

УДК 535.31:681.7.001

К.М. Лапицкий, А.В. Толкачев, Д.В. Симанженков

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА И ОСТЫВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ВОЗДУХЕ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ РЕФРАКТОГРАФИИ

Рассмотрена методика исследования теплового пограничного слоя, возникающего при нагреве металлической поверхности, находящейся в воздухе, основанная на методе лазерной рефрактографии. Описана методика моделирования траектории распространения лазерного пучка в тепловом пограничном слое нагретой поверхности, приведены результаты расчета смещения луча в неоднородности и угла выхода луча из неоднородности, позволяющие определить размер пограничного слоя и величину перегрева нагретой поверхности. Представлены экспериментальные изображения лазерного пучка при прохождении в пограничном слое нагретой поверхности. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных.

ЛАЗЕРНАЯ РЕФРАКТОГРАФИЯ, НЕОДНОРОДНАЯ СРЕДА, ЕСТЕСТВЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ТЕПЛОВОЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ

ВВЕДЕНИЕ

Оптически неоднородные конвекционные потоки в газах являются одним из широко распространенных видов течений, наблюдаемыми не только в природе (например, потоки воздуха около нагретых и охлажденных участков земной поверхности), но и в многочисленных технических устройствах (около нагретых поверхностей в энергетических установках – топливных баках, котлах и др.). Они характеризуются трехмерностью и нестационарностью, что существенно затрудняет их изучение, необходимое как для понимания сути явления, так и для создания многочисленных технических устройств [1].

Если рассмотреть отдельно тепловые процессы, возникающие вблизи нагретых поверхностей, то окажется, что они происходят в сравнительно небольшом по сравнению с размером объекта пространстве – пограничном слое. Зачастую использование контактных методов исследования теплового пограничного слоя затруднено либо в связи с его малой величиной (в этом случае будет нарушена структура потока), либо, наоборот, с большим размером (потребуется множество контактных датчиков).

Основанный на явлении рефракции структурированного лазерного излучения (СЛИ) метод лазерной рефрактографии [2–4], использующий цифровую регистрацию рефракционной картины (рефрактограммы) и ее компьютерную обработку, хорошо зарекомендовал себя при исследовании потоков жидкости. Вследствие больших (по сравнению с газами) градиентами показателя преломления в областях неоднородностей удается реализовать компактные экспериментальные установки (линейный размер – не более 1 м) исследования температурных полей в жидкостях. Данный метод в силу своей практической безынерционности позволяет визуализировать и проводить количественные исследования прозрачных стационарных и нестационарных неоднородных сред и получить качественно новые результаты.

Исследование конвективных потоков в воздухе сопряжено со значительными сложностями. Существенным оказывается влияние случайных неоднородностей показателя преломления, вызываемых атмосферной турбулентностью, что в ряде случаев может оказаться фактором, ограничивающим возможности лазерных систем. Для получения количественных результатов оценки параметров оптической неоднородности в воздухе необходимо создавать максимально возможно регулярное температурное поле, чтобы рефракционные эффекты на случайных неоднородностях были бы значительно меньше эффектов, возникающих в тепловом пограничном слое. Задача разработки методики измерения полей температуры в воздушной среде требует обеспечения проведения исследований на больших расстояниях от источника неоднородной среды.

Целью исследования является количественное восстановление температурного поля по результатам измерения отклонений лучей в среде. Однако для решения такой обратной задачи требуется предварительная разработка методики расчета траекторий лучей для типичных моделей неоднородностей. Верификация указанной методики должна проводиться на основе сравнения расчета с экспериментом при известных параметрах модели неоднородности. Аналитическое решение для траекторий лучей удастся получить лишь в случае плоских и радиальных неоднородностей [5, 6]. На практике плоскостойкие неоднородности, возникающие около тел плоской формы, всегда сопровождаются краевыми эффектами, сильно влияющими на результат рефракции лучей. В данной работе исследуется пограничный слой вблизи металлической поверхности нагретого на воздухе цилиндра.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Рассмотрим вариант структурной схемы экспериментальной установки (рис. 2), реализующей компьютерно-лазерный рефрактографический метод. В качестве источника излучения 1 используется лазер (He-Ne или полупроводниковый). Лазерный пучок 2 проходит около боковой поверхности нагретого металлического цилиндра 3 и попадает на матовый экран 4. Траектория неотклоненного пучка (в отсутствие цилиндра) показано пунктирной линией 5, при наличии нагретого цилиндра лазерный пучок отклоняется в связи с рефракцией в тепловой оптической неоднородности, и на экране наблюдается смещенный след лазерного пучка. С помощью цифровой видеокамеры 6 изображения регистрируются и передаются в персональный компьютер 7 со специализированным программным обеспечением. Для контроля температуры в пограничном слое предусмотрено наличие термодатчиков 8 и мультиметра 9.

