

УДК 681.327.12.001.362:525

Н.А. Фомин, О.Г. Пенязьков, П.П. Храмцов

*Институт тепло-и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси,
220072, Минск, ул. П.Бровки 15, 14, E-mail: ollired@yandex.ru*

50 ЛЕТ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА В ИТМО НАН БЕЛАРУСИ

Дан краткий обзор основных результатов исследований течений с применением оптических методов диагностики, полученных в ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси за 50 лет. Проанализированы современные возможности многодлинновой цифровой лазерной спекл-фотографии и Тальбот интерферометрии для анализа турбулентных течений с использованием интегральных преобразований Эрбека-Мерцкирша и томографической реконструкции 3-х мерных течений с применением интегрального преобразования Радона.

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН, ТЕНЕВЫЕ МЕТОДЫ, ЦИФРОВАЯ СПЕКЛ-ФОТОГРАФИЯ, ТАЛЬБОТ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ, ТОМОГРАФИЯ, ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

ВВЕДЕНИЕ.

Работы по оптической диагностике течений в Институте тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова (ИТМО) НАН Беларуси (в то время ИТМО АН БССР) начались в 1963 г. с установки Казанского интерферометра ИЗК-454 с полем наблюдения около 230 мм. В качестве источника света использовалась аргоновая лампа с интерференционными светофильтрами. Уже в первых экспериментах с этим интерферометром использовалось зондирование исследуемой среды излучением с *различными длинами волн* [1]. Это позволило исследовать одновременно протекающие процессы переноса тепла и вещества и определить профили концентраций и температур, от которых зависит показатель преломления исследуемой среды, см. рис.1. Численный анализ двухдлинновой интерферометрии¹ для выбранных длин волн 440 и 651 нм показал, что при точности интерференционного анализа в 1/40 интерференционной полосы погрешности определения распределений температуры составляют 2-3 %, а погрешности в определении концентраций значительно больше и составляют 20-60% для ацетилена, 10-20% для бензола и 5-10% для дисульфида углерода в зависимости от концентрации примеси.

Подводя итоги достижений в области тепло-массообмена на открытии 3-ей Всесоюзной конференции по тепло- и массообмену² в 1968 г., А.В. Лыков особо отметил работы по оптической диагностике Б.М. Смольского, П.А. Новикова и В.К. Щитникова, подтвердившие разработанную им ранее теорию сублимационной сушки капиллярно-пористых веществ в вакууме, см. рис. 2. Другой яркий физический результат, полученный в лаборатории термоаэродинамики и описанный А.В. Лыковым в этом же “юбилейном” обзоре – управление гидродинамикой обтекания цилиндра неньютоновской жидкостью. Поле

¹ В цитируемой работе [1] такой метод диагностики назван дисперсионметрическим.

² Избранные труды конференции были опубликованы в монографии [2], посвященной 60-тилетию А.В. Лыкова

течения в этой работе было количественно визуализировано с помощью небольших электрохемиллюминесцентных добавок [3], см. рис. 2 справа.

