

*Двенадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 25 — 28 июня 2013 г.*

УДК 535.31:681.7.001

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

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: rinkevbs@mail.ru*

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ РЕФРАКТОГРАФИИ

АННОТАЦИЯ

Доклад посвящен описанию методики проведения и анализу экспериментальных результатов исследования физических процессов в прозрачных жидкостях с помощью лазерной рефрактографии. Приведены структурные схемы лазерных измерительных систем, описан принцип их работы и показаны библиотеки типичных рефрактограмм.

**ОПТИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНЫЕ СРЕДЫ, ЛАЗЕРНАЯ РЕФРАКТОГРАФИЯ,
СТРУКТУРИРОВАННОЕ ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, ГРАДИЕНТ ТЕМПЕРАТУРЫ**

ВВЕДЕНИЕ

Физические процессы в жидкостях и газах вследствие своего чрезвычайного разнообразия и сложности представляют значительный интерес для исследования на основе комплексного сочетания различных подходов к их изучению. Однако при проведении экспериментов и теоретического анализа исследователи имеют дело с определенными моделями, которые не могут обеспечить адекватного представления о процессах, происходящих в реальных условиях.

В этом аспекте оптические методы исследования физических процессов в жидкостях и газах имеют большое преимущество перед другими методами, так как они позволяют визуализировать исследуемый процесс, т.е. увидеть глазами, не нарушая его характеристик [1]. Это хорошо понимал немецкий ученый 18-го века Э. Мах, который, впервые, с помощью теневого прибора увидел ударные волны. Ему принадлежит важное высказывание «Увидеть – значит понять» [2]. Роль оптических методов исследования газовых потоков, особенно сверхзвуковых, огромна [3]. Для этих целей были разработаны различные теневые, интерференционные, поляризационные и голографические методы и созданы соответствующие приборы. Например, в нашей стране был широко распространен теневой прибор марки ИАБ-451 [3]. Большинство из этих приборов из-за их дороговизны и громоздкости в настоящее время не выпускаются.

После появления лазеров были разработаны новые методы диагностики потоков жидкости и газа: лазерная доплеровская анемометрия, фазово-доплеровская анемометрия, лазерная анемометрия по изображениям частиц, фотолюминесцентные методы и ряд других [1]. При использовании этих методов в оптически однородный поток вводятся мелкие светорассеивающие частицы, параметры движения которых определяются по рассеянному

излучению. В настоящее время такого рода приборы широко используются в аэрогидродинамических и теплофизических экспериментах.

Потоки жидкости и газа, в которых происходят теплофизические процессы, являются оптически неоднородными. Причиной оптической неоднородности, главным образом, является зависимость показателя преломления от температуры среды. Причем градиенты показателя преломления в потоках жидкости существенно больше (на два порядка), чем в газовых потоках при одинаковых градиентах температур. Это ограничивает область применения перечисленных выше методов для исследования потоков жидкости, но позволяет создавать новые лазерные методы, на основе которых по измерению оптической неоднородности потока определяется градиент температуры или концентрации в нем. Речь идет о лазерных методах, основанных на явлении рефракции пространственно-модулированных лазерных пучков в оптически неоднородных средах.

ЛАЗЕРНАЯ РЕФРАКТОГРАФИЯ

Лазерная рефрактография основана на зондировании исследуемой прозрачной среды структурированным лазерным излучением (СЛИ), цифровой регистрации рефракционной картины (рефрактограммы) и ее компьютерной обработке с целью восстановления параметров потока [4,5]. В данной технологии используется СЛИ, формируемое специальными оптическими элементами непосредственно на выходе лазера [6]. Такой способ формирования СЛИ позволяет сохранить его высокую когерентность и обеспечить малую расходимость пучков и, следовательно, использовать для описания лазерного излучения представления геометрической оптики и оптики лазерных пучков. В рамках этой модели СЛИ представляется семействами лучей, которые образуют 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. Использование цифровых методов регистрации и обработки рефрактограмм позволяет решать обратную задачу восстановления профиля неоднородности температуры или концентрации и проводить количественную диагностику неоднородной среды одновременно с ее визуализацией.

На рис. 1 показана структурная схема лазерной рефрактографической системы. Излучение лазера 1 преобразуется оптической системой 2 в структурированное лазерное излучение, которое проходя блок сканирования пучка 3 направляется в оптически прозрачную неоднородную среду 4, содержащую нагретые или охлажденные тела в жидкости и образует 2D-рефрактограмму на полупрозрачном экране 5. Далее изображение 2D-рефрактограммы регистрируется цифровой фотокамерой 6, вводится в компьютер 7 и обрабатывается с помощью специального программного обеспечения. Обработка 2D-рефрактограмм дает возможность проводить количественную диагностику градиентной неоднородности в среде, послужившей причиной рефракции этих лучей, т.е. получать информацию, например, распределении температуры в исследуемом потоке 8. В нижнем ряду показаны этапы формирования рефрактограммы из узкого пучка и график определенной зависимости температуры в пограничном слое.

В типичной рефрактографической системе используются полупроводниковые или газовые лазеры малой мощности (1-50 мВт), излучение которых с помощью дифракционных оптических элементов (ДОЭ) преобразуется в структурированное излучение различной формы в зависимости от решаемой задачи. Наиболее широко используются плоские (астигматический гауссов) и цилиндрические (бесселев) пучки.

