

Лазерная рефрактография оптически неоднородных сред

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

Изложены принципы лазерной рефрактографии – нового метода диагностики оптически неоднородных сред и потоков, основанного на рефракции пространственно структурированного лазерного излучения. При использовании 2D- и 3D-рефрактограмм осуществляется визуализация исследуемой среды и количественная диагностика профиля неоднородности. Метод адаптирован для исследования краевых эффектов и тонких пограничных слоев в жидкостях и газах. В силу практической безынерционности измерений лазерная рефрактография может быть использована для диагностики быстротекущих и нестационарных процессов, причем благодаря протяженности источника излучения обеспечивается одновременность диагностики процесса в разных областях.

Ключевые слова: рефракция, рефрактограмма, структурированное лазерное излучение, лазерные измерения, пограничный слой, конвекция.

1. Введение

Активное применение в последнее время лазерных методов для диагностики в прозрачных средах полей акустического давления, температуры, плотности, скорости течения в потоках [1] обусловлено их значительными преимуществами перед другими методами. Прежде всего, оптические измерения не искажают исследуемых полей, поскольку в большинстве случаев энергия, поглощаемая средой, достаточно мала. Кроме того, лазерные методы практически не имеют инерционных погрешностей, что позволяет выполнять точные измерения быстротекущих процессов. Дополнительным преимуществом является возможность проведения дистанционных измерений. Лазерные методы позволяют исследовать поле показателя преломления, которое потом пересчитывается в искомое поле другой физической величины.

Современный этап развития лазерной и вычислительной техники характеризуется появлением полупроводниковых лазеров видимого диапазона, освоением промышленностью выпуска дифракционных оптических элементов [2], цифровых видеокамер и фотоаппаратов с числом разрешаемых элементов более миллиона, компьютеров с быстродействием свыше 3 ГГц и объемом памяти свыше 100 Гбт, развитием новых эффективных цифровых методов обработки оптических изображений. Все это позволило приступить к разработке оптических методов диагностики неоднородных сред на качественно новом научном и техническом уровне, создавая методы получения информации о среде или потоке в выбранном сечении (2D-диагностика) и в объеме (3D-диагностика).

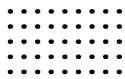


Рефракционные методы диагностики потоков в последние годы переживают возрождение, обусловленное

отмеченными выше факторами. Матричные фотоприемники и компьютеры позволили создать новые методы лазерной градиентной рефрактометрии: спекл-метод, компьютерно-лазерный [3] и теневой фоновый (ТФ) [4] методы. Лазерные пучки различной формы и хорошего качества создаются с помощью простых оптических систем, разработаны сканирующие и многоканальные рефрактометрические системы с компьютерной обработкой изображений [2, 4].

Лазерная рефрактография – новый метод лазерной диагностики оптически неоднородных сред, в частности потоков жидкости, газа и плазмы. Лазерная рефрактография основана на рефракции структурированного лазерного излучения в оптически неоднородных средах и цифровой регистрации рефракционной картины. Данный метод является количественным интегральным методом, применимым к исследованию прозрачных стационарных и нестационарных сред.

Структурированное лазерное излучение (СЛИ) представляет собой пространственно-модулированное по амплитуде излучение, получаемое в основном с помощью дифракционных оптических элементов. Основные типы источников СЛИ приведены в табл.1 и классифицируются по форме пространственных геометрических фигур, образованных лучами от источника: это источники линейно-структурированного, плоскоструктурированного и конусно-структурированного лазерного излучения. Дву-

Табл.1. Основные типы СЛИ.

Тип источника	Сечение пучка СЛИ
Линейно-структурированный	
Плоскоструктурированный	
Конусно-структурированный	

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

Поступила в редакцию 28 февраля 2007 г.

мерные фигуры, приведенные в табл.1, представляют собой сечения пучков, образованных семейством геометро-оптических лучей от источника. Комбинацией основных типов источников можно создавать и другие источники, адаптированные к структуре неоднородности и к форме поверхности тел, вблизи которых исследуются пограничные слои. Для диагностики объемных неоднородностей целесообразно создавать измерительные «сетки» из элементарных источников.

