

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ИНСТИТУТ ТЕПЛОФИЗИКИ СО РАН
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»
НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР
УНИКАЛЬНОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ РАН

**ОПТИЧЕСКИЕ
МЕТОДЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ
ПОТОКОВ**

**ТРУДЫ
XVIII МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

**30 июня – 04 июля 2025 года
МОСКВА**

Под общей редакцией
проф. Ю. Н. Дубнищева
доц. Н. М. Скорняковой

УДК ...

ББК ...

...

под ред.: Ю. Н. Дубнищева, Н. М. Скорняковой
**Оптические методы исследования потоков: Труды XVIII
Международной научно-технической конференции, 30
июня – 04 июля 2025.** – М.: ..., 2025. – 524 с. [Электронное
издание]

ISBN ...

Сборник содержит доклады XVIII Международной научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков». На конференции представлены доклады по следующим направлениям: лазерная анемометрия, визуализация потоков, разработка оптико-электронных устройств, компьютерные методы обработки сигналов и изображений, лазерная и оптическая интерферометрия, применение оптических методов, акустооптика и оптоакустика, оптические методы в биомедицине и экологии, также включены доклады научной молодежной школы.

The proceedings contain papers of the XVIII International Scientific and Technical Conference "Optical Methods of Flow Investigation". The conference papers presented in the following areas: laser anemometry, flow visualization, development of optical-electronic devices, computer methods of signal and image processing, laser and optical interferometry, application of optical methods, acousto-optic and optoacoustics, optical methods in biomedicine and ecology, also included papers of the Youth workshop.

УДК ...

ББК ...

ISBN ...

© Авторы статей, 2025

XVIII Международная научно-техническая конференция
ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТОКОВ
(ОМИП-2025)

Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.

ОРГКОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Сопредседатели конференции:

Д.М. Маркович – академик РАН, А.В. Клименко – академик РАН

Сопредседатели программного комитета:

д.т.н. Ю.Н. Дубнищев, д.т.н. Н.М. Скорнякова

Ученый секретарь: к.т.н. А.Ю. Поройков

Члены оргкомитета:

Вараксин А.Ю. (Москва)	Матвиенко Г.Г. (Томск)
Вишняков Г.Н. (Москва)	Мачихин А.С. (Москва)
Гордиенко В.М. (Москва)	Машек И.Ч. (Санкт-Петербург)
Евтихиева О.А. (Москва)	Мошаров В.Е. (Жуковский)
Жаркова Г.М. (Новосибирск)	Петров О.Ф. (Москва)
Зверев П.Г. (Москва)	Приезжев А.В. (Москва)
Ковш И.Б. (Москва)	Смирнов В.В. (Москва)
Кулеш В.П. (Жуковский)	Смирнов В.И. (Москва)
Кульчин Ю.Н. (Владивосток)	Чашечкин Ю.Д. (Москва)
Левин Г.Г. (Москва)	Чугуй Ю.В. (Новосибирск)
Луцкий А.Е. (Москва)	Ягодкин В.И. (Москва)

Члены организационного комитета:

Бондарев А.Е. (Москва)	Шеманин В.Г. (Новороссийск)
Знаменская И.А. (Москва)	Лапицкий К.М. (Москва)
Иншаков С.И. (Жуковский)	Сапронов М.В. (Москва)
Минеев Б.И. (Москва)	Усманова Ш.Ш. (Москва)
Пожар В.Э. (Москва)	Хвостов А.А. (Москва)
Привалов В.Е. (Санкт-Петербург)	

Технический комитет:

Кучменко А.В.	Иванова (Шматко) Е.В.
Еремин Д.В.	Софуев Д.В.
Ибрагимова Э.И.	Балашова А.М.

Содержание

Содержание	4
Секция 1 – Лазерная анемометрия и интерферометрические методы	8
<i>Зверев П.Г., Смирнов И.В.</i> Многоволновая генерация неодимовых лазеров	9
<i>Шестаков М.В.</i> Исследование влияния колеблющейся струи на смешение и структуру течения в узком зазоре.....	18
<i>Софуев Д.В., Усманова Ш.Ш., Скорнякова Н.М., Сапронов М.В.</i> Определение границ применимости комплекса диагностики потоков методом мультицветной анемометрии по изображениям частиц	26
<i>Могорычная А.В.</i> Измерение поверхностного трения на горизонтальной поверхности методом интерференции в тонкой масляной пленки	34
Секция 2 – Теневые и рефрактометрические методы	44
<i>Винниченко Н.А., Пуштаев А.В., Руденко Ю.К.</i> Улучшение характеристик теневого фонового метода с периодическим цветным фоном и определением смещения методом сдвига фазы.....	45
<i>Назаров Н.А., Миськив Н.Б., Старинская Е.М.</i> Методы определения геометрических параметров испаряющихся капель по цифровым изображениям	56
<i>Федоров Е.К., Павлов И.Н., Лапицкая И.А.</i> Исследование стратифицированной жидкости методами лазерной рефрактографии и нарушенного полного внутреннего отражения	64
<i>Чашечкин Ю.Д.</i> Цветные панорамные и узкопольные теневые наблюдения течений гетерогенных жидкостей	71
<i>Дубнищев Ю.Н., Арбузов Э.В., Золотухина О.С., Лапиков М.М.</i> Оптическая гильберт-томография газовых, конденсированных и реагирующих сред	79
<i>Арбузов Э.В., Дубнищев Ю.Н., Лукашов В.В., Тупикин А.В.</i> Гильберт-визуализация отсоединённого пламени в электрическом поле.....	86
<i>Ведяшкина А.В., Расковская И.Л., Павлов И.Н.</i> Применение метода каустик лазерного излучения для решения задач рефракции в мутных средах	93
Секция 3 – Визуализация потоков.....	100
<i>Инишаков С.И.</i> Особенности визуализации вихревых нитей.....	101
<i>Иванова А.А., Мурсенкова И.В.</i> Оптическая визуализация стационарного сверхзвукового течения около обтекаемого тела.....	112
<i>Сазонов А.С., Мурсенкова И.В.</i> Распределение свечения импульсного поверхностного скользящего разряда в сверхзвуковом потоке с обтекаемым телом.....	117
<i>Здорников С.А., Исаенков С.В., Черданцев А.В.</i> Влияние свойств жидкости на переход от стратифицированного к кольцевому режиму в горизонтальной трубе	123
<i>Неткачев В.В., Скорнякова Н.М.</i> Разработка программы для автоматизации обработки PIV изображений с применением CNN архитектуры U-Net	129
<i>Карнозова Е.А., Знаменская И.А., Луцкий А.Е., Сысоев Н.Н.</i> Визуализация нестационарных тепловых полей в сверхзвуковом потоке при инициировании импульсного разряда	137
<i>Козлов В.В.</i> Ламинарно турбулентный переход и режимы горения микроструй водорода	144