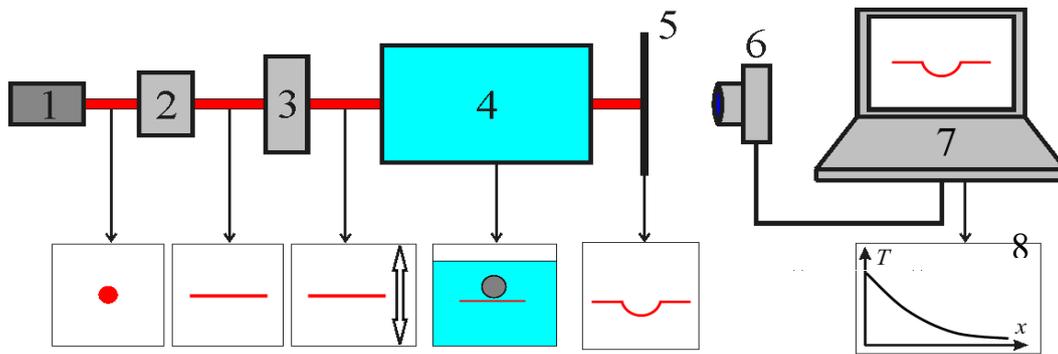


Рис. 1. Структура лазерной рефрактографической системы: 1 – лазер, 2 – оптический блок, 3 – блок сканирования пучка, 4 – исследуемая среда, 5 – полупрозрачный диффузный экран, 6 – цифровая фотокамера, 7 – ПК, 8 – график температуры

На рис. 2 показана фотография малогабаритной рефрактографической системы для исследования пограничного теплового слоя около нагретого шара, а на рис. 4. показана двухракурсная установка для регистрации трехмерных процессов в жидкости.

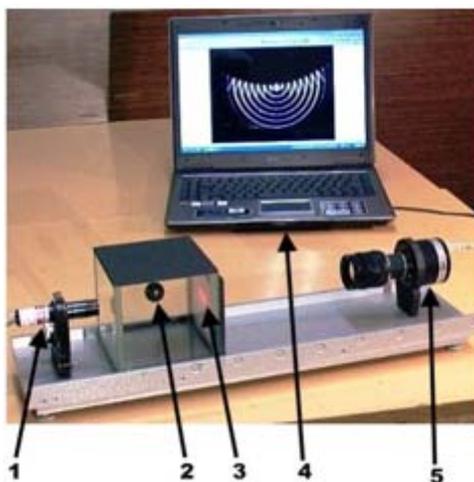


Рис. 2. Малогабаритная рефрактографическая система: 1 – лазер с ДОО, 2 – нагретый шар в воде, 3 – экран, 4 – ПК, 5 – цифровая фотокамера

Теоретические и экспериментальные основы лазерной рефрактографии достаточно полно изложены в монографиях [4, 5]. Современные оптические методы позволяют в большинстве случаев решать как прямую задачу лазерной рефрактографии – определение рефракционных картин для произвольного вида структурированного излучения и заданного аналитически или численно температурного поля в среде [4, 5, 7], так и в ряде случаев обратную – определение распределения температурного поля в жидкости по измеренным параметрам рефрактограммы [4, 5, 8].

Методами лазерной рефрактографии проводились различные исследования оптически неоднородных сред, в том числе и распределения температуры в ламинарных пограничных слоях жидкости около охлажденных или нагретых тел различной формы при использовании различного вида структурированного лазерного излучения: узких и широких лазерных пучков, пучков цилиндрической формы, крестообразных пучков [4, 5, 9-12].

На рис. 3 приведен пример восстановления распределения температуры в пограничном слое около металлического шара, помещенного в кювету с водой при различных температурах шара. Плоский лазерный пучок проходит снизу горячего шара и

сверху холодного шара. Регистрируемые цифровой фотокамерой рефрактограммы показаны в среднем столбце рисунка.

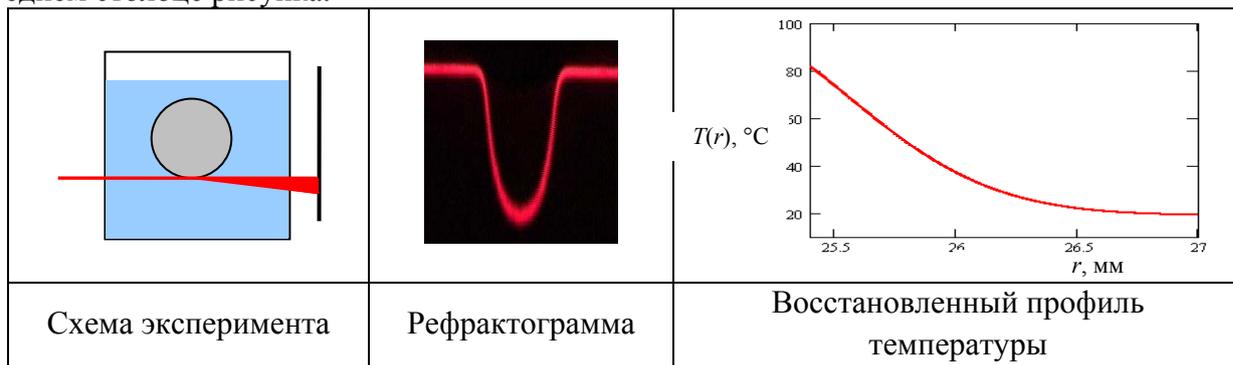
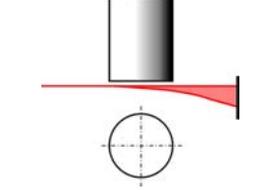
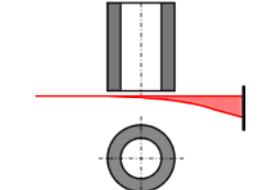
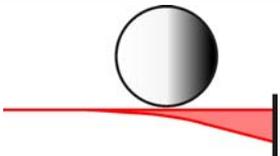


