

DOI 10.35264/1996-2274-2019-3-157-166

ЛАЗЕРНАЯ РЕФРАКТОГРАФИЯ – НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РЕФРАКТОМЕТРИИ ЖИДКИХ СРЕД

И.Л. Расковская, доц. НИУ «МЭИ», канд. физ.-мат. наук, доц., raskovskail@mail.ru

Б.С. Ринкевичюс, проф. НИУ «МЭИ», д-р физ.-мат. наук, rinkevbs@mail.ru

С.П. Юркевичюс, вед. науч. сотр. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, канд. техн. наук, доц., jursp@extech.ru

Рецензент: И.Н. Павлов

Сформулированы основные принципы метода лазерной рефрактографии, представлены результаты его применения для экспериментальной визуализации оптически неоднородных жидких сред. Лазерная рефрактография – новая информационно-измерительная технология, основанная на зондировании среды структурированными лазерными пучками и цифровой обработке изображений, позволяющей восстанавливать параметры неоднородностей в жидкостях. Представлены схемы измерительных установок и типичные рефракционные изображения.

Ключевые слова: рефрактометрия, структурированное лазерное излучение, рефракция, оптически неоднородные жидкости, рефрактография.

LASER REFRACTOGRAPHY – A NOVEL TECHNOLOGY OF LIQUIDS REFRACTOMETRY

I.L. Raskovskaya, Associate Professor, Educational & Research University «MEI», Doctor of Physics and Mathematics, raskovskail@mail.ru

B.S. Rinkevichyus, Professor, Educational & Research University «MEI», Ph. D., inkevbs@mail.ru

S.P. Yurkevichyus, Leading Researcher, SRI FRCEC, Doctor of Engineering, Associate Professor, jursp@extech.ru

This paper is devoted the base principles of the method of laser refractography and the results of its application in experimental visualization of optically inhomogeneous liquids. Laser refractography is a novel information-measurement technique based on the probing of fluid flows with a structured laser beams, digital recording of the refraction images obtained, and their computer processing with a view to reconstructing the parameters of the flows. Block diagrams of measuring laser systems are shown, and typical refractograms are presented.

Keywords: refractometry, structured laser radiation, refraction, optically inhomogeneous liquids, refractography.

Введение

Классические методы рефрактометрии адаптированы главным образом для измерения показателя преломления однородных сред или локальных его значений в избранных малых областях среды. Для обнаружения и визуализации градиентных оптических неоднородностей, как правило, используются теневые методы [2, 5, 6, 9], позволяющие в целом получить представление о форме и динамике наблюдаемого объекта. Однако для количественной диагностики параметров среды теневые изображения градиентных неоднородностей в расфокусирован-

ном лазерном пучке пригодны только в случае слабой рефракции, когда пространственное изменение интенсивности изображения линейно связано с градиентом показателя преломления. В случае сильной рефракции, особенно при наличии каустик, количественная диагностика данным методом затруднена. В этом случае целесообразно проводить измерения на основе зондирования среды структурированным лазерным излучением, что позволяет регистрировать не изменение интенсивности, а смещение структурных элементов пучка [7, 8, 11, 14].

Методика количественной диагностики неоднородностей среды на основе смещения элементов структурированного экрана используется также в спекл-рефрактометрии и при применении теневого фонового метода, однако при решении обратной задачи восстановления значений показателя преломления здесь предполагается условие слабой рефракции и не учитываются объемные эффекты в среде. Кроме того, фоновый и спекл-экраны являются пассивными и не позволяют визуализировать рефракцию оптического излучения в среде.

Основные принципы метода лазерной рефрактографии

Для решения указанных проблем в работах [7, 8] было предложено использовать дискретизацию прямоотеневого изображения, т. е. разбиение его на отдельные структурные элементы, что позволяет измерять рефракционное смещение этих элементов относительно их исходного положения. Дискретизация изображения на физическом уровне может быть осуществлена на основе использования для зондирования структурированных лазерных пучков, формируемых с помощью дифракционных оптических элементов [1]. На рис. 1 в верхнем ряду показаны изображения неоднородностей в жидкости в широком пучке, в нижнем ряду — визуализация таких же неоднородностей в структурированных пучках.