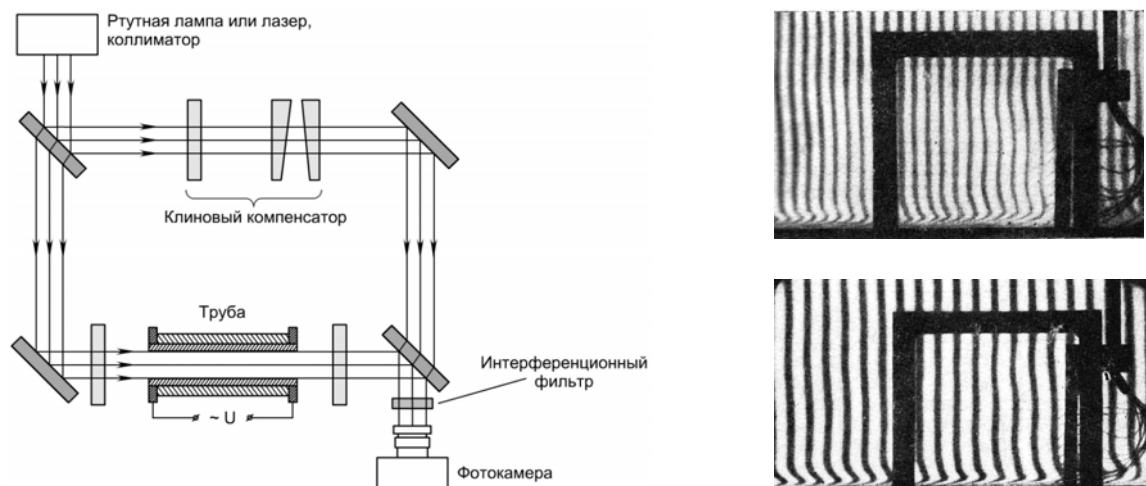


Рис. 1. Интерферометр Маха-Цандера ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси (слева) и интерферограммы течения (справа), полученные для длин волн 440 нм (сверху) и 651 нм (снизу) [1]

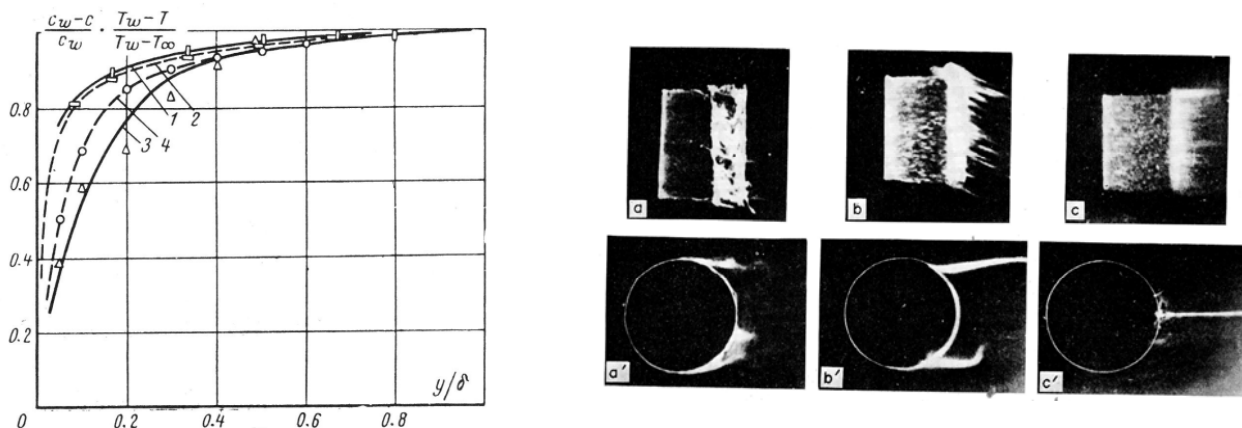


Рис. 2. Слева: профили концентрации и температуры в потоке при испарении бензола с обтекаемой поверхности. $T_{\infty}=298.7$ °К; $T_w= 286.2$ °К; скорость набегающего потока 4.07 м/с. 1, концентрация по дисперсионметрическому методу; 2, концентрация по λ_2 при известном профиле температуры; 3, профиль температуры по дисперсионметрическому методу; 4, измеренный профиль температуры [1]. Справа – картины обтекания цилиндра реологической жидкостью при увеличении концентрации вносимой примеси (Na-СМС): а) – 0%, б)–0.75%, с) – 1.5% [3].

