

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР А. М. ШАЛАГИН

Институт автоматики и электрометрии СО РАН

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА: Ю. Н. ЗОЛОТУХИН,
В. К. МАЛИНОВСКИЙ

Институт автоматики и электрометрии СО РАН

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ В. П. БЕССМЕЛЬЦЕВ
Институт автоматики и электрометрии СО РАН

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

А. Л. АСЕЕВ	Сибирское отделение РАН
И. В. БЫЧКОВ	Институт динамики систем и теории управления СО РАН
С. Н. ВАСИЛЬЕВ	Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН
Ю. И. ЖУРАВЛЕВ	Вычислительный центр им. А. А. Дородницына РАН
В. С. КИРИЧУК	Институт автоматики и электрометрии СО РАН
Г. Н. КУЛИПАНОВ	Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Ю. Н. КУЛЬЧИН	Дальневосточное отделение РАН
Г. Г. МАТВИЕНКО	Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН
Е. С. НЕЖЕВЕНКО	Институт автоматики и электрометрии СО РАН
О. И. ПОТАТУРКИН	Институт автоматики и электрометрии СО РАН
В. А. СОЙФЕР	Институт систем обработки изображений РАН
А. А. СПЕКТОР	Новосибирский государственный технический университет
Ю. В. ЧУГУЙ	Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН
В. Ф. ШАБАНОВ	Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН
Ю. И. ШОКИН	Институт вычислительных технологий СО РАН

УЧРЕДИТЕЛИ ЖУРНАЛА:

Сибирское отделение РАН,
Институт автоматики и электрометрии СО РАН

Ответственные за выпуск
д-р техн. наук Ю. Н. ДУБНИЩЕВ, д-р физ.-мат. наук Б. С. РИНКЕВИЧЮС

Заведующая редакцией Р. П. ШВЕЦ

Сдано в набор 4.08.2014. Подписано в печать 1.10.2014. Формат (60 × 84) 1/8. Офсетная печать.
Усл. печ. л. 13,95. Усл. кр.-отт. 11,2. Уч.-изд. л. 11,2. Тираж 174 экз. Свободная цена. Заказ № 237.
Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания
и средств массовых коммуникаций 31.05.2002.
Свидетельство ПИ № 77-12809

Адрес редакции: Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
просп. Академика Коптюга, 1, Новосибирск 630090,
тел. 8 (383) 330-79-38, E-mail: automr@iae.nsk.su
<http://sibran.ru>

Издательство СО РАН, Морской просп., 2, Новосибирск 630090.
Отпечатано на полиграфическом участке Издательства СО РАН

© Сибирское отделение РАН,
Институт автоматики и
электрометрии СО РАН, 2014

А В Т О М Е Т Р И Я

ОСНОВАН В ЯНВАРЕ 1965 ГОДА

ВЫХОДИТ 6 РАЗ В ГОД

Том 50

2014

№ 5

СЕНТЯБРЬ — ОКТЯБРЬ

СОДЕРЖАНИЕ

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Белозеров А. Ф. Современные технологии создания систем оптико-физических измерений газодинамических полей размером до 1000 мм.....	3
Петров О. Ф., Ваулина О. С., Васильев М. М., Лисин Е. А., Мясников М. И., Антипов С. Н., Чепелев В. М., Косс К. Г., Тун Й., Фортов В. Е. Кулоновские системы сильновзаимодействующих пылевых частиц: эксперименты в лаборатории и условиях микрогравитации.....	19
Алексеев М. В., Бильский А. В., Дулин В. М., Козинкин Л. А., Маркович Д. М., Токарев М. П. Диагностика струйных течений томографическим методом измерения скорости.....	37
Арбузов В. А., Арбузов Э. В., Бердников В. С., Буфетов Н. С., Дубнищев Ю. Н., Шлапакова Е. О. Оптическая диагностика структуры и эволюции плавучих струй в сильновязкой жидкости.....	47
Boden F., Kirmse T., Поройков А. Ю., Ринкевичус Б. С., Скорнякова Н. М., Шашкова И. А. Исследования точности измерений динамических деформаций поверхности методом корреляции фоновых изображений.....	56
Семидетнов Н. В. Эффекты локализации в прямом рассеянии при лазерной диагностике двухфазных потоков.....	66
Большухин М. А., Знаменская И. А., Свешников Д. Н., Фомичев В. И. Термографическое исследование турбулентных пульсаций воды при неизотермическом смешении.....	75
Миронова Т. В. Ошибки измерений при обработке бинарных и полутоновых изображений.....	84
Расковская И. Л. Рефрактометрия оптически неоднородных сред на основе регистрации положения каустик при использовании структурированного лазерного излучения.....	92
Гречихин В. А., Титов Д. А. Квазиоптимальная нелинейная фильтрация сигнала лазерного доплеровского виброметра.....	99
Ли К., Киннунен М., Луговцов А. Е., Приезжев А. В., Карменян А. В. Оптические методы исследования динамики и деформации эритроцитов в условиях потока.....	108