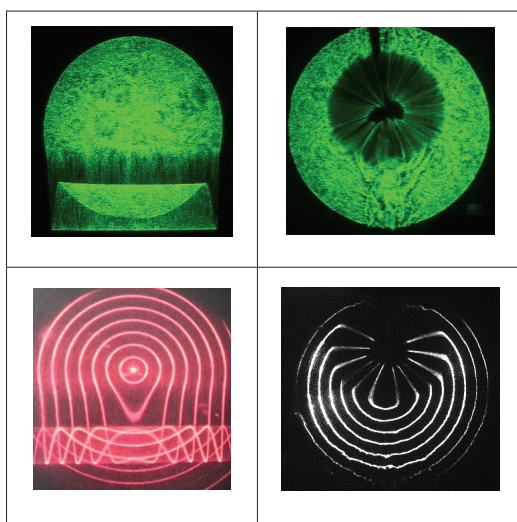


Рис. 1. Экспериментальная визуализация оптических неоднородностей с помощью широких и структурированных лазерных пучков

Применение пучков с дискретной модуляцией интенсивности в сечении позволяет в качестве информативного параметра использовать смещение элементов структуры пучка и восстанавливать значения показателя преломления в неоднородности на основе применения строгих методов решения обратной задачи рефракции. Дискретизация изображений позволяет осуществлять как их качественный визуальный анализ, так и количественную диагностику на основе измерения смещения элементов, изменения их формы и размеров,

регистрации положения особых точек и каустик. Сведение задачи измерения интенсивности прошедшего излучения в плоскости экрана к нахождению геометрических параметров дискретного изображения делает возможным решение обратной задачи восстановления поля показателя преломления.

Идея структурирования (дискретизации) изображения на физическом уровне послужила основой разработки основных принципов метода количественной диагностики жидких сред, адаптированного к условиям сильной рефракции и получившего рабочее название «лазерная рефрактография».

Лазерная рефрактография (ЛР) [8] – метод непосредственной визуализации и количественной диагностики неоднородных сред, основанный на использовании структурированного лазерного излучения (СЛИ) [7], получаемого преимущественно с помощью дифракционных оптических элементов (ДОЭ) [1]. Метод ЛР относится к классу градиентных рефракционных методов (рис. 2), однако отличительной его особенностью является то, что зондирование исследуемой среды осуществляется структурированными лазерными пучками, т.е. пучками с заданной регулярной структурой пространственной модуляции интенсивности в каждом его сечении. Исходная структура пучка, описываемая рядом информационных параметров, очевидно изменяется при его рефракции в оптической неоднородности, что позволяет на основе полученных экспериментально рефракционных изображений (рефрактограмм) осуществлять количественную диагностику и визуализацию неоднородности.



Рис. 2. Классификация методов лазерной рефрактометрии по типу сканирующего излучения

Элементарной базой преобразования гауссовского лазерного пучка в структурированный являются ДОЭ. ДОЭ представляет собой пропускающую или отражающую пластинку с фазовым микрорельефом, рассчитанным в рамках теории дифракции. Наиболее перспективными для использования в ЛР являются ДОЭ, фокусирующие лазерное излучение в тонкие

линии или малые области пространства (рис. 3), что соответствует структурированному пучку с дискретной модуляцией интенсивности [7]. В этом случае элементы структуры пучка непосредственно визуализируются в его сечении и рефрактограммы имеют контурный графический характер, что, собственно, и послужило причиной появления термина «рефрактография».