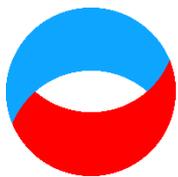
<i>Вдовин М.И., Краев И.М., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И.</i> Исследование оптическими методами влияния пенного покрова на процессы обмена в турбулентном пограничном слое воздушного потока над водной поверхностью	152
<i>Литвиненко Ю.А., Козлов В.В., Литвиненко М.В.</i> Сталкивающиеся ламинарные микро-струи	158
<i>Чашечкин Ю.Д.</i> Расчет и визуализация тонкой структуры периодических течений в гетерогенных сжимаемых средах	168
<i>Чашечкин Ю.Д.</i> Картины слияния однородных капель растворов и суспензий химически нейтральных и реагирующих сред	175
<i>Сергеев Д.А., Вдовин М.И., Краев И.М., Зотова А.Н., Ермакова О.С., Троицкая Ю.И.</i> Детальное исследование основных источников возникновения событий фрагментаций типа парашют оптическими методами при лабораторном моделировании процессов образования морского аэрозоля	196
<i>Родин И.Р., Павлов И.Н., Янина Г.М., Знаменская И.А.</i> Разработка оптико-электронного комплекса для исследования физических процессов в пристеночных слоях жидкости	202
Секция 4 – Оптико-электронное приборостроение.....	210
<i>Павлов И.Н., Королькова О.В., Федоров Е.К., Родин И.Р.</i> Разработка оптической части оптико-электронного датчика на основе НПВО	211
<i>Белых А.Ю., Сударев А.А., Хохлов Д.Д.</i> Влияние характеристик оптического волокна на спектр комбинационного рассеяния образца в исследованиях с использованием зондовых систем	219
<i>Хохлов Д.Д., Быков А.А., Поляков М.П., Золотухина А.А., Белых А.Ю., Шишкин Д.В., Асютин Р.Д.</i> Разработка оптической системы для контроля распределения температуры в аддитивных процессах сплавления металлов	225
<i>Марченков А.Ю., Печинская О.В., Свиридов Г.Б.</i> Модернизация микроскопа-твердомера из состава прибора МЭИ Т-7	233
<i>Гоголев К.С., Печинская О.В.</i> Исследование точностных характеристик бителецентрического объектива с однократным увеличением	243
<i>Ветрова Н.А., Куимов Е.В., Лунева Л.А.</i> Особенности моделирования ВАХ резонансно-туннельных диодов на участке отрицательной дифференциальной проводимости	252
<i>Иванова Е.В., Поройков А.Ю., Еремин Д.В., Лапицкая И.А.</i> Инструментальная оценка погрешности измерения ориентации свободноповорачивающейся платформы	258
Секция 5 – Компьютерные методы обработки сигналов и изображений.....	262
<i>Кривоклякин Г.Д., Винецкий Ю.Р.</i> Определение пространственного разрешения ОЭС ДЗЗ без необходимости формирования специальных тест-объектов методом «виртуальной пространственной миры»	263
<i>Кузьмин В.И., Тытик Д.Л., Абатуров М.А., Касаткин В.Э.</i> Сдвиговая функция на основе метрик функциональных пространств при анализе больших данных	273
<i>Кадыров Р.И., Стаценко Е.О., Нгуен Т.Х.</i> Физически информированное машинное обучение в цифровом керне: прогноз газовой проницаемости карбонатов на основе изображений микротомографии стандартных образцов	281
<i>Павлов И.Н.</i> Избавление от артефактов на изображениях, полученных методом сканирующей ближнепольной оптической микроскопии	290
<i>Анциперов В.Е., Кершнер В.А.</i> Перспективный подход к обработке изображений, основанный на нейроморфном декодировании в парадигме Марра	299

Секция 7 – Применение оптических методов	304
<i>Терехова А.С., Смирнов С.В.</i> Поглощение ИК-излучения свободными электронами в наноразмерных пленках ИТО.....	305
<i>Шестаков М.В., Ягодницына А.А.</i> Управление линиями тока в массиве столбцов.....	311
<i>Курьяков В.Н.</i> Некоторые возможности метода ультрамикроскопии и применение данного метода в научных исследованиях.....	315
Секция 8 – Акустооптика и оптоакустика.....	319
<i>Сударев А.А., Шарикова М.О., Польщикова О.В.</i> Оптическая схема акустооптического гиперспектрального инфракрасного микроскопа.....	320
<i>Никитин П.А.</i> Оптимизация акустооптического фокусирующего устройства, использующего линейно частотно модулированный импульс звука.....	324
<i>Пожар В.Э.</i> Особенности расчета дифракции света на акустических волнах в акустооптических устройствах.....	329
<i>Поляков М.П.</i> Особенности проектирования акустооптических видеоспектрометров.....	334
<i>Балашова А.М., Латицкий К.М., Печинская О.В.</i> Макет пирометра на основе АОФ для измерения температуры горения газового пламени.....	339
Секция 9 – Научная визуализация.....	348
<i>Подвесовский А.Г., Филонов А.А., Захарова А.А.</i> Визуализация параметров оптимизационной модели в системах планирования транспортировки разнородных грузов с помощью беспилотных летательных аппаратов.....	349
<i>Смирнов В.И.</i> Метрологический анализ различных схем измерения параметров поляризации лазерного излучения.....	360
<i>Бондарев А.Е., Кувшинников А.Е.</i> Анализ сравнения точности солверов в задаче о пересечении косых скачков.....	367
<i>Бондарева Н.А.</i> Построение методологического гибридного подхода использования генеративных нейросетей при создании 3D моделей.....	374
<i>Конопацкий Е.В., Кислицын Д.И., Степура А.В., Котова О.В.</i> Метод поиска оптимальных узлов аппроксимации непрерывных функций с учётом нелинейности пространства.....	384
<i>Расковская И.Л., Павлов И.Н.</i> Моделирование волнового поля лазерного пучка, отраженного от неровной поверхности при наличии динамических нормальных деформаций.....	392
<i>Попович С.С., Знаменская И.А., Козлов П.В., Загайнов И.А.</i> Исследование взаимодействия ударной волны с турбулентным пограничным слоем на пластине.....	407
<i>Попович С.С., Здитовец А.Г., Виноградов Ю.А.</i> Исследование процесса дробления капель воды при течении воздушно-капельного потока через сопло Лавалья.....	412
Секция 10 – Оптические методы в биомедицине и экологии	417
<i>Будников А.А., Наумов А.А., Платонов Д.М., Паршин В.А.</i> Реализация метода лазерной дифрактометрии эритроцитов.....	418
<i>Лебедева М.С., Цыбров Е.Г., Никитин С.Ю.</i> Эритроциты в сдвиговом потоке и на мазке крови: анализ методами микроскопии и лазерной дифрактометрии.....	426
<i>Горбачева П.В., Матвеева И.А.</i> Использование методов машинного обучения для ранней диагностики миеломы при помощи рамановской спектроскопии.....	436
<i>Томникова К.Е., Матвеева И.А.</i> Ансамблевый алгоритм на основе стекинга для анализа рамановских спектров новообразований кожи.....	443

<i>Пименова И.А., Матвеева И.А.</i> Компонентный анализ рамановских спектров сыворотки крови методом разрешения многомерных кривых.....	451
<i>Деревесникова Д.А., Гурылева А.В., Мачихин А.С., Ян С., Еремеева К.В., Свистушкин В.М.</i> Неинвазивное определение параметров микроциркуляции крови слизистой носовой полости.....	458
<i>Зыкова Л.А., Титов С.А., Бурлаков А.Б., Богаченков А.Н.</i> Динамическая визуализация камер сердца рыб на личиночной стадии развития	464
Секция 11 – Научная молодежная школа	469
<i>Лёвин Д.С., Павлов И.Н.</i> Исследование многослойной жидкости методом лазерной рефрактографии.....	470
<i>Иванов Е.С., Фланден В.С.</i> Исследование возможности расширения диапазона измерения пирометра турбинных лопаток в сторону низких температур	478
<i>Нестеров Г.В., Золотухина А.А., Фомин Дм.С., Фомин Д.С.</i> Оценка содержания органического вещества в почве на основе спектральных характеристик отражения	485
<i>Гуревич И.Д., Печинская О.В.</i> Количественная оценка качества изображения, даваемого объективами.....	489
<i>Дюкарев В.С., Скорнякова Н.М.</i> Анализ нейронной сети Хопфилда.....	499
<i>Здарова Д.А., Золотухина А.А., Беляева А.С.</i> Сравнительный анализ методов колориметрии и спектроскопии отражения в задаче оценки содержания пигментов в листьях растений	507
<i>Сапронов М.В., Русаков Г.И., Усманова Ш.Ш., Полев А.А.</i> Исследование поляризационных свойств излучения, рассеянного на оптически прозрачном растворе наночастиц.....	512
Авторский указатель.....	522

Секция 1

Лазерная анемометрия и интерферометрические методы



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 621.3.038.8

Зверев П.Г.^{1,2}, Смирнов И.В.¹

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: zverevpg@mpei.ru

² Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Россия,
119991, Москва, Вавилова ул., 38, E-mail: zverev@lst.gpi.ru

МНОГОВОЛНОВАЯ ГЕНЕРАЦИЯ НЕОДИМОВЫХ ЛАЗЕРОВ

АННОТАЦИЯ

Многоволновые лазеры являются важным направлением исследований в лазерной физике благодаря широкому спектру их практических применений, которые включают мониторинг окружающей среды, создание лидаров, генерацию терагерцового излучения, оптическую интерферометрию. Такие лазеры дают синхронизированное по времени и пространству лазерное излучение на двух, трех или более длинах волн, используя только один активный элемент. В работе создан многоволновой лазер на основе анизотропной активной среды $Nd^{3+}:YAlO_3$, одновременно работающий на двух и трех длинах волн 1064, 1073 и 1079 нм. При использовании изотропного активного элемента $Nd^{3+}:Y_3Al_5O_{12}$ создан лазер с переключаемым излучением на двух длинах волн из спектральном диапазоне 1319-1444 нм. Рассмотрены различные способы управления спектрально-селективными потерями в оптическом резонаторе для создания многоволнового лазера.

**ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ЛАЗЕР; МНОГОВОЛНОВАЯ ГЕНЕРАЦИЯ; НЕОДИМОВЫЙ ЛАЗЕР;
ДИОДНАЯ НАКАЧКА; СПЕКТРАЛЬНО-СЕЛЕКТИВНЫЕ ПОТЕРИ**

ВВЕДЕНИЕ

Разработка эффективных, компактных, многоволновых лазеров, работающих в ближнем инфракрасном спектральном диапазоне, привлекает внимание исследователей из-за широкого спектра их потенциальных научно-технических применений [1-3]. Эти лазеры могут быть использованы для спектроскопических исследований [4], оптического преобразования частоты [5], дистанционного зондирования [6], в медицине [7], для оптической регистрации потоков частиц [8, 9]. Многообразие практических применений обусловлено тем, что в ближнем инфракрасном диапазоне находятся основные линии поглощения воды, атмосферных газов, органических и неорганических соединений.

Лазеры, одновременно дающие когерентное излучение на двух спектральных компонентах с одинаковыми пространственными и временными характеристиками, могут быть использованы для получения терагерцового излучения путем нелинейного процесса генерации разностной частоты (ГРЧ) [10]. Энергетическая эффективность преобразования излучения двухволнового лазера в терагерцовое в процессе ГРЧ повышается при использовании излучения в инфракрасной области спектра. Кроме этого, многие нелинейные материалы для ГРЧ прозрачны в этом спектральном диапазоне [11]. Поэтому разработка мощных импульсных лазерных источников, работающих на двух и более длинах волн в ближней инфракрасной области, представляет большой интерес для лазерной физики.

Двух и многоволновая генерации с использованием одного активного элемента лазера может возникать, если коэффициент усиления при полном обходе резонатора одинаков для излучения с разными длинами волн. Для выравнивания коэффициента усиления в лазере с анизотропным активным элементом можно использовать спектрально селективные связанные резонаторы с поляризационной развязкой, поляризующие элементы или фазовые пластинки [12, 13]. В резонаторе с изотропным активным элементом можно управлять активными и пассивными потерями в резонаторе, изменяя коэффициент отражения выходного зеркала, используя спектрально селективные оптические элементы [14, 15], включая дисперсионные призмы или твердотельные эталоны Фабри-Перо толщиной в сотни микрон [16].

В работе представлен анализ возможностей создания многоволновых неодимовых лазеров и приведены примеры их реализации. В качестве спектрально селективных элементов предложено использовать внутрирезонаторные фазовую пластинку, дисперсионную призму, эталон Фабри-Перо. В лазере с анизотропной активной средой $\text{Nd}^{3+}:\text{YAlO}_3$ и фазовой пластинкой была получена трехволновая непрерывная генерация на длинах волн 1064, 1073 и 1079 нм. Переключаемая двухволновая генерация была получена в лазере с диодной накачкой на кристалле $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ с внутрирезонаторной дисперсионной призмой на двух соседних спектральных компонентах спектра усиления ионов Nd^{3+} в диапазоне от 1319 до 1444 нм. Использование в качестве спектрально селективного элемента внутрирезонаторного эталона позволило получить мощное импульсное трехволновое излучение $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ лазера на длинах волн 1319, 1338 и 1356 нм. Рассмотрены особенности контроля спектрального состава излучения с помощью внутрирезонаторной дисперсионной призмы, твердотельного интерферометра и фазовой пластинки.

ИОНЫ НЕОДИМА ДЛЯ МНОГОВОЛНОВЫХ ЛАЗЕРОВ

Ион Nd^{3+} является известным и распространенным лазерно-активным ионом, на основе которого создано большинство эффективных твердотельных лазеров, многие из которых в последнее время используют эффективную накачку лазерными диодами. Многоволновая лазерная генерация на ионах Nd^{3+} возможна с большим частотным сдвигом при переходах с верхнего лазерного уровня ${}^4\text{F}_{3/2}$ на различные электронные энергетические уровни: ${}^4\text{I}_{9/2}$, ${}^4\text{I}_{11/2}$, ${}^4\text{I}_{13/2}$ и с малым частотным сдвигом при переходах на разные штарковские подуровни уровней ${}^4\text{I}_{11/2}$ и ${}^4\text{I}_{13/2}$. Различия сечений усиления для этих переходов небольшое и оно может быть скомпенсировано спектрально-селективными внутрирезонаторными потерями. Положение энергетических уровней, интенсивность сечения усиления на различных переходах определяются влиянием локального кристаллического поля лазерной матрицы на активный ион. При комнатной температуре в спектрах люминесценции отдельные линии эмиссии могут уширяться и перекрываться между собой, образуя общий спектр, состоящий из широких полос с узкими пиками.

Спектр люминесценции ионов Nd^{3+} в кристаллах на переходе ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$ состоит из 12 линий, соответствующих переходам между различными штарковскими подуровнями: двум подуровням верхнего лазерного уровня ${}^4\text{F}_{3/2}$ (R1, R2) и шести компонентам нижнего уровня ${}^4\text{I}_{11/2}$ (Y1-Y6). Таким образом, получается спектр люминесценции из 12 линий, на которых можно получить одно- и многоволновую генерацию в спектральном диапазоне 1,04-1,12 мкм. На рисунке 1(а) показан спектр люминесценции ионов Nd^{3+} в кристалле YAG, наиболее интенсивные пики которого соответствуют переходам $\text{R2} \rightarrow \text{Y1}$ (1), $\text{R1} \rightarrow \text{Y1}$ (2), $\text{R2} \rightarrow \text{Y2}$ (3), $\text{R2} \rightarrow \text{Y3}$ (4), $\text{R2} \rightarrow \text{Y4}$ (5), $\text{R1} \rightarrow \text{Y3}$ (6) и $\text{R1} \rightarrow \text{Y4}$ (7), соответствующие длинам волн 1052, 1054, 1062, 1064, 1068, 1071, и 1074 нм [17].

Спектр люминесценции ионов Nd^{3+} при переходе ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$ состоит из 14 линий, поскольку есть два подуровня верхнего лазерного уровня ${}^4\text{F}_{3/2}$ (R1, R2) и семь подуровней нижнего лазерного уровня ${}^4\text{I}_{13/2}$ (X1-X7). В этом случае генерация может быть получена в спектральном диапазоне от 1,3 до 1,45 мкм. На рис. 1(б) показан спектр люминесценции ионов Nd^{3+} в кристалле YAG на переходе ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$. Интенсивные линии соответствуют переходам

R2 → X1 (8), R2 → X3 (9), R1 → X4 (10), R2 → X6 (11), R1 → X6 (12) и R1 → X7 (13) с длинами волн 1319, 1338, 1356, 1415, 1432, и 1444 нм, соответственно [17]. Значения интенсивности люминесценции в пиках хорошо согласуется со значениями сечений люминесценции на этих переходах [18].