Рис. 3. Этапы восстановления температуры в пограничном слое около поверхности горячего шара в воде

В табл. 1 приведены типичные виды экспериментальных рефрактограмм, получаемые на установке, реализующую схему, показанную на рис. 1. В качестве структурированного излучения используется плоский лазерный пучок (ПЛП). Объектом исследования является ламинарный пограничный слой около поверхности нагретых тел, помещенных в воду. Анализ вида приведенных рефрактограмм показывает, что во всех случаях имеются участки плоского лазерного пучка, которые проходят оптически однородный слой жидкости не отклоняясь. Рефракция только части пучка происходит в непосредственной близости к поверхности исследуемого тела. Это является большим достоинством данной измерительной технологии, т.е. технология – лазерная рефрактография является дифференциальным методом.

Таблица 1. Рефрактограммы плоского лазерного пучка, прошедшего у нижней границы нагретых тел

№ № п/п	Объекты и условия освещения	Форма и направление зондирования объекта	Рефрактограммы
1	Параллелепипед – ПЛП проходит под дном параллелепипеда вдоль его длинной стороны		
2	Цилиндр – ПЛП проходит под основанием вертикально расположенного цилиндра		
3	Толстостенный цилиндр – ПЛП проходит под основанием цилиндра		
4	Шар – ПЛП проходит под нижней точкой поверхности нагретого шара		

ДВУХЦВЕТНАЯ ЛАЗЕРНАЯ РЕФРАКТОГРАФИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

В настоящее время разработаны схемы лазерных рефрактографических систем с различными характеристиками [4]. Для расширения возможностей диагностики потоков жидкости разработана двухцветная лазерная система, в которой одновременно используются эффекты рассеяния лазерного излучения на мелких частицах и его рефракция из-за градиента показателя преломления среды. Система предназначена для исследования динамических тепловых процессов в прозрачных жидкостях в научных и учебных лабораториях. Приведены результаты визуализации тепловых потоков в воде для нагревательного элемента.

На рис. 4а,б приведены схема и фотография новой измерительной системы визуализации и исследования тепловых процессов в жидкостях [14], в которой могут одновременно использоваться два оптических эффекта: рефракция лазерных пучков в оптически неоднородной среде (крупномасштабные неоднородности) и рассеяние лазерного излучения на мелких, специально вводимых частицах (мелкомасштабные неоднородности) [6]. В системе применяются два лазера, работающие в различных спектральных диапазонах и в различных режимах. Рефрактографический канал (рис.3а) состоит из лазера с блоком формирования структурированного лазерного излучения 1, исследуемой кюветы с жидкостью 2, в которую погружаются нагретые или охлажденные тела 3, полупрозрачного экрана 5. Рефрактограммы регистрируются с помощью цифровой фотокамеры 6. Указанные элементы установлены на основании 7. Координатник 4 позволяет перемещать исследуемые тела в трех направлениях. Рефрактографический канал позволяет визуализировать и исследовать пограничные слои около изучаемых тел (рис.4).

