

## ВИЗУАЛИЗАЦИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНО-ЛАЗЕРНЫХ МЕТОДОВ

### АННОТАЦИЯ

Дано описание применения компьютерно-лазерных методов для визуализации потоков жидкости, основанных на зондировании среды структурированным лазерным излучением, получаемом с помощью дифракционных оптических элементов. Картины визуализации регистрируются цифровыми видеокамерами. Приведены примеры визуализации теплофизических процессов, обусловленных свободной конвекцией в жидкости около нагретых тел: параллелепипеда, цилиндра и шара.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Сложность теплофизических процессов в жидкости заключается в их трехмерности и нестационарности, существенно затрудняющих использование расчетных методов моделирования [1]. Основные теплофизические процессы развиваются в тонком пограничном слое толщиной несколько миллиметров, что осложняет использование контактных методов исследования конвекции. Для проведения расчетов тонкого пограничного слоя необходимо учитывать изменение его физических свойств. Поэтому разработка бесконтактных оптических методов исследования конвекции является весьма актуальной.

Для исследования газовых потоков широко используются оптические рефракционные методы [2], однако для исследования тепловых процессов в жидкости оптические методы применяются реже, хотя они были давно описаны [3]. Это связано с недостаточным развитием этих методов применительно к решению теплофизических задач в жидкости.

Создание лазеров позволило получить узкие коллимированные пучки, что открыло новые возможности в оптической градиентной рефрактометрии. Современный этап развития лазерной и вычислительной техники характеризуется появлением новых лазеров, освоением промышленностью выпуска дифракционных оптических элементов (ДОЭ) [4], цифровых видеокамер и фотоаппаратов с числом разрешаемых элементов более миллиона, компьютеров с быстродействием свыше 2 ГГц и объемом памяти свыше 100 Гбайт, разработкой новых эффективных алгоритмов и методов обработки оптических изображений [5].

Все это позволило приступить к разработке оптических методов диагностики потоков жидкости на технически новом уровне [6]. Так в [7,8] был предложен компьютерно-лазерный рефракционный (КОЛАР) метод исследования оптически не-

однородных потоков, в котором используются лазерные пучки специальной формы, регистрация рефракционных картин ведется с помощью цифровых видеокамер, а обработка выполняется с помощью компьютеров. Метод является дифференциальным, что существенно снижает требования к оптическим элементам экспериментальной установки.

### 2. КОМПЬЮТЕРНО-ЛАЗЕРНЫЕ МЕТОДЫ

Рассмотрим распространение лазерного пучка вдоль оси  $Oz$  в оптически неоднородной среде, состоящей из трех участков (рис.1). Первый участок ( $0 - z_1$ ) – среда оптически однородная с показателем преломления  $n_0$ ; второй участок ( $z_1 - z_2$ ) – среда оптически неоднородная с показателем преломления  $n(y)$ , зависящим от координаты  $y$ , причем  $n(z_2) = n_0$ ; третий участок ( $z_2 - z_3$ ) – среда оптически однородная с показателем преломления  $n_0$ . Если лазерный пучок падает нормально на такую среду, то на начальном участке он будет распространяться прямолинейно вдоль оси  $Oz$ , на втором участке пучок будет отклоняться в сторону положительного градиента показателя преломления, на третьем – пучок будет распространяться прямолинейно под углом  $\alpha_1$  к оси  $Oz$ .

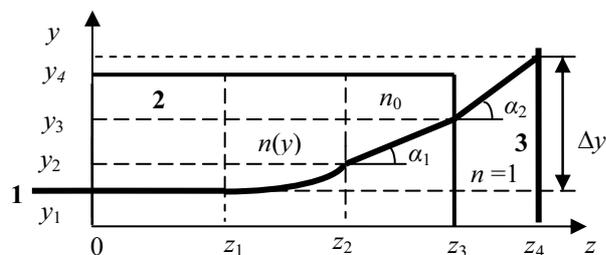


Рис. 1 – Распространение лазерного пучка слоистой среде: 1 – лазерный пучок, 2 – исследуемая среда, 3 – экран

В КОЛАР методе измеряется смещение  $\Delta y$  изображения лазерного пучка на экране 3, которое можно легко определить в геометрическом приближении на основании законов распространения пучка [9]. Возможность использования данного метода с пучками в виде лазерной плоскости для визуализации процессов перемешивания жидкостей была показана в [10], а для естественной конвекции — в [7,8]. В данной работе применяются пучки более сложной формы.