Очевидно, что указанный подход справедлив в приближении геометрической оптики, поэтому при работе с реальными измерительными установками следует оценивать погрешность, обусловленную дифракционными эффектами, для определения границ применимости метода. Например, плоскоструктурированное лазерное излучение, называемое еще «лазерной плоскостью» (ЛП), в действительности представляет собой астигматический лазерный пучок эллиптического сечения, дифракционная расходимость которого определяется на основе известных методов квазиоптики [5].

Прошедшее через исследуемую среду СЛИ создает на экране 2D-рефрактограмму, вид которой связан с типом СЛИ и пространственным распределением показателя преломления, зависящего от температуры, давления, плотности, солености и других характеристик среды.

2D-рефрактограмма представляет собой 2D-изображение источника пространственно структурированного излучения, созданное оптической системой, в качестве которой выступает исследуемая среда. В данном аспекте метод рефрактографии близок к ТФ методу, в котором в естественном освещении анализируются изображения структурированного экрана с нанесенными случайным образом точками при наблюдении его через оптически неоднородную среду. Принципиальным отличием лазерной рефрактографии от ТФ метода является использование когерентного лазерного излучения, что позволяет проводить количественную диагностику среды и исследовать интерференционные эффекты, несущие дополнительную информацию. Кроме того, наблюдение рассеянного малыми частицами лазерного излучения дает возможность визуализировать область исследования.

2D-рефрактограммы даже без последующей компьютерной обработки могут применяться для экспресс-диагностики неоднородностей. На рис.1 изображены типичные 2D-рефрактограммы ЛП, используемой для диагностики пограничного слоя и краевых эффектов вблизи нагретых или охлажденных тел в жидкости. В [6] приведены 2D-рефрактограммы для других типов СЛИ. Набор проекций ЛП в разных сечениях формирует 3D-рефрактограмму неоднородности.

3D-рефрактограмма представляет собой 3D-изображение поверхности, образованной рефракгирующими в среде лучами от источника СЛИ (рис.2), и может быть получена на основе совокупности экспериментальных или расчетных 2D-рефрактограмм для разных сечений с

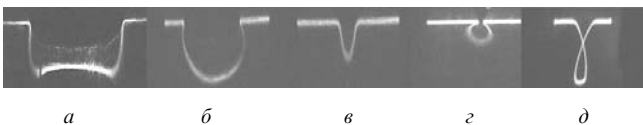


Рис.1. Типичные 2D-рефрактограммы ЛП, полученные при исследовании пограничного слоя вблизи нагретых (а–с) и охлажденного (д) тел в жидкости: параллелепипеда (а), цилиндра с плоским дном (б), шара (в, д) и острого клина (с).

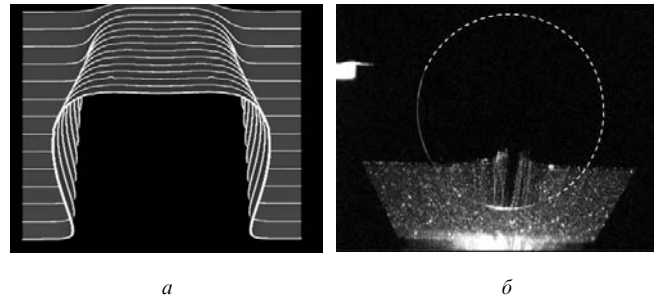


Рис.2. 3D-рефрактограммы ЛП для пограничного слоя под горячим (расчетная) (а) и под холодным (экспериментальная) шаром в воде (б).

помощью специальных методов обработки [7]. 3D-рефрактограмму можно экспериментально визуализировать в рассеянном излучении (рис.2,б).

2D- и 3D-рефрактограммы регистрируются цифровой видеокамерой, соединенной с персональным компьютером, с помощью которого проводится их обработка. Сравнение экспериментальных рефрактограмм с расчетными позволяет восстанавливать профиль неоднородности и проводить верификацию численных методов расчета характеристик потока с использованием пакетов прикладных программ.

