

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 535.31 : 681.7.001

**ТРЁХМЕРНЫЕ РЕФРАКЦИОННЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ
В ЛАЗЕРНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ*****М. В. Есин, И. Л. Расковская, Б. С. Ринкевичюс, А. В. Толкачев**

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Национальный исследовательский университет "МЭИ"»,
111250, Москва, ул. Красноказарменная, 14
E-mail: rinkevbs@mail.ru*

Описана новая технология визуализации и диагностики прозрачных сред с градиентными неоднородностями — трёхмерная лазерная рефрактография, основанная на рефракции пространственно структурированного лазерного излучения, цифровой регистрации и обработке двумерных (в прошедшем излучении) или трёхмерных (в рассеянном излучении) рефракционных картин. Представлены результаты компьютерного моделирования трёхмерных рефракционных картин (3D-рефрактограмм) для сферически- и плоскостойких сред. Приведено описание схемы установки для наблюдения 3D-рефрактограмм в рассеянном излучении, изложена методика их получения по экспериментальным двумерным рефракционным картинкам и даны примеры компьютерной обработки экспериментальных данных.

Ключевые слова: рефракция, структурированное лазерное излучение, лазерная рефрактография, трёхмерные лазерные рефрактограммы, сферически-слоистая среда, плоскостойкая среда, диффузионный слой.

Введение. Для исследования прозрачных неоднородных сред с плавным изменением показателя преломления широко применяются различные оптические и лазерные методы. В классических теневых методах визуализации неоднородных сред [1, 2] используются пучки с плоским волновым фронтом и аналоговая фильтрация изображений неоднородности в фурье-плоскости.

Применение лазерной техники и цифровых устройств регистрации и обработки изображений привело к дальнейшему развитию классических рефракционных методов получения информации об исследуемой среде. С помощью лазерных измерительных систем проводится диагностика полей температур, плотности, акустического давления и скоростей потоков в прозрачных средах [3, 4]. Рефракционные лазерные методы используются для прямого определения поля показателя преломления, которое в дальнейшем может быть пересчитано в поле взаимосвязанной с ним другой физической величины: температуры, плотности и т. д.

В работах [5–9] для исследования прозрачных градиентных неоднородностей в жидкостях и газах применялась новая информационно-измерительная технология — лазерная рефрактография (ЛР), которая является технологией лазерной диагностики оптически неоднородных сред, основанной на зондировании среды структурированным лазерным излучением (СЛИ), цифровой регистрации рефракционной картины (рефрактограммы) и

*Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 10-08-00936а) и Министерства образования и науки РФ (ГК № 14.740.11.0594).

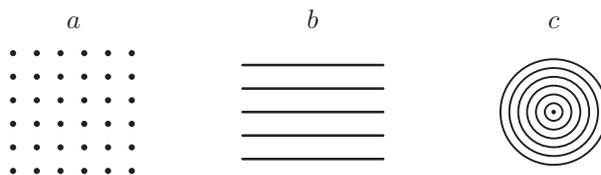


Рис. 1. Основные виды СЛИ: a — линейное, b — плоское, c — цилиндрическое

её компьютерной обработке в целях восстановления параметров среды [5]. В данной технологии используется СЛИ, формируемое специальными оптическими элементами непосредственно на выходе источника излучения [10, 11]. В рамках геометрической оптики модель СЛИ представляется семействами лучей, которые образуют поверхности в виде дискретного набора плоскостей, вложенных цилиндров, конусов и т. д. По виду поверхности проводится классификация СЛИ: линейное, плоское и цилиндрическое (коническое) (рис. 1).

В данной работе представлена методика моделирования и экспериментального получения трёхмерных рефракционных изображений СЛИ в неоднородных средах — $3D$ -рефрактограмм. Прошедшее через неоднородность СЛИ проецируется на экран в плоскости наблюдения и образует $2D$ -рефрактограмму.

Развитие микроэлектроники и лазерной техники сделало практически реализуемой задачу создания высококачественных дифракционно-оптических элементов (ДОЭ) со сложным профилем зон [12]. Наиболее перспективными для применения в ЛР являются ДОЭ, фокусирующие лазерное излучение в тонкие линии или малые области пространства, что соответствует структурированному пучку с модуляцией интенсивности.

