

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЕВ ЖИДКОСТИ ОКОЛО НАГРЕТЫХ ТЕЛ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ РЕФРАКТОГРАФИИ

Ведяшкина А.В., Павлов И.Н., Сапронов М.В., Толкачев А.В.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Аннотация. Приведено описание двухцветной лазерной измерительной системы и методики проведения экспериментальных исследований физических процессов в прозрачных жидкостях с помощью метода лазерной рефрактографии и метода рассеяния плоского лазерного пучка на мелких частицах. Показаны примеры визуализации градиентов температуры и определения параметров тонких пограничных слоев жидкости около нагретых тел различной конфигурации. Описана методика проведения эксперимента и приведены результаты визуализации вихревых течений около нагревательного элемента, помещенного в воду.

Ключевые слова: лазерная рефрактография, лазерная визуализация потоков, теплообмен в жидкости, пограничные слои, двухцветная лазерная измерительная система.

Пограничные слои играют большую роль в работе всех тепловых приборов нагрева и охлаждения жидкости, определяя эффективность их работы и КПД. Исследования этих тонких слоев контактными методами существенно затруднены их малой толщиной. Численные методы расчета процессов требуют значительных затрат времени и вычислительных ресурсов из-за трехмерности задачи и нестационарности процесса. Поэтому существует необходимость создания новых методов исследования тепловых процессов. Одним из таких методов является метод лазерной рефрактографии [1,2].

Все тепловые потоки жидкости являются оптически неоднородными средами, в которых при распространении лазерного пучка наблюдается его рефракция, которая изменяет направление его распространения, поэтому возникает возможность разработки новых лазерных измерительных систем.

Метод лазерной рефрактографии основан на зондировании среды структурированным лазерным излучением (СЛИ), цифровой регистрации рефракционной картины (рефрактограммы) и ее компьютерной обработке с целью восстановления параметров среды. Использование современных цифровых методов регистрации и обработки рефрактограмм позволяет решать обратную задачу восстановления профиля температуры и проводить количественную диагностику неоднородной среды одновременно с ее визуализацией.

На рис. 1 показана структурная схема лазерной рефрактографической системы [2]. 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, передается в компьютер 7 и обрабатывается с помощью специального программного обеспечения. В нижнем ряду показаны этапы формирования рефрактограммы из узкого пучка и график определенной зависимости температуры в пограничном слое, по которому восстанавливаются температурные характеристики пограничного слоя.

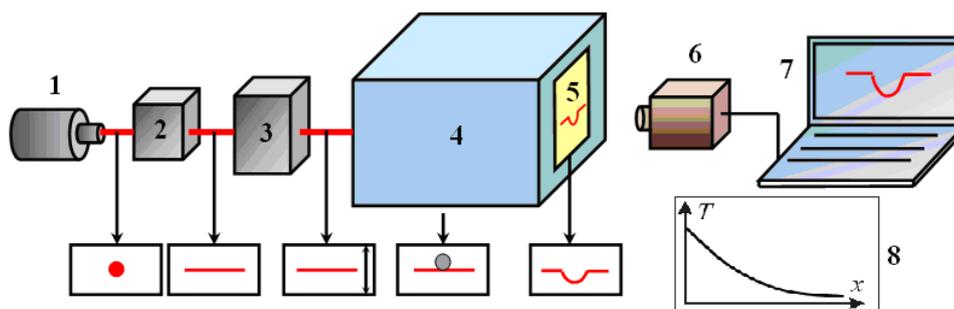


Рисунок 1 – Структурная схема лазерной рефрактографической системы: 1 – лазер, 2 – оптический блок, 3 – блок сканирования пучка, 4 – исследуемая среда, 5– диффузный экран, 6 – цифровая фотокамера, 7 – ПК, 8 – график температуры

Особенности исследования пограничных слоев жидкости рефракто-графическим методом рассматривались в работах [3-5]. В качестве примера в таблице 1 приведены типичные рефрактограммы, характеризующие пограничные слои жидкости около нагретых тел [4].