Дальнейшее развитие оптических методов диагностики газовых сред в Институте связано с формированием нового научного направления под руководством О.Г. Мартыненко – азротермооптики [4, 5]. Введены в строй голографический интерферометр ИЗК-463 с апертурой 800 мм, теневые приборы ИАБ- 451 и интерферометры на их основе [6]. С приездом в ИТМО академика Р.И. Солоухина в 1976 г. спектр оптических методов диагностики значительно расширяется. Ведутся работы с интерферометром Майкельсона и фоторегистраторами быстропротекающих процессов (СФР, ЖФР, ЖЛВ), а также разрабатываются лазерные спектрографы с быстрой перестройкой спектра генерации [7, 8]. На рис.3 показаны интерферограммы течения инверсной среды в ГДЛ на смешении, полученные с использованием интерферометра Майкельсона и ждущей лупы времени [7], а на рис.4 показана схема лазерного спектрографа с пространственной селекцией мод. Такая схема позволяет формировать произвольный спектр генерации в пределах полосы усиления и осуществлять быструю перестройку спектра генерации [8].

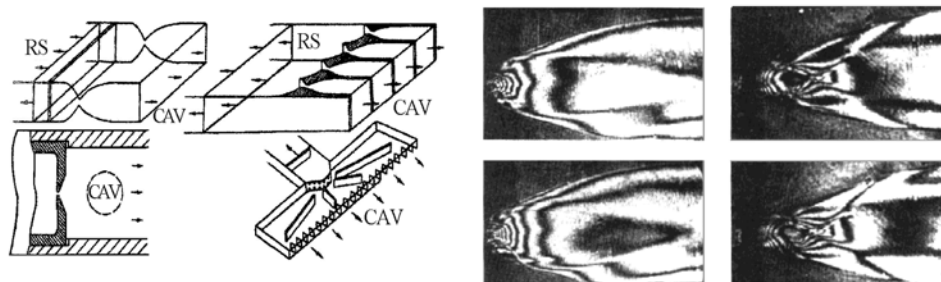


Рис. 3. Сопловые блоки для газодинамических лазеров (слева) и интерферограммы течений в газодинамических лазерах на смещении [7]

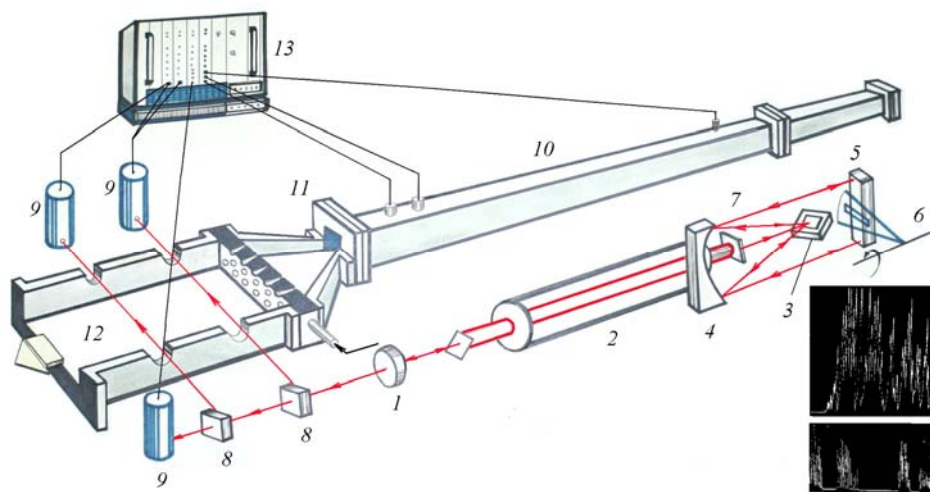


Рис. 4. Диагностика неравновесных распределений молекулярных уровней с помощью лазерного спектрографа Якоби-Солоухина: 1, выходное зеркало спектрографа, 2, Электроразрядная трубка, 3, дифракционная решётка, 4,5, 7, зеркала резонатора спектрографа, 6, механический сканер для выделения линии генерации, 8, поворотные зеркала, 9, приёмники излучения, 10, ударная труба, 11, сопловой блок, 12, сверхзвуковое течение с инверсной заселённостью [8]

Во второй половине восьмидесятых годов прошлого столетия в ИТМО начались работы по спекл-интерферометрии [9, 10]. Эти работы развивались первоначально как “голографические” с использованием фоторегистраторов, а к началу 21 века перешли на цифровые методы регистрации и обработки изображений [11], что позволило использовать их при томографической реконструкции сложных трёхмерных течений с использованием интегральных преобразований Радона. Эти исследования неоднократно докладывались на конференциях ОМИП.

