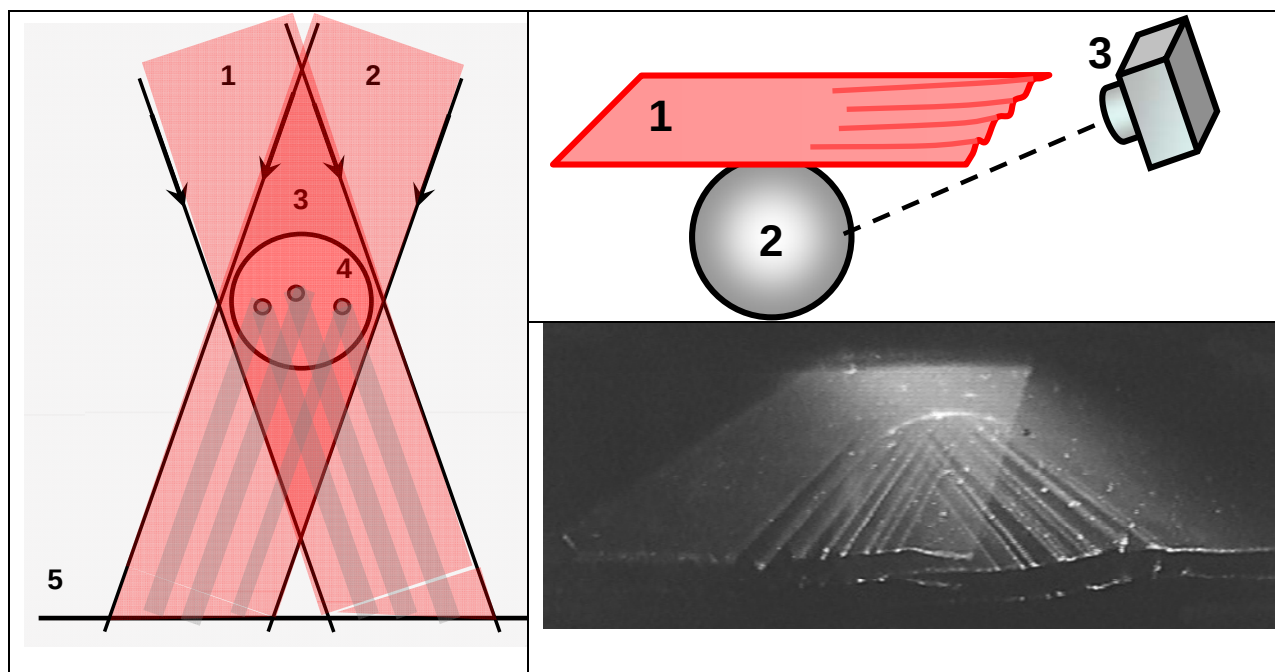


Рис. 11. Определение местоположения локальных неоднородностей с помощью двух скрещенных плоских пучков.

На первом этапе производится подготовка изображений к векторизации. Векторизация необходима для уменьшения искажений при построении трехмерного тела и операциях над ним.

Базовые алгоритмы цифровой фильтрации, используемые на данном этапе, хорошо известны, однако, подбор параметров фильтров и последовательность их применения остается актуальной задачей [11]. В последовательности используются комбинации медианных и линейных фильтров, позволяющие удалить шумы и фоновые засветки. После применения этих фильтров изображение сглаживается и контрастируется, что позволяет подчеркнуть нечеткую границу светового пучка на экране. Далее, при помощи оператора Кани [12], выделяются контуры изображения. Порядок работы данного оператора, ставшего индустриальным стандартом в оконтуривании изображений, следующий:

- производится поиск максимальных значений частной производной функции изображения I в перпендикулярном контуру направлении и сглаживание сигнала вдоль контура;
- производится обнуление немаксимальных значений полученного градиента;
- найденные контуры подвергаются пороговой фильтрации для удаления «малозначительных».

На втором этапе реконструкции производится векторизация растровых контуров. Для этого могут использоваться различные алгоритмы и геометрические примитивы. Реализованный алгоритм основан на методе наименьших квадратов. Растровое изображение разбивается на сегменты, в каждом из которых производится аппроксимация контуров кусочно-линейной функцией. Далее полученные в разных сегментах отрезки замыкаются. Точки переломов кусочно-линейной функции используются в качестве опорных для окончательно аппроксимирующего контур сплайна. Применение сплайнов для описания контуров упрощает дальнейшее построение поверхности, так как позволяет использовать параметрическое описание координат и задать для каждого контура одинаковое число точек, используемых для «натягивания» поверхности, которое производится на третьем этапе.