2. Рефракция ЛП в сферической неоднородности

Для разработки методики построения расчетных рефрактограмм исследуется рефракция ЛП [8] в сферической слоистой среде с показателем преломления $n = n(r)$. Геометрия задачи иллюстрируется рис.3. Лазерный пучок в виде ЛП 1, перпендикулярной оси x , распространяется вдоль оси z . Начало координат совмещено с центром сферической неоднородности 2. Проекция ЛП наблюдается на экране 3 в плоскости, перпендикулярной оси z и расположенной на расстоянии z_1 от начала координат. Связь между декартовыми и сферическими координатами задается соотношениями

$$x = r \sin \theta \cos \varphi, \quad y = r \sin \theta \sin \varphi, \quad z = r \cos \theta.$$

При $z = z_0$ уравнение ЛП имеет вид $x = x_0$. Прицельный параметр ρ_0 лежащего в ЛП луча определяется углом φ (параметром луча):

$$\rho_0 = \frac{x_0}{\cos \varphi}. \quad (1)$$

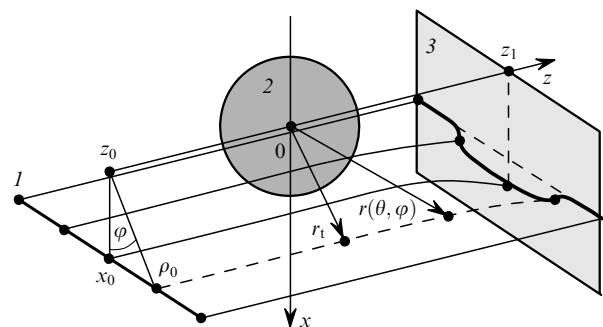


Рис.3. Геометрические параметры задачи построения расчетных рефрактограмм:

1 – ЛП; 2 – сферическая неоднородность; 3 – экран.

При сферической симметрии этот луч остается в плоскости, задаваемой параметром φ , и его траектория определяется зависимостью $r(\theta, \varphi)$. Траектории лучей рассчитываются на основе соотношений, описывающих их распространение в сферической неоднородности [9]. Методика определения траектории распространения луча в такой среде состоит в разбиении траектории на два участка: от точки входа до точки поворота и от точки поворота до плоскости наблюдения. Точка поворота в рассматриваемом случае определяется минимальным расстоянием r_t от траектории луча до начала координат (центра неоднородности) и находится из следующего уравнения:

$$r_t n(r_t) = n_0 \rho_0, \quad (2)$$

где n_0 – невозмущенный показатель преломления (при $z = z_0$).

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

$$r_0(\varphi) = \left(\frac{x_0^2}{\cos^2 \varphi} + z_0^2 \right)^{1/2}. \quad (3)$$

Угол θ_0 характеризует направление луча при входе в среду:

$$\theta_0(\varphi) = \frac{\pi}{2} + \arctan \frac{z_0 \cos \varphi}{x_0}. \quad (4)$$

Соответствующий точке поворота угол

$$\theta_t(\varphi) = \theta_0(\varphi) + \int_{r_0(\varphi)}^{r_t(\varphi)} \frac{n_0 x_0 dr}{r \cos \varphi [n^2(r)r^2 - (n_0^2 x_0^2 / \cos^2 \varphi)]^{1/2}}. \quad (5)$$

Уравнение траектории луча до точки поворота имеет вид

$$\theta(r, \varphi) = \theta_0(\varphi) + \int_{r_0(\varphi)}^r \frac{n_0 x_0 dr}{r \cos \varphi [n^2(r)r^2 - (n_0^2 x_0^2 / \cos^2 \varphi)]^{1/2}}, \quad (6)$$

а после точки поворота –

$$\theta(r, \varphi) = \theta_t(\varphi) + \int_r^{r_t(\varphi)} \frac{n_0 x_0 dr}{r \cos \varphi [n^2(r)r^2 - (n_0^2 x_0^2 / \cos^2 \varphi)]^{1/2}}. \quad (7)$$

Соотношения (6), (7) составляют основу для расчета рефракции ЛП в сферической неоднородности. Угол φ является параметром, задающим произвольный луч в ЛП, что позволяет описать все семейство лучей, принадлежащих ЛП. На экране, расположенном в плоскости $z = z_1$, радиальная координата луча $r(z_1, \varphi)$ определяется из уравнения

$$r \cos \theta(r, \varphi) = z_1, \quad (8)$$

а координаты проекции ЛП на экране находятся из уравнений

$$x(z_1, \varphi) = r(z_1, \varphi) \sin \theta(r(z_1, \varphi), \varphi) \cos \varphi, \quad (9)$$

$$y(z_1, \varphi) = r(z_1, \varphi) \sin \theta(r(z_1, \varphi), \varphi) \sin \varphi.$$

Соотношения (9) определяют структуру рефрактограммы для заданной сферической неоднородности.