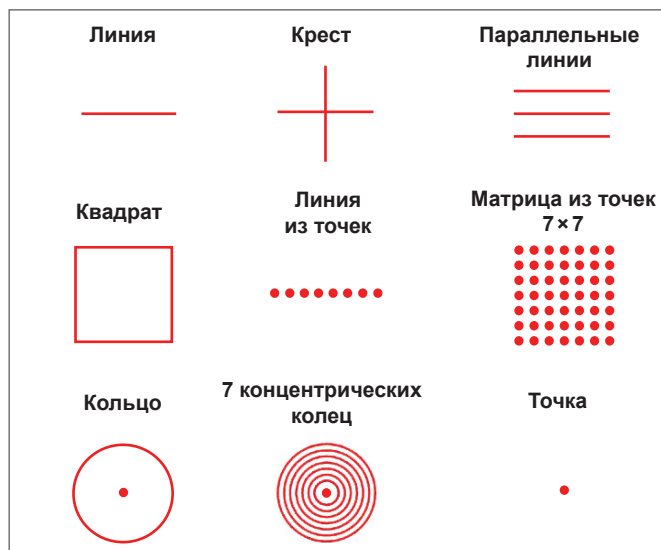


Рис. 3. Примеры сечений структурированных пучков, формируемых с помощью ДОЭ

В ЛР используется излучение, формируемое непосредственно на выходе источника и обладающее достаточной интенсивностью для визуализации зондирующих пучков внутри среды, что дает возможность построения трехмерных рефрактограмм, информативных для решения обратных задач. Кроме того, такой способ формирования СЛИ позволяет сохранить его высокую когерентность и обеспечить малую расходимость пучков, что позволяет в большинстве случаев использовать для описания СЛИ представления геометрической оптики (ГО).

В рамках ГО модель СЛИ может быть представлена семействами лучей, образующих поверхности в виде дискретного набора плоскостей, вложенных цилиндров, конусов и др. Основные типы источников излучения классифицируются по форме пространственных геометрических фигур, образованных лучами от источника: это линейно-структурированное, плоско-структурированное, цилиндрически- или конусно-структурированное лазерное излучение (рис. 4, а, в, д). Прошедшее через исследуемую среду СЛИ создает на экране двумерную рефрактограмму (см. рис. 4, б, г, е), вид которой связан с типом пучка и пространственной структурой распределения показателя преломления, зависящего от температуры, давления, плотности, солености и других характеристик. Двумерная рефрактограмма представляет собой изображение пространственно-структурированного источника излучения, созданное оптической системой, в качестве которой выступает исследуемая среда.

Трехмерная рефрактограмма представляет собой изображение поверхности, образованной рефразирующими в среде лучами от источника СЛИ (рис. 5), и может быть визуализирована в рассеянном излучении (рис. 11, а) или получена с помощью специальных методов обработки [8] на основе совокупности экспериментальных (рис. 5, б) или расчетных (рис. 5, в) двумерных рефрактограмм в разных сечениях.

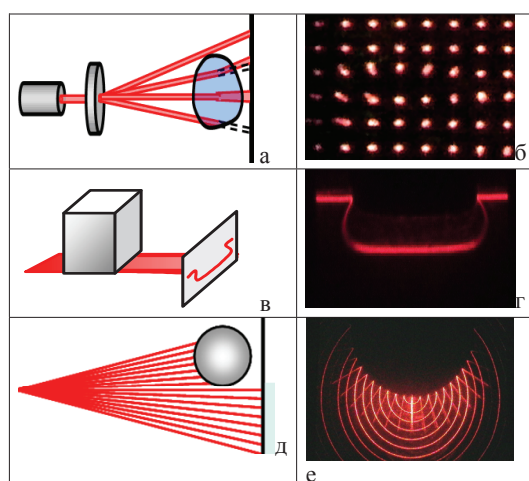


Рис. 4. Основные типы источников излучения и соответствующие двумерные рефрактограммы

