

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДИАГНОСТИКИ ОПТИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНЫХ ЖИДКИХ СРЕД В УСЛОВИЯХ СИЛЬНОЙ РЕФРАКЦИИ

И.Н. Павлов, доц. НИУ «МЭИ», канд. техн. наук, доц., *inpavlov@bk.ru*
И.Л. Расковская, проф. НИУ «МЭИ», д-р. техн. наук, доц., *raskovskail@mail.ru*
С.П. Юркевичюс, нач. отд. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, канд. техн. наук, доц.,
jursp@extech.ru
А.Е. Гриценко, зам. нач. отд. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, канд. техн. наук,
gritsenkoae@extech.ru

Рецензент: Г.Н. Вишняков, нач. лаб., ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений», д-р техн. наук, *vish@vniiofi.ru*

Представлен аналитический обзор современных оптических, и в частности лазерных, методов, применяемых для исследования оптически неоднородных прозрачных жидких сред. Выявлены проблемы, возникающие при количественной диагностике таких сред в условиях существенной рефракции зондирующего излучения. Указаны возможные подходы к решению данных проблем, основанные на применении новых типов зондирующего лазерного излучения, разработке соответствующих математических моделей и методов реконструкции параметров среды.

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

INFORMATION AND MEASUREMENT LASER TECHNOLOGIES FOR DIAGNOSTICS OF OPTICALLY INHOMOGENEOUS LIQUID MEDIA UNDER CONDITIONS OF STRONG REFRACTION

I.N. Pavlov, Associate Professor, NRU «MPEI», Doctor of Engineering, Assistant Professor, *inpavlov@bk.ru*
I.L. Raskovskaya, Professor, NRU «MPEI», Ph.D., Assistant Professor, *raskovskail@mail.ru*
S.P. Yurkevichyus, Head of Department, SRI FRCEC, Doctor of Engineering, Assistant Professor, *jursp@extech.ru*
A.E. Gritsenko, Deputy Head of Department, SRI FRCEC, Doctor of Engineering, *gritsenkoae@extech.ru*

An analytical review of modern optical, and in particular laser, methods used for the study of optically inhomogeneous transparent liquid media is presented. The problems arising in the quantitative diagnosis of such media under conditions of significant refraction of probing radiation are revealed. Possible approaches to solving these problems based on the use of new types of probing laser radiation, the development of appropriate mathematical models and methods for reconstructing the parameters of the medium are indicated.

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

Введение

Лазерные методы активно используются в последние годы для диагностики полей акустического давления, температур, плотности, скоростей потоков в прозрачных средах [1–10].

Это обусловлено прежде всего тем, что лазерные измерения не возмущают исследуемых полей, поскольку поглощаемая исследуемой средой энергия зондирующего излучения, как правило, чрезвычайно мала. Кроме того, такие методы практически безынерционны, что позволяет проводить диагностику быстропротекающих физических процессов. Дополнительными преимуществами являются возможность дистанционных измерений и высокое пространственное разрешение. Для количественной диагностики параметров прозрачных жидких сред разработан ряд экспериментальных подходов, которые условно можно разбить на два класса: методы, основанные на регистрации положения и скорости микрочастиц, находящихся в жидкой среде, и методы градиентной рефрактометрии. В первом случае рефракция является мешающим, а во втором – информативным фактором.

Лазерные методы диагностики кинематических параметров жидких сред, содержащих частицы

Рассмотрим более подробно методы, предполагающие наличие в потоке частиц, рассеивающих оптическое излучение. В настоящее время наиболее распространены методы диагностики, основанные на рассеянии лазерного излучения на частицах микронных размеров. Реже используется молекулярное и комбинационное рассеяние. Преимущество этих методов, в отличие от градиентных, – возможность их применения в сильно разреженных газовых средах при отсутствии рефракционных эффектов.