Экспериментальное исследование вихревых структур и температурных полей при нестационарной конвекции в горизонтальных каналах и цилиндрических зазорах, проведенное на интерферометре Маха – Цандера, показало, что фактором, наиболее влияющим на интенсивность теплообмена, является формирование устойчивых вихревых структур [12, 13]. Широкий круг явлений, связанных с распространением, отражением и дифракцией ударных и детонационных волн, изучался в ИТМО с помощью высокоскоростной фоторегистрации в сочетании с теньвыми и интерференционными методами в связи с исследованиями импульсных детонационных двигателей [14]. В конце первой декады 21 века в Институте проведены комплексные исследования влияние приповерхностного высокочастотного барьерного разряда на структуру пограничного слоя и величину полного аэродинамического сопротивления плоской пластины и профиля Жуковского. С помощью оптической визуализации (теневого и PIV-метода, дымовой и трековой визуализации) получено поле скоростей ионного ветра вблизи обтекаемой

поверхности, дающее исчерпывающую информацию о структуре потока и абсолютных значениях скорости течения [15]. В это же время начались работы по применению Тальбот- и спеклинтерферометрии для диагностики как ламинарных, так и турбулентных течений [16, 17], см. рис.5. а также микротечений и биотканей [18, 19], см. рис. 6.

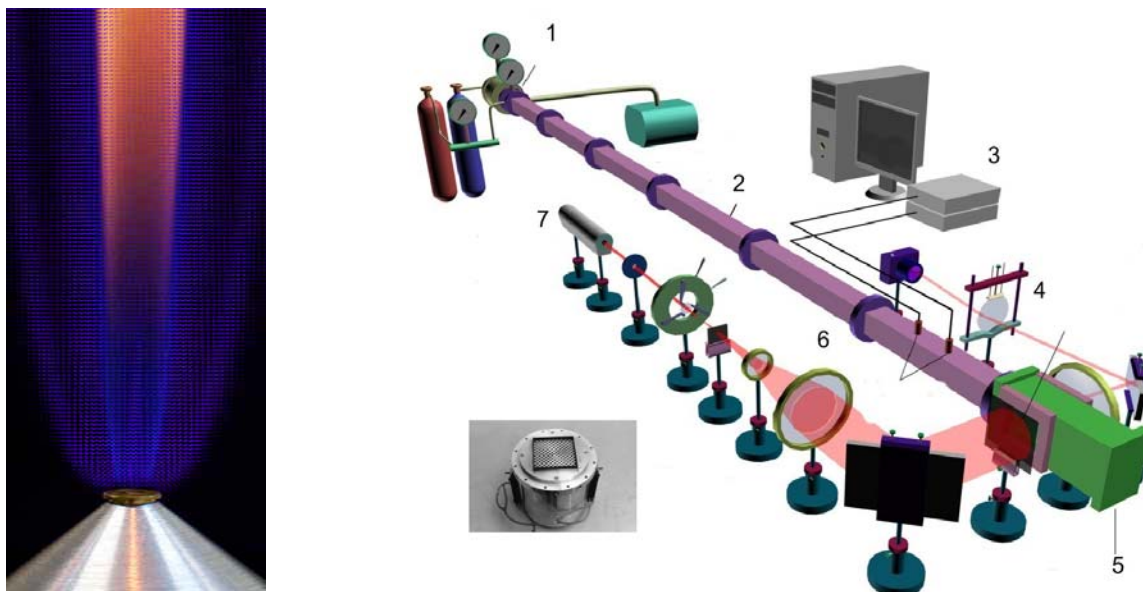


Рис. 5. Слева: Тальбот интерферограмма пламени. Справа: Тальбот интерферометр на ударной трубе: 1, канал высокого давления УТ, 2, канал низкого давления УТ, 3, регистрирующая аппаратура и ПЭВМ, 4, экран, 5, рабочая часть УТ, 6, коллиматор, 7, зондирующий лазер [16]. В нижнем углу схемы интерферометра турбулизирующая решётка для создания изотропной турбулентности [17].