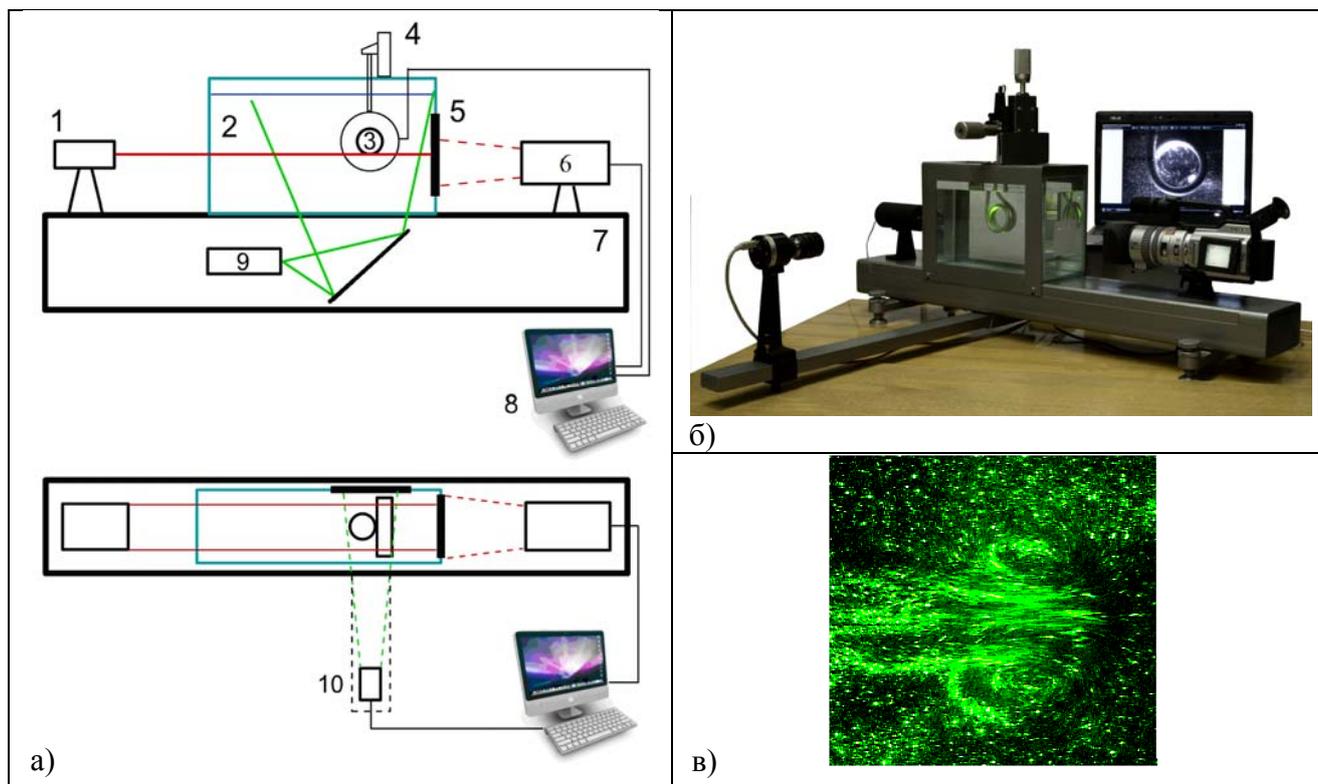


Рис. 4. Двухцветная рефрактографическая установка: а) схема, б) фотография, в) визуализация вихря

Второй канал предназначен для регистрации рассеянного частицами излучения. Он состоит из лазера 9 с блоком формирования структурированного лазерного излучения в виде плоского лазерного пучка, распространяющегося параллельно плоскости чертежа. В исследуемую кювету с жидкостью 2 могут погружаться нагретые или охлажденные тела, а также различные нагреватели, установленные на координатнике 4. Рассеянное на частицах

излучение регистрируется цифровой камерой 10, подключенной к компьютеру 8. При использовании двухимпульсного лазера этот канал выполняет функции лазерного анемометра по изображениям частиц. Для обработки изображений, характеризующих теплофизические процессы в жидкости, используется специальное программное обеспечение, с помощью которого строятся рефрактограммы и визуализируется поле скоростей частиц в потоке.

Система позволяют получить полную картину потока, по которой рассчитываются такие характеристики процесса нагревания или охлаждения как: поле скоростей около исследуемого объекта (скорость движения частиц в среде); поля градиентов температур в различных слоях и зонах жидкости; характер (ламинарный или турбулентный) движения слоев жидкости в различных фазах нагрева или охлаждения жидкости; поле градиента показателя преломления среды; время нагрева или остывания; степень однородности нагрева или остывания жидкой среды. Дополнительно можно определять время гомогенизации смешиваемых растворов в химических реакторах. На рис.4в показан пример визуализации движения вихря в воде.

Полученные на установке рефракционные картины позволяют оценить геометрические размеры характерных зон около исследуемого объекта, например, толщину пограничных слоёв или выявить зоны с нестационарными течениями. Кроме того, возможно построить двумерные поля скоростей, выбрать оптимальную форму нагревателей и их пространственное расположение в технологических резервуарах с целью обеспечения равномерного, полного и быстрого нагрева или охлаждения жидкости в различных технологических процессах химической, пищевой, энергетической промышленности и в оборудовании коммунальных служб.

Наглядное представление о возможностях описанной выше рефрактографической установки можно показать на примере исследования тепловых полей и вызванных ими конвекционных течений в непосредственной близости от трубчатого спирального нагревательного элемента.

Для получения картин визуализации конвекционных потоков в области между витками нагревательного элемента применялась следующая методика: с помощью координатного устройства 4 (см. рисунок 4а) трубчатый нагревательный элемент располагался таким образом, чтобы плоский лазерный пучок, сформированный во втором канале установки, зондировал пространство между его витками; после чего видеокамера 10 (см. рисунок 4а) включалась в режим записи, а сам нагревательный элемент подключался к электрической сети. Внесенные в воду светорассеивающие частицы (алюминиевая пудра) начинали перемещаться и отслеживать возникающие течения в жидкости. Характер этих конвекционных потоков определялся временем работы нагревателя.