Источником излучения являлся He-Ne лазер, работающий в одномодовом режиме (длина волны 0,6328 мкм). Объектом исследования (источником неоднородного температурного поля в воздухе) является нагретый металлический цилиндр (материал Д16Т) радиусом $R = 65$ мм и высотой 56,5 мм. Расстояние от выходного зеркала до оси объекта $Z_0 = 300$ мм. Лазерный пучок проходил около боковой поверхности цилиндра на расстоянии $x_0 = 0,6$ мм от оси. Форма следа лазерного пучка наблюдается на плоском матовом экране. Регистрация ведется в отраженном излучении на расстоянии 51,8 м от оси цилиндра с помощью USB-видеокамеры «ВИДЕОСКАН», подключенной к компьютеру со специализированным программным обеспечением. Съемка осуществлялась с применением объектива МТО-1000А (диапазон фокусировки – от 10 м до ∞). Для контроля распределения температуры в пограничном слое у боковой поверхности цилиндра был проведен эксперимент по сканированию температуры при помощи термодатчика (хромель-копель), сопряженной с мультиметром. Результаты измерения температуры в пограничном слое вдоль радиальной координаты, отсчитываемой от поверхности цилиндра, при различных температурах поверхности представлены на рис. 3. Примеры рефракционных изображений пучка He-Ne лазера после прохождения около боковой поверхности нагретого цилиндра показаны на рис. 4. Величины отклонений пучка в направлении от оси цилиндра и их сравнение с расчетом будут приведены в следующем разделе.

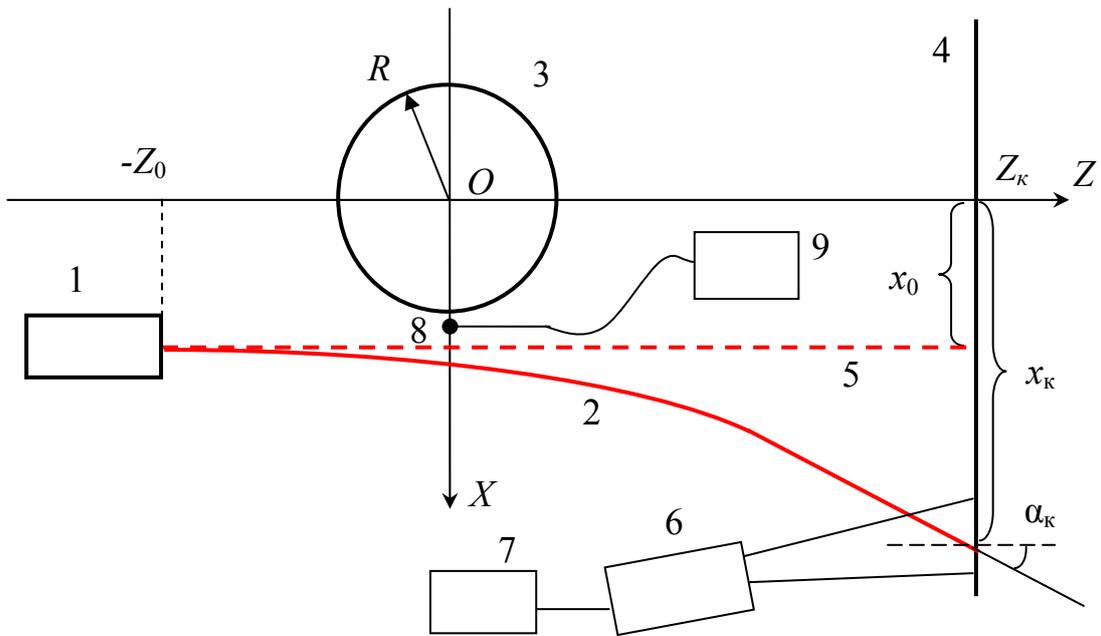


Рис. 2. Схема экспериментальной установки (вид сверху): 1 – лазер, 2 – лазерный пучок, 3 – нагретый цилиндр, 4 – экран, 5 – неотклоненный лазерный пучок, 6 – цифровая видеокамера, 7 – персональный компьютер с программным обеспечением, 8 – термопара, 9 – милливольтметр