3. Расчетные рефрактограммы ЛП для сферического пограничного термального слоя

Заметим, что все оптические методы по сути дают поле показателя преломления, которое затем преобразуется в поле температуры $T(x, y)$ или другой исследуемой величины. При анализе тепловых процессов, следуя работе [10], будем полагать, что зависимость показателя преломления воды от температуры для лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 0.6328$ мкм определяется аппроксимационной зависимостью

$$n(T) = 1.3328 - 0.000051T - 0.0000011T^2, \quad (10)$$

где температура T измеряется в градусах Цельсия.

Математическое моделирование рефракции ЛП в сферически симметричном термальном пограничном слое около шара радиусом R проводится для радиальной зависимости температуры, определяемой выражением

$$T(r) = T_0 + \Delta T \exp \left[-\frac{(r - R - \Delta R)^2}{a^2} \right], \quad (11)$$

где T_0 , ΔT , ΔR , a – параметры модели температурного поля. Параметр T_0 определяется температурой стенок кюветы с жидкостью, температура $T(R)$ равна температуре на поверхности шара T_s , а отношение $\Delta T/a$ соответствует градиенту температурного поля в пограничном слое толщиной a . Для горячего шара $\Delta T > 0$, а для холодного $\Delta T < 0$.

Значение градиента температуры при $r = R$ определяется сдвигом ΔR , причем при теплопроводности шара, не равной теплопроводности жидкости, на поверхности шара $\text{grad}[T(r)] \neq 0$. Однако при исследовании не исключается возможность равенства или близости к нулю градиента температуры в пограничном слое [11], чем и определяется выбор гауссовой модели температурного поля.

Теоретическое исследование рефракции ЛП в слое жидкости вблизи горячего шара подробно проведено в работе [8], поэтому ограничимся построением рефрактограмм для пограничного слоя вблизи холодного шара.

На рис.4 представлены 3D-рефрактограммы для двух моделей распределения температуры вблизи охлажденного шара в воде: модели 1, описываемой формулой (11) с параметрами $R = 20.5$ мм, $T_0 = 60^\circ\text{C}$, $\Delta T = -55^\circ\text{C}$, $\Delta R = -0.3$ мм, $a = 2$ мм, и модели 2, в которой температура в неоднородности экспоненциально возрастает от 5°C до 60°C . Характерным признаком «холодной» сферической неоднородности в воде является образование петли на рефрактограммах, причем при близких к нулю

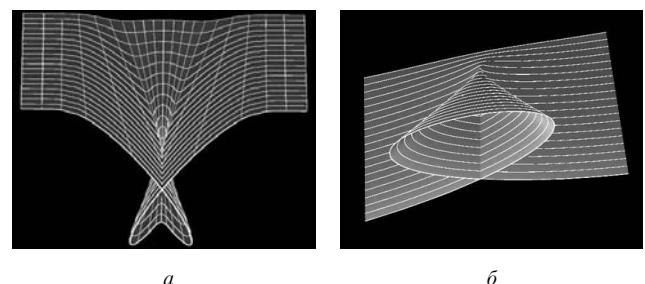


Рис.4. 3D-рефрактограммы ЛП для моделей 1 (а) и 2 (б) пограничного слоя жидкости вблизи холодного шара (см. текст).

