

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ РЕФРАКТОГРАФИИ

Б.С. Ринкевичюс¹, И.Л. Расковская, А.В.Толкачев

*Национальный исследовательский университет (МЭИ), кафедра физики им. В.А.Фабриканта,
Красноказарменная ул. д.14, 111250, г. Москва, Российская Федерация*

¹ *Email: rinkevbs@mail.ru*

Аннотация. Доклад посвящен описанию методики проведения и экспериментальных результатов исследования тепловых процессов в прозрачных жидкостях с помощью метода лазерной рефрактографии. Лазерная рефрактография является новой информационно-измерительной технологией лазерной диагностики прозрачных оптически неоднородных потоков жидкости и газа, основанной на зондировании потока структурированным лазерным излучением, цифровой регистрации рефракционной картины (рефрактограммы) и ее компьютерной обработке с целью восстановления параметров потока. Приведена структурная схема лазерной измерительной системы, описан принцип ее работы и показана библиотека рефрактограмм для плоского лазерного пучка, распространяющегося в ламинарном пристеночном слое около нагретых или охлажденных тел различной формы, находящихся в воде.

Лазерная рефрактография применена для визуализации градиентов температуры в тонких пограничных слоях около нагретых или охлажденных тел, помещенных в прозрачную жидкость, определения времени нагрева или времени остывания различных тел в жидкости, определения времени установления ламинарного и турбулентного режимов конвекции, определения местоположения локальных изменений температуры в жидкости.

Приведено описание разработанной двухцветной лазерной системы, 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.

1. Введение

Теплофизические 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 рефракции пространственно-модулированных лазерных пучков в оптически неоднородных средах.

2. Лазерная рефрактография

Лазерная рефрактография основана на зондировании потока 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 3, которое проходя через оптически неоднородную среду 4, содержащую нагретые или охлажденные тела в жидкости 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 о распределении температуры в исследуемом потоке 8. В нижнем ряду показаны этапы формирования рефрактограммы из узкого пучка и график определенной зависимости температуры в пограничном слое.

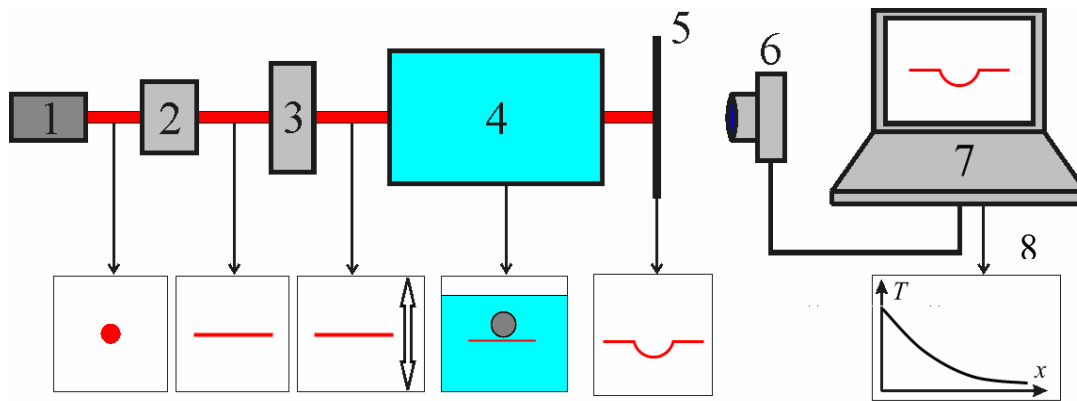


Рис.1. Схема лазерной рефрактографической системы: 1 – лазер, 2 – оптический блок, 3 – блок сканирования пучка, 4 – исследуемая среда, 5– диффузный экран, 6 – цифровая фотокамера, 7 - ПК, 8 - график температуры

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 исследования 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.2 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 камерой рефрактограммы показаны в среднем столбце рисунка.