Построение поверхности может производиться как с использованием триангуляции, так и сплайном. Построение триангуляционной поверхности требует меньших вычислительных ресурсов, однако вносит дополнительные погрешности. Построенные поверхности могут

импортироваться в популярные CAD приложения (MicroStation или AutoCAD) для качественной визуализации, проведения измерений и дальнейшего изучения.

Описанный метод обработки и построения трехмерных картин рефракции СЛИ реализован в специализированном программном обеспечении VizC. Возможна автоматическая и полуавтоматическая обработка экспериментальных изображений. Хранение данных в программе реализовано с использованием SQL базы данных. Визуализация производится при помощи стандартной мультиплатформенной графической библиотеки OpenGL. Такая реализация программного обеспечения позволяет перенести его на любую программно-аппаратную платформу без значительных изменений.

На рис. 12 представлены двумерные рефрактограммы, зарегистрированные на экране в разные моменты времени. Плоский лазерный пучок проходил под нагретым шаром в воде на расстоянии 0,075 – 0,1 мм от его нижней точки. Толщина пучка под шаром составляла 0.1 мм, ширина 51 мм. По мере остывания шара, форма пучка возвращалась к исходной.

По полному временному ряду возможно построение трехмерной пространственно-временной поверхности рефрагировавшего плоского пучка. Это изображение иллюстрирует изменение показателя преломления в пограничном слое (температуры в пограничном слое) во времени. На рис. 13 представлено трехмерное изображение, восстановленное по 80 кадрам последовательности.