Использование пучков сложной структуры значительно расширяет возможности традиционных лазерных градиентных методов.

Во-первых, выбор конфигурации элементов структуры пучка позволяет адаптировать измерения для определённого типа неоднородностей, например исследовать пограничные микрослои у поверхностей разной формы.

Во-вторых, множественность элементов структуры пучка и их пространственная протяжённость предоставляют возможность проводить измерения одновременно в выбранных областях исследуемой среды, что существенно при диагностике динамических неоднородностей.

В-третьих, дискретная и регулярная структура пучка позволяет выделить участок рефрактограммы для каждого элемента зондирующего пучка и измерить его смещение.

Принципы лазерной $3D$ -рефрактографии. При высокой интенсивности СЛИ в рассеянном излучении можно проводить наблюдения $3D$ -рефрактограмм — поверхностей, образованных рефрагирующими лучами. Они могут быть получены также на основе совокупности экспериментальных или расчётных двумерных рефрактограмм в разных сечениях с помощью специальных методов обработки [5]. Цифровые методы регистрации и обработки рефрактограмм позволяют решать обратную задачу восстановления профиля неоднородности и выполнять её количественную диагностику одновременно с визуализацией.

Структурная схема лазерной системы получения $3D$ -рефрактограмм в рассеянном свете показана на рис. 2. Излучение лазера 1 преобразуется оптической системой 2 в СЛИ 3 и, проходя вблизи нагретого объекта 4 через неоднородную среду 5, содержащую мелкие частицы при незначительной их концентрации, образует объёмные рефрактограммы, наблюдаемые в рассеянном свете. Изображение $3D$ -рефрактограмм регистрируется цифровой фотокамерой 6 и обрабатывается компьютером 7 с помощью специального программного обеспечения. Трёхмерные рефрактограммы в отличие от классических двумерных ре-

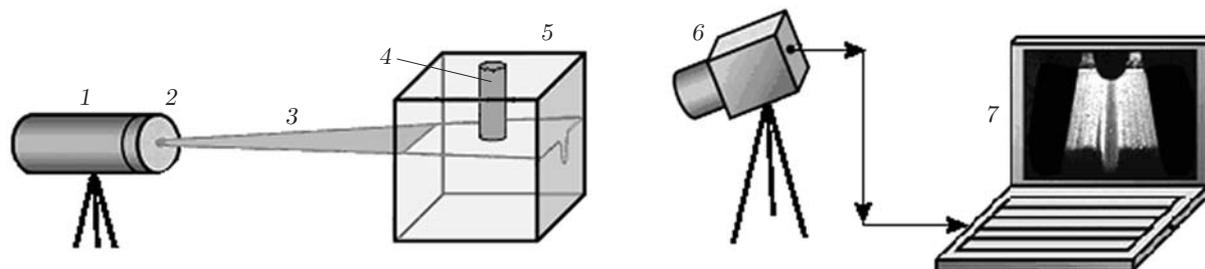


Рис. 2. Структурная схема лазерной 3D-рефрактографической системы: 1 — лазер, 2 — ДОО, 3 — СЛИ, 4 — нагретый объект, 5 — кювета с холодной водой, 6 — ПЗС-камера, 7 — компьютер

фракционных картин позволяют получить дополнительную информацию об исследуемой среде, так как фактически они визуализируют траектории семейства геометрооптических лучей, образующих СЛИ, во всём объёме исследуемой среды. Компьютерная обработка этих траекторий даёт возможность проводить количественную диагностику градиентной неоднородности в среде, послужившей причиной рефракции этих лучей.

Геометрооптические модели и рефракция СЛИ. Математические модели 3D-рефрактограмм могут быть получены аналитически для традиционных случаев сферически-слоистой и плоскостроистой оптически неоднородных сред.