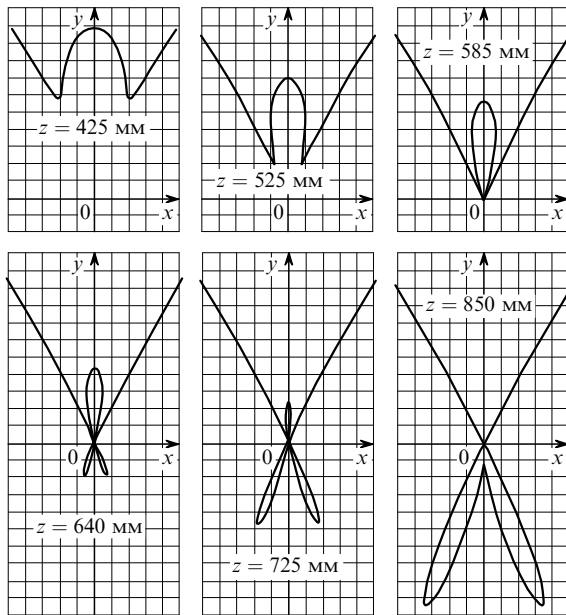


Рис.5. Формирование рефрактограммы ЛП для сферического пограничного слоя в области каустики при различных расстояниях z до экрана. Сторона квадрата масштабной сетки равна 1 мм.

значениях градиента температуры непосредственно у поверхности сферы имеет место характерный экстремум на петле, обусловленный малым отклонением лучей в этой области. Распределение температуры в слое в данном случае близко к гауссову (модель 1). При экспоненциальном распределении экстремум не возникает.

Таким образом, визуализация неоднородности среды с помощью рефрактограмм позволяет проводить экспресс-диагностику типа неоднородности и делать выводы относительно распределения температуры в тонком пограничном слое. Образование петли на рефрактограмме непосредственным образом связано с наличием осевой каустики [9], которая может быть визуализирована экспериментально.

На рис.5 показаны 2D-рефрактограммы, соответствующие приведенной выше 3D-рефрактограмме (рис.4,а) при параметрах модели 1 и различных расстояниях z до экрана. Представленные на рис.5 участки рефрактограмм вблизи каустики (плоскость наблюдения перпендикулярна оси z) позволяют в деталях проследить формирование петли. Набор 2D-рефрактограмм, полученных экспериментально, позволяет восстановить соответствующее трехмерное изображение и определить тип неоднородности.

4. Экспериментальная установка и методика проведения эксперимента

На рис.6 показана принципиальная схема экспериментальной установки, предназначенной для визуализации теплофизических процессов при естественной нестационарной конвекции в жидкости около нагретых (охлажденных) тел с помощью СЛИ.

Методика проведения эксперимента состояла в следующем. С помощью юстировочного столика и устройства поворота дифракционных оптических элементов лазерное излучение направлялось в область вблизи поверхности нагреваемого тела 5. В начале эксперимента записывалось изображение рефракционной картины на эк-

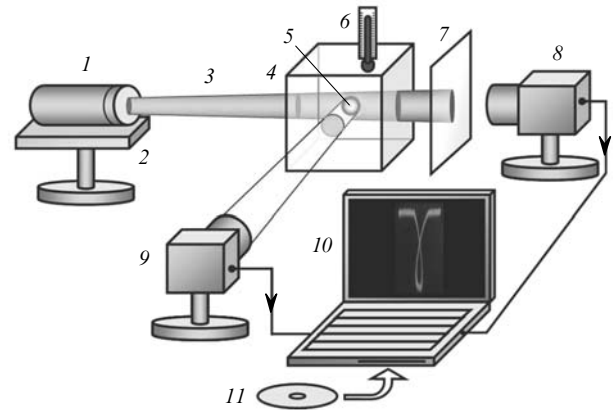
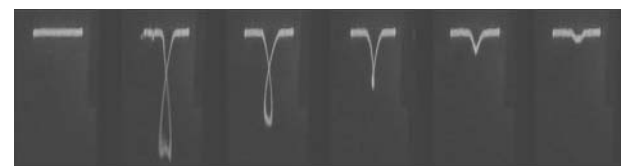


Рис.6. Принципиальная схема экспериментальной установки для визуализации естественной конвекции:

1 – полупроводниковый лазер с дифракционными оптическими элементами; 2 – юстировочный столик; 3 – СЛИ; 4 – прозрачная кювета с водой; 5 – нагреваемый (охлаждаемый) объект; 6 – термометр; 7 – полупрозрачный экран; 8, 9 – цифровые видеокамеры; 10 – персональный компьютер; 11 – специальное программное обеспечение.