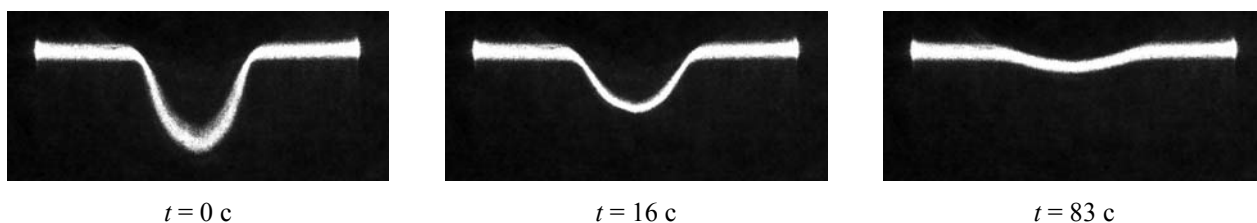


Рис. 12. Последовательность кадров 2D-рефрактограмм в разные моменты времени

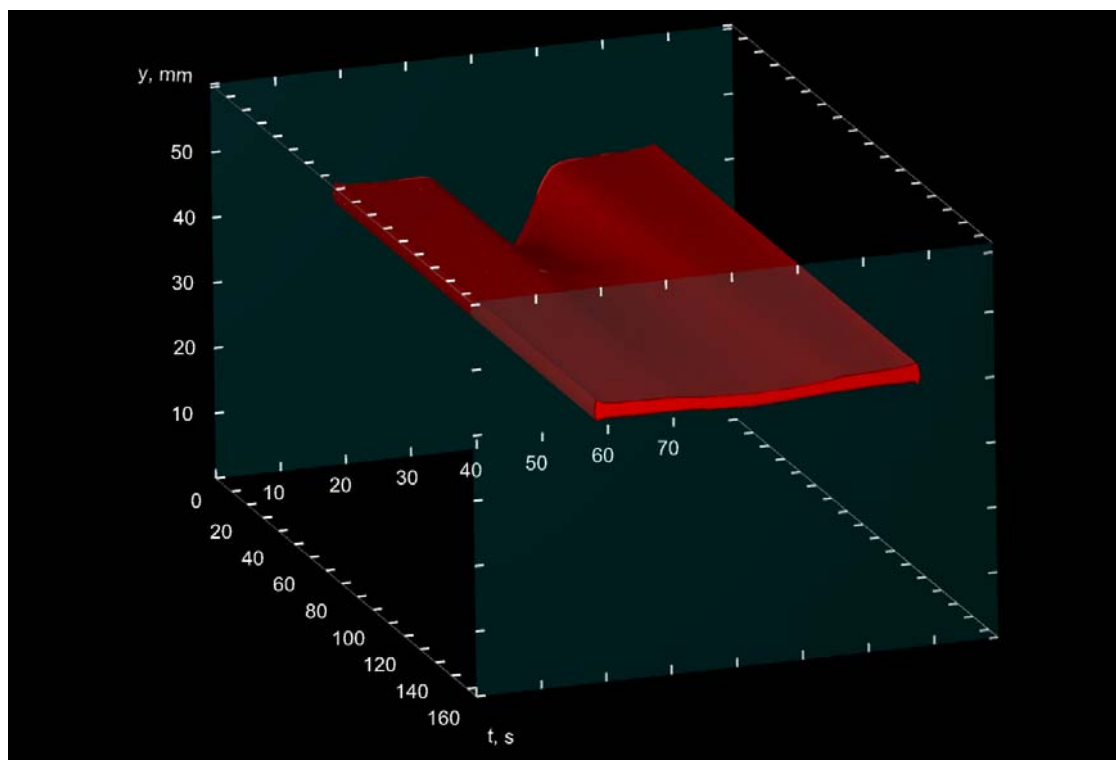


Рис.13. Пространственно-временная 3D-рефрактограмма, реконструированная по 80 кадрам

На рис.14а представлена 3D-рефрактограмма, реконструированная по экспериментальным двумерным рефрактограммам для случая плоскостойкой неоднородности в стратифи-

цированной жидкости, в соответствии с условиями эксперимента, описанного в [5]. Сечения, в которых наблюдались двумерные рефрактограммы взяты с шагом 10 см, первое сечение расположено на расстоянии 8 см от границы неоднородности.

Следует заметить, что использование экспериментальных рефрактограмм позволяет восстановить 3D-рефрактограмму с учетом конечной толщины пучка, которая зависит как от его дифракционной расходимости, так и от рефракционных эффектов.

На рис.14б представлена 3D-рефрактограмма, реконструированная по той же методике, но по расчетным двумерным рефрактограммам, полученным для экспоненциальной зависимости показателя преломления в сферическом слое с отрицательным градиентом показателя преломления [1]. В данном случае конечная толщина пучка не учитывается, т.к. расчетные рефрактограммы получены в приближении геометрической оптики.

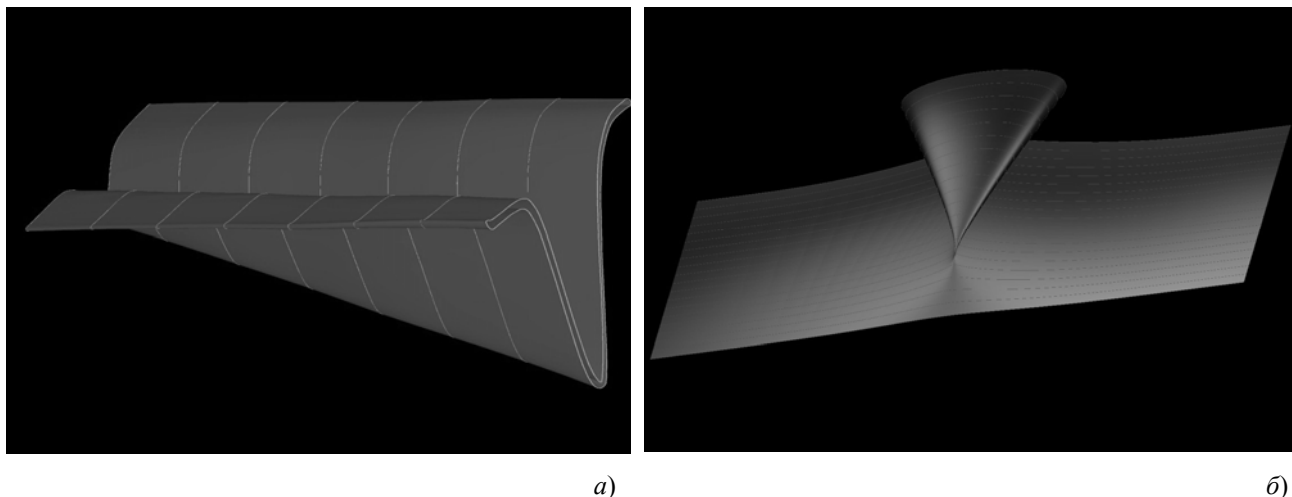


Рис. 14. 3D-рефрактограммы, реконструированные по двумерным сечениям а) экспериментальным, б) расчетным

