

## РАЗРАБОТКА НОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТОКОВ ЖИДКОСТИ И ГАЗА НА КАФЕДРЕ ФИЗИКИ ИМ. В.А. ФАБРИКАНТА НИУ «МЭИ»

**Б.С. Ринкевичюс**, проф. НИУ «МЭИ», д-р физ.-мат. наук, [rinkevbs@mail.ru](mailto:rinkevbs@mail.ru)

**С.П. Юркевичюс**, вед. науч. сотр. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, канд. техн. наук, доц., [jursp@extech.ru](mailto:jursp@extech.ru)

*Проведен анализ научных работ сотрудников кафедры физики МЭИ по разработке и применению новых лазерных методов исследования потоков жидкости и газа за период с 2000 по 2013 гг.*

**Ключевые слова:** эффект Доплера, лазерная доплеровская анемометрия, анемометрия по изображениям частиц, лазерная рефрактография, теневой фоновый метод, вихревые течения, сверхзвуковые течения, оптически неоднородные потоки.

## DEVELOPMENT OF NEW METHODS OF OPTICAL LIQUID AND GAS FLOW IN THE PHYSICS DEPARTMENT NAMED AFTER V.A. FABRIKANT NIU «MEI»

**B.S. Rinkevichyus**, Professor, NIU «MEI», Ph.D. of Physics and Mathematics, [rinkevbs@mail.ru](mailto:rinkevbs@mail.ru)

**S.P. Yurkevichyus**, Leading Researcher, SRI FRCEC, Doctor of Engineering, Assistant Professor, [jursp@extech.ru](mailto:jursp@extech.ru)

*The analysis of the scientific works of employees of the Department of Physics Dept of the development and application of new laser methods of research of liquid and gas flows during the period from 2000 to 2013 have been carried out.*

**Keywords:** Doppler laser Doppler anemometer, wind gauge for the particle images, laser refractography, shady background method, eddy current, ultrasonic flow optically inhomogeneous flows.

### Введение

Роль оптических методов в развитии механики жидкости, газа и плазмы хорошо известна и отражена в ряде книг [1, 2]. Речь идет, прежде всего, о теневых, интерференционных, скоростной фотографии методах и их применении для исследования этих потоков.

После создания в 1960 году рубинового и гелий-неонового лазеров [3, 4, 5] многие ученые во всем мире начали разрабатывать научные основы их применения как в научных исследованиях, так и в технических приложениях.

Уже в первых работах по изучению характеристик лазерного излучения были показаны его отличительные свойства (качество) — высокая степень когерентности, т.е. высокая монохроматичность и узкая направленность. Именно высокое качество лазерного излучения послужило основой создания лазерной метрологии — связующего звена между фундаментальной наукой и высокими технологиями.

**Тематика исследований, выполненных в МЭИ по оптическим и лазерным методам исследования потоков в 2001–2013 гг.**

В этот период были разработаны два новых метода исследования потоков: теневой фоновый метод и метод лазерной рефрактографии. Рассмотрим первый метод.

*Теневого фонового метода* исследования оптически неоднородных сред, разработанный канд. техн. наук Н.М. Скорняковой, предназначен для исследования различных потоков жидко-

сти и газа. В этом методе используется двойное фотографирование специального фонового экрана, освещаемого некогерентным источником света, с помощью высококачественной цифровой фотокамеры: первое фотографирование производится без среды, а второе через исследуемую оптически неоднородную среду. Кросскорреляционная обработка двух снимков с помощью компьютеров позволяет получить информацию о градиенте показателя преломления среды и связанные с ним параметры среды: градиент температуры или градиент плотности. Достоинство метода – его простота, наглядность представления информации о среде. Разработка теневого фонового метода проводилась аспирантами Поповой Е.М. (2008), Удаловым И.Н. (2010), Поройковым А.Ю. (2012).

### **Методы лазерной рефрактографии**

Узкая направленность лазерного излучения позволило предложить новые схемы лазерных рефракционных систем, предназначенных для исследования оптически неоднородных потоков. Новые методы многоканальной лазерной градиентной рефрактометрии для исследования теплофизических процессов в жидкости разрабатывались в кандидатской диссертации Евтихиевой О.А. (1980 г.). Сканирующие лазерные градиентные рефрактометры разрабатывались в кандидатской диссертации Гуменника Е.В. (1985 г.). Однако реально их преимущество стало возможным реализовать только после появления доступных современных матричных фотоприемников и современных высокопроизводительных компьютеров. Для обработки рефракционных картин используются как стандартные профессиональные программы для научных и инженерных расчетов, так и специальные программы, разработанные сотрудниками научной группы.