Сферически-неоднородная среда. Пусть плоскоструктурированный пучок 1 (рис. 3) распространяется вдоль оси OZ в сферически-неоднородной среде с показателем преломления $n(r)$, где r — расстояние от центра неоднородности. Для определённости можно считать, что оптическая неоднородность представляет собой температурный пограничный слой у нагретого или охлаждённого шара 2 с радиусом R , помещённого в жидкость. Для нагретого шара градиент показателя преломления положительный, для охлаждённого шара — отрицательный. В отсутствие шара и на достаточном удалении от него показатель преломления равен n_0 . После прохождения через оптически неоднородный пограничный слой рефрагированное СЛИ попадает на экран 3.

В сферической системе координат при $z = z_0$ уравнение плоского пучка имеет вид $x = x_0$. Прицельный параметр луча [13], принадлежащего пучку, определяется парамет-

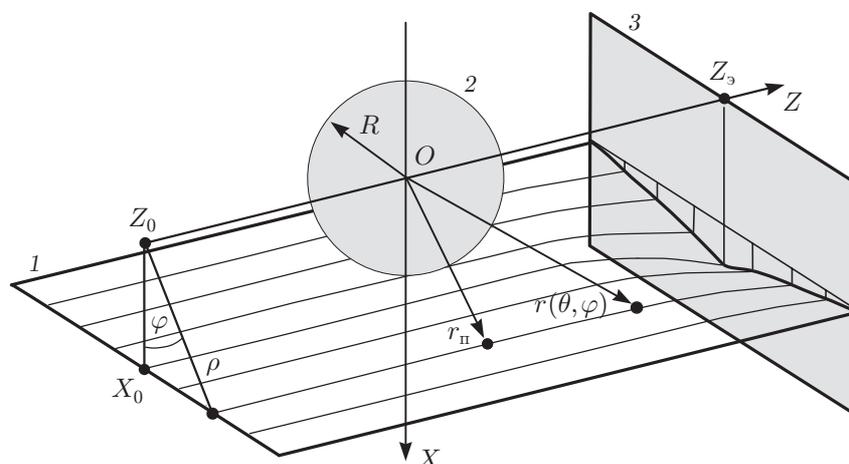


Рис. 3. Рефракция плоского пучка в сферически-неоднородной среде: 1 — плоский лазерный пучок, 2 — шар, 3 — экран

ром φ : $\rho(\varphi) = x / \cos \varphi$, где x — координата луча, принадлежащего плоскому пучку. При сферической симметрии этот луч остаётся в плоскости, задаваемой параметром φ , и его траектория определяется зависимостью $\theta(r, \varphi)$.

Траектории лучей рассчитываются на основе соотношений, описывающих распространение луча в сферически-слоистой неоднородности [13]. Уравнения луча до точки поворота и после неё имеют вид

$$\theta(r, \varphi) = \theta_0(\varphi) + \int_{r_0(\varphi)}^r \frac{n_0 \rho(\varphi) dr}{r \sqrt{n^2(r)r^2 - n_0^2 \rho^2(\varphi)}}, \quad (1)$$

$$\theta(r, \varphi) = \theta_t(\varphi) + \int_r^{r_{\pi}(\varphi)} \frac{n_0 \rho(\varphi) dr}{r \sqrt{n^2(r)r^2 - n_0^2 \rho^2(\varphi)}}. \quad (2)$$

Здесь радиальная координата луча при входе в среду (при $z = z_0$) определяется соотношением

$$r_0(\varphi) = \sqrt{\rho^2(\varphi) + z_0^2};$$

угол θ_0 , характеризующий направление луча при входе в среду, описывается выражением

$$\theta_0(\varphi) = \frac{\pi}{2} + \operatorname{arctg} \frac{z_0}{\rho(\varphi)};$$

угол $\theta = \theta_{\pi}$, соответствующий радиальной координате $r_{\pi}(\varphi)$ точки поворота, запишется как

$$\theta_{\pi}(\varphi) = \theta_0(\varphi) + \int_{r_0(\varphi)}^{r_{\pi}(\varphi)} \frac{n_0 \rho(\varphi) dr}{r \sqrt{n^2(r)r^2 - n_0^2 \rho^2(\varphi)}},$$