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Базаров Ю. Б., Мешков Е. Е. Способ регистрации быстролетающих микрочастиц с использованием диакопической проекции.....	116
Павлов И. Н., Толкачев А. В. Визуализация кристаллизации пограничного слоя капли воды методом нарушенного полного внутреннего отражения широкого коллимированного лазерного пучка.....	120

ОТ СОСТАВИТЕЛЕЙ ВЫПУСКА

Предлагаемый вниманию читателей выпуск журнала посвящается не оптической диагностике вообще (необъятное объять невозможно), а лишь некоторым перспективным её направлениям и важным практическим приложениям, отражённым в материалах XII Международной конференции «Оптические методы исследования потоков», состоявшейся в 2013 году в Москве. К ним относятся: история и перспективы развития широкоапертурных интерференционно-теневых систем для визуализации полей оптической фазовой плотности потоков в экспериментальной газодинамике; исследование плазменно-пылевых упорядоченных структур в лабораторных условиях и в условиях микрогравитации; методы PIV-томографии и её приложения в диагностике струйных течений; методы гильбертоптики и интерферометрии в исследовании плавучих струй при физическом моделировании мантийных плюмов и подъёмных течений в зоне спрединга; техника корреляции фоновых изображений при оптических измерениях динамических деформаций поверхностей; оптическая диагностика двухфазных потоков с учётом влияния тонких эффектов локального взаимодействия света с частицей; методы тепловизионной диагностики пространственно-временных и частотных характеристик турбулентного пограничного слоя жидкости; оценка статистической погрешности корреляционных измерений при анализе бинарных и полутоновых изображений в системах оптической обработки информации; томографическая рефрактометрия неоднородных сред с использованием структурированных лазерных пучков; оптическая диагностика быстролетящих микрочастиц, индуцированных взаимодействием ударной волны с металлической поверхностью; фотодинамическая и дифракционная диагностика эритроцитов; лазерная доплеровская виброметрия; методы нарушенного полного внутреннего отражения в оптической диагностике процессов кристаллизации капли воды.

Предлагаемые в тематическом выпуске исследования дают представление о современном уровне этих направлений в оптической диагностике потоков.

*д-р техн. наук Ю. Н. Дубнищев
д-р физ.-мат. наук Б. С. Ринкевичюс*

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 535.42

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ
ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ
ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ РАЗМЕРОМ ДО 1000 мм

А. Ф. Белозеров

ОАО «Научно-производственное объединение
"Государственный институт прикладной оптики"»,
420075, г. Казань, ул. Н. Луштова, 2
E-mail: progipo@tnpko.ru

Базовые технологии, используемые в разработках теневых, интерференционных и интерференционно-теневых приборов первого и второго поколения, не позволили решить до конца ряд проблем современного газодинамического эксперимента, прежде всего создания сравнительно дешёвых и компактных систем для оптико-физических измерений газодинамических полей (полей визуализации) размером 800–1000 мм и более. В ближайшие годы следует ожидать резкого повышения спроса на уникальные оптические системы для оснащения аэродинамических труб и баллистических трасс: только на их основе возможно осуществить экспериментальное изучение картин обтекания моделей самолётов, вертолётных аппаратов будущего, автомобилей, ракет различных классов в условиях масштабирования, приближающихся к натурным. (В аэродинамической трубе поток газа направлен на неподвижную модель, например, летательного аппарата; аэробаллистическая трасса позволяет осуществлять прямое моделирование движения исследуемых тел.) Реализованы новые технические возможности оптических методов исследования газовых потоков: апостериорное изучение волновых полей, деформированных при прохождении через газовый поток, повышение чувствительности оптических измерений на 1–2 порядка, многократное увеличение объёма информации, получаемой в сложном газодинамическом эксперименте. Для решения этих проблем использованы современные оптические технологии.

Ключевые слова: оптические методы визуализации, интерференционные и теневые методы, методы светящейся точки, газовый поток, аэробаллистическая трасса, голографический интерферометр.