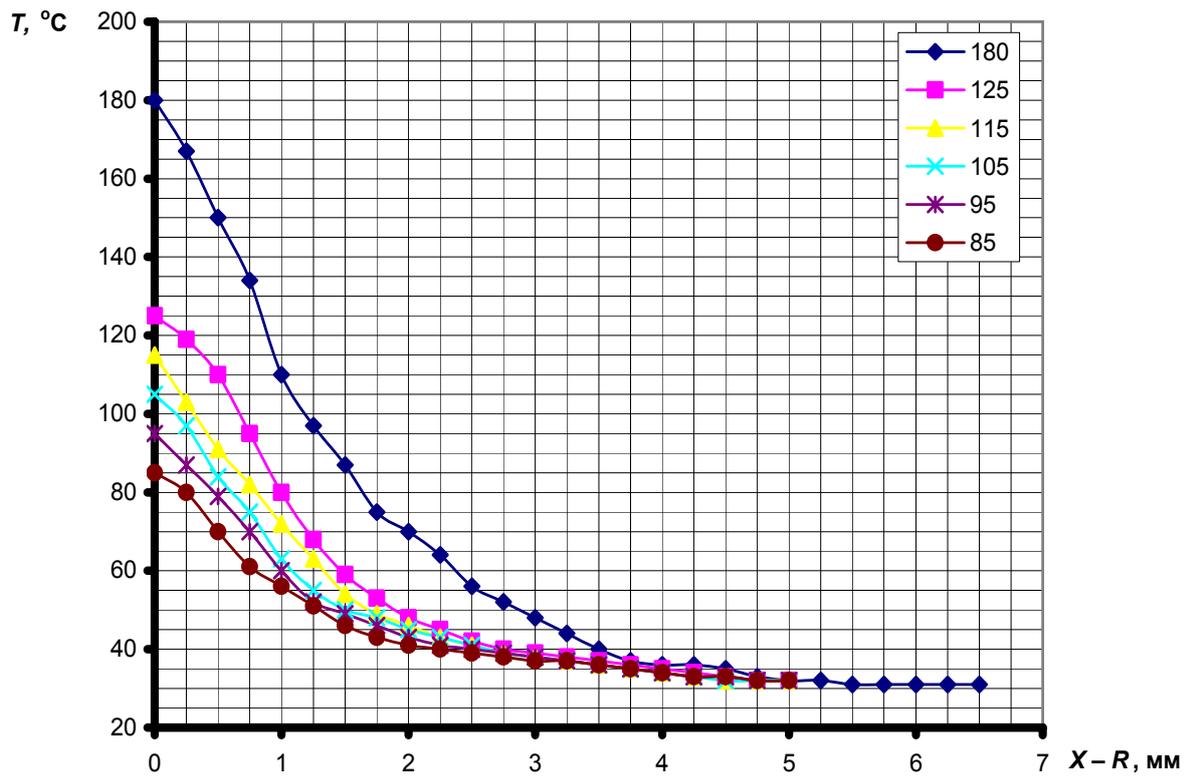


Рис. 3. Температурные распределения вдоль радиальной координаты в тепловом пограничном слое нагретого цилиндра; температура в градусах Цельсия поверхности указана в рамке