где координата точки поворота $r_{\pi}(\varphi)$ находится из условия

$$r_{\pi}(\varphi) n(r_{\pi}(\varphi)) = n_0 \rho(\varphi).$$

Формулы (1), (2) составляют основу для расчёта рефракции структурированного излучения в сферически-неоднородном слое. Угол φ является параметром, задающим луч в пучке, что позволяет описать всё семейство лучей, принадлежащих пучку. На экране, расположенном на дистанции z , радиальная координата $r(z_{\text{э}}, \varphi)$ вычисляется из уравнения

$$r \cos \theta(r, \varphi) = z_{\text{э}},$$

а координаты проекции пучка имеют вид

$$\begin{aligned} x(z_{\text{э}}, \varphi) &= r(z_{\text{э}}, \varphi) \sin \theta(r(z_{\text{э}}, \varphi), \varphi) \cdot \cos \varphi; \\ y(z_{\text{э}}, \varphi) &= r(z_{\text{э}}, \varphi) \sin \theta(r(z_{\text{э}}, \varphi), \varphi) \cdot \sin \varphi. \end{aligned} \quad (3)$$

Соотношения (3) определяют структуру наблюдаемой на экране $2D$ -рефрактограммы для заданной сферической неоднородности.

Математическая модель $3D$ -рефрактограммы в рассеянном свете представляет собой поверхность, образованную семейством лучей (1), (2) при непрерывном изменении параметра φ .

Плоскостойкая неоднородная среда (рис. 4). Траектория луча в этом случае может быть описана соотношением [5]

$$z(x) = \int_{x_0}^x \frac{n(x_0) \sin(\theta_0)}{(n(x) - n(x_0)^2 \sin^2(\theta_0))^{1/2}} dx, \tag{4}$$

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

В качестве примера плоскостойкой среды рассмотрим диффузионный слой в жидкости. Как известно, в двухслойной жидкости наблюдается переходный слой, в котором её свойства плавно изменяются и соответственно изменяется показатель преломления. Такой слой принято называть диффузионным. В солестратифицированной жидкости изменение показателя преломления описывается соотношением [8]

$$n(x) = \frac{n_1 + n_2}{2} + \frac{n_1 - n_2}{2} \operatorname{th} \left(\frac{x - x_{\text{ц}}}{h} \right), \tag{5}$$

где n_1 — показатель преломления верхней жидкости; n_2 — показатель преломления более плотной нижней жидкости; h — характерная полуширина слоя; $x_{\text{ц}}$ — положение центра слоя. Такая зависимость показателя преломления и экспериментальные рефрактограммы используются для определения распределения солёности в слоях жидкости.

Далее при моделировании трёхмерных рефрактограмм будем рассматривать случай, когда $\theta_0 = 90^\circ$. Сечение плоского пучка с одним структурным элементом на входе в среду лежит в плоскости XOY .

В общем случае сечение может составлять некоторый угол α с осью OY (наклонный плоский лазерный пучок). 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 , остаётся в этой плоскости при распространении

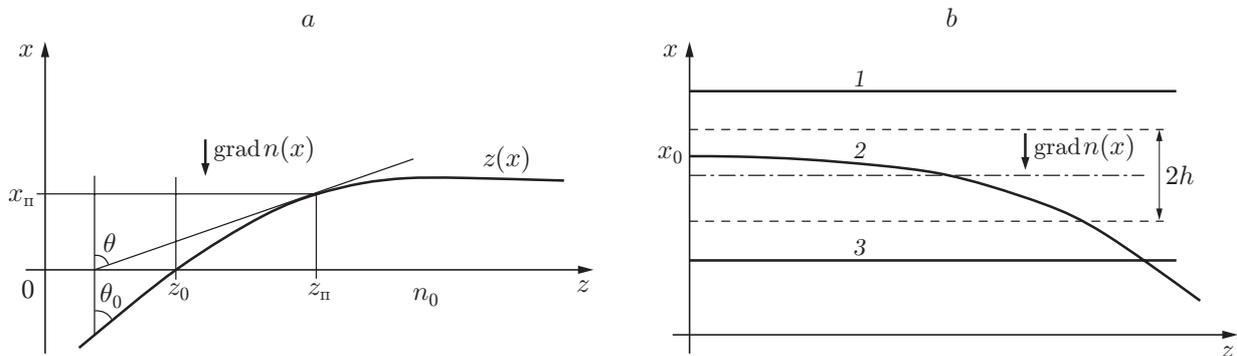


Рис. 4. Траектория луча в плоскостойкой среде: a — отрицательный градиент $n(x)$; b — диффузионный слой (1 — луч в верхнем слое, 2 — в середине слоя, 3 — в нижнем слое)