В частности, широко распространены методы локальной диагностики на основе лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА) [6–7]. Поток зондируется двумя или более узкими лазерными пучками, и рассеянное частицами излучение регистрируется фотоприемником, электрический сигнал с которого обрабатывается с помощью специальных процессоров. При этом, например, в дифференциальной схеме ЛДА роль «измерительной линейки» для определения величины смещения частицы играет сетка интерференционных полос в области пересечения двух лазерных пучков. Привлекательность данного метода заключается в возможности определения именно локальных параметров потока в области расположения зондируемых частиц, причем без нарушения его структуры. Последние разработки в области ЛДА связаны с использованием компьютерных методов обработки сигналов и с расширением их функциональных возможностей. Фазовая лазерная доплеровская анемометрия (ФЛДА) позволяет одновременно измерять скорость частиц и их размер.

Визуализация потоков с помощью лазерной плоскости (ЛП) основана на зондировании потока с частицами плоским лазерным пучком (лазерной плоскостью) и регистрации рассеянного частицами излучения с помощью цифровой видеокамеры. Метод пригоден для визуализации крупномасштабных распределений концентраций частиц (рис. 1), например вихрей.

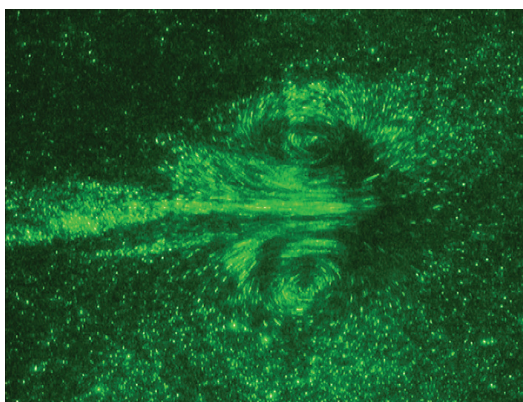


Рис. 1. Визуализация вихря

Анемометрия по изображениям частиц, или PIV (Particle Image Velocimetry). Метод предназначен для построения двумерного поля скоростей потока путем обработки двух снимков изображения частиц, полученных в разные моменты времени [8]. Практическая реализация осуществляется в двух вариантах. В первом случае исследуемый поток зондируется двумя короткими лазерными импульсами, для чего используется лазерная система, состоящая из двух неодимовых лазеров, дающих два импульса с регулируемой задержкой. PIV-изображение регистрируется на одном кадре, и после автокорреляционной обработки изображений получается поле скоростей частиц. Во втором случае используется лазер непрерывного действия, PIV-изображения регистрируются за счет быстродействующей цифровой видеокамеры на двух кадрах. Дальнейшая кросскорреляционная обработка этих снимков позволяет получить векторное поле скоростей потока.

Лазерная томография потоков позволяет получать трехмерное распределение скорости и концентрации частиц путем регистрации их в нескольких сечениях и построения трехмерного изображения после компьютерной обработки двумерных изображений [9, 19].

В методах диагностики кинематических параметров, как правило, непосредственно измеряются локальные характеристики среды, поэтому рефракционные эффекты, которые возникают на пути распространения зондирующих пучков до исследуемой области, являются не информационным, как в случае градиентных методов, а мешающим фактором. Рефракционные искажения пучков приводят к размытию, изменению местоположения или искажению области измерения, что приводит к увеличению погрешности измерений.

На рис. 2 показана обобщенная структурная схема измерительной системы, предназначенной для исследования потоков. Она состоит из когерентного источника – лазера (1), временного модулятора и оптической системы формирования лазерного пучка (2), блока питания модулятора (3), исследуемого потока (4), полупрозрачного экрана (5), цифровых видеокамер (6 и 9), компьютера (7) и специального программного обеспечения (8). Такая измерительная система может работать либо в режиме регистрации рассеянного излучения, либо в рефракционном режиме регистрации прошедшего исследуемый поток излучения. В первом случае в поток должны вводиться частицы, а во втором случае поток может не содержать частиц, и диагностика может быть основана, например, на регистрации градиента температур.