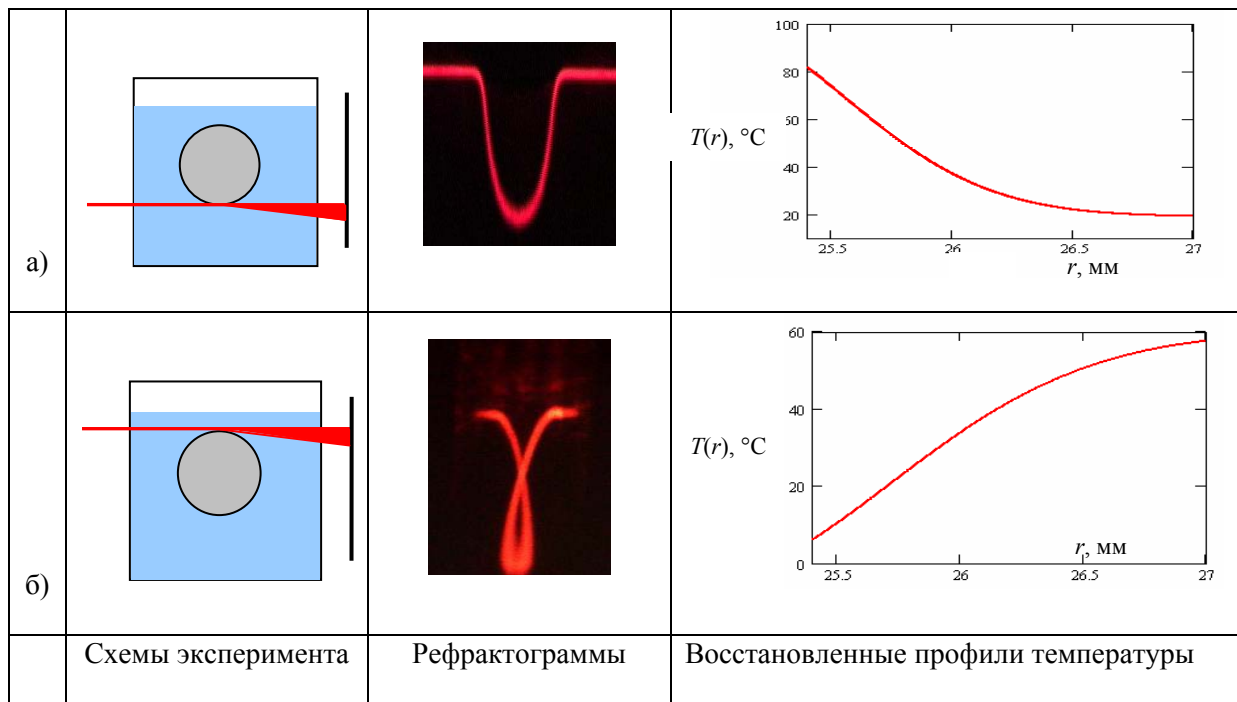

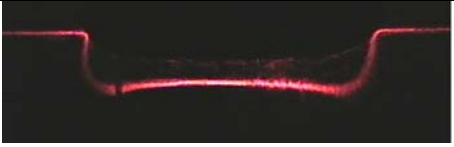
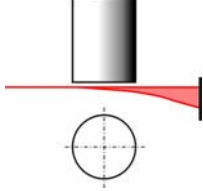

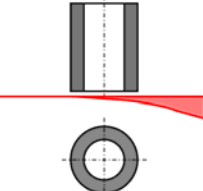

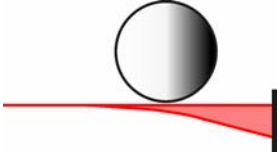

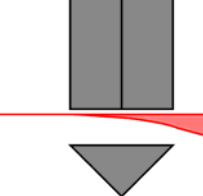

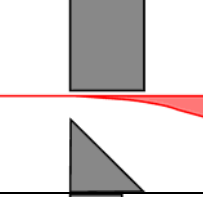

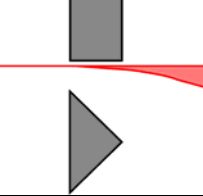

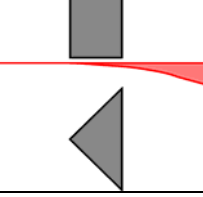





Рис.2. Этапы восстановления градиента температуры в пограничном слое около поверхности шара в воде: а) горячего, б) холодного

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 отклоняются). Рефракция части пучка проходит только в непосредственной близости к поверхности исследуемого тела. Это является большим достоинством данной измерительной технологии, т.е. лазерная рефрактография является дифференциальным методом.