через неоднородность. В этих условиях поверхность трёхмерной рефрактограммы будет задаваться соотношением

$$z(x, y) = \int_{x_0}^x \frac{n(x_0(y))}{(n(x) - n(x_0(y)))^{1/2}} dx. \quad (6)$$

Выражения (2)–(6) для траекторий лучей в рассмотренных средах являются основой для компьютерного моделирования 2D- и 3D-рефрактограмм.

3D-рефрактограммы в сферической и плоской неоднородных средах. Трёхмерные рефрактограммы плоского лазерного пучка, прошедшего через сферический слой с положительным градиентом (показатель преломления увеличивается при увеличении радиальной координаты) и сферический слой с отрицательным градиентом показателя преломления, показаны на рис. 5. Характерной особенностью сферической неоднородности с отрицательным градиентом является петлеобразная рефрактограмма. Формирование петли связано с наличием осевой каустики [13], которая может быть визуализирована экспериментально [5].

На рис. 6 приведена 3D-рефрактограмма для диффузионного слоя жидкости, изменение показателя преломления которого моделируется на основе формулы (5) при следующих параметрах: $n_1 = 1,332$, $n_2 = 1,335$, $h = 5$ мм, $x_{\text{ц}} = 20$ мм. Следует обратить внимание на различный масштаб по осям OX , OY и OZ .

Для рефрактограмм, изображённых на рис. 5, 6, характерно то, что они моделировались для ситуации, когда СЛИ уже прошло область градиентной неоднородности. В этом случае образующими рефрактограмм являются прямые линии, представляющие собой семейство геометрооптических лучей, формирующих плоский или цилиндрический пучок, и отклонившихся в неоднородности на разные углы в плоскости φ . В такой ситуации возможно однозначное восстановление трёхмерных рефрактограмм по экспериментальным 2D-рефрактограммам, рассчитанным или полученным в разных сечениях.

Наиболее актуально использование 3D-рефрактограмм в ситуации, когда они моделируются или визуализируются экспериментально прямо в объёме исследуемого объекта. Заметим, что восстановление значений показателя преломления в среде для неоднородностей, допускающих применение сферических и плоских моделей, возможно и на основе 2D-рефрактограмм [5]. При более сложной структуре исследуемого объекта для локального определения показателя преломления требуется непосредственная визуализация СЛИ в её объёме, т. е. 3D-рефрактограмма.

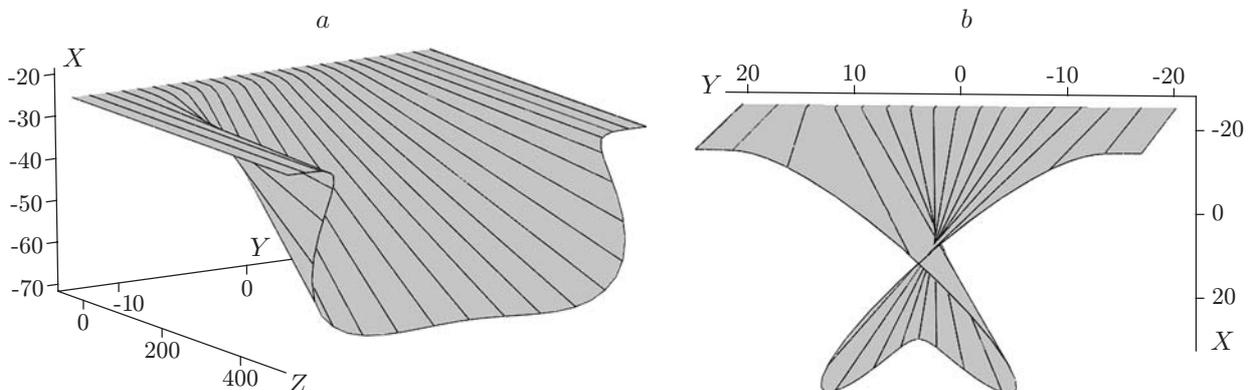


Рис. 5. 3D-рефрактограммы для сферического слоя: *a* — положительный градиент, *b* — отрицательный градиент (размеры приведены в миллиметрах)