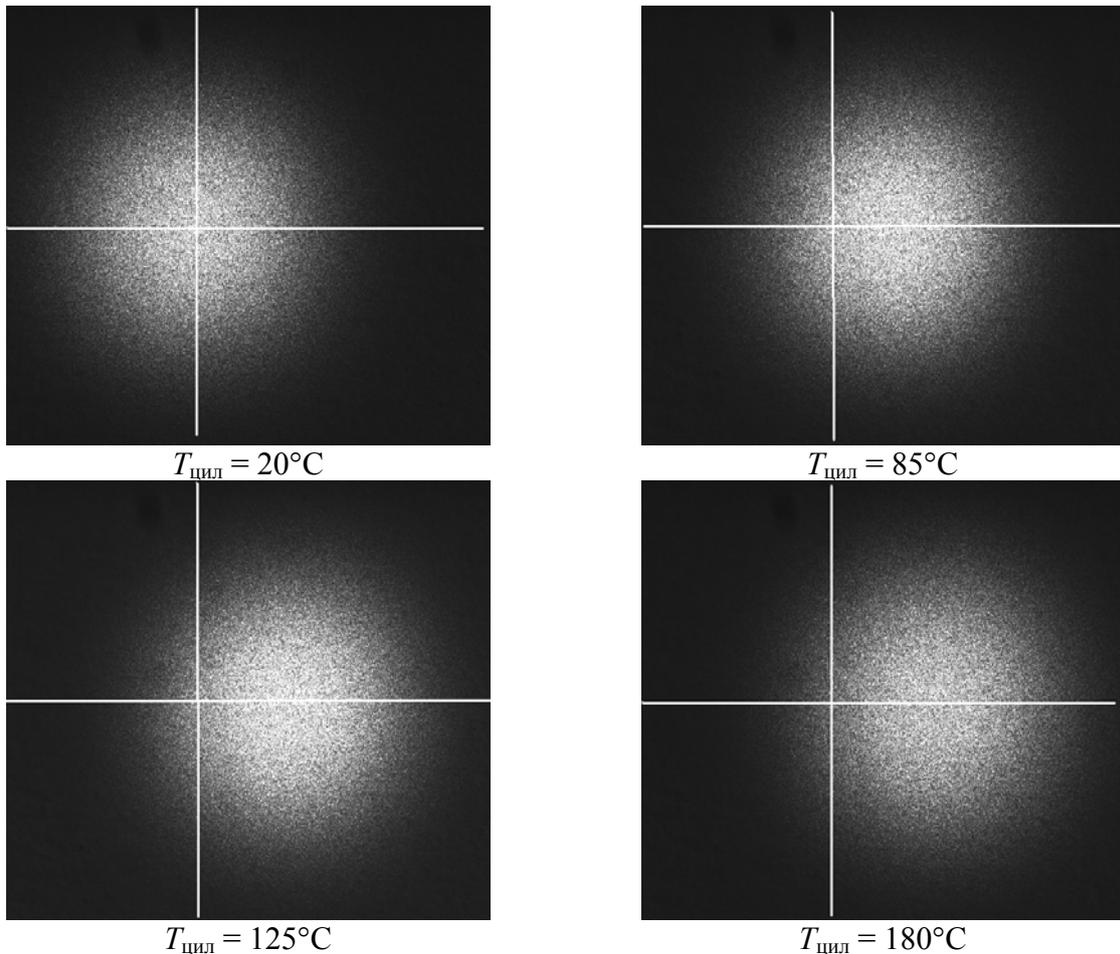


Рис.4. Экспериментальные изображения лазерного пучка; центр креста совпадает с центром исходного лазерного пучка

МЕТОДИКА КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА В ТЕПЛОМ ПОГРНИЧНОМ СЛОЕ

Модель температурного поля в пограничном слое у боковой поверхности цилиндра

Для проведения компьютерного моделирования траекторий лазерного пучка в тепловом пограничном слое необходимо определить математическую модель, описывающую распределение температуры вдоль радиальной координаты. Как показано в [4, 9], приведенные на рис. 3 распределения могут быть аппроксимированы выражением

$$T(r) = T_0 + \Delta T \cdot \exp\left(-\frac{(r - R - \Delta R)^2}{a^2}\right), \quad (5)$$

где T_0 , ΔT , ΔR , a – параметры модели температурного поля, R – радиус цилиндра, r – радиальная координата, $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$. Параметр T_0 определяется температурой окружающей среды, значение $T(r = R)$ равно температуре на поверхности нагретого тела, а отношение $\Delta T/a$ соответствует среднему градиенту температурного поля в пограничном слое толщиной a , определяемом по уровню спада температуры в e раз. Значение градиента температуры при $r = R$ определяется сдвигом ΔR . В таблице 1 приведем значения указанных параметров для распределений температуры в пограничном слое исследуемого цилиндра.

Таблица 1. Параметры температурного распределения по радиальной координате нагретого цилиндра

$T_{ц}, °C$	$T_0, °C$	$\Delta T, °C$	$R, мм$	$\Delta R, мм$	$a, мм$
180	32,36	312,44	65	-2,789	3,275
125	35,09	100,49	65	-0,512	1,731
115	33,04	175,85	65	-2,366	2,721
105	32,68	973,34	65	-6,5	4,059
95	33,28	264,51	65	-3,903	3,268
85	32,83	2142	65	-9,123	4,759

Схема моделирования траектории приведена на рис. 5.