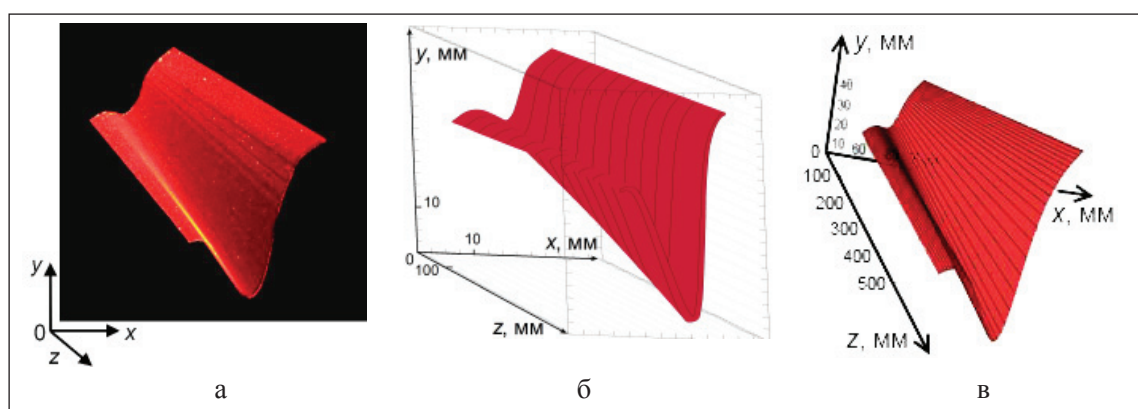


Рис. 5. Трехмерные рефрактограммы плоского пучка:

а) экспериментальная визуализация, б) восстановленная по двумерным рефрактограммам, в) моделирование

Общие принципы построения экспериментальных установок и визуализация двумерных и трехмерных рефрактограмм

Лазерный рефрактографический метод визуализации и количественной диагностики оптически неоднородной среды реализуется на основе:

- зондирования среды структурированным лазерным излучением, получаемым с помощью ДОЭ или специального оптического блока формирования СЛИ;
- цифровой регистрации рефрактограмм СЛИ;
- обработки рефрактограмм с помощью специального программного обеспечения в целях восстановления поля показателя преломления и поля физической величины, обуславливающей оптическую неоднородность.

Для исследования оптической неоднородности методом лазерной рефрактографии измерительная система должна содержать следующие основные элементы: источник лазерного излучения; оптический блок формирования СЛИ; систему позиционирования СЛИ; диф-

фузно-рассеивающий экран; цифровую фото- или видеокамеру, компьютер, специальное программное обеспечение. Объект исследования размещается между оптической системой формирования СЛИ и матовым экраном.

Рефрактографические системы на основе плоского СЛИ

На рис. 6 показана структурная схема лазерной рефрактографической системы. Излучение лазера (1) преобразуется оптической системой (2) в СЛИ (3), которое, проходя через оптически неоднородную среду (4), образует рефрактограмму на экране (5). Далее рефрактограмма регистрируется цифровой фотокамерой (6), вводится в компьютер (7) и обрабатывается с помощью специального программного обеспечения. Обработка рефрактограмм дает возможность проводить количественную диагностику неоднородности в среде, т.е. получать информацию, например, о распределении температуры в жидкости в пограничном слое около нагретых тел.

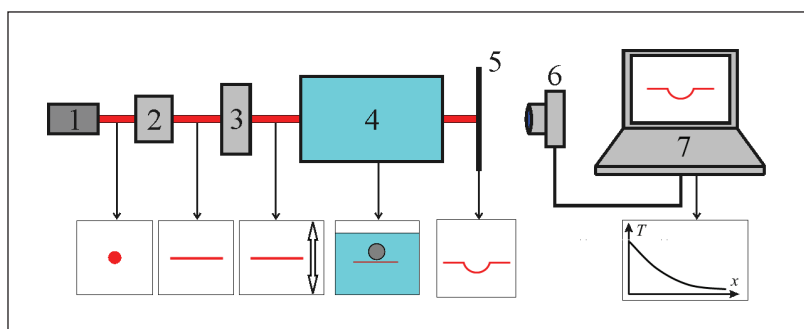


Рис. 6. Структурная схема экспериментальной установки на основе зондирования плоско-структурированным излучением

Рефрактографические системы на основе цилиндрического СЛИ

С помощью дифракционных оптических элементов возможно получить СЛИ различного вида, которые можно адаптировать к особенностям исследуемой оптической неоднородности. В качестве примера ниже рассмотрена рефрактографическая система на основе конического СЛИ.

На рис. 7 показана принципиальная схема экспериментальной установки, предназначенной для визуализации теплофизических процессов при естественной конвекции в жидкости около нагретых тел с помощью цилиндрического СЛИ, получаемого с помощью ДОЭ. Установка состоит из полупроводникового лазера с ДОЭ (1), установленного на юстировочном столике (2), СЛИ (3), нагреваемого объекта (4), прозрачной кюветы с водой (5), полупрозрачного экрана (6), цифровых видеокамер (7, 8), сигнал с которых вводится на персональный компьютер (9), и специального программного обеспечения (10).