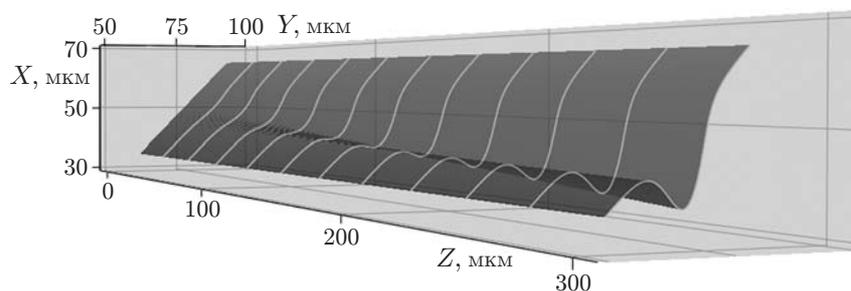


Рис. 6. 3D-рефрактограмма плоского пучка в двухслойной жидкости

Использование 3D-рефрактограмм даёт новые возможности диагностики сред — это нахождение 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. В [5] показана схема установления местоположения локальных неоднородностей с помощью 3D-рефрактограммы, полученной для двух скрещённых плоских пучков.

Восстановление 3D-рефрактограмм по двумерным изображениям. Метод восстановления трёхмерных изображений объектов с нечёткими границами описан в [14]. В данной работе он применён для восстановления трёхмерной поверхности СЛИ по набору изображений двумерных сечений. Метод восстановления условно можно разбить на три этапа.

На первом этапе производится подготовка изображений к векторизации, которая необходима для уменьшения искажений при построении трёхмерного тела и в операциях над ним. Базовые алгоритмы цифровой фильтрации, используемые на данном этапе, хорошо известны, однако подбор параметров фильтров и последовательность их применения остаются актуальной задачей [14]. В последовательности используются комбинации медианных и линейных фильтров для удаления шумов и фоновых засветок. После применения этих фильтров изображение сглаживается и контрастируется, что позволяет подчеркнуть нечёткую границу светового пучка на экране. Далее с помощью оператора Кани [15] выделяются контуры изображения.

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

Построение поверхности может производиться как с использованием триангуляции, так и сплайном. Триангуляционная поверхность требует меньших вычислительных ресурсов, однако вносит дополнительные погрешности. Сформированные поверхности могут импортироваться в популярные САД-приложения (MicroStation или AutoCAD) для качественной визуализации, проведения измерений и дальнейшего изучения. Создано программное обеспечение, позволяющее обрабатывать экспериментальные изображения автоматически и полуавтоматически.

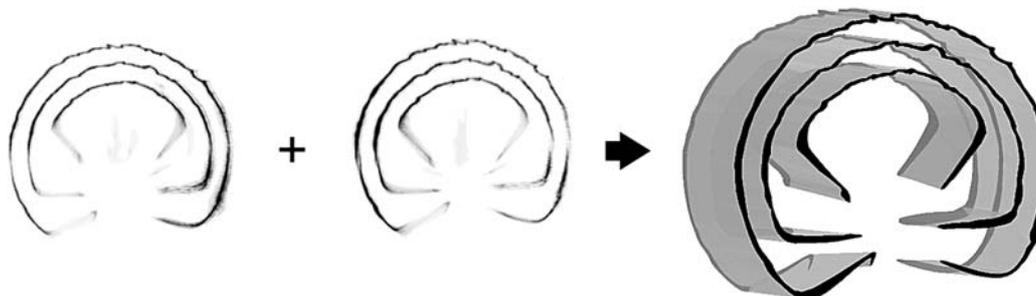


Рис. 7. Построение 3D-рефрактограммы из двух 2D-рефрактограмм

Восстановление 3D-рефрактограмм для рефракции цилиндрического пучка в пограничном слое горячего шара по 2D-рефрактограммам с использованием созданной программы показано на рис. 7.