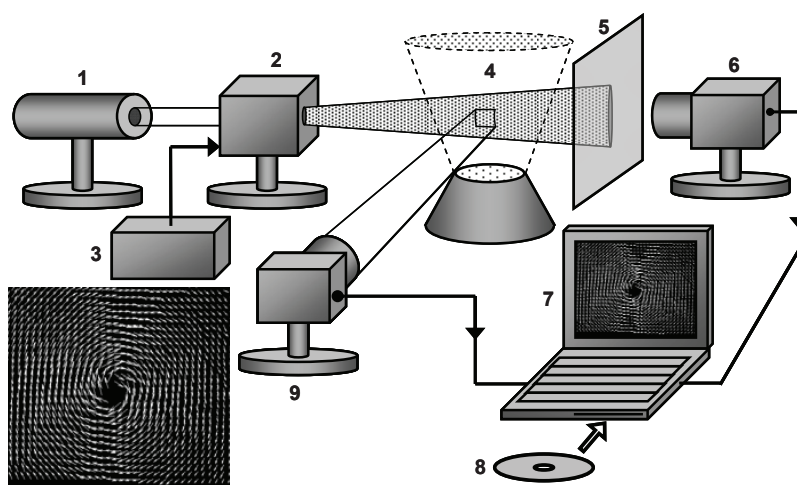


Рис. 2. Структурная схема обобщенной лазерно-компьютерной системы диагностики потоков:

1 – лазер, 2 – оптическая система формирования зондирующего излучения, 3 – временной модулятор с блоком питания, 4 – исследуемый поток, 5 – полупрозрачный экран, 6, 9 – цифровые видеокамеры, 7 – компьютер, 8 – специальное программное обеспечение

Работы по созданию метода измерения акустического давления в жидкости на основе интерференционной схемы лазерной доплеровской анемометрии [6–7] путем нахождения колебательной скорости локализованных в исследуемой среде частиц были начаты еще в 1991 г. по инициативе и при поддержке ВНИИФТРИ и в дальнейшем продолжены при частичной поддержке международных грантов. Однако в ходе исследований было выявлено, что из-за рефракции при распространении лазерных пучков в акустическом поле в жидкости возникает неконтролируемый фазовый набег, приводящий к колебанию интерференционных полос в измерительном объеме и появлению эффекта «кажущейся скорости частицы». Дальнейшие работы [10], проводимые научной группой кафедры физики МЭИ под руководством профессора Б.С. Ринкевичюса совместно с группой исследователей Эдинбургского университета (Jack S.H., Hann D.B., Greated C.A.), позволили оценить и исследовать для разных условий погрешность измерения локального акустического давления, обусловленную указанным акустооптическим эффектом. Полученные значения погрешностей «истинной скорости частицы», измеряемой на основе определения девиации частоты рассеянного частицами лазерного излучения на первой гармонике акустических колебаний, составляли сотни процентов, что на тот момент заставило отказаться от идеи создания лазерного эталона акустического давления в жидкости. В настоящее время разработанные волновые и лучевые модели распространения и интерференции лазерных пучков в акустическом поле с учетом их рефракции позволили обосновать принципиальную возможность установления однозначной связи между значением локального акустического давления в жидкости и параметрами лазерного излучения, рассеянного на микрочастицах, находящихся в данной области. Показано, что учет нелинейных членов фазового набега позволяет однозначно выразить локальное избыточное давление в области интерференции двух пересекающихся лазерных пучков через константы среды и параметры рассеянного лазерного излучения, что свидетельствует о принципиальной возможности создания лазерного эталона акустического давления в жидкости [11].