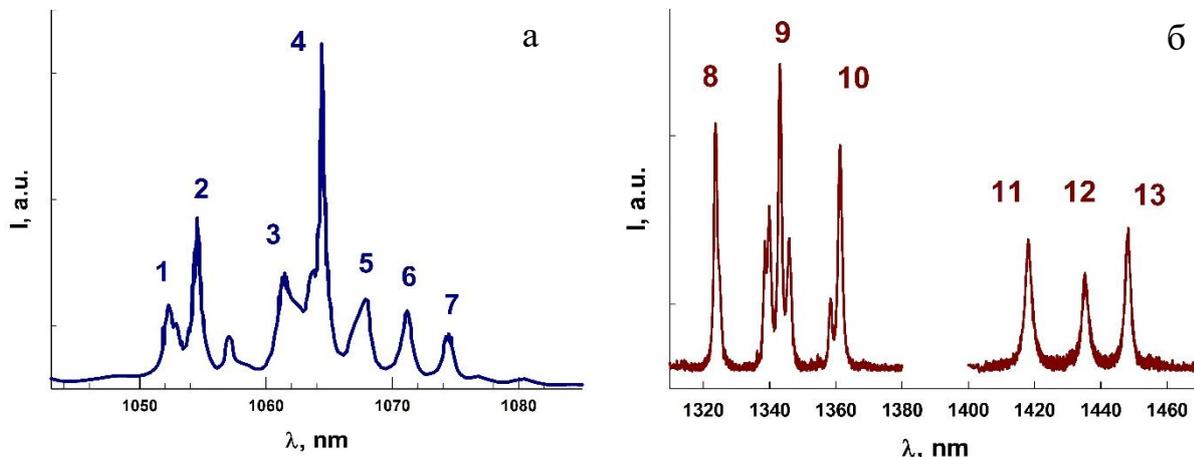


Рис. 1. Спектр излучения ионов Nd^{3+} в кристалле YAG при комнатной температуре в диапазоне 1,04-1,09 мкм (а) и 1,31-1,47 мкм (б) при возбуждении лазерным диодом с длиной волны генерации 808 нм

Из рис. 1 следует, что кристалл $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ имеет одну доминирующую линию люминесценции на переходе ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ на длине волны 1064 нм. На переходе ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ представлены две группы линий примерно одинаковой интенсивности. Для получения многоволновой генерации в спектральном диапазоне 1,04-1,09 мкм необходимо ввести высокие спектрально-селективные потери на длине волны 1064 нм, чтобы подавить высокое усиление на этой длине волны и уравнивать его с усилением на других спектральных компонентах, что будет приводить к снижению общей эффективности такого лазера. Однако, в спектральном диапазоне 1,3-1,45 мкм многоволновая генерация $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ лазера может быть довольно легко получена с минимальными потерями на спектральную селекцию.

Многоволновая генерация Nd-лазеров в спектральном диапазоне 1,04-1,09 мкм возможна в активном элементе из анизотропной матрицы, которые демонстрируют заметное изменение спектра люминесценции для разной ориентации кристаллов. Одной из таких сред является анизотропный кристалл $\text{Nd}^{3+}:\text{YAIO}_3$, вырезанный вдоль оси b , который используется в лазерах, генерирующих поляризованное излучение на длине волны 1079 нм [19]. Поляризованные спектры люминесценции в нем на переходе ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ показаны на рис. 2. Пики линий соответствуют переходам R1 → Y1 и R2 → Y3 (1), R1 → Y2 (2), R1 → Y2 и R2 → Y3 (3), R2 → Y5 (4), R2 → Y6 (5) и R1 → Y4 (6), соответствующие длинам волн 1064, 1073, 1079, 1084, 1091, и 1092 нм. Максимальное сечение люминесценции наблюдается на длине волны 1079 нм для излучения, поляризованного вдоль оси a . Сечение люминесценции на длине волны 1073 нм меньше, чем на 1079 нм. Для излучения с поляризацией вдоль оси c , пиковое сечение на 1064 нм становится больше, чем на 1079 и 1073 нм. Изменение сечений люминесценции при повороте поляризации регистрируемого излучения с помощью фазовой пластинки от оси a к оси c позволяет выбрать поляризацию, когда коэффициент усиления в активном элементе будет одинаковым для двух или трех спектральных компонент, в этом случае возможна многоволновая генерация на длинах волн 1064, 1073 и 1079 нм.

Из представленных данных следует, что с использованием неодимовой активной среды можно получить многоволновую лазерную генерацию. Однако, для спектрального диапазона 1,04-1,1 мкм предпочтительно использовать анизотропные матрицы со значительным изменением спектра люминесценции для излучения с разными поляризациями. Изотропный кристалл $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ хорошо подходит для получения многоволновой генерации в спектральном диапазоне 1,3-1,45 мкм.

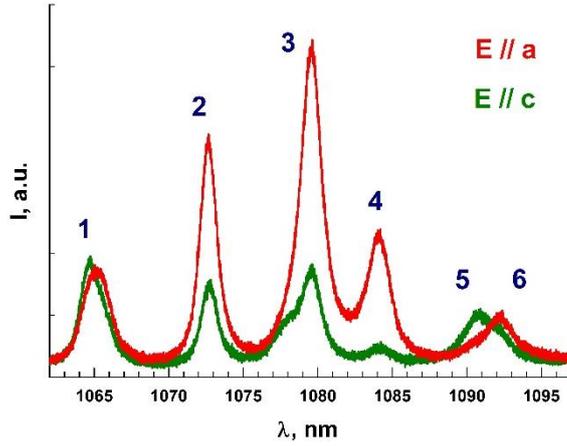


Рис. 2. Спектр излучения ионов Nd^{3+} в анизотропном кристалле YAlO_3 , вырезанном вдоль оси b в диапазоне длин волн 1,06-1,1 мкм для поляризаций, параллельных оси a и оси c , при возбуждении лазерным диодом с длиной волны 808 нм

ТЕОРИЯ МНОГОВОЛНОВОЙ ЛАЗЕРНОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Используя теоретического описание генерации твердотельного лазера с диодной накачкой в приближении плоских волн, рассматривая стационарный случай и равномерное пространственное распределение возбуждающего и генерируемого излучения, можно получить, что условием возникновения многоволновой генерации является равенство пороговых значений накачки для спектральных компонент P_i . Значение P_i можно записать следующим образом [20]:

$$P_i = \eta_{LD} \eta_{abs} \frac{h\nu_p}{\sigma_i \tau} \cdot \frac{L_i - \ln(R_1 \cdot R_i)}{2 \cdot l \cdot \eta_i}, \quad (1)$$

где η_{LD} - эффективность лазерных диодов, η_{abs} - эффективность поглощения в активном элементе, $h\nu_p$ - энергия фотонов накачки, τ - время жизни флуоресценции на верхнем лазерном уровне, σ_i - сечение вынужденного излучения i -ой спектральной компоненты, η_i - квантовая эффективность для нее, l - длина активного элемента, R_1 - коэффициент отражения глухого зеркала, а R_i - коэффициент отражения выходного зеркала для i -ой компоненты и L_i - потери за двойной обход резонатора для неё.

Из (1) следует, что для получения многоволновой генерации необходимо выровнять коэффициенты усиления за двойной обход резонатора на соответствующих спектральных компонентах, что эквивалентно равенству пороговых значений интенсивности накачки для излучения на этих длинах волн. Для двухволновой генерации нужно чтобы отношение пороговых интенсивностей γ , которое равно:

$$\gamma = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\sigma_1 \left(\ln\left(\frac{1}{R_2}\right) + L_2 \right)}{\sigma_2 \left(\ln\left(\frac{1}{R_1}\right) + L_1 \right)}, \quad (2)$$

равнялось единице. Из уравнения (2) видно, что отношение пороговой мощности накачки может быть скомпенсировано либо путем изменения сечения генерации σ_i , либо соответствующим изменением активных или пассивных потерь в резонаторе. Активными потерями можно управлять выбором дихроичных зеркал резонатора. Пассивные потери можно изменять путем установки в резонатор лазера спектрально-селективных оптических элементов, таких как дисперсионная призма, фазовая пластинка или эталон Фабри-Перо.

ВНУТРИРЕЗОНАТОРНЫЕ СПЕКТРАЛЬНО-СЕЛЕКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОМ УСИЛЕНИЯ

Для управления пассивными потерями в многоволновом лазере используются дисперсионные оптические элементы, тип которых зависит от конкретных требований к лазеру. Многоволновой лазер может генерировать излучения как с малой, так и с большой разницей частот. Спектральные компоненты могут иметь одинаковую или разные поляризации. Направление распространения может быть, как одинаковым, так и разным. Правильный выбор спектрально-селективного элемента позволяет создать многоволновой лазер с требуемыми характеристиками лазерного излучения.