ране 7 с помощью цифровой видеокамеры 8, которое использовалось в дальнейшем для сравнения. Далее металлический объект нагревался до температуры 50–100 °С или охлаждался до температуры 9–10 °С и опускался в бассейн с водой. После этого велась видеозапись рефракционной картины на экране 7 в течение нескольких минут. Температура тела измерялась термопарой. Записанное изображение рефракционной картины вводилось в компьютер и обрабатывалось с помощью специального пакета прикладных программ. На рис.7 приведены экспериментальные рефрактограммы ЛП, полученные на описанной установке, для охлажденного шара.

Методика измерений обеспечивает одновременность диагностики процесса в области прохождения ЛП в пограничном слое непосредственно над шаром. Уже предварительное наблюдение рефрактограмм, изображенных на рис.7, позволяет на основе библиотеки известных типичных рефрактограмм делать качественные выводы относительно эволюции неоднородности в слое, т. е. проводить экспресс-диагностику процесса. Например, в первые секунды наблюдения, когда процесс существенно нестационарен, на петле наблюдается характерная «выемка», наличие которой свидетельствует о существовании слоя воды непосредственно у поверхности шара, в котором градиент температуры близок к нулю (библиотечная рефрактограмма для гауссовой модели распределения температуры на рис.4,а). В последующие моменты наблюдения рефрактограммы соответствуют экспоненциальной модели распределения температуры в сферическом слое (библиотечная рефрактограмма на рис.4,б), которая согласуется с результатами численного моделиро-



$t = 0$ $t = 2.4$ с $t = 10$ с $t = 30$ с $t = 80$ с $t = 120$ с
 $T_s = 9.5$ °С $T_s = 22$ °С $T_s = 31$ °С $T_s = 50$ °С $T_s = 65$ °С $T_s = 68.5$ °С

Рис.7. Экспериментальные 2D-рефрактограммы ЛП для пограничного слоя вблизи холодного шара при начальной температуре горячей воды 70 °С.

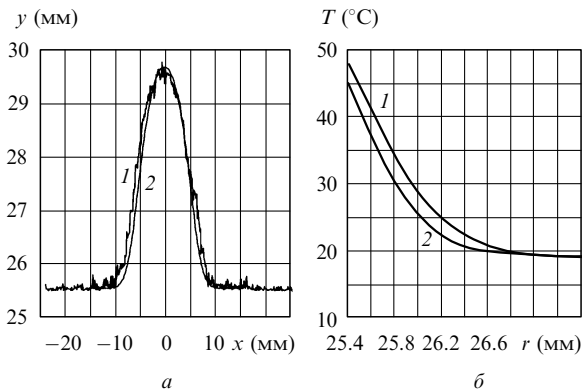


Рис.8. Иллюстрация методики восстановления радиального температурного профиля в пограничном слое: экспериментальные (1) и расчетные (2) рефрактограммы (а) и радиальные температурные зависимости (б).

вания квазистационарной конвекции [12].

Количественная диагностика температурного профиля пограничного слоя осуществляется на основе следующей методики: проводится специальная компьютерная обработка изображения двумерной рефрактограммы, минимизирующая дифракционные эффекты [12]; оцифрованная экспериментальная рефрактограмма сравнивается с набором библиотечных рефрактограмм, рассчитанных для данной установки и различных параметров температурного слоя при его заданной модели; на основе критерия минимизации среднеквадратичного отклонения выбирается расчетная рефрактограмма, наилучшим образом совпадающая с экспериментальной; в качестве измеренного температурного профиля выбирается профиль, соответствующий выбранной расчетной рефрактограмме.