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование СЛИ в лазерной рефрактографии расширяет возможности рефракционных методов, позволяя адаптировать тип зондирующего пучка к структуре неоднородности и обеспечивая одновременность измерений во всей исследуемой области. Однако наиболее существенной особенностью ЛР является возможность количественной диагностики физических процессов в среде, приводящих к изменению ее показателя преломления [2]. Методика получения информации о характеристиках указанных процессов получает дальнейшее развитие при использовании 3D-рефрактографии, которая позволяет визуализировать структуру неоднородности не только в прошедшем излучении, но и непосредственно в исследуемом объеме. Моделирование или наблюдение 3D-рефрактограмм в рассеянном свете позволяет визуализировать поверхности, образованные семействами геометрикооптических лучей СЛИ. Форма этих поверхностей, наличие каустик и их тип несут дополнительную информацию о структуре неоднородности. Количественная информация о значениях показателя преломления в исследуемой области может быть получена при регистрации в рассеянном свете и оцифровке траекторий геометрикооптических лучей. Методика реконструкции 3D-рефрактограмм позволяет на основе совокупности двумерных изображений в прошедшем излучении восстановить соответствующие лучевые поверхности.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ грант 10-08-0936а и Минобрнауки РФ (проект 2010-1.2.2-121-018-011).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евтихиева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С. Лазерная рефрактография. – М.: Физматлит, 2008, 176 с.
2. Ринкевичюс Б.С. Лазерная диагностика потоков. М.: Издательство МЭИ, 1990. 287 с.
3. Расковская И.Л. Распространение лазерного пучка в среде с акустической волной // Радиотехника и электроника. –2004, №11.–С.1382-1389.
4. Пудовиков Д.Е., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В. Диагностика конвективных процессов в пограничном слое жидкости методом лазерной рефрактографии. // Инженерно-физический журнал, 2010, том 83, №6.
5. Расковская И.Л., Сергеев Д.А., Ширинская Е.С. Диагностика характеристик солестратифицированной жидкости методом лазерной рефрактографии. // Измерительная техника, 2010, №11
6. Расковская И.Л. Структурированные пучки в задачах лазерной рефрактографии // Радиотехника и электроника, 2009, том 54, №12, с.1524-1531
7. B.S Rinkevichyus, O.A. Evtikhieva, M.V.Yesin, I.L. Raskovskaya and A.V.Tolkachev 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
8. B.S Rinkevichyus, I.L. Raskovskaya, A.V. Tolkachev. 3D-laser refractography. In Book of abstracts. "18th International Conference on Advanced Laser Technologies". 11-16 September 2010. Radboud University Nijmegen. The Netherlands, p.135
9. Методы компьютерной оптики. /Под ред. В.А.Сойфера. – М.: Физматлит, 2003. 687 с.
10. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. – М.: Наука, 1980.
11. Yesin M.V., Rinkevichyus B.S., and Tolkachev A.V. 3D Images Reconstruction of the Objects with Indistinct Boundaries // Proc. SPIE, vol. 4900, part two, pp.1140--1146, 2002.
12. Canny J.F. A computational approach to edge detection, //IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8: 679-698, 1986

M.V. Yesin, I.L. Raskovskaya, B.S. Rinkevichyus, A.V. Tolkachev

*Moscow Power Engineering Institute (technical university), Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: rinkevbs@mail.ru*

3D LASER REFRACTOGRAPHY

New method of transparent gradient inhomogeneities visualization and diagnostic – 3D Laser Refractography – is presented. The method based on refraction of Structured Laser Radiation (SLR) in spatially inhomogeneity media; digital registration of refraction patterns; and computer processing of 2D images (in the case of passed laser radiation) or 3D images (in the case of scattered laser radiation). In the article the results of computer modeling of 3D laser refractograms for typical inhomogeneities are presented as well as experimental set-up for observations of 3D refractograms in scattered light. Method of 3D refractograms reconstruction by set of 2D experimental refraction patterns of SLR is also presented.