Методы градиентной рефрактометрии

Методы второго класса – рефрактометрические методы диагностики прозрачных оптических неоднородных сред на первом этапе своего развития – использовались, как правило, для визуализации неоднородностей и развивались преимущественно для газовых сред, что соответствовало условиям слабой рефракции [12, 13]. В этом случае считалось, что зондирующее излучение в объеме среды не отклоняется от исходного направления распространения, и при решении обратных задач традиционно использовалось приближение фазового экрана. Причем подавляющее большинство теневых и интерференционных приборов, предназначенных для исследования оптических неоднородностей в прозрачных средах, могут регистрировать только относительно небольшие искажения волнового фронта световой волны, прошедшей исследуемую область. При исследовании температурных и диффузионных полей в жидкостях угловые отклонения лучей могут превышать допустимые значения диапазона серийных приборов по крайней мере на порядок, что приводит к заведомо неверным результатам. Следуя общепринятой терминологии, будем считать рефракцию сильной, если имеет место образование каустик и областей многолучевости. Сильная рефракция может быть вызвана как значительными градиентами физических параметров в пограничных областях жидкой среды, так и большой протяженностью неоднородности.

В дальнейшем изложении будет использоваться термин «существенная рефракция», который подразумевает, что при диагностике неоднородной среды нельзя пренебречь эффектами, связанными с искажением фазового фронта и отклонением зондирующих пучков в ее объеме. Например, при использовании описанной выше интерференционной схемы диагностики ультразвуковых полей в жидкости даже при слабой рефракции пренебрежение фазовыми набегам пучков или их отклонением приводит к заведомо неверным результатам.

Кроме того, при решении обратных задач рефракции в протяженных средах, методика которых изложена ниже, зачастую недопустимо использование метода фазового экрана даже при слабых градиентах показателя преломления, и требуется учет искривления зондирующих пучков. В этом случае рефракцию тоже будем считать существенной, хотя ее нельзя назвать сильной из-за отсутствия каустик и областей многолучевости.

Ко второму классу, кроме классических теневых и интерференционных методов, следует отнести активно развивающиеся в настоящее время методы многоканального или сканирующего зондирования [20], теневой фоновый метод [13] и метод спекл-интерферометрии, позволяющие не только визуализировать, но и осуществлять количественную диагностику потоков. При использовании указанных методов в условиях сильной рефракции возникает проблема, связанная с учетом объемных эффектов в неоднородности, приводящих к изменению распределения интенсивности зондирующего излучения, отклонению его от исходного направления распространения и формированию каустик. Для получения достоверных количественных результатов необходима разработка моделей и методов решения обратных задач диагностики при отсутствии специальных ограничений на значения градиента показателя преломления и протяженность среды.

Кроме того, при диагностике быстро протекающих физических процессов в пространственно протяженных средах требуется одновременность измерения параметров процесса во всей интересующей области. В связи с этим целесообразным представляется применение в качестве зондирующего – структурированного лазерного излучения (СЛИ), что позволяет избежать применения сложных технологий быстрого сканирования. В дальнейшем изложении под структурированным лазерным излучением, или структурированными пучками, будем понимать лазерные пучки с пространственной модуляцией интенсивности в поперечном сечении. Структурированные лазерные пучки (СЛП) в настоящее время формируются преимущественно на основе дифракционных оптических элементов (ДОЭ), принцип действия которых и характеристики получаемых пучков описаны в [14]. Использование для зондирования широких (десятки сантиметров в диаметре) пучков с различными элементами структуры («точки», линии, концентрические окружности) в сечении обуславливает возможность одновременной диагностики протяженных динамических неоднородностей показателя преломления, возникновение которых характерно для жидких сред при наличии в них быстропротекающих физических процессов. Для экспериментальной визуализации температурных полей и конвективных процессов в прозрачных жидких средах структурированное лазерное излучение было впервые использовано в работах, представленных в [15, 20]. Получаемые изображения давали общее представление о форме неоднородности, однако для интерпретации полученных экспериментальных результатов и количественной диагностики процессов требовалось создание моделей распространения структурированного излучения в неоднородных средах. В соответствии с экспериментальными данными, полученными на кафедре физики им. В.А. Фабриканта НИУ «МЭИ», в монографии [15] были предложены лучевые модели распространения структурированных пучков основных типов при продольном зондировании плоских, цилиндрических стратификаций и сферического слоя и на основе этих моделей решены обратные задачи диагностики температурных полей в пограничном слое жидкости при наличии конвективных процессов.