Приведенные видеоматериалы наглядно иллюстрируют сложную структуру тепловых полей под витками трубчатого нагревательного элемента, а также возникающих в исследуемой зоне течений жидкости. На рис. 5а представлена визуализация конвекционных потоков внутри витка этого элемента через 9 секунд после включения нагревательного элемента. Рис. 5б демонстрирует изображения, полученные в рефрактографическом канале измерительной установки при прохождении плоского лазерного пучка под тем же нагревательным элементом, находящемся в холодной воде.

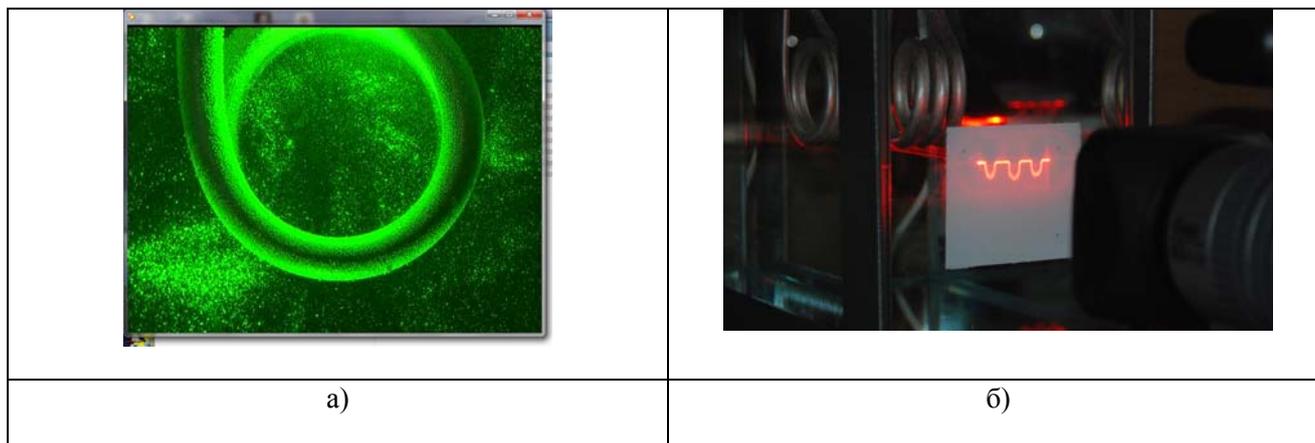


Рис. 5. Визуализация тепловых процессов в нагревательном элементе: а) визуализация потоков по рассеянному излучению, б) рефрактограмма прошедшего плоского пучка снизу нагревательного элемента

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЖИДКОСТИ С ПОМОЩЬЮ ШИРОКОГО ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА

Ниже описана методика и приведены результаты эксперимента по визуализации в широком лазерном пучке конвективных потоков у охлажденного шара в жидкости.

Методика проведения эксперимента состояла в следующем:

- вода в прозрачной кювете нагревалась до заданной температуры (например, до 60°C);
- металлический шар в это же время охлаждался примерно до $(1 - 3)^{\circ}\text{C}$;
- видеокамера, сопряженная с персональным компьютером и предварительно настроенная на получение резких рефракционных изображений на матовом экране, включалась на запись видеоинформации;
- запись прямых теневых картин производилась до тех пор, пока их вид не переставал изменяться.

На рис. 6 приведена прямая теневая картина широкого лазерного пучка (диаметр 90 мм), прошедшего через кювету с водой с температурой 60°C , в которую помещен металлический шар диаметром 50,8 мм, охлажденный до 1°C . Рефрагированные на тепловой неоднородности лучи отклоняются к одной точке, что наблюдается на матовом экране. Анализ видеок кадров позволяет сделать вывод о наличии под нагревающимся в горячей (60°C) воде холодным металлическим шаром зоны с нестационарными оптическими неоднородностями, вызванными нестационарными конвекционными потоками в воде под шаром. В примере видеок кадра, приведенном на рис. 6а момент наблюдения составляет $t = 9$ с от начала процесса, а температура шара $T_{\text{шара}} = 22^{\circ}\text{C}$. Под шаром четко видна зона нестационарной конвекции. Как видно из теневой картины, показанной на рис.6б, через 180с процесс нагрева стабилизируется (ламинарный режим).

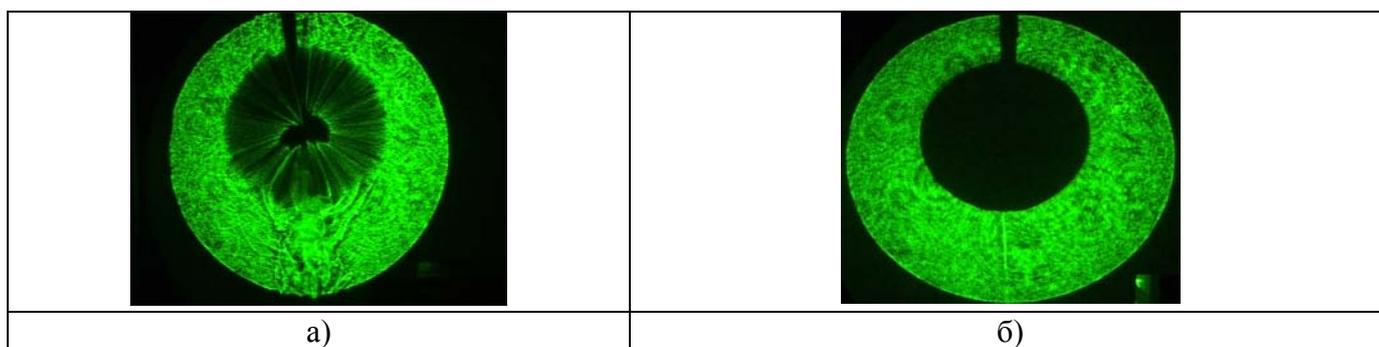


Рис. 6. Теневая картина пограничной области около охлажденного шара в воде: а) $t=9$ с, б) $t=180$ с