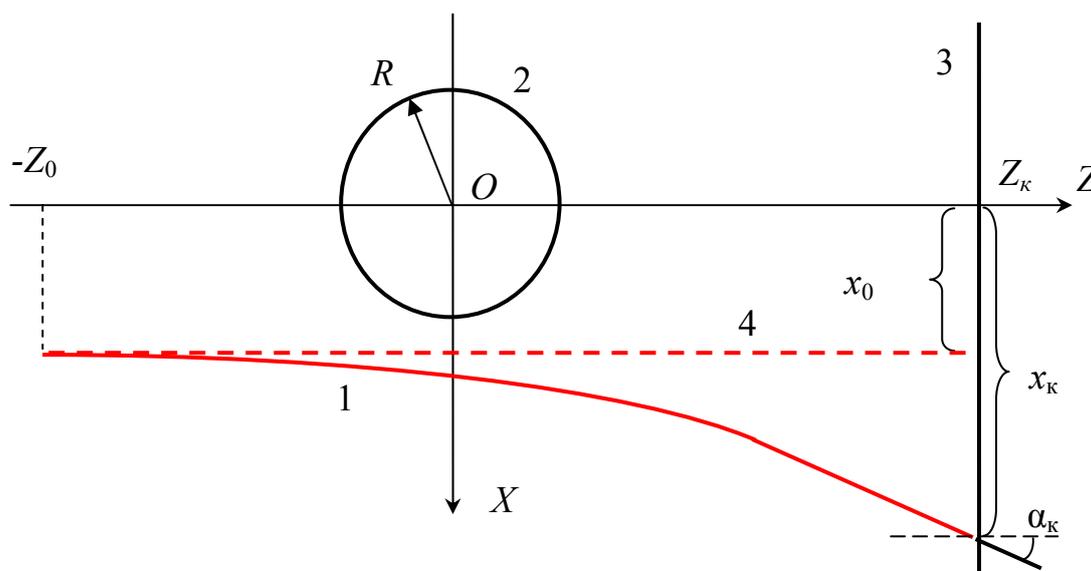


Рис.5. Схема моделирования траектории лазерного пучка в пограничном слое нагретого цилиндра

В [2, 4, 9] приведена методика моделирования траектории светового луча с использованием аналитических выражений [5]. Однако в геометрии рассматриваемой задачи это не совсем удобно, т.к. расстояние до экрана приблизительно на 3 порядка превосходит размер пограничного слоя и непосредственно рефракция происходит на сравнительно небольшом расстоянии от цилиндра. Целесообразнее использовать численный метод расчета, при котором имеется возможность варьировать размер расчетной сетки [10].

Описание программы расчета траекторий лучей и рефрактограмм

Для реализации численного алгоритма расчета траектории лучей на кафедре физики им. В.А. Фабриканта было разработано программное средство учебного назначения (ПСУН) «Компьютерное моделирование рефракции лазерной плоскости» (авторы: Лапицкий К.М., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С.) [11] для решения задачи распространения лазерной плоскости в трехмерной оптически неоднородной среде. Приложение создано в среде программирования Delphi и может работать на компьютерах с операционной системой Windows; рекомендуемые системные требования: 64 Мб ОЗУ, 10 Мб свободного места на диске. В программе заложен расчет траектории на основе численного решения дифференциального лучевого уравнения [5], поле показателей преломления задается в виде сетки с известными значениями температуры, которая с использованием дисперсионной формулы пересчитывается в показатель преломления. Связь теплофизических и оптических параметров неоднородной среды (теплового пограничного слоя) рассмотрена в докладе «Анализ параметров тепловой воздушной струи лазерным рефрактографическим методом» (Евтихиева О.А., Лапицкий К.М., Толкачев А.В.) [настоящий сборник, доклад №6].

На рис. 6 – 8 представлены окна ввода параметров температурного поля, вывода результатов расчета траектории светового луча и график траектории.

Моделирование сферической 2D-неоднородности

Модель температурного поля

$$T(r) = T_0 + \Delta T \cdot \exp\left(-\frac{(r - \Delta R - R)^m}{a^m}\right)$$

m = 2

T₀ = 29,58 °C ΔR = 0,735 мм R = 65 мм

ΔT = 49,48 °C a = 1,267 мм

Параметры сетки расчетной области

x_{нач} = 65 мм x_{кон} = 70 мм

z_{нач} = -20 мм z_{кон} = 20 мм

Количество разбиений по оси x: 1000 Количество разбиений по оси z: 5000

Названия файлов для записи результатов

Столбец координат по оси x: xsph.txt

Столбец координат по оси z: zsph.txt

Матрица температурного поля: tsph.txt

Расчет и запись в файл График Закрыть

Рис 6. Окно ввода параметров температурной неоднородности

Программа позволяет проводить расчеты рефрактограмм в сферически-слоистых оптически неоднородных средах с распределением температуры по экспоненциальному и гауссову законам с выдачей результатов в виде графиков и их записью в текстовый файл. Время численного расчета одной траектории компьютере Pentium IV с тактовой частотой 1700 МГц составляет 1 – 2 секунды в зависимости от выбранного допустимого количества узлов сетки, а рефрактограммы, построенной на основе нескольких лучей, – от 20 секунд до 1 минуты. В программе предусмотрена возможность моделировать двумерную температурную неоднородность, проводить расчет траектории лучей в численно заданном двумерном температурном поле и расчет рефрактограмм в трехмерном температурном поле около различных нагретых тел (шар, цилиндр, клин) с учетом краевых эффектов, а также в сферической неоднородности с отрицательным градиентом показателя преломления.

Расчет траектории луча в 2D-неоднородности

Считывание данных из файлов

Столбец координат по оси x: Xsph.txt
Столбец координат по оси z: Zsph.txt
Матрица температурного поля: Tsph.txt

Загрузить данные

Среда:
 вода
 воздух

Дисперсионная формула (0,6328 мкм) для воды

$$n = 1.3328 + (-0.000051) T + (-0.0000011) T^2$$

Давление воздуха: 760 мм рт. ст.