Угол отклонения луча в точке выхода из второго участка среды в направлении оси  $y$   $\alpha_y$  определяется соотношением [9]

$$\alpha_y(y_2) = \int_{y_1}^{y_2} (dn/dy) dz, \quad (1)$$

где  $dn/dy$  - градиент показателя преломления по координате  $y$ .

Точка выхода луча из второго участка среды находится из следующего интегрального уравнения

$$z_2 = \int_{y_1}^{y_2} [\sqrt{n^2(y) - n_0^2}]^{-1} dy. \quad (2)$$

Угол выхода луча из второго участка среды равен

$$\alpha_1 = \arcsin[n(y_2)n_0^{-1} \sin \alpha_y(y_2)], \quad (3)$$

а угол выхода из среды будет

$$\alpha_2 = \arcsin(n_0 \sin \alpha_1). \quad (4)$$

Полное смещение лазерного пучка в плоскости регистрации равно

$$\Delta y = y_2 - y_1 + (z_3 - z_2) \operatorname{tg} \alpha_1 + (z_4 - z_3) \operatorname{tg} \alpha_2. \quad (5)$$

Вид функции  $n(y)$  определяется свойствами жидкости и распределением температуры в пограничном слое. Следует заметить, что выражения (1) и (2) не содержат ограничений на значение градиента показателя преломления, как это имеет место в [2].

Зависимость показателя преломления воды от температуры на длине волны  $\lambda = 0,6328$  мкм определяется аппроксимационной функцией

$$n(T) = 1,3328 - 0,000051T - 0,00000T^2, \quad (6)$$

полученной на основании дисперсионной формулы и данных [11]. Здесь температура  $T$  измеряется в °С.

Регистрация рассеянного частицами излучения позволяет измерять скорость потока по эффекту Доплера и PIV-методом [3,6], а также наблюдать влияние оптически неоднородного потока на характер распространения в нем лазерного пучка.

### 3. СТРУКТУРИРОВАННОЕ ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Использование лазеров совместно с дифракционными оптическими элементами позволяет получать пространственно-модулированное лазерное излучение сложной формы. Зондирование исследуемого потока жидкости, газа или плазмы таким излучением, регистрация прошедшего исследуемый поток излучения с помощью цифровых видеокамер и дальнейшая компьютерная обработка рефракционных изображений открывают новые возможности исследования оптически неоднородных потоков жидкости, газа и плазмы.

ДОО стали выпускаться промышленностью только в последнее время и представляют собой тонкие фазовые пластинки, на которые с помощью лазера нанесены специальные фазовые рельефы.

При дифракции лазерного пучка на таком элементе получается модулированное по пространству излучение, которое получило название структурированного лазерного излучения (СЛИ).

В таблице 1 приведены основные виды СЛИ.

Исходный пучок от лазера является осесимметричным. С помощью ДОО, эквивалентного линейной дифракционной решетке, такой пучок превращается в совокупность расходящихся пучков, расположенных в одной плоскости. С помощью ДОО, эквивалентного цилиндрической линзе, из лазерного пучка получается расходящаяся лазерная плоскость, которая в сечении дает линию. Сочетание цилиндрической линзы и дифракционной решетки позволяет получить несколько таких линий (до 100).

Таблица 1. Основные виды СЛИ

№	Тип лазерного пучка	Сечение СЛИ
1	Исходный пучок	
2	Многоточечная линия	
3	Многоточечные линии	
4	Многоточечный «крест»	
5	Горизонтальная линия	
6	Множественные линии	

Использование ДОО с более сложным фазовым рисунком позволяет получить СЛИ другой формы: крестовидный пучок, состоящий из двух лазерных плоскостей, расположенных в ортогональных плоскостях; конусный пучок; совокупность конусных пучков и т.д.

### 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

На рис. 2 показана схема экспериментальной установки, предназначенной для визуализации теплофизических процессов в жидкости около нагретых (охлажденных) тел с помощью СЛИ. Установка состоит из лазера 1, юстировочного столика с установленным на нем ДОО, на выходе которого формируется лазерная плоскость (ЛП) 3, прозрачного бассейна с водой 4 с размещаемым в нем нагреваемым объектом, полупрозрачного экрана 5, на котором наблюдается рефракционная картина. Эта картина регистрируется с помощью цифровой видеокамеры 7, а рассеянное лазерное излучение регистрируется цифровой видеокамерой 6. Сигналы с камер подаются на компьютер 8. Обработка рефракционной картины и картин визуализации по рассеянному излучению ведется с помощью пакета прикладных программ 9.