Лазерная рефрактография

Как обобщение полученных результатов была сформулирована концепция метода диагностики, получившего рабочее название «лазерная рефрактография» [15], основанного на использовании структурированного лазерного излучения и решении обратных задач рефракции с учетом объемных эффектов в целях восстановления полей физических величин, приводящих к сильной оптической неоднородности среды. Информативными параметрами для количественной диагностики являются абсолютное рефракционное смещение элемен-

тов структуры относительно исходного положения, их относительное смещение, отображение каустик, изменение размеров элемента и др. Метод лазерной рефрактографии получил дальнейшее развитие, отраженное в ряде публикаций, обзор которых дан в [15, 20].

При построении моделей распространения волновых пучков были использованы подходы к описанию волновых полей, изложенные, например, в [16], построение лучевых моделей основано на методах, описанных в [15]. Решению обратных задач рефракции в радиофизике на основе строгих аналитических и численных методов посвящен ряд работ в области синтеза антенн и слоистых покрытий и при исследовании ионосферы. В трансмиссионной томографии рефракция традиционно рассматривается как мешающий фактор и учитывается в основном в целях внесения поправок в результаты [9]. Кроме того, для широких пучков реализация стандартных томографических алгоритмов из-за их сложности и требования значительных вычислительных ресурсов делает практически невозможной диагностику динамических неоднородностей в режиме реального времени. Поэтому при разработке моделей распространения зондирующего излучения был сделан акцент на их физической наглядности, возможности описания поля пучков и лучевых траекторий в аналитической форме в рамках обоснованных приближений и на адаптации к построению быстродействующих алгоритмов решения обратных задач восстановления поля показателя преломления.

Самостоятельный интерес с точки зрения обобщения разработанных методов решения обратных задач рефракции структурированных пучков имеет исследование испарения капли на горизонтальной подложке. В этом случае смещение элементов пучка обусловлено преломлением на поверхности жидкой среды. Результаты восстановления рельефа поверхности капли на основе послойного зондирования плоским и широким коллимированным пучками представлены в [17, 18]. Визуализация каустик на изображении капли позволила сделать выводы об особенностях микрорельефа ее поверхности и установить определенные закономерности ее испарения.

Обсуждение

Рефрактометрическая методика, основанная на зондировании среды структурированными лазерными пучками, решает проблему диагностики оптически неоднородных прозрачных жидкостей при наличии сильной рефракции.

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, 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 положение каустик и получить предварительные сведения о геометрии неоднородности.

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. 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.

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

Во-первых, надлежащий выбор конфигурации элементов структуры пучка позволяет адаптировать экспериментальную установку для диагностики определенного типа неоднородностей, например исследовать пограничные слои 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 в объеме среды, что открывает дополнительные возможности восстановления количественных характеристик неоднородности среды.

Выводы

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.

Разработка моделей распространения структурированных лазерных пучков и методов решения обратных задач рефракции структурированного излучения расширяет возможности лазерной рефракционной томографии и способствует развитию нового направления – диагностики динамических протяженных фазовых объектов в условиях сильной рефракции.

Метод лазерной рефрактографии адаптирован к условиям сильной рефракции и может применяться для визуализации и количественного анализа физических явлений в объеме и на границе жидких сред: 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.