Начальные координаты и угол входа луча в неоднородность

x0 = 65.6 мм z0 = -20 мм α0 = 0 °

Размеры расчетной области Расчет

Конечная точка траектории в неоднородности и угол выхода

Координата Z: 20 мм Угол выхода: 0,042788657040921 °
Координата X: 65,6149372379996 мм Величина вертикального смещения: 0,0149372379996038 мм

График траектории Запись в файл Имя файла: res_2D_65.6.txt

Расчет траектории в экспериментальной установке Закрыть

Рис. 7. Окно вывода результатов расчета траектории луча

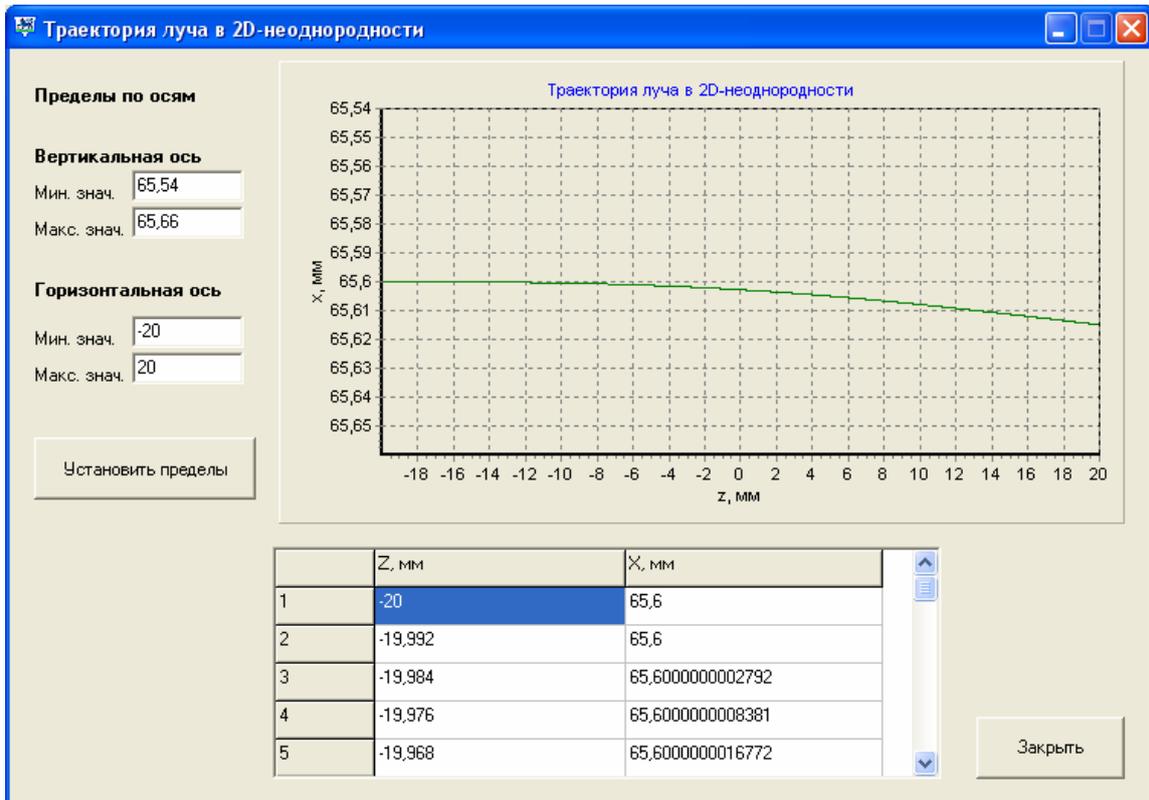


Рис. 8. Окно вывода графика траектории луча

Экспериментальные результаты и сравнение с расчетом

На рис. 9 приведены траектории лучей в пограничном слое с параметрами, приведенными в таблице 1, в случае, когда лазерный пучок проходит на расстоянии 0,6 мм от боковой поверхности цилиндра при различных температурах.