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ НАД НАГРЕТЫМ ШАРОМ

В [7] экспериментально было обнаружено появления зоны нестационарных конвективных потоков над поверхностью остывающего в холодной воде нагретого металлического шара. Наличие такой зоны обусловлено наличием нестационарного теплового поля, в результате зондирования которого плоским лазерным пучком наблюдаются термики. Рис. 8а демонстрирует визуализацию термиков в рассеянном излучении над остывающим в холодной воде металлическим шаром, когда плоский лазерный пучок проходит непосредственно над верхней точкой поверхности шара. Вид таких картин существенно меняется во времени. Рис. 8б и 8в иллюстрируют влияние профилированной насадки, установленной на верхней поверхности шара на стабилизацию рефракционной картины в области над шаром. Наличие профилированной насадки существенно снижает время установления стационарного теплового поля.

В [15,16] приведены другие примеры трехмерной визуализации конвекционных течений.

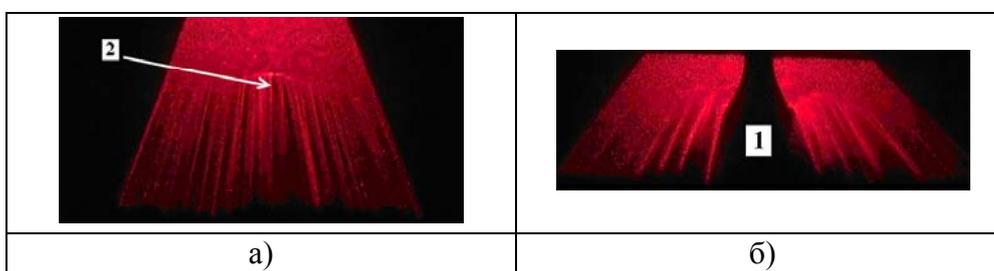


Рис. 8. Визуализация термиков в рассеянном излучении над остывающим в воде нагретым шаром: а) шар без насадки, б) шар с насадкой при $t = 0$, в) 1- профилированная насадка, 2 – поверхность шара

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФфуЗИОННОГО СЛОЯ ЖИДКОСТИ

Исследование переходного (диффузионного) слоя между различными жидкостями необходимо для решения многих задач физической химии. Исследование стратифицированных по плотности потоков – один из важных разделов современной гидрофизики. Изучение гидрофизических течений в основном базируется на лабораторном моделировании и связано с созданием плотностной стратификации, измерением и контролем ее характеристик. Применение метода лазерной рефрактографии для диагностики таких сред требует детального анализа рефракции лазерных пучков в них.

В работах [15-20] была детально исследована рефракция плоского лазерного пучка (лазерной плоскости) в оптически неоднородной стратифицированной жидкости, которая экспериментально моделируется с помощью водно-солевого раствора с изменением концентрации соли. Такой способ создания неоднородного переходного слоя является легко реализуемым на практике, широко используется при лабораторном моделировании различных гидрофизических явлений. Например, среда, состоящая из двух слоев: нижний – солевой раствор, верхний – чистая вода. На их границе наблюдается переходный слой, в котором показатель преломления плавно изменяется от большего значения в соленой воде (более плотной среде) к меньшему значению в чистой, так как показатель преломления в слое жидкости зависит от локального значения солёности. Таким образом, задача измерения градиента концентрации сводится к измерению градиента показателя преломления с помощью метода лазерной рефрактографии.

На рис. 9 показана лазерная рефрактографическая система для восстановления профиля показателя преломления диффузионного слоя жидкости и его толщины, а также визуализации экспериментальных 2D- и 3D-рефрактограмм.

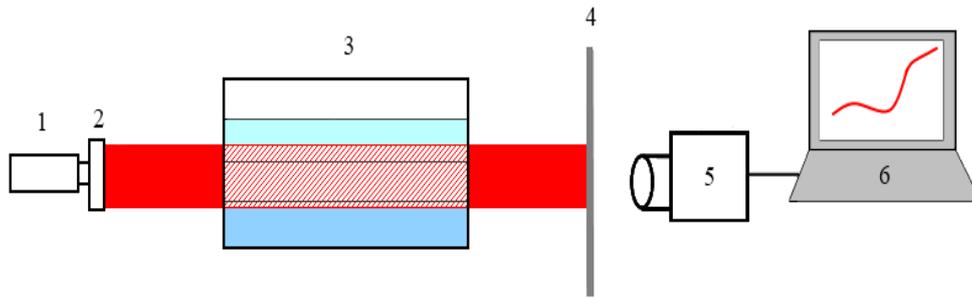


Рис. 9. Схема экспериментальной установки ЛАРЕФ для исследования диффузионного слоя жидкости: 1 – полупроводниковый лазер, 2 – оптическое устройство формирования плоского лазерного пучка, 3 – кювета с исследуемой двухслойной жидкостью, 4 – полупрозрачный экран, 5 – цифровая фотокамера, 6 – персональный компьютер

На рис.10 приведены параметры восстановленной модели диффузионного слоя пресная вода-соленая вода. Наклонная штриховая линия показывает положение исходного плоского лазерного пучка.