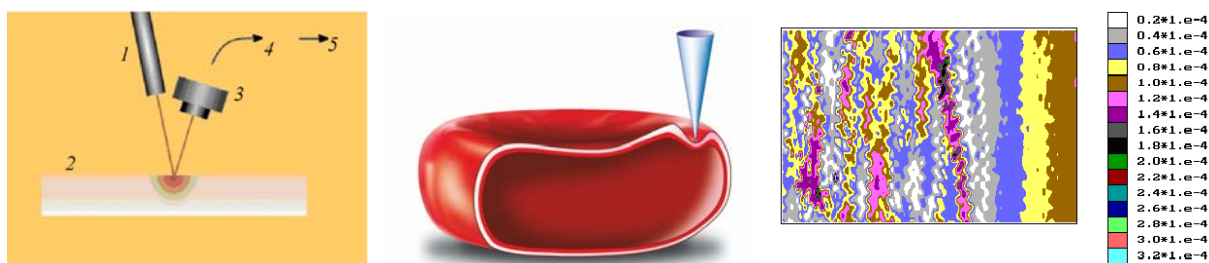


Рис. 6. Слева: принципиальная схема и основные компоненты устройства для лазерной диагностики микротечений и биотканей [18, 19]: 1, зондирующий лазер; 2, исследуемая биоткань; 3, цифровая камера для регистрации спекл-полей; 4, ПЭВМ; 5, монитор, на который выводится обработанная информация. В центре – мониторинг эритроцита в сканирующем электронно-силовом микроскопе [19]. Справа: спекл-фотография анизотропии в турбулентном пламени [17].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Sadovnikov G.V., Smols'kiy B.M., Shchitnikov V.K.** Investigation of Simultaneous Heat and Mass Transfer Using an Interferometr // Heat Transfer. Soviet Research. 1969. Vol.1., Nu. 1. Pp. 32-38.
2. **Luikov A.V.** Opening Remares. Third All-Union Heat and Mass Transfer Conference, Minsk, USSR. Progress in Heat and Mass Transfer, Vol. IV, Pergamon Press, Oxford, 1971, Pp. 21-31.
3. **Лыков А.В., Шульман З.П., Пурис Б.И.** Отрыв пограничного слоя на круговом цилиндре, обтекаемом неньютоновской эластовязкой жидкостью. Инженерно-физический журнал. 1968. Т.14, №1., С. 17-28.
4. **Martynenko O.G., Berkovsky B.M., Lemesh N.I.** A thermogaseous lens with a swirled flow // Int. J. Heat and Mass Transfer, 1968. Vol. 10. Pp. 355-364.