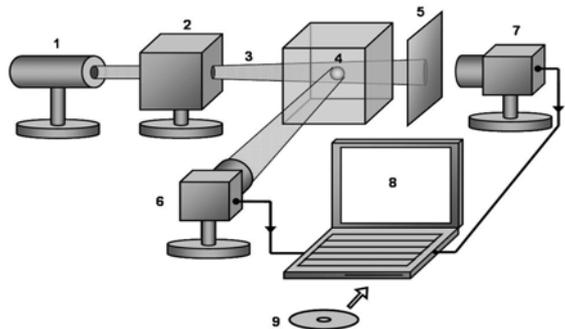


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для визуализации естественной конвекции в жидкости

Методика проведения эксперимента состояла в следующем. С помощью юстировочного столика 2 и устройства поворота сформированное ДОО лазерное излучение направлялось в непосредственной близости от поверхности нагреваемого объекта в бассейн 4. В начале эксперимента цифровой видеокамерой 7 записывалось изображение рефракционной картины на экране 5, которое использовалось в дальнейшем для сравнения. Далее металлический объект нагревался до температуры 50-100 °С и опускался в бассейн с водой. После этого велась видеозапись рефракционной картины на экране 5 в течение нескольких минут. Температура объекта измерялась с помощью термодпары. Записанное изображение рефракционной картины вводилось в компьютер и обрабатывалось с помощью специального пакета прикладных программ. Целью обработки являлось количественное сравнение рефракционных картин: зарегистрированной при наличии нагретого тела и исходной, зарегистрированной в начальный момент времени.

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

### 5.1. Визуализация по рефракции

При проведении эксперимента использовались ДОО, позволяющие получать различные виды СЛИ: плоскость, крест, концентрические окружности. На рис. 3 приведены изменения изображений на экране 5 следа тонкой ЛП, прошедшей под дном различных нагретых тел: параллелепипеда, размером 38,2 x 27,2 мм<sup>2</sup>; вертикально расположенного цилиндра с плоским дном диаметром 24 мм и высотой 72 мм, изготовленного из дуралюмина; шара из стали диаметром 41,2 мм. Первые два тела после их нагревания до температуры  $T_T$  погружались в холодную воду на глубину 45–50 мм. Нагретый стальной шар погружался в холодную воду полностью. Температура воды в кювете была равна комнатной и измерялась с помощью образцового ртутного термометра. Толщина ЛП под дном исследуемого объекта, измеренная по уровню  $1/e^2$ , была равна 0,12 мм и во всех случаях была меньше толщины пограничного слоя, которая составляла 1-3 мм.

Из рис. 3 видно, что исходная ЛП, след которой на экране представляет собой прямую линию, деформируется под воздействием оптической неоднородности жидкости, которая окружает любое нагретое тело. Эта деформация зависит как от расстояния между ЛП и поверхностью исследуемого тела, так и от времени. Деформации ЛП существенно зависят также от формы нагретого тела. После остывания нагретого тела деформации ЛП исчезают. Построение зависимости величины деформации ЛП от времени позволяет определить время остывания нагретого тела или время нагрева холодного.



Рис. 3. Рефракционные картины для лазерной плоскости, прошедшей под дном различных объектов

На рис. 4 показаны примеры визуализации пограничного слоя около нагретых тел с помощью СЛИ в виде «креста». Исходное излучение представляет собой совокупность тонких пучков, расположенных в ортогональных плоскостях. В данном эксперименте толщина каждого из пучков была больше, чем толщина пограничного слоя. Эти пучки фокусировались на экране. Величина и направление отклонения каждого из пучков характеризуют значение и направление градиента распределения температуры в пограничном слое.



Рис. 4. Рефракционные картины визуализации пограничного слоя с помощью «креста»

### 4.2. Визуализация конвекции по рассеянию света

Картины визуализации получаются с помощью видеокамеры 6, расположенной под углом к направлению распространения исходного лазерного излучения (см. рис. 2), или с помощью видеокамеры 7, расположенной под некоторым углом к направлению распространения лазерного излучения (рассеяние «вперед»). Так, на рис. 5,а показан неискаженный ход лазерного пучка в воде под холодным цилиндром с плоским дном (вертикальные светлые линии появляются на снимках из-за бликов на боковой поверхности цилиндра).

Оптическая неоднородность, обусловленная наличием градиента температуры в воде под дном нагретого цилиндра, приводит (см. рис. 5,б), во-первых, к нарушению прямолинейности хода лазерного пучка в жидкости и, во-вторых, к фокусировке пучка из-за его конечного поперечного размера.

На рис. 6 по рассеянному излучению визуализируются картины, характеризующие появление термиков над нагретым стальным шаром. Наблюдаются существенное искажение формы лазерных плоскостей и появление неосвещенных участков из-за очень больших градиентов температуры в воде над шаром. В случае зондирования среды двумя лазерными плоскостями по приведенной картине возможно определение координат термиков и их статистических характеристик.