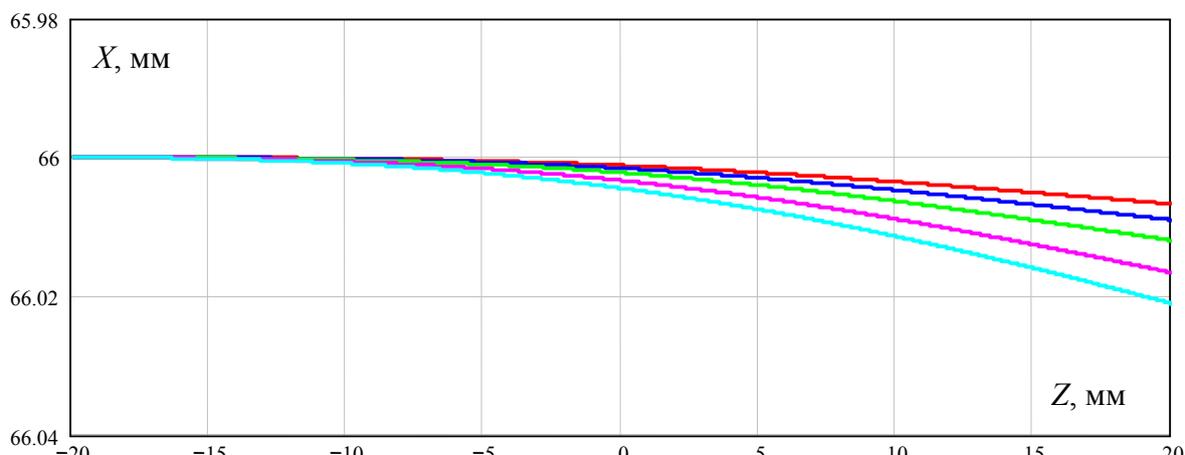


Рис. 9. Траектории лучей (начальный участок) в пограничном слое нагретого цилиндра; температура поверхности цилиндра – 85°C; 95°C; 105°C; 115°C; 125°C (последовательность графиков сверху вниз)

На данном рисунке приведены только начальные участки траекторий лучей, где и происходит рефракция. Далее траектории выходят на линейный участок. Зная угол наклона прямой к оси Z и расстояние до экрана, можно вычислить конечную координату луча по оси X на экране. На рис. 10 приведены графики, иллюстрирующие зависимость конечного положения на экране x_k световых лучей (расчет) и лазерного пучка (эксперимент) от температуры поверхности цилиндра. Определение величины смещения лазерного пучка проведено по алгоритмам, приведенным в [12, 13] с погрешностью до десятых долей пикселя, что составляет в масштабе изображения 0,1 мм, т.е. величина регистрируемого смещения значительно меньше размера самого пучка.

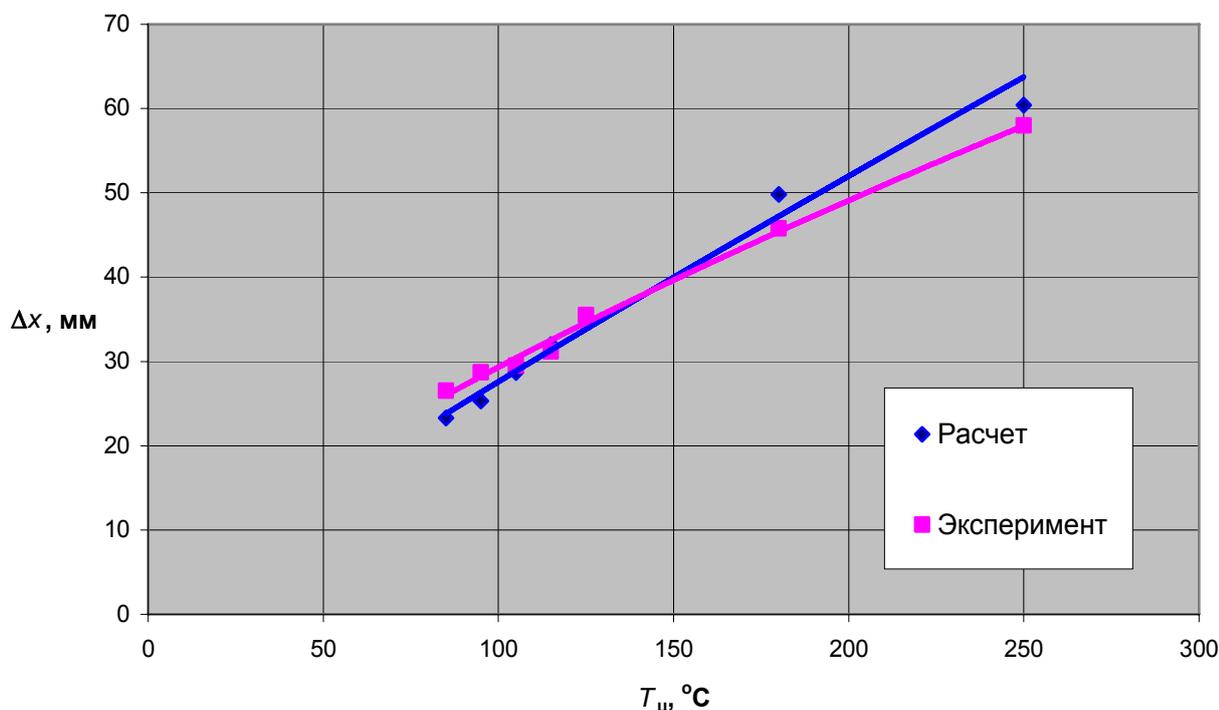


Рис. 10. Зависимости поперечного смещения световых лучей (расчет) и лазерного пучка (эксперимент) от температуры поверхности цилиндра