Таблица 1. Рефрактограммы плоского лазерного пучка, прошедшего около нагретых тел

№ № п/п	Объекты и условия освещения	Форма и направление зондирования объекта	Рефрактограммы
1	Параллелипипед – ПЛП проходит под дном параллелипипеда 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		
5	Прямоугольная призма с углом при вершине 90° – ПЛП проходит вдоль гипотенузы основания призмы		
6	Прямоугольная призма с углом при вершине 90° – ПЛП проходит вдоль катета основания призмы		
7	Прямоугольная призма с углом при вершине 90° – ПЛП проходит со стороны гипотенузы основания		
8	Прямоугольная призма с углом при вершине 90° – ПЛП проходит со стороны прямого угла основания призмы		
9	Призма с углом при вершине 47° – ПЛП проходит вдоль нижнего продольного ребра призмы		

3. Двухцветная лазерная рефрактографическая система

В настоящее время разработаны схемы лазерных рефрактографических систем с различными характеристиками [4]. 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.3).

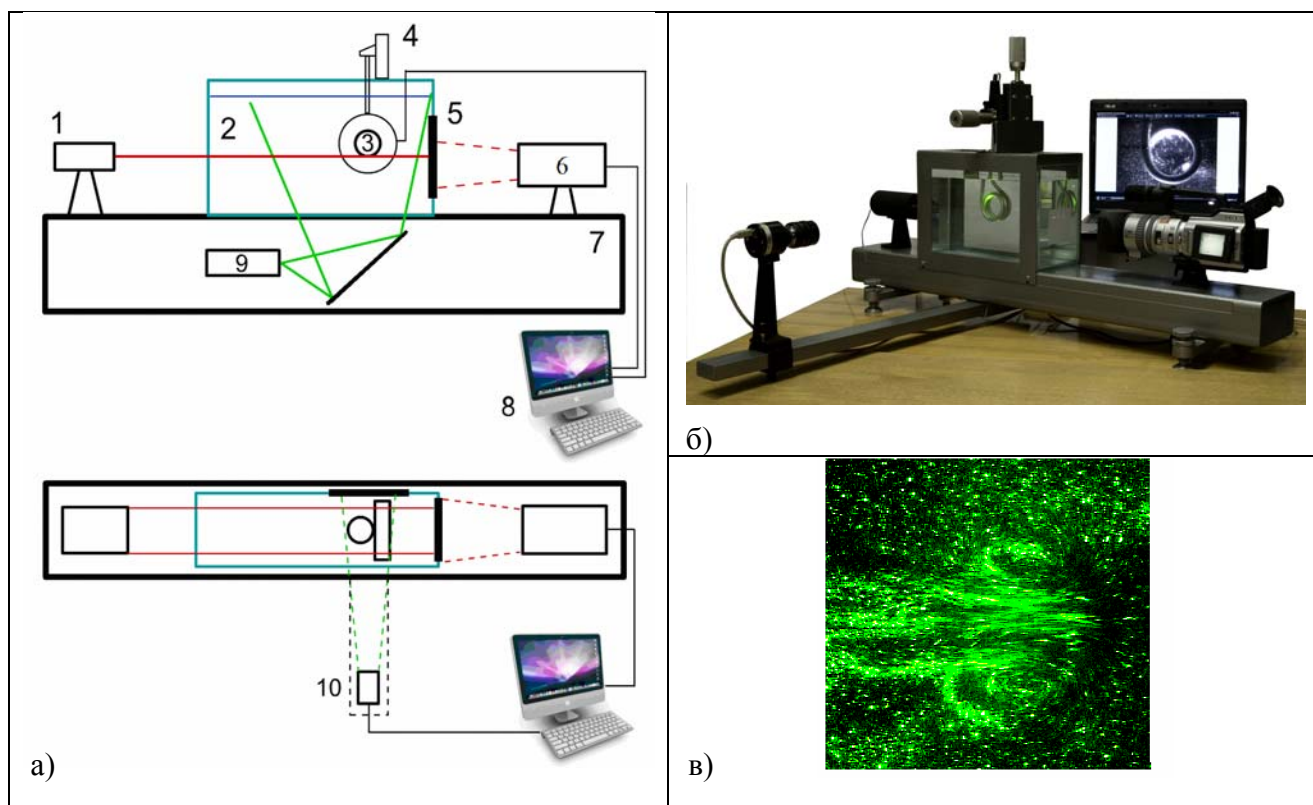


Рис. 3 Двухцветная рефрактографическая установка: а) схема, б) фотография,

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 параллельного 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.

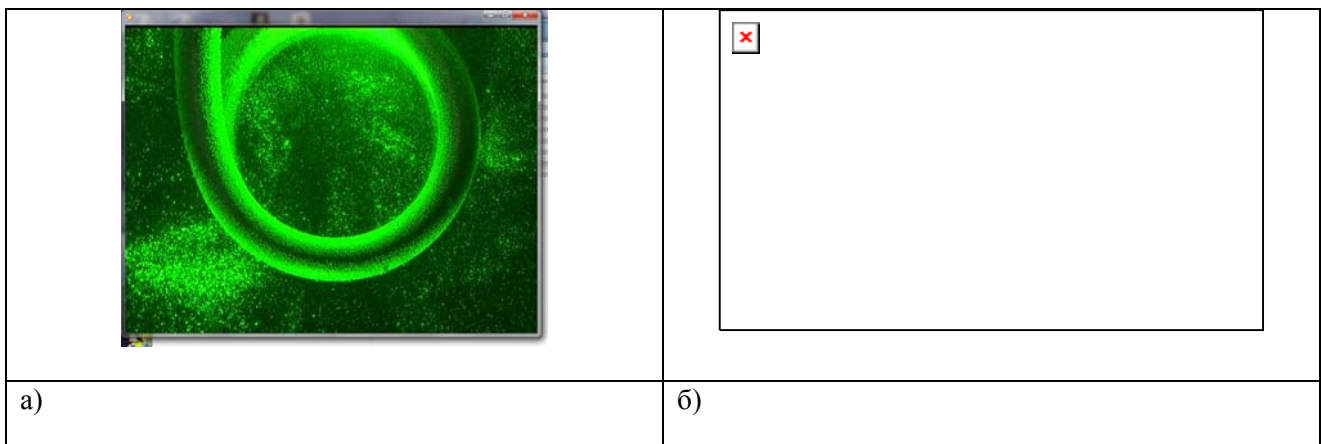


Рис. 5. Визуализация тепловых процессов в нагревательном элементе: а) визуализация потоков по рассеянному излучению, б) рефрактограмма прошедшего плоского пучка снизу нагревательного элемента

4. 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 $T_{\text{шара}} = 22^{\circ}\text{C}$. Снизу шара четко видна зона нестационарной конвекции. Как видно из теневой картины, показанной на рис.6б, через 180 с процесс нагрева стабилизируется (ламинарный режим).