Дисперсионная призма

Дисперсионную призму можно использовать, когда требуется получить двухволновое излучение с большой разницей частот. Максимальное угловое разрешение симметричной 60-ти градусной призмы определяется следующим уравнением:

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{2}{\sqrt{4-n^2}} \cdot \frac{dn}{d\lambda}, \quad (3)$$

здесь n - показатель преломления материала призмы. Уравнение (3) показывает, что угловое разрешение зависит от дисперсии материала призмы на генерирующей длине волн. Для излучения с длиной волны около 1 мкм угловая дисперсия призмы из плавленого кварца будет составлять приблизительно $1,7 \cdot 10^{-2}$ мРад/нм. Небольшое значение угловой дисперсии позволяет контролировать спектрально-селективные потери в резонаторе для длин волн с разницей не менее 10 нм. Дисперсия плавленого кварца в ближней инфракрасной области снижается, поэтому в области 1,5 мкм его использовать нельзя.

Вращение призмы или зеркала резонатора позволяет переключать длину волны генерируемого излучения. Стоит отметить, из-за малой угловой дисперсии и конечной расходимости излучения лазера направление распространения различных спектральных компонент в выходном пучке может быть различно.

Внутррезонаторный поляризатор

В анизотропной активной среде коэффициент усиления может быть разным для излучения с разной поляризацией, поэтому можно использовать внутррезонаторный поляризатор для разделения излучения на два канала генерации с взаимно перпендикулярной поляризацией. Это позволяет независимо регулировать потери в каждом из них [16]. С другой стороны, можно использовать фазовую пластинку для управления потерями излучения с определенной поляризацией [12].

Интерферометр Фабри-Перо

По сравнению с призмой интерферометр имеет большую угловую дисперсию, равную:

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{1}{\lambda \cdot \theta}, \quad (4)$$

здесь θ – это угол наклона интерферометра. Однако, работа интерферометра ограничена областью свободной дисперсии, связанной с наложением разных порядков интерференции. Установка интерферометра в резонатор приводит к спектрально-селективным внутррезонаторным потерям, поскольку длина волны с максимальным пропусканием

эталона зависит от угла падения θ , расстояния между зеркалами L и показателя преломления среды n внутри него следующим образом:

$$\lambda_{\max} = \frac{2 \cdot L \cdot n \cdot \cos \theta}{q}, \quad (5)$$

где q – порядок интерференции. Оптимальной конструкцией внутрирезонаторного интерферометра является тонкая плоскопараллельная пластина, изготовленная из материала с высоким показателем преломления. В этом случае интерференция френелевских отражений от его граней обеспечивает достаточную спектральную избирательность. Коэффициент пропускания T на соответствующей длине волны λ может быть рассчитан как [19]:

$$T(\theta) = \frac{(1-R)^2}{1+R^2-2R\cos(\delta)}, \quad (6)$$

здесь R – коэффициент френелевского отражения для излучения с внешним углом падения θ , который определяется как:

$$R(\theta) = \left[\frac{n \cdot \cos(\theta) - \cos(\psi)}{n \cdot \cos(\theta) + \cos(\psi)} \right]^2, \quad (7)$$

где ψ – внутренний угол для излучения в эталоне, определяемый как: $\psi = \arcsin(n^{-1} \cdot \sin(\theta))$, а δ – разность фаз между последовательными лучами, распространяющимися в эталоне:

$$\delta = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) 2nL \cos(\psi). \quad (8)$$

Моделируя зависимости пропускания эталона от угла падения для двух или более длин волн, можно найти угловые зависимости коэффициента усиления в резонаторе и углы, соответствующие равным значениям коэффициента усиления в лазере. Подробности численного моделирования описаны в работе [22]. В отличие от дисперсионной призмы, внутрирезонаторный интерферометр Фабри-Перо позволяет получить генерацию одновременно на трех длинах волн.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Нами была исследована работа нескольких схем многоволновых неодимовых лазеров. Был создан импульсный лазер с поперечной диодной накачкой на основе изотропного активного элемента $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ ($\text{Ø}5\text{мм} \times 100\text{мм}$) с внутрирезонаторной призмой Пеллин-Брока, с высокой выходной энергией, работающий в одно и двухволновом режиме в диапазоне длин волн 1,3-1,44 мкм. При использовании импульсов электрической накачки с энергией 3,6 Дж были получены лазерные импульсы с энергией 400 мДж и КПД 11,2%. При вращении выходного зеркала была получена генерация на шести одиночных длинах волн 1319, 1338, 1356, 1415, 1432 и 1444 нм с эффективностью от 20 до 4,8%. Для промежуточных положений выходного зеркала была получена двухволновая генерация на 1319 и 1338, 1338 и 1356, 1415 и 1432, 1432 и 1444 нм с дифференциальным КПД от 21,7 до 2,65%. Исследования показали, что $\text{Nd}:\text{YAG}$ -лазер с внутрирезонаторной дисперсионной призмой использовать для управления спектром выходного излучения и переключать одно- и двухволновой режим генерации в спектральном диапазоне 1,3-1,44 мкм [15].

На основе анизотропного активного элемента $\text{Nd}^{3+}:\text{YAlO}_3$ ($\text{Ø}6,3\text{мм} \times 12\text{мм}$) с продольной диодной накачкой использование внутрирезонаторной фазовой пластинки позволило создать непрерывный лазер дающий двух и трехволновое излучение [22]. Получена двухволновая генерация на длинах волн 1064 и 1073 нм с ортогональными поляризациями и на длинах волн 1073 и 1079 нм с одинаковыми поляризациями. Низкие внутрирезонаторные потери в фазовой пластинке позволили получить высокую эффективность, близкую к эффективности лазера с излучением на одной длине волны. Управление коэффициентом усиления с помощью фазовой пластинки позволило получить генерацию одновременно на трех длинах волн 1064, 1073 и 1079 нм. КПД генерации лазера с тремя длинами волн по оптической мощности при накачке 6,7 Вт составил 26,1%, при дифференциальном КПД 32,3%.

На основе активного элемента $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ ($\text{Ø}5 \times 100$ мм) с поперечной диодной накачкой при использовании внутрирезонаторного интерферометра Фабри-Перо и электрооптического модулятора добротности был создан мощный импульсный лазер, работающий на двух и трех длинах волн 1319 нм, 1338 нм и 1356 нм [21]. В качестве эталона использовалась плоскопараллельная пластинка из кристалла YAG толщиной 100 мкм. При накачке осветителя электрическими импульсами с энергией 8,7 Дж лазер генерировал импульсы двухволнового излучения на длинах волн 1319 и 1338 нм с энергией 150 мДж, дифференциальным КПД 3,5% и длительностью импульса 35 нс. Максимальная пиковая мощность в этом режиме достигала 4,1 МВт. В трехволновом режиме с излучением на длинах волн 1319, 1338 и 1356 нм энергия импульсов лазера достигала 96 мДж при КПД 2,4% и длительностью импульса также 35 нс. Пиковая мощность в трехволновом режиме генерации достигала 2,6 МВт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного анализа и экспериментальных исследований установлено, что с помощью различных внутрирезонаторных дисперсионных оптических элементов можно получать и управлять спектральным составом излучения неодимовых лазеров, получать одно, двух или многоволновой режим генерации. Спектрально-селективные внутрирезонаторные потери можно контролировать с помощью фазовой пластинки, дисперсионной призмы или твердотельного эталона. Используя анизотропную активную среду $\text{Nd}^{3+}:\text{YAlO}_3$ и твердотельного эталона Фабри-Перо, мы получили переключаемую двух и трехволновую генерацию на длинах волн 1064, 1073 и 1079 нм. Также продемонстрирована переключаемая двухволновая генерация $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ лазера с диодной накачкой с внутрирезонаторной дисперсионной призмой, работающий на любых двух смежных спектральных компонентах в спектральном диапазоне от 1319 до 1444 нм. Представленные результаты позволяют предложить неодимовую лазерную систему с внутрирезонаторным дисперсионным элементом, работающую в диапазоне от 1,06 до 1,44 мкм и генерирующую излучение с контролируемым спектральным составом, дающее излучение на одной, двух и трех длинах волн одновременно.