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

Объекты и условия освещения	Форма и направление зондирования объекта	Рефрактограммы
Цилиндр – ПЛП проходит под основанием сплошного цилиндра		
Толстостенный цилиндр – ПЛП проходит под основанием цилиндра		
Шар – ПЛП проходит под нижней точкой нагретого шара		

На основе метода лазерной рефрактографии рассеяния лазерного излучения на мелких частицах на кафедре физики им. В.А. Фабриканта НИУ "МЭИ" разработана двухцветная лазерная система, предназначенная для измерения распределения температуры около нагретых тел в жидкости и визуализации течений по рассеянному излучению [6]. Схема разработанной двухцветной лазерной системы приведено на рис. 2(a,b). В системе 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, а также для визуализации пограничных слоев около нагретых тел.

В системе применяются два лазера, работающие в различных спектральных диапазонах и в различных режимах. Рефрактографический канал (рис.2a) 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.

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 фронтальной стенке кюветы 2. Рассеянное на частицах излучение регистрируется цифровой камерой 10. Рефрактограммы с камер 6 и 10 обрабатываются с помощью специального программного обеспечения на компьютере 8. При использовании импульсного лазера и соответствующего программного обеспечения возможно получить распределение скоростей частиц в потоке.

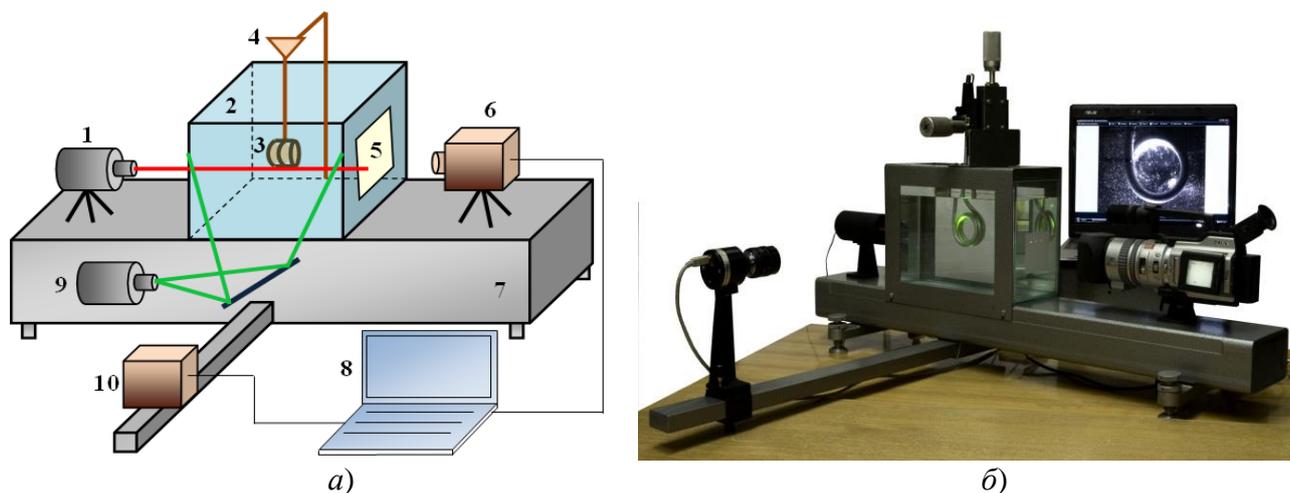


Рисунок 2 – Двухцветная рефрактографическая установка: а) схема: 1, 9 – лазеры, 2 – кювета с водой, 3 – нагретое или охлажденное тело, 4 – координатник, 5 – диффузный экран, 6, 10 – цифровые фотокамеры, 7 – основание системы, 8 – ПК, б) фотография системы

При использовании лазера непрерывного действия и скоростной видеокамеры измерительная система позволяет получить картину тепловых потоков, по которой рассчитываются такие характеристики процесса нагрева 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 температуры среды; время нагрева или остывания; степень однородности нагрева или остывания жидкой среды.

Полученные на установке рефракционные картины позволяют оценить геометрические размеры характерных зон около исследуемого объекта, например, толщину пограничных слоёв или выявить зоны с нестационарными течениями.