Приведенные результаты показывают хорошее согласие расчета и эксперимента. Различие может быть вызвано погрешностью аппроксимации и отклонением формы температурного поля от сферической, погрешностью обработки, а также неидеальностью условий эксперимента из-за большого расстояния между объектом и экраном (наличие дополнительных источников температурной неоднородности).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный метод диагностики процесса нагрева и остывания цилиндрической поверхности, основанный на сравнении обработанных экспериментальных рефракционных изображений лазерного пучка и расчетных траекторий, может быть использован для определения температуры поверхности и градиента температуры в приповерхностной области. Моделирование траекторий световых лучей целесообразно проводить с использованием численного метода расчета.

Наблюдаемые в эксперименте величины отклонений центра лазерного пучка составляют около 30 мм при температуре цилиндра 100°C и 60 мм при 250°C (на расстоянии приблизительно 50 м от тепловой воздушной струи). При уменьшении расстояния величина смещения составит меньшие величины, но благодаря возможностям современных методов обработки цифровых изображений определение величины отклонения может быть произведено с погрешностью до сотых долей пикселя, т.е. величина регистрируемого смещения может быть значительно меньше размера самого пучка.

Наблюдается хорошее совпадение результатов расчета и эксперимента. Относительная погрешность расчетных отклонений пучка относительно экспериментальных находится в пределах 10%. Наличие небольшого расхождения вызвано погрешностью аппроксимации и отклонением формы температурного поля от сферической, погрешностью обработки, а также неидеальностью условий эксперимента из-за большого расстояния между объектом и экраном (наличие дополнительных источников температурной неоднородности).

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (ГК № 02.740.11.0449).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белозеров А.Ф. Оптические методы визуализации газовых потоков. – Казань, 2007 г. – 748 с.
2. Евтихиева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С. Лазерная рефрактография. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 176 с.
3. Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В. Лазерная рефрактография оптически неоднородных сред. // Квантовая электроника. 2007. № 12. С. 1176 – 1180.
4. Lapitskiy K.M., Raskovskaya I.L., Rinkevichyus B.S. Quantitative visualization of transparent spherical temperature layer // CD-ROM Proc. 12th International Symposium on Flow Visualization. / Ed. J. Kompenhans, A. Schroeder, I. Grant. – Goettingen, Germany: German Aerospace Center (DLR), 2006. Paper No. 55.
5. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. – М.: Наука, 1990. – 432 с.
6. Хауф В., Григуль У. Оптические методы в теплопередаче. – М.: Мир, 1973. 240 с.
7. Физические величины. Справочник / Под. ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
8. Ринкевичюс Б.С. Лазерная диагностика потоков. – М.: МЭИ, 1990. – 288 с.
9. Евтихиева О.А. Рефракция лазерной плоскости в сферически неоднородном тепловом пограничном слое // Измерительная техника. – 2006, № 5. С. 35 – 39.

10. Лапицкий К.М., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С. Алгоритм расчета рефрактограмм плоского лазерного пучка в оптически неоднородной среде. // Измерительная техника. – 2009, №5. С. 36 – 39.
11. Лапицкий К.М., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С. Программное средство учебного назначения «Компьютерное моделирование рефракции лазерной плоскости». – М.: МЭИ, 2010.
12. Имшенецкий А.И. Влияние шумов изображения на погрешность определения центра лазерного пучка. //Тезисы докладов конференции «Лазеры. Измерения. Информация». – С-Петербург: Издательство БГТУ, 2004. С.28 – 29.
13. Савченко Е.В., Евтихиева О.А., Ринкевичюс Б.С. Определение параметров астигматического гауссова пучка в задачах лазерной градиентной рефрактометрии.// Измерительная техника. 2007. №4. С.31 — 35.

K.M. Lapitskiy, A.V. Tolkachev, D.V. Simanzhenkov

*Moscow Power Engineering Institute (Technical University), Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: LapitskyKM@mpei.ru*

HEATING AND COOLING OF A METAL SURFACE PROCESS RESEARCH BY THE LASER REFRACTOGRAPHY METHOD

The technique of the thermal boundary layer research near a metal surface on heating in air is considered by a method of laser refractography. The technique of a light beam trajectory modeling in a thermal boundary layer of the heated up surface is described, the beam displacement calculation in heterogeneity and a corner of an output beam from the heterogeneity are resulted, the boundary layer size and the heated temperature value is defined. The laser beam experimental images are submitted by spreading through a boundary layer of the heated up surface. The comparison of calculated and experimental results is carried out.

**LASER REFRACTOGRAPHY, INHOMOGENIOUS MEDIA, FREE CONVECTION,
NUMERICAL MODELLING, THERMAL BOUNDARY LAYER**