Авторы благодарят профессора Сироткина А.А. за помощь в проведении экспериментов по многоволновой генерации лазера с диодной накачкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Jackson S.D.** Towards high-power mid-infrared emission from a fibre laser // Nature photonics. 2012. Vol. 6. Pp. 423-431.
2. **Scholle K., Lamrini S., Koopmann P., Fuhrberg P.** 2 μm laser sources and their possible applications // Frontiers in guided wave optics and optoelectronics: IntechOpen. 2010. Pp. 471-500.

3. **Soldatov A.N., Mirza S.Y., Polunin Y.P., Shumeiko A.S., Kostadinov I.K.** Multi-wavelength metal vapor laser systems for solving applied problems of atmospheric spectroscopy // SPIE. 2015. Vol. 9680. Pp. 1039-1043.
4. **Воропай Е.С., Гулис И.М., Комяк А.И., Толстик А.Л.** Развитие исследований в области спектроскопии и лазерной физики в БГУ // Вестник БГУ. 2013. Т. 3. С. 3-19.
5. **Морозов Ю.А., Нефедов И.С., Морозов М.Ю.** Нелинейно-оптическое преобразование частоты в двухцветном лазере с вертикальным внешним резонатором // Физика и техника полупроводников. 2008. Т. 42. С. 473-479.
6. **Бочковский Д.А., Васильева А.В., Матвиенко Г.Г., Полунин Ю.П., Романовский О.А., Солдатов А.Н., Харченко О.В., Юдин Н.А., Яковлев С.В.** Применимость лазера на парах стронция для решения задач лазерного зондирования газового состава атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 11. С. 985-989.
7. **Walter E.J., Knight J.A., Lilge L.** A multi-wavelength, laser-based optical spectroscopy device for breast density and breast cancer risk pre-screening // J. Biophotonics. 2017. Vol. 10. Pp. 565-576.
8. **Usmanova S.S., Skornyakova N.M., Belov S.Y., Sapronov M.V.** Visualization of water toroidal vortex by multicolor particle image velocimetry // Scientific Visualization. 2022. Vol. 14. Pp. 62-70.
9. **Близнюк В.В., Паршин В.А., Семенова О.И., Тарасов А.Е.** Метрологическое обеспечение лазерных измерительных систем, используемых для исследования потоков // Оптические методы исследования потоков: Тез. докл. 17-й Межд. конф. М.: МЭИ, 2023. С. 224-228.
10. **Sirotkin A.A., Yudin N.N., Dyomin V.V., Gribenyukov F.I.** Tunable THz-radiation in a ZnGeP₂ single crystal pumped by dual-wavelength degenerate optical parametric oscillator // Laser Phys. Lett. 2020. Vol. 17. P. 035402.
11. **Handbook of nonlinear optical crystals.** / Dmitriev V.G., Gurzadyan G.G., Nikogosyan D.N. V. 64. Springer, 2013.
12. **Шилова Г.В., Сироткин А.А., Зверев П.Г.** Управление спектральными параметрами ионов неодима в анизотропных кристаллах со структурой шеелита // Квантовая электроника. 2019. Т. 49. № 6. С. 570-576.
13. **Sirotkin A.A., Garnov S.V., Zagumennyi A.I., Zavartsev Y.D., Kutovoi S.A., Vlasov V.I., Di Labio L, Lüthy W., Feurer T., Shcherbakov I.A.** New lasers based on c-cut vanadate crystals // Laser physics. 2009. Vol. 19. Pp. 1083-1091.
14. **Chang J.Q., Bian Q., Bo Y., Peng Q.J.** Study on energy scaling of 1.3 μm dual-wavelength Nd: YAG laser // Laser Physics. 2023. Vol. 33. P. 055002.
15. **Smirnov I.V., Zverev P.G., Sirotkin A.A.** Diode-Side-Pumped Pulsed Nd: YAG Laser Operating in the Range of 1.3–1.44 μm with Single and Dual-Wavelength Output // Physics of Wave Phenomena. 2024. Vol. 32. Pp. 328-335.
16. **Сироткин А.А., Гарнов С.В., Власов В.И., Загуменный А.И., Заварцев Ю.Д., Кутовой С.А., Щербаков И.А.** Двухчастотные лазеры на кристаллах ванадатов со взаимно параллельной и ортогональной поляризациями генерируемого излучения // Квантовая электроника. 2012. Т. 42. № 5. С. 420-426.
17. **Marling J.** 1.05-1.44 μm tunability and performance of the CW Nd³⁺:YAG laser // IEEE J. Quantum Electron. 1978. Vol. 14. Pp. 56-62.
18. **Barnes N.P., Walsh B.M., Davis R.E.** Dispersive tuning and performance of a pulsed Nd: YAG laser // Advanced Solid-State Photonics. OSA Trends in Optics and Photonics. 2003. Vol. 83. P. 38.
19. **Weber M.J., Varitimos T.E.** Optical spectra and intensities of Nd³⁺ in YAlO₃ // J. Applied Physics. 1971. Vol. 42. Pp. 4996-5005.
20. **Fan T.Y., Byer R.L.** Diode laser-pumped solid-state lasers // IEEE J. Quantum Electron. 1988. Vol. 24. Pp. 895-912.

21. **Smirnov I.V., Zverev P.G., Sirotkin A.A.** Efficient multiwavelength operation of a diode-pumped Nd:YAlO₃ laser at 1064, 1072 and 1079 nm // Laser Physics Lett. 2020. Vol. 17. P. 095001.
22. **Zverev P.G., Smirnov I.V., Sirotkin A.A.** Controlled multiwavelength operation of diode-pumped Nd:YAG laser at 1318, 1338 and 1356 nm with intracavity etalon // Laser Physics Lett. 2023. Vol. 20. P. 115001.

Zverev P.G.^{1,2}, Smirnov I.V.¹

¹ National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russia, 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: zverevpg@mpei.ru

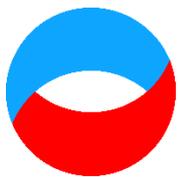
² Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Russia, 119991, Moscow, Vavilov str., 38, E-mail: zverev@lst.gpi.ru

MULTIWAVE OSCILLATION OF NEODYMIUM LASERS

ABSTRACT

Multiwave lasers are an important area of research in laser physics due to their wide range of practical applications, which include environmental monitoring, lidar applications, terahertz generation, and optical interferometry. Such lasers produce time- and space-synchronized laser radiation at two, three, or more wavelengths using only one active element. A three-wave laser based on an anisotropic active medium Nd³⁺:YAlO₃ simultaneously operating at three wavelengths of 1064, 1073 and 1079 nm has been developed. Using an isotropic active element Nd³⁺:Y₃Al₅O₁₂, a laser with switchable radiation at two wavelengths from the spectral range of 1319-1444 nm was created. Various methods of controlling spectral-selective losses in an optical resonator for creating a multiwave laser are considered.

SOLID-STATE LASER; MULTIWAVE OSCILLATION; NEODYMIUM LASER; DIODE PUMPING; SPECTRALLY SELECTIVE LOSSES



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 532.5.032, 532.582.31, 532.542

Шестаков М.В.

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия,
630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1, E-mail: maximvsh@gmail.com*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОЛЕБЛЮЩЕЙСЯ СТРУИ
НА СМЕШЕНИЕ И СТРУКТУРУ ТЕЧЕНИЯ В УЗКОМ ЗАЗОРЕ**

АННОТАЦИЯ

Течения в узких зазорах характерны для энергетического оборудования, например, тепловыделяющих сборок. В пучках с плотной упаковкой структура течения сильно анизотропна и характеризуется крупномасштабными квазипериодическими пульсациями продольной и поперечной скорости, что существенно влияет на смешение в зазорах между подканалами. В работе с помощью одновременного применения методов PIV и PLIF исследовано влияние колеблющейся струи, создаваемой струйным осциллятором, на смешение и квазипериодическую структуру течения в узком зазоре. Эксперименты показали, что колеблющаяся струя эффективно воздействует на процессы смешения и структуру течения. Однако из-за малой дальности струи область её влияния ограничена и зависит от параметров зазора, режима течения в каналах и числа Рейнольдса струи.