Тематика исследований кафедры физики в области оптических и лазерных методов исследования потоков в 2001–2013 гг. представлена в табл. 1.

Логическим развитием этих методов явилась разработка нового метода исследования оптически неоднородных потоков жидкости и газа – *лазерной рефрактографии*.

Этот метод основан на использовании структурированного лазерного излучения как источника диагностики потоков. В отличие от классического теневого метода, широко используемого для исследования ударных волн в сверхзвуковых газовых потоках, где используются широкие однородные по волновому фронту световые пучки и пространственная фильтрация прошедшего пучка в фокальной плоскости с помощью ножа Фуко, в методе лазерной рефрактографии используется структурированное излучение в виде плоских или цилиндрических пучков, а также их различные комбинации. Компьютерная обработка рефрактографических изображений позволяет восстановить распределение показателя преломления и связанных с ним параметров потока (температуры или плотности) в объеме среды. Лазерная рефрактография является аналогом рентгеновской флюорографии, где исследуемое тело человека зондируется рентгеновским излучением и по полученному снимку опытный врач устанавливает заболевание пациента. Только на рентгеновском снимке регистрируется поле поглощения пучка в среде (теле человека), а на рефрактограмме регистрируется поле градиентов показателя преломления оптически прозрачной среды.

Лазерная рефрактография является современным методом исследования оптически неоднородных потоков, основанным на зондировании среды структурированным лазерным излучением (СЛИ), цифровой регистрации рефракционной картины (рефрактограммы) и ее компьютерной обработке с целью восстановления параметров среды [6]. В лазерной рефрактографии используется структурированное лазерное излучение, формируемое с помощью специальных оптических элементов непосредственно на выходе источника излучения. Такой способ формирования СЛИ дает возможность сохранить его высокую когерентность и обеспечить малую расходимость пучков, что позволяет использовать для описания СЛИ представления геометрической оптики и оптики лазерных пучков. Тогда модель СЛИ может быть представлена семействами лучей, образующих поверхности в виде дискретного набора плоскостей, вложенных цилиндров, конусов и др. СЛИ, прошедшее через неоднородность про-

ещируется на экран в плоскости наблюдения, образуя так называемую 2D-рефрактограмму. Высокая интенсивность СЛИ позволяет наблюдение в рассеянном излучении 3D-рефрактограмм, т. е. поверхностей, образованных рефрагирующими геометрическими лучами.