Следует обратить внимание на малые габариты лазерного блока. Размеры полупроводникового лазера совместно с установленным на нем дифракционным оптическим элементом — следующие: длина — 70 мм, диаметр — 20 мм. Полупроводниковый лазер потребляет менее 1 Вт электрической энергии при мощности излучения 20 мВт.

Высокая интенсивность СЛИ позволяет наблюдение в рассеянном излучении трехмерных рефрактограмм, т.е. поверхностей, образованных рефракгирующими геометрооптическими лучами.

На рис. 8 приведена фотография экспериментальной установки для двухкурсного зондирования оптических неоднородностей в жидкости и одновременного наблюдения двумер-

ных и трехмерных рефрактограмм. Излучение лазера преобразуется оптической системой в СЛИ и, проходя через неоднородную среду, образует трехмерные рефрактограммы, наблюдаемые в рассеянном свете. Изображение рефрактограмм регистрируется камерой и обрабатывается компьютером с помощью специального программного обеспечения. Трехмерные рефрактограммы позволяют получить дополнительную информацию об исследуемой среде по сравнению с двумерными рефракционными картинками, так как фактически они позволяют визуализировать траектории семейства геометрических лучей, образующих СЛИ. Последующая специальная компьютерная обработка и оцифровка этих траекторий позволяют проводить количественную диагностику градиентной неоднородности в среде, послужившей причиной рефракции этих лучей.

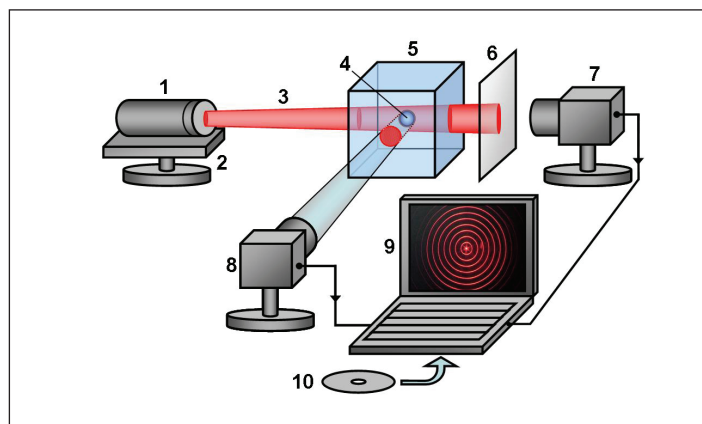


Рис. 7. Структурная схема экспериментальной установки на основе зондирования цилиндрически-структурированным излучением

С помощью специально разработанных алгоритмов трехмерные рефрактограммы могут быть восстановлены на основе серии двумерных рефрактограмм, полученных в ряде сечений (см. рис. 5, 6).



Рис. 8. Экспериментальная установка для наблюдения трехмерных рефрактограмм

Обсуждение

Дискретный и регулярный характер рефрактограмм оптимальным образом обеспечивает их пригодность для цифровой регистрации и компьютерной обработки, что позволяет достичь высокой точности количественной диагностики характеристик неоднородности. На основе полученных количественных данных восстанавливается поле показателя преломления в среде и осуществляется компьютерная визуализация оптической неоднородности (фазового объекта), аналогично тому, как это делается в лазерной томографии при реконструкции амплитудных (поглощающих) неоднородностей. Одновременно возможна непосредственная визуализация оптической неоднородности в среде, подобно визуализации в широком пучке при использовании прямого теневого метода, что позволяет определить положения каустик [3, 4, 10, 12, 15] и получить предварительные сведения о геометрии неоднородности. Экспериментальные методики с использованием лазерной рефрактографии в совокупности с методами решения обратных задач рефракции и компьютерной визуализацией среды составляют основу лазерной рефракционной томографии динамических жидких сред.

При решении обратных задач учитываются объемные эффекты в среде, т. е. метод применим в условиях сильной рефракции, в частности для диагностики градиентных жидкостных стратификаций и явлений на границе сред [13]. Таким образом, метод лазерной рефрактографии оказывается оптимально адаптированным для диагностики физических процессов в объеме и на границе жидкой среды, обуславливающих оптическую неоднородность и существенную рефракцию зондирующего излучения.