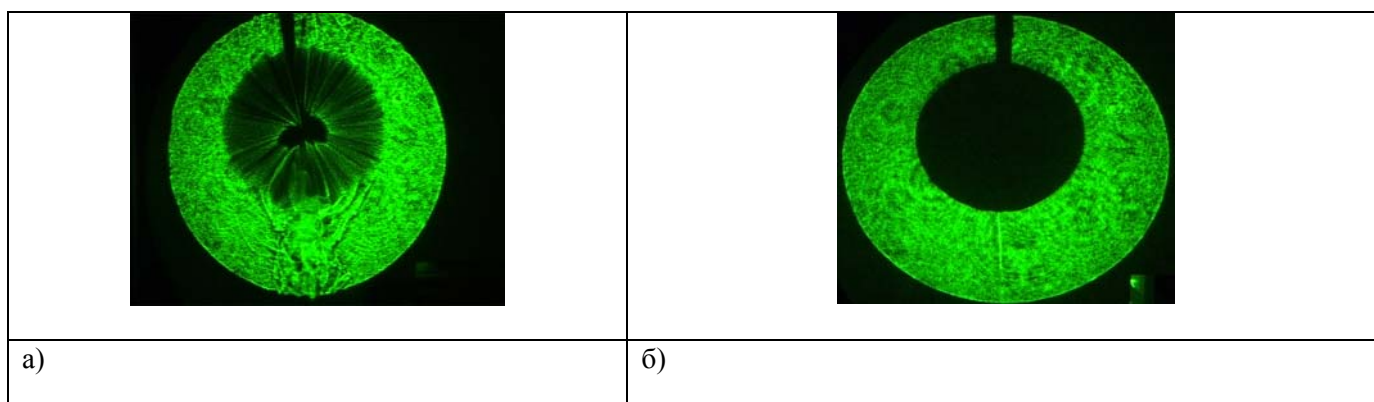


Рис. 6. Теневая картина пограничной области около охлажденного

шара в воде: а) $t=9$ с, б) $t=180$ с

5. 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.

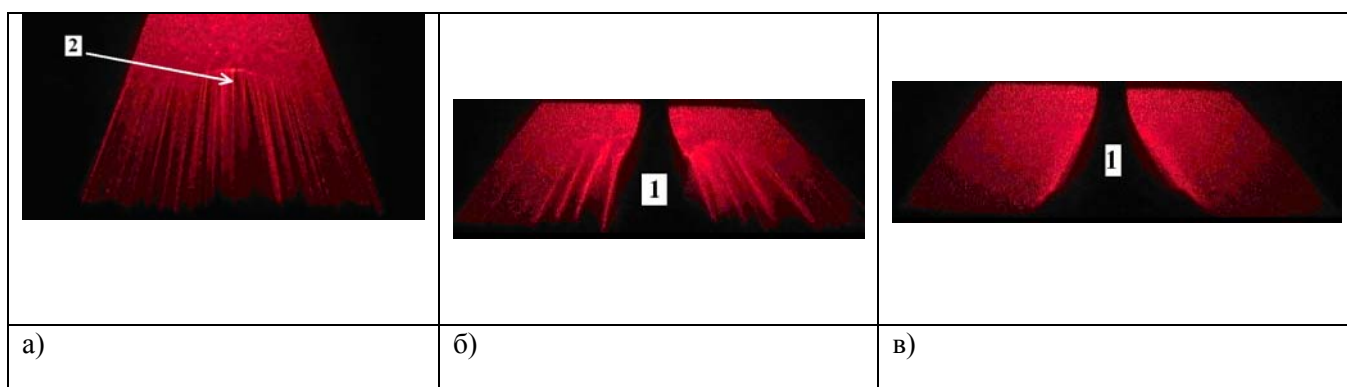


Рис.8. Визуализация термиков в рассеянном излучении над остывающим в воде нагретым шаром:

а) шар без насадки, б) шар с насадкой при $t=0$, в) шар с насадкой при $t=5,6$ с:

1- профилированная насадка, 2 – поверхность шара

Заключение

Разработана лазерно-компьютерная рефракционная технология для качественной и количественной визуализации теплофизических процессов в прозрачных жидкостях.

Данная технология может быть 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.

Сравнение расчетных и экспериментальных рефрактограмм позволяет проводить верификацию численных методов расчета тепловых процессов в жидкости.

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

Благодарности

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

Литература

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. //Автоматрия, 2012, Т.48, №3