На рис. 8, *a* представлены 2D-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 составляла 0,1 мм, ширина — 51 мм. По мере остывания шара форма пучка возвращалась к исходной (см. рис. 1, *b*).

По полному временному ряду возможно построение трёхмерной пространственно-временной поверхности рефрагировавшего плоского пучка. Это изображение иллюстрирует изменение показателя преломления в пограничном слое, связанное с изменением темпе-

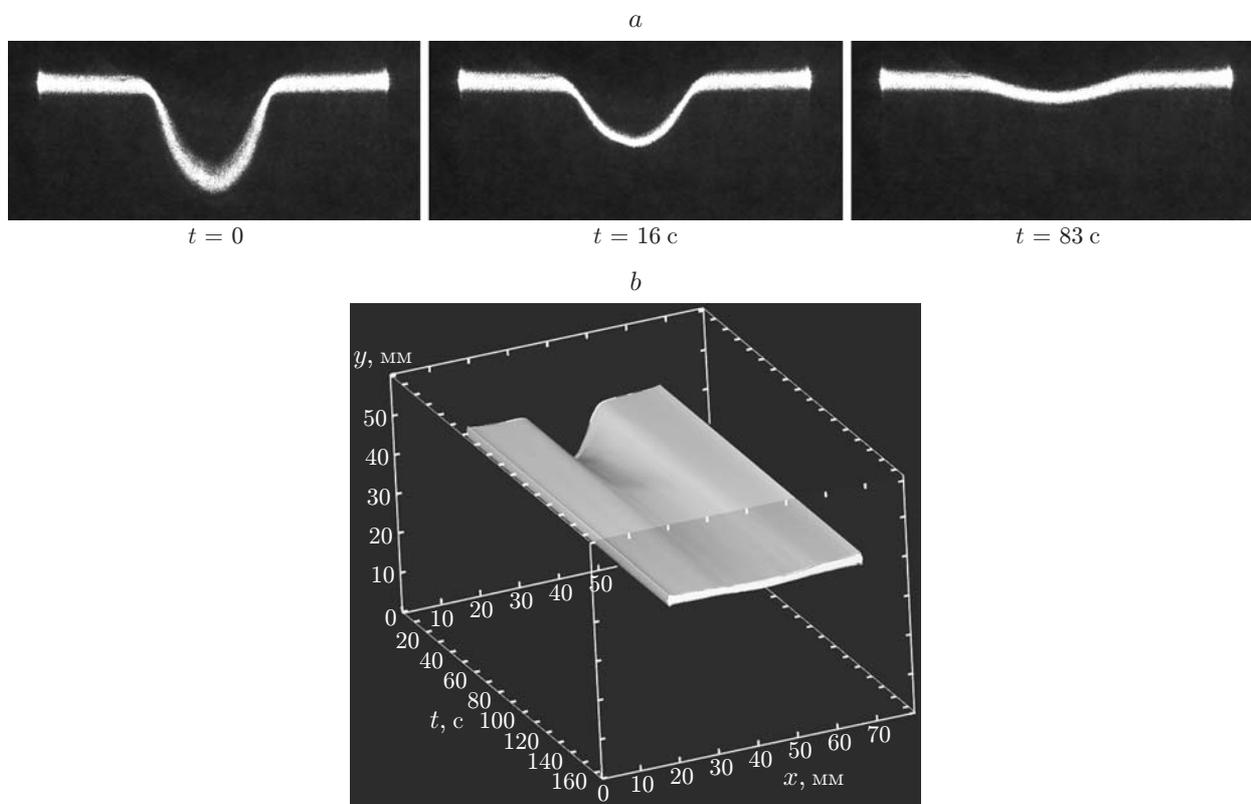


Рис. 8. Методика реконструкции пространственно-временных 3D-рефрактограмм: *a* — последовательность кадров 2D-рефрактограмм для сферического слоя в разные моменты времени; *b* — 3D-рефрактограмма, реконструированная по 80 кадрам

ратуры в пограничном слое во времени. На рис. 8, *b* показано восстановленное трёхмерное изображение пучка.