Выводы

Использование в лазерной рефрактографии структурированных пучков существенным образом расширяет возможности традиционных градиентных методов рефрактометрии.

Во-первых, надлежащий выбор конфигурации элементов структуры пучка позволяет адаптировать экспериментальную установку для диагностики определенного типа неоднородностей, например для исследования пограничных слоев у поверхностей разной формы.

Во-вторых, множественность элементов структуры пучка и их пространственная протяженность позволяют проводить измерения одновременно в избранных областях исследуемой среды, что существенно при диагностике динамических неоднородностей, например нестационарных конвективных течений.

В-третьих, основным информативным параметром при количественной диагностике является смещение элемента структуры пучка из-за рефракции в неоднородности. Измерение этого смещения оказывается возможным благодаря идентификации элементов, так как дискретный и регулярный характер структуры пучка позволяет определять, какому элементу структуры в исходном пучке соответствует тот или иной элемент рефрактограммы.

Использование структурированного лазерного излучения при его достаточно высокой интенсивности и направленности дает возможность наблюдения и регистрации траекторий пучков и каустик [10, 15] в объеме среды, что открывает дополнительные возможности восстановления количественных характеристик неоднородности среды. Количественные данные о положении каустических поверхностей и их проекций являются информативными характеристиками, позволяющими в ряде случаев осуществлять реконструкцию значений показателя преломления в среде.

Разработанная методика может применяться для визуализации и количественного анализа физических явлений в объеме и на границе жидких сред [14]: процессов неоднородного нагрева и остывания, диффузии в стратифицированной жидкости, внутренних волн в солестратифицированной жидкости, ультразвуковых полей в воде и других процессов, приводящих к оптической неоднородности среды.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ № 075-00938-19-04.

Список литературы

1. Сойфер В.А., Безус Е.А., Быков Д.А. и др. Дифракционная оптика и нанофотоника. М.: Физматлит, 2014. 608 с.
2. Cerisier P., Sylvain J., Dauby P. Application of the laser beam deflection to the study of temperature fields in Rayleigh-Benard convection. *Experiments in Fluids*, 2002, Vol. 33. No. 3. P. 391–397.
3. Gao G., Li Z., Negahban M. Dynamic fracture analysis of polycarbonate by the optical method of caustics // *Procedia Materials Science*. 2014. No. 3. P. 165–176.
4. Markides C., Kourkoulis S. Revisiting the Reflected Caustics Method: the Accurate Shape of the «Initial Curve» // *Engineering transactions*. 2013. 61 (4). P. 265–287.
5. Mikhalev A.S., Skornyakova N.M. A refraction system for studying evaporation of liquid drops from a solid surface. *Measurement Techniques*. 2011. Vol. 52. No. 12. P. 1337–1341.
6. Mowbray D.E. The use of schlieren and shadowgraph techniques in the study of flow patterns in density stratified liquids. *J. Fluid Mech.* 1967. Vol. 27. No. 3. P. 595–608.
7. 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. P. 399–411.
8. Rinkevichyus B.S., Evtikhieva O.A., Raskovskaya I.L. *Laser Refractography*. New York. Springer. 2011. 189 p.
9. Settles G.S. *Schlieren and Shadowgraph Techniques*. New York, Springer. 2011. P. 376.
10. Vedyashkina A.V. Computer modeling of optical rays' refraction in inhomogeneous mediums // *Journal of Beijing Institute of Technology*. 2013. Vol. 22. Suppl. 1. P. 71–76.
11. Юркевичюс С.П., Ринкевичюс Б.С. Разработка новых оптических методов исследования потоков жидкости и газа на кафедре физики им. В.А. Фабриканта НИУ «МЭИ» // *Инноватика и экспертиза*. 2015. Вып. 2 (15). С. 288–292.
12. Gdoutos E.E. The optical method of caustics for the solution of fracture mechanics problems // *15th International Conference on Experimental Mechanics*. 2012. P. 3819.
13. Pavlov I.N., Rinkevichyus B.S., Vedyashkina A.V. Application of surface plasmon resonance method for visualization of processes in a near-wall liquid layer // *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. Vol. 737. No. 1. P. 012044.
14. Raskovskaya I.L., Pavlov I.N., Rinkevichyus B.S., et al. Laser techniques for monitoring physical processes in water under substantial refraction conditions // *Proceedings of XVII International Conference «Laser Optics 2016»*, St. Petersburg, June 27 – July 1, 2016, P. R7–5.
15. Vedyashkina A.V., Rinkevichyus B.S., Raskovskaya I.L., Pavlov I.N. Laser radiation caustics method for quantitative diagnostic of transparent inhomogeneous media // *Progress in Electromagnetics Research Symposium 2017*. P. 754–758.