Таблица 1

**Тематика диссертаций, выполненных в МЭИ по оптическим и лазерным методам исследования потоков в 2001–2013 гг.**

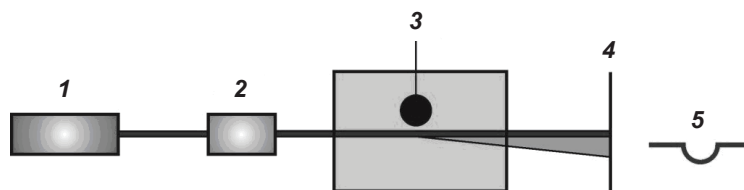
|    |   |   |      |
|----|---|---|------|
| 1  | Скорнякова Н.М.,<br>Руководитель: д-р физ.-мат. наук<br>Ринкевичюс Б.С. | Исследование рассеяния гауссового пучка на движущихся частицах в задачах лазерной диагностики потоков.            | 2001 |
| 2  | Есин М.В.,<br>Руководитель: д-р физ.-мат. наук<br>Ринкевичюс Б.С.       | Обработка интерференционных картин и оптических изображений компьютерными методами в лазерной диагностике потоков | 2001 |
| 3  | Имшенецкий А.И.,<br>Руководитель: д-р физ.-мат. наук<br>Ринкевичюс Б.С. | Разработка и расчет оптико-электронных систем диагностики потоков жидкости и газа                                 | 2005 |
| 4  | Расковская И.Л.,<br>Руководитель: д-р физ.-мат. наук<br>Ринкевичюс Б.С. | Теоретическое и экспериментальное обоснование лазерных методов диагностики акустического поля в жидкостях и газах | 2005 |
| 5  | Москалевич В.И.,<br>Руководитель: канд. техн. наук<br>Евтихиева О.А.    | Разработка оптико-электронного комплекса для исследования колебаний шероховатой поверхности                       | 2007 |
| 6  | Попова Е.М.,<br>Руководитель: канд. техн. наук<br>Евтихиева О.А.        | Теневой фоновый метод в задачах тепломассообмена  | 2008 |
| 7  | Лапицкий К.М.,<br>Руководитель: д-р физ.-мат. наук<br>Ринкевичюс Б.С.   | Разработка методов расчета и обработки рефракционных картин в лазерной системе визуализации тепловых полей        | 2009 |
| 8  | Нгуен Ван Тханг,<br>Руководитель: д-р физ.-мат. наук<br>Ринкевичюс Б.С. | Расчет освещенности экрана астигматическим пучком при распространении его в неоднородной среде                    | 2009 |
| 9  | Михалев А.С.,<br>Руководитель: д-р физ.-мат. наук<br>Ринкевичюс Б.С.    | Оптико-электронный комплекс одновременного измерения параметров движущихся пузырьков газа или капель жидкости     | 2009 |
| 10 | Удалов А.В.,<br>Руководитель: канд. техн. наук<br>Евтихиева О.А.        | Аппаратно-программный комплекс теневого фонового метода для натуральных исследований                              | 2010 |
| 11 | Крикунов А.В.,<br>Руководитель: д-р физ.-мат. наук<br>Ринкевичюс Б.С.   | Лазерная рефрактографическая система диагностики диффузионного слоя жидкости                                      | 2011 |
| 12 | Поройков А.Ю.,<br>Руководитель: канд. техн. наук<br>Скорнякова Н.М.     | Разработка метода корреляции фоновых изображений для определения деформаций поверхности                           | 2012 |
| 13 | Павлов И.Н.,<br>Руководитель: д-р физ.-мат. наук<br>Ринкевичюс Б.С.     | Оптико-электронный комплекс для визуализации физических процессов в пристеночном слое жидкости                    | 2013 |

На рис. 1 показана принципиальная схема лазерного рефрактографа. Она состоит из лазера 1, оптической системы формирования структурированного лазерного пучка 2, исследуемой оптически неоднородной среды 3, полупрозрачного экрана 4, на котором наблюда-

ется двумерная рефрактограмма 5. Эта рефрактограмма регистрируется с помощью цифровой фотокамеры 6 и обрабатывается с целью решения обратной задачи: определения параметров оптически неоднородной среды.

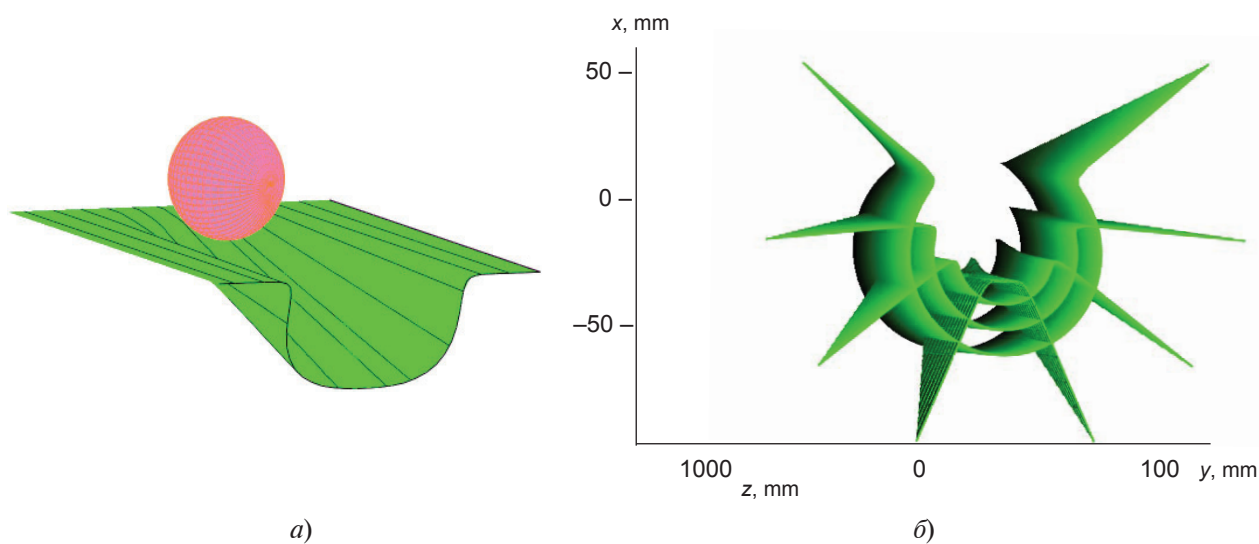
На рис. 2 показаны две лазерные 3D-рефрактограммы для плоского (а) и цилиндрического пучков (б), проходящих под горячим шаром в холодной воде.