МЕТОД PIV, МЕТОД PLIF, КАНАЛЫ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ, УПРАВЛЕНИЕ ПОТОКОМ, УЗКИЙ ЗАЗОР, СТРУЙНЫЙ ОСЦИЛЛЯТОР, КОЛЕБЛЮЩАЯСЯ СТРУЯ

ВВЕДЕНИЕ

Процессы смешения играют определяющую роль в обеспечении безопасной эксплуатации реакторных установок, где достижение равномерных распределений температуры и концентрации замедлителя является критически важным фактором. В тепловыделяющих сборках выравнивание параметров теплоносителя происходит за счет дистанцирующих и интенсифицирующих элементов, таких как проволочная навивка, дефлекторы дистанцирующих решеток и другие виды завихрителей потока. Однако эти пассивные элементы обладают принципиальным ограничением - они не позволяют оперативно регулировать интенсивность тепломассопереноса при изменении режимов течения.

В последнее время для управления процессами интенсификации тепломассопереноса стали применять струйные осцилляторы. Эти устройства получили широкое распространение в технических приложениях, включая управление отрывом потока [1], снижение трения [2], охлаждение лопаток турбин [3], интенсификацию горения [4] и теплообмена [5]. Интерес к струйным осцилляторам обусловлен их способностью обеспечивать широкий диапазон скоростей и частот колебаний при отсутствии движущихся частей. Наибольшее распространение получили струйные осцилляторы с двумя каналами обратной связи, в которых частота автоколебаний струи линейно зависит от расхода жидкости [6].

Современные экспериментальные исследования структуры течения и процессов смешения в модельных установках активно используют панорамные оптические методы PIV

(Particle Image Velocimetry) [7] и PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence) [8-11]. Их синхронное применение позволяет получать комплексные количественные данные, включая мгновенные поля скорости и концентрации, а также анализировать их пространственно-временные корреляции.

Целью настоящего исследования является экспериментальное изучение влияния колеблющейся струи, генерируемой струйным осциллятором, на структуру течения и процессы смешения в узком межканальном зазоре. Особое внимание уделено анализу возможностей активного управления параметрами смешения в условиях изменяющихся режимов течения.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальные исследования влияния колеблющейся струи на структуру течения и смешение в узком зазоре проводились в прямоугольном канале длиной 800 мм, состоящем из прозрачной и непрозрачной частей равной длины. В прозрачной части была установлена Т-образная вставка длиной 360 мм, формирующая центральный зазор глубиной 2 мм и шириной 15 мм, который разделял канал на два подканала и обеспечивал жидкостный обмен между ними. Непрозрачная часть содержала два изолированных канала (рис. 1а).

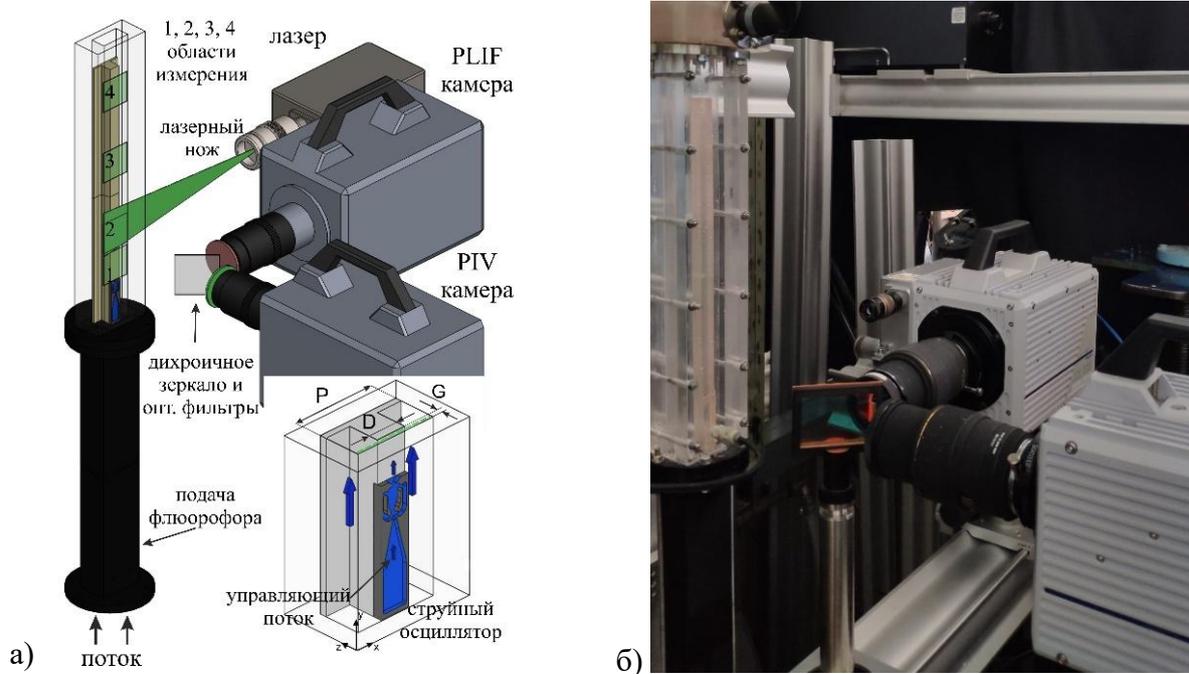


Рис. 1. Схема (а) и фотография (б) экспериментальной установки

На входе прозрачного участка вдоль всей ширины зазора размещался струйный осциллятор с соплом, соответствующим глубине зазора (2 мм) и углом раствора 100° . Установка была интегрирована в гидродинамический контур с системой термостабилизации, насосом и расходомером, использующий дистиллированную воду в качестве рабочей жидкости. Основной поток характеризовался числом Рейнольдса $Re = 8400$, рассчитанным по гидравлическому диаметру и среднерасходной скорости. Колеблющаяся струя создавалась струйным осциллятором, питаемым от шприцевого насоса Cole-Parmer (объем шприца 150 мл). Насос обеспечивал подачу жидкости в осциллятор с постоянным расходом 200 мл/мин, что соответствовало числу Рейнольдса струи $Re = 1850$. Для исследования влияния колеблющейся струи на процессы смешения в узком зазоре в один из каналов подавался водный раствор флюорофора Родамин 6Ж. Краситель с расходом 50 мл/мин и концентрацией 120 мг/л подавался через иглу, вмонтированную в боковую стенку

непрозрачной части рабочего участка. Для соблюдения равенства расходов в соседний канал для балансировки потоков вводился равный объем дистиллированной воды.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА

Одновременные измерения полей скорости и концентрации проводились с помощью синхронизированных высокоскоростных систем PIV и PLIF, сопряженных через дихроичное зеркало. Измерительная система включала непрерывный лазер CNI MGL-D-532 (532 нм, 30 Вт), две высокоскоростные камеры Photron FASTCAM SA5 с объективами SIGMA ($f = 105$ мм) и оптическими фильтрами (550-560 нм и 500-550 нм), а также синхронизирующий процессор BNC (Berkeley). Лазерный луч формировался в световой нож толщиной 0,5 мм в области измерений. В качестве трассеров использовались полиамидные частицы диаметром 20 мкм и плотностью $1,05$ г/см³. Для совмещения плоскостей для измерения полей скорости и концентрации применялась калибровочная мишень с маркерами (шаг 1 мм, диаметр 0,5 мм). Калибровка метода PLIF проводилась по известным концентрациям флюоресцентного красителя ($C_0 = 0$ и $C_1 = 0,5$ мг/л), что позволило установить зависимость между значением интенсивности в каждом пикселе изображения и значением концентрации. Измерения выполнялись в четырех областях в средней плоскости узкого зазора (рис. 1а) с частотой 2000 кадр/с. В каждом эксперименте регистрировалось по 16 380 изображений трассеров (1024×1024 пикс) и флюоресцентного красителя. Обработка данных проводилась в программном обеспечении «ActualFlow» с использованием итерационного многосеточного алгоритма и непрерывного смещения расчетного окна. Вычисление полей скорости проводилось в две итерации с разрешением 64×64 пикселя, что обеспечило пространственное разрешение $0,66 \times 0,66$ мм² на один вектор.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальное исследование динамики струйного осциллятора в узком зазоре методом PIV с высоким временным разрешением подтвердило наличие устойчивых автоколебаний струи, что согласуется с данными работы [12]. Как показано на рис. 2, возбуждение колебаний струи приводит к существенной трансформации структуры течения. В отсутствие генерации колебаний (рис. 2а) в зазоре формируется меандрирующее течение, аналогичное следу за обтекаемым телом в мелкой воде [13, 14], с характерной волнообразной границей раздела чистой жидкости и красителя (длина волны $\sim 3D$) и равномерным распределением красителя. При возбуждении колебаний струи (рис. 2б) поперечные движения вызывают турбулизацию течения благодаря образованию сдвиговых вихревых структур на границах струи, что приводит к фрагментации границы раздела, появлению выраженных градиентных областей и уменьшению характерного масштаба неоднородностей. Наблюдаемые изменения свидетельствуют об интенсификации процессов смешения, обусловленной вихревым переносом жидкости и реверсивными течениями в узком зазоре.