References

1. Soifer V.A., Bezus E.A., Bykov D.A., etc. (2014) *Difraktsionnaya optika i nanofotonika* [Diffraction optics and nanophotonics] *Fizmatlit* [Fizmatlit]. Moscow. P. 608.
2. Cerisier P., Sylvain J., Dauby P. (2002) Application of the laser beam deflection to the study of temperature fields in Rayleigh-Benard convection. *Experiments in Fluids*. Vol. 33. No. 3. P. 391–397.
3. Gao G., Li Z., Negahban M. (2014) Dynamic fracture analysis of polycarbonate by the optical method of caustics. *Procedia Materials Science*, No. 3. P. 165–176.
4. Markides C., Kourkoulis S. (2013) Revisiting the Reflected Caustics Method: the Accurate Shape of the «Initial Curve». *Engineering transactions*. 61 (4). P. 265–287.
5. Mikhalev A.S., Skornyakova N.M. (2011) A refraction system for studying evaporation of liquid drops from a solid surface. *Measurement Techniques*. Vol. 52. No. 12, P. 1337–1341.
6. Mowbray D.E. (1967) The use of schlieren and shadowgraph techniques in the study of flow patterns in density stratified liquids. *J. Fluid Mech.* Vol. 27. No. 3. P. 595–608.

7. Raskovskaya I.L., Rinkevichyus B.S., Tolkachev A.V. (2011) Structured Beams in Laser Refractography Applications. In books: Laser Beams Theory. Properties and Applications. Nova Science Publishers. Inc. N-Y. P. 399–411.
8. Rinkevichyus B.S., Evtikhieva O.A., Raskovskaya I.L. (2011) Laser Refractography. New York. Springer. 189 p.
9. Settles G.S. (2011) Schlieren and Shadowgraph Techniques. New York. Springer. P. 376.
10. Vedyashkina A.V. (2013) Computer modeling of optical rays' refraction in inhomogeneous mediums. Journal of Beijing Institute of Technology. Vol. 22. Suppl. 1. P. 71–76.
11. Yurkevicius S.P., Rinkevichus B.S. (2015) *Razrabotka novykh opticheskikh metodov issledovaniya potokov zhidkosti i gaza na kafedre fiziki im. V.A. Fabrikanta NIU «MEI»* [Development of new optical methods of researching fluid and gas flows at the Department of Physics. named after V.A. Fabricant in the Educational & Research University «MEI»] *Innovatika i ekspertiza* [Innovatica and expert examination]. No. 2 (15). P. 288–292.
12. Gdoutos E.E. (2012) The optical method of caustics for the solution of fracture mechanics problems. 15th International Conference on Experimental Mechanics. P. 3819.
13. Pavlov I.N., Rinkevichyus B.S., Vedyashkina A.V. (2016) Application of surface plasmon resonance method for visualization of processes in a near-wall liquid layer. Journal of Physics: Conference Series. Vol. 737. No. 1. P. 012044.
14. Raskovskaya I.L., Pavlov I.N., Rinkevichyus B.S., et al. (2016) Laser techniques for monitoring physical processes in water under substantial refraction conditions. Proceedings of XVII International Conference «Laser Optics 2016». St. Petersburg. June 27 – July 1. 2016. P. R7–5.
15. Vedyashkina A.V., Rinkevichyus B.S., Raskovskaya I.L., Pavlov I.N. (2017) Laser radiation caustics method for quantitative diagnostic of transparent inhomogeneous media. Progress in Electromagnetics Research Symposium. P. 754–758.