Метод лазерной рефрактографии и его применение разрабатывались в диссертациях Имшенецкого А.И. (2005), Нгуен Ван Тханга (2009), Крикунова А.В. (2011).



**Рис. 1. Принципиальная схема лазерного рефрактографа:**

1 – лазер, 2 – оптическая система формирования структурированного лазерного пучка, 3 – оптически неоднородная среда, 4 – экран, 5 – рефрактограмма



**Рис. 2. Лазерные 3D-рефрактограммы для плоского пучка (а) и цилиндрического пучка (б), проходящих под горячим шаром в холодной воде**

**Заключение.** Начатые научные исследования по разработке и применению лазерных и оптических методов исследования потоков жидкости и газа на кафедре физики МЭИ по инициативе и под руководством проф. В.А. Фабриканта в 1965 г. продолжались все это время, развиваясь и совершенствуясь по мере развития лазерной техники, компьютерных методов обработки электрических сигналов и оптических изображений.

Научная группа поддерживает тесные научные контакты с ИОФ РАН, Физическим институтом им. П.Н. Лебедева, ИТЭС ИОВТ РАН, Институтом теплофизики СО РАН, Институтом теплообмена НАБ (Минск), ЦАГИ, ЦИАМ им. П.Н. Баранова и рядом зару-

бежных организаций. Научная группа проводит исследования по хоздоговорам и при поддержке отечественных и международных грантов: РФФИ, Минобрнауки РФ, МОНТ и ИНТАС и ЕС.

Кафедра физики является организатором международных научно-технических конференций «Оптические методы исследования потоков», проводимых каждые два года.

Результаты научной деятельности сотрудников кафедры отражены в монографиях и книгах, изданных в России и других странах, а также в многочисленных публикациях в журналах и трудах конференций, авторских свидетельствах и патентах. Только за последние десять лет вышли из печати пять монографий и книг, из которых две за рубежом. Ежегодно печатается более 30 научных статей. Исследования по разработке и применению оптических и лазерных методов широко ведутся и во многих отечественных и зарубежных институтах.

### Список литературы

1. Белозеров А.Ф. Оптические методы визуализации газовых потоков. Казань: Изд-во Казанского государственного технического университета. 2007. 747 с.
2. Settles G.S. *Schlieren and shadowgraph techniques: visualizing phenomena in a transparent media* / Berlin: Springer. 2001. 366 p.
3. Maiman T.H. Optical and microwave-optical experiments in ruby. *Physical Review Letters* 4, с. 564–566. 1960.
4. Javan A., Bennett W.B., Herriott D.R. Population inversion and continuous optical maser oscillation in a gas discharge containing He-Ne mixture // *Phys. Rev. Lett.* 1961, v. 6, p. 106–110.
5. Щербаков И.А. К истории создания лазера // *УФН*, 2011, т. 181, № 1, с. 71–78.
6. Евтихиева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С. Лазерная рефрактография / Под. ред. Ринкевичюса Б.С. М.: Физматлит, 2008, 176 с.

### References

1. Belozеров A.F. (2007) *Opticheskie metody vizualizatsii gazovykh potokov* [Optical imaging gas streams]. *Izd-vo Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Publishing House of Kazan University]. Kazan, 747 p.
2. Settles G.S. *Schlieren and shadowgraph techniques: visualizing phenomena in a transparent media*. Berlin: Springer. 2001. 366 p.
3. Maiman T.H. Optical and microwave-optical experiments in ruby. *Physical Review Letters* 4, p. 564–566. 1960.
4. Javan A., Bennett W.B., Herriott D.R. Population inversion and continuous optical maser oscillation in a gas discharge containing He-Ne mixture. *Phys. Rev. Lett.* 1961, vol. 6, p. 106–110.
5. Shcherbakov I.A. (2011) *K istorii sozdaniya lazera* [On the history of the laser]. *UFN [UFN]*, vol. 181, no. 1, pp. 71–78.
6. Evtikhieva O.A., Raskovskaya I.L., Rinkevichyus B.S. (2008) *Lazernaya refraktografiya. Pod. red. Rinkevichyusa B.S.* [Laser refractography. Under. Ed. Rinkevichyusa B.S.]. *Fizmatlit [FIZMATLIT]*. Moscow, 176 p.