Введение. Изучение многих процессов в прозрачных неоднородных средах (воздух и составляющие его газы, жидкости, стекло и кристаллы), имеющих место в технике, в науке, в жизни, таких как смешивание компонентов в химической и топливной промышленности, растворов и лекарственных препаратов в медицине, тепломассообмен в теплотехнике, строительстве, гидромеханике, оптимизация параметров различных энергоустановок, существенно упрощается при их визуализации. Задача визуализации состоит в преобразовании фазы проходящей через прозрачную неоднородную среду световой волны в изменения интенсивности, которые легко регистрируются оптическими методами: теневыми, интерференционными, прямотеневыми (источник света расположен в бесконечности). Важнейшая особенность и достоинство этих методов состоят в высокой чувствительности, бесконтактности применения, поскольку они не вносят возмущений в изучаемый процесс [1].

Наиболее широкое и известное использование оптические методы получили в экспериментальной газовой динамике, потому что становление и развитие авиации, ракетной техники и космонавтики неразрывно связаны с необходимостью визуализации, измерений и контроля параметров газовых потоков. Здесь очень важно обеспечить проведение как качественных (форма и расположение скачков уплотнения, наблюдение вихрей, срыв-

ных течений, турбулентности, пограничного слоя), так и количественных исследований (расчёт полей плотности, температур, давлений).

Для количественных исследований потоков более пригодны интерференционные приборы. В СССР для этих целей были созданы интерферометры по схеме Цендера — Маха, наиболее известные из них ИЗК-454 (поле визуализации 230 мм) и ИТ-42 (поле визуализации 300 мм). Один из главных недостатков интерферометров — неустойчивость к внешним воздействиям: вибрациям, колебаниям температуры, звуковым колебаниям. Более простыми по конструкции и более устойчивыми являются теневые приборы ИАБ-451, ИАБ-453, ИАБ-457, ТЕ-19, ТЕ-20, ТЕ-21 с размером поля визуализации до 230 мм и ТЕ-23 с гигантским размером поля — в диаметре 500 мм! Разработанная к этому времени теория интерферометров со сдвигом волновых фронтов (в отличие от классических интерферометров здесь отсутствует эталонная ветвь прибора, что существенно упрощает и удешевляет его) дала возможность использовать теневые приборы в качестве интерферометров. Позднее в Казанском государственном университете был создан решёточный дифракционный интерферометр, а в Государственном оптическом институте (Ленинград) — различного типа зеркальные интерферометры [1], которые позволили реализовать значительную часть систем оптико-физических измерений (ОФИ) второго поколения. Ко второму поколению систем ОФИ можно отнести также неравноплечие лазерные интерферометры, квазицветные теневые приборы, теневые приборы, работающие по принципу «лазерного ножа», реализующие оптическое преобразование Гильберта [2], стереоскопические теневые приборы и другие, применяемые для количественных измерений.

У истоков создания интерференционных, теневых, прямотеневых методов и приборов были такие известные учёные, как Жюль Селестен Жамен, Альберт Абрахам Майкельсон, Эрнст Мах, Жан Бернар Фуко, Август Теплер.

Проблемные вопросы. В одном газодинамическом эксперименте (при одной продувке в аэродинамической трубе или одном выстреле на баллистической установке) обычно удаётся собрать ограниченную информацию об изучаемом потоке: теневые или интерференционные картины, или картины по методу светящейся точки. Эти картины получают к тому же при определённых параметрах настройки аппаратуры, оптимальных для визуализации какой-либо выбранной части потока: форме визуализирующей диафрагмы, ширине и ориентации осветительной щели, величине перекрытия изображения щели диафрагмой — при теневых измерениях; ширине и ориентации интерференционных полос, длине волны используемого излучения — при интерференционных измерениях. Таким образом, газодинамические исследования, особенно пространственных течений (показатель преломления потока газа — функция трёх координат), связаны с проведением большого количества экспериментов, для чего должна быть обеспечена достаточная стабильность газового потока в аэродинамической установке.

Выдвинут ряд принципиально новых требований к измерительной аппаратуре [1]. Одно из важнейших — повышение чувствительности измерений при изучении газовых потоков, которые вызывают деформацию прошедшего через них волнового фронта, не превышающую $\lambda/10$ (течения в аэродинамических трубах при низких давлениях, разреженные газовые потоки в ударных трубах, плазменные потоки).

К новым требованиям можно отнести необходимость исследования многофазных (чаще всего двухфазных: газ и твёрдые частицы) потоков обтекания тел на гиперзвуковых скоростях при эрозии поверхности тела.

Сложной задачей является оптическая диагностика через обычные защитные стёкла течений с сильным свечением и течений, имеющих сверхвысокие температуры. Возникает необходимость получения теневых или интерференционных картин при фокусировке светового пучка на узкую зону исследуемого течения, а также визуализации течения, находящегося за рассеивающей или фокусирующей свет прозрачной защитной стенкой.