В качестве нагретого тела для исследования тепловых полей и вызванных ими конвекционных течений рассмотрен трубчатый спиральный нагревательный элемент, помещенный в холодную воду [6].

На рис. 3а показаны конвекционные потоки внутри витка через 9 секунд после включения нагревательного элемента. Рис. 3б демонстрирует изображения, полученные в рефрактографическом канале измерительной установки при прохождении лазерного пучка под тем же нагревательным элементом, находящемся в холодной воде.

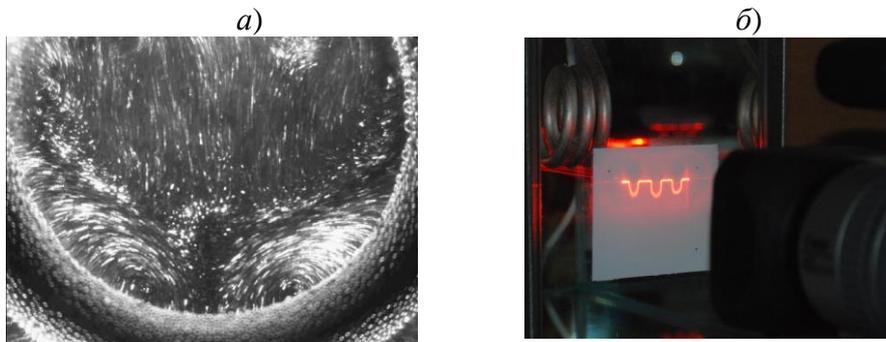


Рисунок 3 – Визуализация тепловых процессов в нагревательном элементе:

а) визуализация потоков по рассеянному излучению, б) рефрактограмма прошедшего плоского пучка снизу нагревательного элемента

Приведенные материалы наглядно иллюстрируют сложную структуру тепловых полей под витками трубчатого нагревательного элемента, а также возникающих в исследуемой зоне течений жидкости.

Заключение. Создана экспериментальная установка для одновременной регистрации тепловых полей около нагревательного элемента и визуализации потоков жидкости вокруг него с помощью рассеянного лазерного излучения. Метод лазерной рефрактографии позволяет исследовать тонкие температурные слои в жидкости около нагретых твердых тел. Разработано программное обеспечение, позволяющее восстанавливать градиент температуры около нагретых тел в жидкости.

Разработанная измерительная система может быть использована для научных теплофизических исследований, таких как изучение тонких пограничных слоев жидкости около нагретых тел, визуализации сложных потоков жидкости в тепловых и химических установках. Особенно это важно для проверки различных гипотез, используемых в компьютерных методах расчета пограничных слоев жидкости.

В учебных целях на базе данной установки может быть поставлен целый ряд лабораторных работ для студентов теплофизических специальностей по визуализации и изучению закономерностей теплопередачи от нагретых металлических тел разнообразной формы к различным жидкостям, перемешивания различных жидкостей в разнообразных условиях.

Список использованных источников

1. Евтихиева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С. Лазерная рефрактография // Под. ред. Б.С. Ринкевичюса. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. С. 176.
2. Евтихиева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С. Основы лазерной рефрактографии. Учебное пособие под ред. Б.С. Ринкевичюса. – М.: Изд. МЭИ, 2012. С. 84.
3. Лапицкий КМ, Расковская ИЛ, Ринкевичюс БС. Моделирование влияния краевых эффектов при рефракции лазерного излучения в температурной неоднородности. // Измерительная техника. 2008, №7. С.28-33.
4. Расковская И.Л., Б.С. Ринкевичюс, А.В. Толкачев // Диагностика конвективных процессов в пограничном слое жидкости методом лазерной рефрактографии. // Инженерно-физический журнал. Т.83, № 6, 2010. С.1149-1156.
5. Vedyashkina A.V. Computer modeling of optical rays' refraction in inhomogeneous mediums. // Journal of Beijing Institute of Technology. 2013, Vol.22, Suppl.1, Pp.39-41.
6. 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.