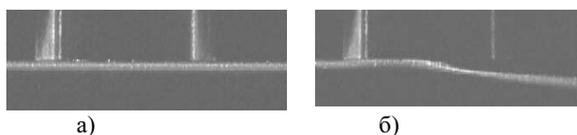


Рис. 5. Визуализация лазерного пучка в воде: а — под холодным цилиндром с плоским дном; б — под сильно нагретым цилиндром

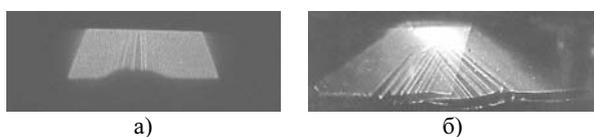


Рис. 6. Визуализация термиков в воде над сильно нагретым стальным шаром: а) одна лазерная плоскость, б) две лазерные плоскости

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные компьютерно-лазерные измерительные системы существенно расширяют возможности количественной диагностики и визуализации сложных трехмерных нестационарных течений жидкости. Переход к цифровым технологиям и прямая обработка рефракционных изображений позволяют организовать мониторинг исследуемых процессов в реальном времени, что открывает широкие перспективы внедрения этих систем в практику учебных, научных и технологических измерений.

Созданная установка предназначена для исследования нестационарных тепловых процессов, происходящих в пограничном слое прозрачной жидкости вокруг нагретых тел, с быстродействием 25 кадров в секунду и в конечном счете зависит от параметров применяемой цифровой видеокамеры. Размеры исследуемых объектов – 10 – 100 мм, пространственное разрешение – 0,05 – 1,0 мм. Диапазон температур – 15 – 100 °С.

При разработке алгоритмов и методик численного моделирования рефракции СЛИ в тепловом пограничном слое нагретых тел станет возможным сопоставление расчетных рефракционных картин и экспериментально полученных КОЛАР методом. Это необходимо для верификации численных методов расчета тепловых процессов в жидкости.

КОЛАР метод позволяет определять характерные временные параметры нестационарного теплового процесса, например, время нагревания или остывания тела в жидкости. Метод светорассеяния позволяет визуализировать потоки жидкости около нагретых тел.

Работа выполнялась по гранту Министерства образования и науки Российской Федерации (грант № РНП.2.1.2.686).

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Свободноконвективные** течения, тепло- и массообмен / Пер. с англ. Б. Гербхарт, Й. Джалурия, Р. Махаджан, Б. Саммакин. М.: Мир, 1991. Кн. 1.
2. **Хауф В., Григуль У.** Оптические методы в теплопередаче. М.: Мир, 1973. 240 с.
3. **Ринкевичюс Б.С.** Лазерная диагностика потоков. М.: Издательство МЭИ, 1990. 287 с.
4. **Методы** компьютерной оптики /Под ред. В.А. Сойфера. М.: Физматлит, 2003. 687 с.
5. **Методы** компьютерной обработки изображений /Под ред. В.А.Сойфера. М.: Физматлит, 2001. 780 с.
6. **Ринкевичюс Б.С.** Современные лазерно-компьютерные методы диагностики газовых потоков // Труды НТК «Фундаментальные проблемы высокоскоростных течений». Жуковский: Изд-во ЦАГИ, 2005.
7. **Компьютерно-лазерный** рефракционный метод исследования оптически неоднородных потоков / О.А. Евтихиева, А.И. Имшенецкий, Б.С. Ринкевичюс, А.В. Толкачев. Измерительная техника. 2004. № 6. С. 15-19.
8. **Исследование** нестационарного температурного поля при естественной конвекции КОЛАР методом / В.И. Артемьев, О.А. Евтихиева, К.М. Лапицкий, Б.С. Ринкевичюс, А.В. Толкачев, Г.Г. Яньков //Труды VII МНТК ОМИП 2005 / Под. ред. Ю.Н. Дубнищева, Б.С. Ринкевичюса. М.: МЭИ, 2005. С. 478-481.
9. **Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И.** Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1980.
10. **Лазерный** рефракционный метод исследования жидкостей в закрученных потоках / О.А. Евтихиева, М.В. Есин, С.В. Орлов, Б.С. Ринкевичюс, А.В.Толкачев // Труды РНКТ-3.Т.4. 2002. С. 197-200.
11. **Лейкин М.В., Молочников Б.И., Морозов В.Н., Шакарян Э.С.** Отражательная рефрактометрия. Л.: Машиностроение, 1983.