Список литературы

1. Panigrahi P.K., Muralidhar K. Visualization of Convective Heat Transfer // Handbook of Thermal Science and Engineering. 2018. P. 759–803.
2. Tanda G., Fossa M., Misale M. Heat transfer measurements in water using a schlieren technique // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2014. Vol. 71. P. 451–458.
3. 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.
4. Znamenskaya I., Koroteeva E., Shagiyanova A. Thermographic analysis of turbulent non-isothermal water boundary layer // Journal of Flow Visualization and Image Processing. 2019. Vol. 26. P. 49–56.
5. Yesin M.V., Evtikhieva O.A., Orlov S.V., Rinkevichius B.S., Tolkachev A.V. Laser refractometral method for visualization of liquid mixing in twisted flows. CD Rom Proceedings / 10th International Symposium on Flow Visualization. (Kyoto, August 26–29, 2002). Paper No. F037. P. 1–8.
6. Ринкевичюс Б.С. Лазерная доплеровская анемометрия. М.: Русайнс, 2019. 160 с.
7. Albrecht H.E., Borys M., Damashke N., Tropea C. Laser Doppler and phase Doppler measurement techniques. Berlin: Springer. 2003. 738 p.
8. Corvaro F., Paroncini M., Sotte M. Experimental PIV and interferometric analysis of natural convection in a square enclosure with partially active hot and cold walls // International Journal of Thermal Sciences. Sci. 2011. Vol. 50. No. 9. P. 1629–1638.
9. Svetov I.E., Derevtsov E.Yu., Volkov Yu.S., Schuster T. A numerical solver based on B-splines for 2D vector field tomography in a refracting medium // Math. Comput. Simulation. 2014. Vol. 97. P. 207–223.
10. Crickmore R.I., Jack S.H., Hann D.B., Greated C.A. Laser Doppler anemometry and the acousto-optic effect // Optics and laser technology. 1999. Vol. 31. P. 85–94.

11. Расковская И.Л. О принципиальной возможности создания лазерного эталона локального акустического давления в жидкости // Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 106. № 2. С. 119–122.
12. Settles G.S. Schlieren and Shadowgraph Techniques. New York: Springer, 2011. P. 376.
13. Goldhahn E. and Seume J. The background oriented Schlieren technique: Sensitivity, accuracy, resolution and application to a three-dimensional density field // Exp. in Fluids. 2007. Vol. 43. P. 241–249.
14. Сойфер В.А., Безус Е.А., Быков Д.А., Досколович Л.Л., Ковалев А.А. и др. Дифракционная оптика и нанофотоника. М.: Физматлит, 2014. 608 с.
15. Rinkevichyus B.S., Evtikhieva O.A., Raskovskaya I.L. Laser refractography. 2010. P. 1–189.
16. Blank A.V., Suhareva N.A. Spatial differential analysis of the collimated wave beam intensity profile // Proceedings of SPIE. Vol. 11532. 2020. P. 115320O-1-115320O-9.
17. Павлов И.Н., Расковская И.Л., Толкачев А.В. Структура микрорельефа поверхности испаряющейся с шероховатой подложки капли как возможная причина гистерезиса краевого угла // ЖЭТФ. 2017. Т. 151. № 4. С. 670–681.
18. Павлов И.Н., Расковская И.Л., Юркевичюс С.П. Рефракционный метод измерения скорости испарения капли жидкости в условиях пиннинга контактной линии // Измерительная техника. 2018. № 6. С. 52–55.
19. Yesin M., Rinkevichius B., Tolkachev A. Unsteady 3D flow visualization with laser tomography. CD Rom Proc. The Millenium 9th Int. Symp. on Flow Visualization. Edinburgh, 2000. P. 329.
20. 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.