5. **Kolesnikov P.M., Martynenko O.G.** Aerothermo-Optics (Wave Approach) // Progress in Heat and Mass Transfer, Vol. IV, Pergamon Press, Oxford, 1971, Pp. 235-255.
6. **Богачёв В.С., Гиль В.В., Драгун В.Л., Лемеш Н.И., Лысенко О.Г., Мартыненко О.Г., Солоухин Р.И., Фомин Н.А., Ходан И.В., Щитников В.К. и др.** Методы экспериментальных исследований процессов тепло – и массопереноса. Препринт ИТМО №11, 1984, 57 с., илл.
7. **Солоухин Р.И., Фомин Н.А.** Газодинамические лазеры на смешении. Минск: Наука и техника, 1984. – 248 с., илл.
8. **Ачасов О.В., Кудрявцев Н.Н., Новиков С.С., Солоухин Р.И., Фомин Н.А.** Диагностика неравновесных состояний в лазерных системах. Минск: Наука и техника, 1985. – 212 с., илл.
9. **Блинков Г. Н., Виткин Д. Э., Солоухин Р. И., Фомин Н. А.** Спекл-фотография полей локальных температур в процессах тепло- и массообмена с осевой симметрией // Докл. АН БССР. 1987. Т. 31, № 7. С. 627–630.
10. **Фомин Н.А.** Спекл-фотография газодинамических течений. Минск: Наука и техника, 1989. – 189 с., илл.
11. **Fomin N.A.** Speckle Photography in Fluid Mechanical Measurements. Berlin: Springer. 1998. – 208 pp., ill.
12. **Martynenko O.G., Khrantsov P.P.** Stable Vortex Structures in Axisymmetric Flame under Oscillating Combustion //In book “Applied Optical Measurements”. Berlin: Springer. 1999. Pp. 321--328.
13. **Martynenko O.G., Khrantsov P.P.** Free-Convective Heat Transfer. With Many Photographs of Flows and Heat Exchange// Berlin: Springer. 2005. -516 pp., ill.
14. **Ачасов О.В., Лабуда С.А., Пенязьков О.Г., Пушкин Р.М., Тарасов А.И.** Ударно-волновое инициирование детонации в полужамкнутой полости // Хим. физика. 1993. Т. 12, № 5. С. 714-716.
15. **Храмцов П.П.** Оптическая диагностика конвективного тепло-и массообмена в газовой динамике // Наука и Инновации №3 (121). 2013. С. 14-16.
16. **Храмцов П.П., Пенязьков О.Г., Шатан И.Н., Ших И.А.** Тальбот метод исследования распределения концентрации метана в турбулентной осесимметричной струе // Инженерно-физический журнал. 2013. Т. 86. № 2. С. 247-255.
17. **Fomin N. A., Penyazkov O. G., Khrantsov P. P., Lavinskaya E. I.** 3D turbulence diagnostics by digital speckle photography and Talbot interferometry// Proc. of the Int. Conf. on the Methods of Aerophysical Research ICMAR-2007. Part IV. Novosibirsk: Publ. House “Parallel”, 2007. Pp. 22 – 27.
18. **N.B. Bazylev, N. A. Fomin, H. Galiano, O.V. Meleeva, S. Martemianov, O.G. Penyazkov.** PEMFCs flow microstructure analysis by advanced speckle technologies. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 54, issues 11, 12, pp. 2341-2348. **2011.**
19. **Sergei Chizhik, Lizaveta Drozd, Nikita Fomin.** Digital Optical and Scanning Probe Microscopy for Inspection and Manipulation of Biocells- In book: Micro and nano Flow Systems for Bioanalysis. Edited by Michael W. Collins and Carola S. König. ISBN 978-1-4614-4376-6. Springer. Berlin. 2013. Ch. 7. Pp. 87-105.

N.A. Fomin, O.G. Penyazkov, P.P. Khrantsov

Heat and Mass Transfer Institute, P. Brovki 15,
Minsk, Belarus Academy of Sciences, 220072, Belarus
e-mail: fomin@hmti.ac.by

50 YEARS INVERSE PROBLEMS OF REFRACTOMETRY FOR TURBULENT FLOWS DIAGNOSTICS

The short review of optical flow investigations at the Luikov Heat and Mass Transfer Institute of National Academy of Science during the last 50 years are given. Modern possibilities of multi-wavelength digital laser speckle and Talbot interferometry of turbulent flows with the usage of Erbeck-Merzkirch integral transforms as well as the tomographic reconstruction of 3d-flows with the use of Radon integral transform have been analyzed.

INTERFEROMETRY, HEAT AND MASS TRANSFER, SCHADOW METHODS, DIGITAL SPECKLE PHOTOGRAPHY, TALBOT INTERFEROMETRY, TOMOGRAPHY, TURBULENCE