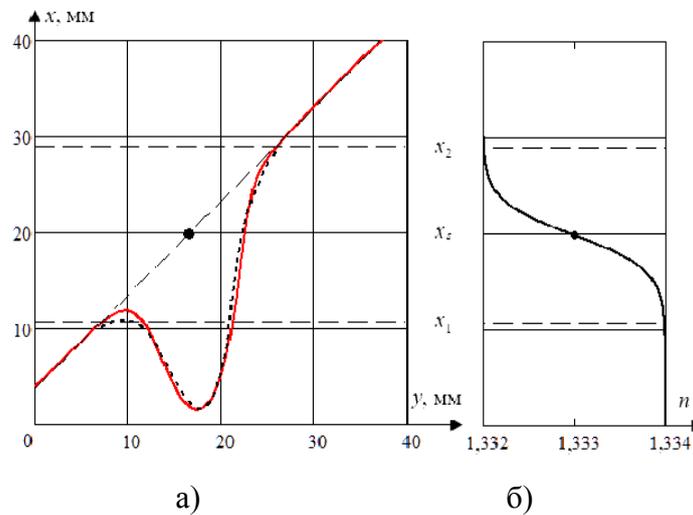


Рис. 10. Восстановленная модель диффузионного слоя пресная вода-соленая вода : а) экспериментальная и расчетная рефрактограммы, б) график распределения показателя преломления; $n_1 = 1,334$, $n_2 = 1,332$, $x_s = 20$ мм, $h_1 = 0,2$ мм, $h_2 = 2$ мм,

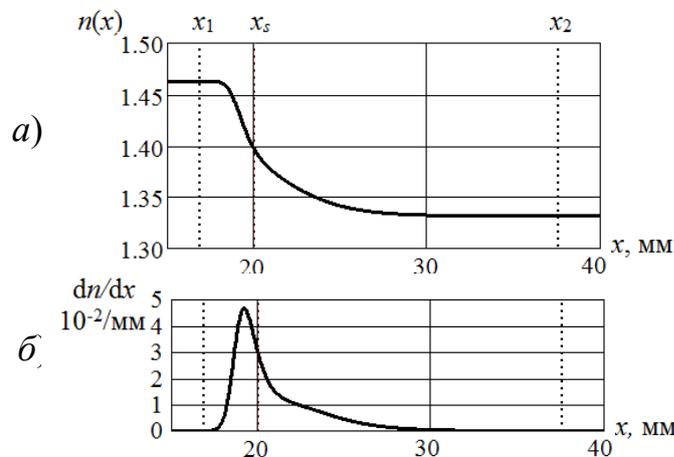


Рис. 11. Восстановленная модель диффузионного слоя для вода-глицерин: а) – распределение показателя преломления; б) – градиент показателя преломления, $n_1 = 1,4630$, $n_2 = 1,3315$, $x_s = 20$ мм

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана лазерно-компьютерная рефракционная технология (ЛАРЕФ) для качественной и количественной визуализации физических процессов в прозрачных жидкостях.

Разработаны теоретические основы ЛАРЕФ метода: распространения лазерных пучков в оптически неоднородных средах в приближении законов геометрической и волновой оптики.

Разработаны структурные схемы экспериментальных установок и созданы макеты измерительных систем.

Разработаны алгоритмы компьютерной обработки экспериментальных рефрактограмм, что позволяет проводить их сравнение с расчетными, т.е. позволяет проводить верификацию численных методов расчета физических процессов в жидкости.

Данная технология применена для визуализации градиентов температуры в тонких пограничных слоях около нагретых или холодных тел, помещенных в прозрачную жидкость, определения времени нагрева и времени остывания различных тел в жидкости, определения момента установления ламинарного и турбулентного режимов конвекции, определения времени перемешивания смеси жидкостей, установления закономерностей распространения звуковых волн в жидкости, для исследования диффузионных процессов в смеси жидкостей.

Разработан макет двухцветной лазерной системы, который может использоваться для исследования динамических тепловых процессов в жидкости как в научных, так и в учебных лабораториях.

На основе рефракционных изображений структурированного лазерного излучения может быть осуществлена не только визуализация, но и количественная диагностика неоднородностей показателя преломления в жидкости и, соответственно, характеристик физических процессов, порождающих эти неоднородности. Методика обработки рефракционных изображений и измерения необходимых информативных параметров рефрактограмм, а также алгоритмы решения обратных задач изложены в работах [15-18, 20-22].