References

1. Panigrahi P.K., Muralidhar K. (2018) Visualization of Convective Heat Transfer. Handbook of Thermal Science and Engineering. P. 759–803.
2. Tanda G., Fossa M., Misale M. (2014) Heat transfer measurements in water using a schlieren technique. International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol. 71. P. 451–458.
3. 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.
4. Znamenskaya I., Koroteeva E., Shagiyanova A. (2019) Thermographic analysis of turbulent non-isothermal water boundary layer. Journal of Flow Visualization and Image Processing. Vol. 26. P. 49–56.
5. Yesin M.V., Evtikhieva O.A., Orlov S.V., Rinkevichius B.S., Tolkachev A.V. (2002) Laser refractometral method for visualization of liquid mixing in twisted flows. CD Rom Proceedings. 10th International Symposium on Flow Visualization. (Kyoto, August 26–29, 2002). Paper No. F037. P. 1–8.
6. Rinkevicius B.S. (2019) *Lazernaya doplerovskaya anemometriya* [Laser Doppler anemometry] *Rusayns* [Rusains]. Moscow. 160 p.
7. Albrecht H.E., Borys M., Damashke N., Tropea C. (2003) Laser Doppler and phase Doppler measurement techniques. Berlin: Springer. 738 p.
8. Corvaro F., Paroncini M., Sotte M. (2011) Experimental PIV and interferometric analysis of natural convection in a square enclosure with partially active hot and cold walls. International Journal of Thermal Sciences. Sci. Vol. 50. No. 9. P. 1629–1638.
9. Svetov I.E., Derevtsov E.Yu., Volkov Yu.S., Schuster T. (2014) A numerical solver based on B-splines for 2D vector field tomography in a refracting medium. Math. Comput. Simulation. Vol. 97. P. 207–223.
10. Crickmore R.I., Jack S.H., Hann D.B., Greated C.A. (1999) Laser Doppler anemometry and the acousto-optic effect. Optics and laser technology. Vol. 31. P. 85–94.
11. Raskovskaya I.L. (2017) *O printsipial'noy vozmozhnosti sozdaniya lazernogo etalona lokal'nogo akusticheskogo davleniya v zhidkosti* [On the fundamental possibility of creating a laser standard of local acoustic pressure in a liquid] *Pis'ma v ZhETF* [Letters to the JETF]. Vol. 106. No. 2. P. 119–122.
12. Settles G.S. (2011) Schlieren and Shadowgraph Techniques. New York: Springer. P. 376.

13. Goldhahn E. and Seume J. (2007) The background oriented Schlieren technique: Sensitivity, accuracy, resolution and application to a three-dimensional density field. *Exp. in Fluids*. Vol. 43. P. 241–249.
14. Soyfer V.A., Bezus E.A., Bykov D.A., Doskolovich L.L., Kovalev A.A., etc. (2014) *Difraktsionnaya optika i nanofotonika* [Diffraction optics and nanophotonics] *Fizmatlit* [Fizmatlit]. Moscow. 608 p.
15. Rinkevichyus B.S., Evtikhieva O.A., Raskovskaya I.L. (2010) Laser refractography. P. 1–189.
16. Blank A.V., Suhareva N.A. (2020) Spatial differential analysis of the collimated wave beam intensity profile. *Proceedings of SPIE*. Vol. 11532. P.115320O-1-115320O-9.
17. Pavlov I.N., Raskovskaya I.L., Tolkachev A.V. (2017) *Struktura mikrorel'efa poverkhnosti isparya-yushcheyusa s sherokhovatoy podlozhki kapli kak vozmozhnaya prichina gisterezisa kraevogo ugla* [The structure of the microrelief of the surface of a drop evaporating from a rough substrate as a possible cause of the hysteresis of the marginal angle] *ZhETF* [ZhETF]. Vol. 151. No. 4. P. 670681.
18. Pavlov I.N., Raskovskaya I.L., Yurkevicius S.P. (2018) *Refraktsionnyy metod izmereniya skorosti ispare-niya kapli zhidkosti v usloviyakh pinninga kontaktnoy linii* [Refractive method for measuring the evaporation rate of a liquid drop under pinning conditions of a contact line] *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring technique]. No. 6. P. 52–55.
19. Yesin M., Rinkevichyus B., Tolkachev A. (2000) Unsteady 3D flow visualization with laser tomography. *CD Rom Proc. The Millenium 9th Int. Symp. on Flow Visualization*. Edinburgh. P. 329.
20. Yurkevicius S.P., Rinkevicius 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 for studying fluid and gas flows at the Department of Physics named after V.A. Fabrikant of the National Research University «MEI»] *Innovatika i ekspertiza* [Innovation and Expert Examination]. Issue 2 (15). P. 288–292.