На рис.8,а представлены экспериментальная и выбранная расчетная рефрактограммы, полученные при исследовании процесса конвекции в воде у поверхности горячего стального шара диаметром 50.8 мм через 40 с после погружения шара в воду. Перед погружением шар нагревался до температуры 90 °С. Центр ЛП расположен на расстоянии 0.1 мм от нижней точки шара, толщина ЛП под шаром в воде по уровню $1/e$ равна 37 мкм. Рефрактограмма наблюдалась на расстоянии 108 мм от центра шара. На рис.8,б показана восстановленная по описанной выше методике температурная зависимость в пограничном слое, которая сравнивается с зависимостью, полученной на основе пакета прикладных программ для расчета конвекции методом конечных объемов. Сравнение указанных результатов расчета и эксперимента обнаруживает хорошее совпадение: их расхождение не превышает 10 % и может быть вызвано неполным соответствием эксперименту модели, используемой для расчета с помощью пакета прикладных программ.

5. Заключение

Особенностью представленного в работе метода лазерной рефрактографии является использование СЛИ, позволяющего получать 2D- и 3D-рефрактограммы прозрачных неоднородных сред и потоков жидкости и газа. Рефрактограмма является в определенном смысле «портретом» исследуемой среды и может быть сопоставлена с

набором элементарных рефрактограмм типичных неоднородностей, что позволяет непосредственно в процессе наблюдения осуществлять экспресс-диагностику среды. Использование СЛИ позволяет также проводить 3D-визуализацию каустик лучей и проследить их формирование на основе эволюции 2D-рефрактограмм.

Различные комбинации, ориентация и расположение элементарных источников СЛИ позволяют адаптировать измерительную установку к структуре неоднородности, причем в силу протяженности источника излучения обеспечивается одновременность диагностики процесса в разных областях. Как следует из описанной выше методики измерения температуры в пограничном слое, существенным достоинством лазерной рефрактографии является возможность количественной диагностики параметров среды, т. е. восстановление профиля неоднородности на основе сравнения экспериментальных и расчетных рефрактограмм. Погрешность метода определяется в основном дифракционными эффектами и может быть значительно снижена при использовании методов специальной компьютерной обработки изображения.

В силу практической безынерционности рефракционных измерений лазерная рефрактография может использоваться для диагностики не только стационарных, но и нестационарных быстропротекающих процессов, в том числе для исследования тепловых процессов в жидкости, газе и плазме, естественной конвекции в жидкости около нагретых или охлажденных тел, сверхзвуковых потоков, процессов перемешивания различных жидкостей в аппаратах, предназначенных для химической технологии.

Кроме того, благодаря возможности создания узких зондирующих пучков метод лазерной рефрактографии адаптирован для диагностики пограничных слоев и краевых эффектов, а также исследования процессов в микро- и наноканалах.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № РНП.2.1.2.686), а также РФФИ (грант № 07-07-13529).

1. Ринкевичюс Б.С. *Лазерная диагностика потоков* (М.: Изд-во МЭИ, 1990, с. 3).
2. *Методы компьютерной обработки изображений*. Под ред. В.А.Сойфера (М.: Физматлит, 2001, с. 11).
3. Евтихиева О.А., Имшенецкий А.И., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В. *Измерительная техника*, № 6, 15 (2004).
4. Ринкевичюс Б.С. В сб.: *Фундаментальные проблемы высокоскоростных течений* (Жуковский: Изд-во ЦАГИ, 2005).
5. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. *Теория волн* (М.: Наука, 1979, с. 261).
6. Евтихиева О.А., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В. *Вестник МЭИ*, № 1, 135 (2007).
7. Yesin M.V., Rinkevichius B.S., Tolkachev A.V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4900**, 1140 (2002).
8. Евтихиева О.А. *Измерительная техника*, № 5, 34 (2006).
9. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. *Геометрическая оптика неоднородных сред* (М.: Наука, 1980, с. 153).
10. Евтихиева О.А., Лапицкий К.М., Расковская И.Л. *Труды 8-й научн.-техн. конф. «Оптические методы исследования потоков»*. Под ред. Ю.Н.Дубнищева, Б.С.Ринкевичюса (М.: Изд-во «Знак», 2005, с. 332).
11. Хауф В., Григуль У. *Оптические методы в теплопередаче* (М.: Мир, 1973, с. 28).
12. Артемов В.И., Евтихиева О.А., Лапицкий К.М. и др. *Труды 3-й Российской нац. конф. по теплообмену* (М.: Изд-во МЭИ, 2006, т. 3, с. 42).