Заключение. Использование СЛИ в лазерной рефрактографии расширяет возможности рефракционных методов исследования оптически неоднородных сред, 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 её показателя преломления [5]. Методика получения информации о характеристиках указанных процессов имеет дальнейшее развитие при использовании 3*D*-рефрактографии, которая визуализирует структуру неоднородности не только в прошедшем излучении, но и непосредственно в исследуемом объёме. Моделирование или наблюдение 3*D*-рефрактограмм в рассеянном свете позволяет визуализировать поверхности, образованные семействами геометрооптических 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 геометрооптических лучей. Методика реконструкции 3*D*-рефрактограмм даёт возможность на основе совокупности двумерных изображений в прошедшем излучении восстановить соответствующие лучевые поверхности.

Рассмотренный метод лазерной рефрактографии неприменим для мутных сред с большим рассеянием и ограниченно применим при слабой рефракции, например в газовых средах, так как требует существенного увеличения расстояния от объекта до экрана, что не всегда осуществимо в лабораторных условиях. Кроме того, к определённым ограничениям количественной диагностики показателя преломления приводит наличие дифракции СЛИ [16], проявляющейся в протяжённых неоднородностях и при значительном удалении области наблюдения от исследуемой среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Белозеров А. Ф.** Оптические методы исследования газовых потоков. Казань: Изд-во Казан. гос. ун-та, 2007. 747 с.
2. **Дубнищев Ю. Н., Арбузов В. А., Белоусов П. П., Белоусов П. Я.** Оптические методы исследования потоков. Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2003. 418 с.
3. **Ринкевичюс Б. С.** Лазерная диагностика потоков. М.: Изд-во МЭИ, 1990. 287 с.
4. **Расковская И. Л.** Распространение лазерного пучка в среде с акустической волной // Радиотехника и электроника. 2004. **49**, № 11. С. 1382–1389.
5. **Евтихиева О. А., Расковская И. Л., Ринкевичюс Б. С.** Лазерная рефрактография. М.: Физматлит, 2008. 176 с.
6. **Rinkevichyus B. S., Evtikhieva O. A., Yesin M. V. et al.** 3D-laser refractography — new chapter of information optics // Journ. Phys.: Conf. Ser. 2010. **206**. 012010. URL: http://iopscience.iop.org/1742-6596/206/1/012010/pdf/1742-6596_206_1_012010.pdf (дата обращения: 31.01.2012).
7. **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. **83**, № 6. С. 1149–1156.
8. **Расковская И. Л., Сергеев Д. А., Ширинская Е. С.** Диагностика характеристик солестратифицированной жидкости методом лазерной рефрактографии // Измер. техника. 2010. № 10. С. 36–38.

9. **Крикунов А. В., Ринкевичюс Б. С., Расковская И. Л.** Рефракция астигматического лазерного пучка в переходном слое стратифицированной жидкости // Оптика и спектроскопия. 2011. **111**, № 6. С. 1020–1026.
10. **Расковская И. Л.** Структурированные пучки в задачах лазерной рефрактографии // Радиотехника и электроника. 2009. **54**, № 12. С. 1524–1531.
11. **Raskovskaya I. L., Rinkevichyus B. S., Tolkachev A. V.** Structured beams in laser refractography applications // Laser Beams: Theory, Properties and Applications. N. Y.: Nova Science Publishers, Inc., 2011. P. 399–414.
12. **Дифракционная** нанофотоника /Под ред. В. А. Сойфера. М.: Физматлит, 2011. 687 с.
13. **Кравцов Ю. А., Орлов Ю. И.** Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1980. 304 с.
14. **Yesin M. V., Rinkevichyus B. S., Tolkachev A. V.** 3D images reconstruction of objects with indistinct boundaries // Proc. SPIE. 2002. **4900**, Pt. 2. P. 1140–1146.
15. **Sanny J. F.** A computational approach to edge detection // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1986. **8**, N 6. P. 679–698.
16. **Расковская И. Л.** Волновые методы моделирования рефрактограмм для диагностики градиентов фазовых неоднородностей // Автометрия. 2012. **48**, № 3. С. 54–60.

Поступила в редакцию 6 февраля 2012 г.