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант №10-08-00936а) и Минобрнауки (проект ГК №14.740.11.0594)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Rinkevichyus B.S.** Laser Diagnostics in Fluid Mechanics. N-Y: Begell House, Inc.1998. 341 p.
2. **Settles G.S.** Schlieren and Shadowgraph Techniques. N-Y, Springer. 2001. 376 p.
3. **Белозеров А.Ф.** Оптические методы исследования газовых потоков. Казань: Изд-во Казан. гос. ун-та. 2007. 747 с.
4. **Евтихиева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С.** Лазерная рефрактография. М.: Физматлит, 2008. 189 с.
5. **Rinkevichyus B.S., Evtikhieva O.A., Raskovskaya I.L.** Laser refractography. N-Y: Springer. 2011. 201 p.
6. **Raskovskaya I.L., Rinkevichyus B.S., Tolkachev A.V.** Structured Beams in Laser Refractography Applications. In books:Laser Beams Theory. Properties and Applications. Nova Science Publishers. Inc. N-Y. 2011. Pp.399-414.
7. **Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В., Ширинская Е.С.** Рефракция цилиндрического лазерного пучка в температурном пограничном слое. // Оптика и спектроскопия. 2009, Т.106, №6, С.1016-1022.

8. **Нгуен В.Т., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С.** Алгоритмы количественной диагностики оптических неоднородностей методом лазерной рефрактографии. // Измерительная техника, 2009, №4. С.24-28
9. **Артемов В.И., Яньков Г.Г., Евтихиева О.А., Лапицкий К.М., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В.** Численное и экспериментальное исследования естественной конвекции в жидкости около нагретого цилиндра.//Четвертая Российская национальная конференция по теплообмену в 8 томах. Т.3. Свободная конвекция. Тепло- массообмен при химических превращениях. М.: Изд-во МЭИ, С. 42- 46, 2006.
10. **Евтихиева О.А., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В.** Визуализация нестационарной конвекции в жидкости около нагретых тел с помощью структурированного лазерного излучения. // Вестник МЭИ. 2007, №1, С.65-75.
11. **Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В.** Диагностика конвективных процессов в пограничном слое жидкости методом лазерной рефрактографии. // ИФЖ, 2010, Т. 83, № 6. С.1149-1156.
12. **Пудовиков Д.Е., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В.** Исследование естественной конвекции около шара в жидкости методом лазерной рефрактографии. В книге: Современные оптические методы исследования потоков. /Под. ред. Б.С. Ринкевичюса. Москва, Изд-во Оверлей 2011. С. 291-306
13. **Rinkevichyus B.S., Raskovskaya I.L., Tolkachev A.V.** Laser refractography – the new technology of the transparent heterogeneities quantitative visualization.// ISFV13 - 13th International Symposium on Flow Visualization FLUVISU12 - 12th French Congress on Visualization in Fluid Mechanics July 1-4, 2008, Nice, France
14. **Ринкевичюс Б.С., Есин М.В., Расковская И.Л., Толкачев А.В.** Лазерная рефрактометрическая система для визуализации физических процессов в жидкости. Патент № 105433 от 10.06.2011. БИ-10-2011. МПК- 601F 1/00
15. **Есин М.В., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В.** Трехмерные рефрактограммы и их применение для диагностики градиентных неоднородностей. //Радиотехника и электроника, 2012, Т. 57, № 4. С.485-491
16. **Есин М.В., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В.** Трехмерные рефракционные изображения в лазерных измерительных технологиях. //Автометрия, 2012, Т.48, №3
17. **Расковская И.Л., Сергеев Д.А., Ширинская Е.С.** Диагностика профиля солености в переходном слое жидкости методом лазерной рефрактографии. // Измер. техн., 2010. №10. С. 36 – 38.
18. **Крикунов А.В., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С.** Рефракция астигматического лазерного пучка в переходном слое стратифицированной жидкости. // Оптика и спектроскопия. – 2011, Т.111, №6. С. 1020-1026.
19. **Крикунов А.В., Ринкевичюс Б.С., Ширинская Е.С.** Исследование рефракции плоского лазерного пучка в переходном слое стратифицированной жидкости. // Вестник МЭИ. – 2011, № 4 . С. 97-102.
20. **Суровцев П.Ю., Ринкевичюс Б.С.** Рефракция плоского лазерного пучка в диффузионном слое воды с глицерином. Настоящий сборник. 2013 г.
21. **Расковская И.Л.** Рефракционный метод диагностики двумерно-неоднородных сред. // Радиотехника и электроника. 2013. Т. 58. № 1. С.38-45.
22. **Расковская И.Л.** Лазерная рефракционная томография фазовых объектов // Квантовая электроника. 2013. Т. 43, №6.

O.A. Evtikhieva, I.L. Raskovskaya, B.S. Rinkevichyus, A.V. Tolkachev

*National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: rinkevbs@mail.ru*

**INVESTIGATION OF PHYSICAL PROCESSES IN LIQUID
BY LASER REFRACTOGRAPHY**

The report describes methods and analysis of the experimental results of the study of physical processes in transparent liquids using laser refractography. The scheme of laser measuring systems is shown, described how they work, and shows the typical library refractograms.

OPTICAL INHOMOGENEOUS MEDIUM, LASER REFRACTOGRAPHY, STRUCTURED
LASER RADIATION, TEMPERATURE GRADIENT