На рис. 3 представлены синхронно измеренные мгновенные поля скорости и концентрации, а также результат их совмещения. В отсутствие колебаний струи в структуре течения наблюдается характерная для следов область пониженной скорости (дефект скорости) (рис. 3а). Область пониженной скорости в центральной части зазора соответствует малым локальным числам Рейнольдса, в результате граница раздела чистой и окрашенной жидкости имеет четкие очертания с равномерным распределением концентрации и незначительными градиентами (рис. 3б). Введение дополнительного импульса в виде колеблющейся струи компенсирует дефект скорости и турбулизует поток в узком канале (рис. 3г). Колебательное движение струи и связанное с ним увеличение уровня турбулентности приводят к образованию неоднородного распределения концентрации с высокими градиентами, что существенно интенсифицирует процесс турбулентного перемешивания.

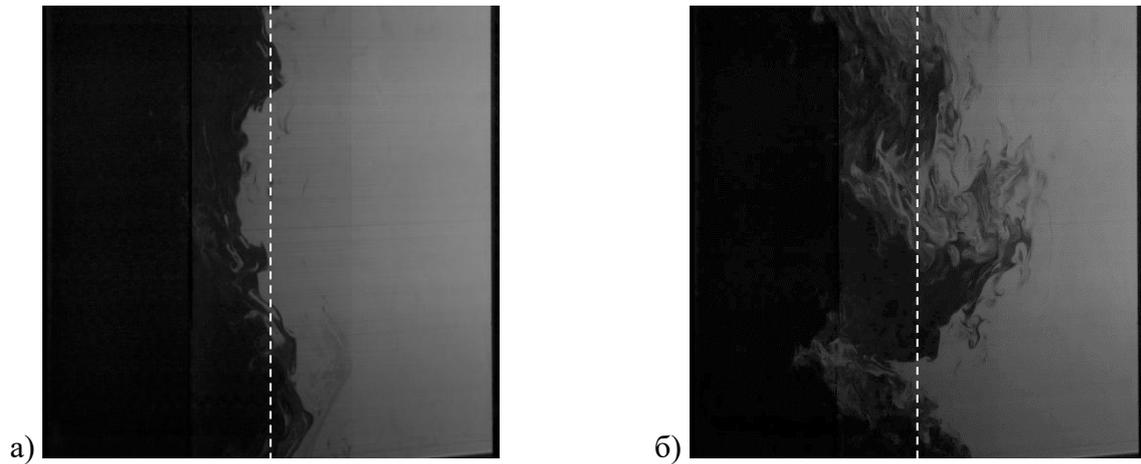


Рис. 2. Распределение флюорофора в зазоре: а) течение без струи, б) течение с колебаниями струи.
Пунктирной линией показано центральное сечение зазора

На рис. 4 представлены временные осциллограммы, демонстрирующие влияние колеблющейся струи на динамику течения и распределение концентрации в центральной части измерительной области. Сравнение осциллограмм для случаев без струи (синяя линия) и с колеблющейся струей (красная линия) выявляет существенные различия в поведении параметров течения. В отсутствие струи изменение концентрации носит квазипериодический характер с крупномасштабными колебаниями в диапазоне от 0,2 до 1,15 относительно среднего значения 0,8 (пунктирная синяя линия) (рис.4а). При наличии колеблющейся струи картина изменяется: наблюдаются более короткие квазирегулярные всплески концентрации при сохранении амплитуды пульсаций, но со снижением среднего значения в два раза до 0,4 (пунктирная красная линия), что свидетельствует об интенсификации процесса смешения.

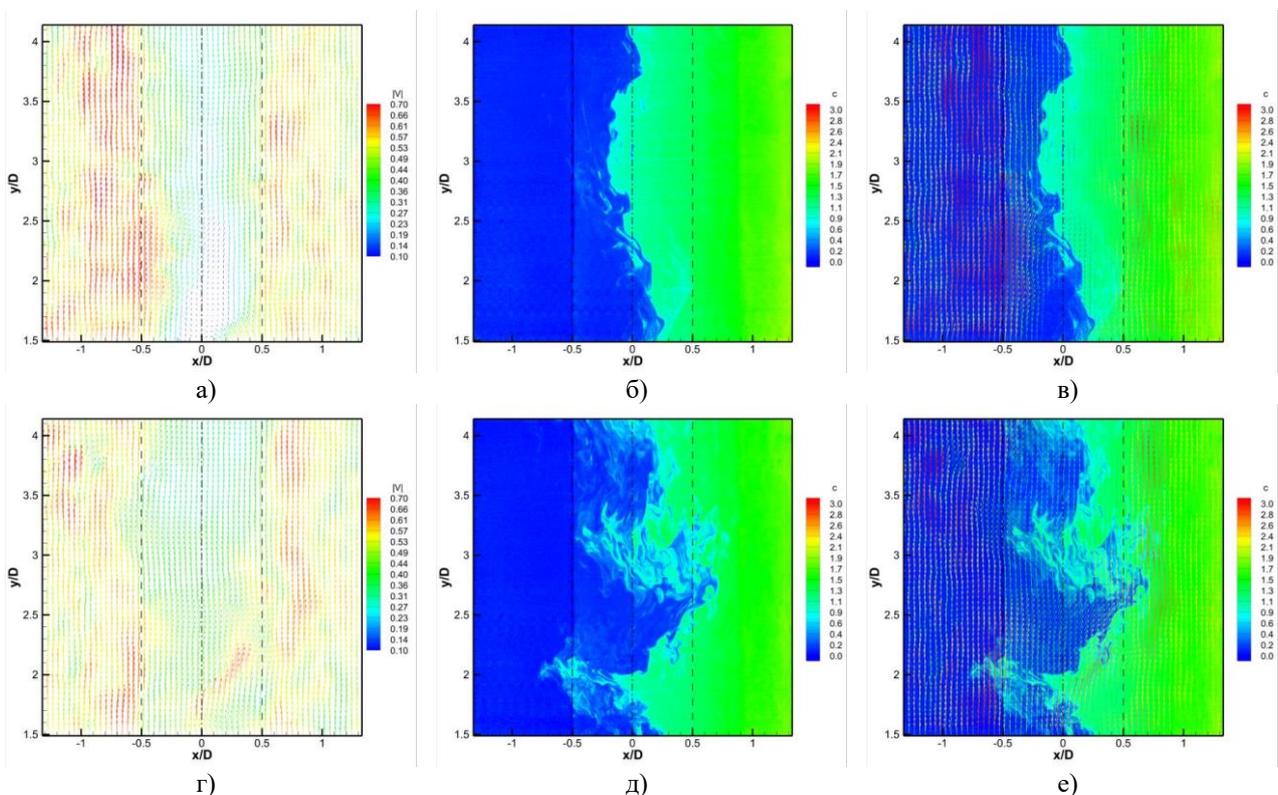


Рис. 3. Слева направо: мгновенное поле скорости, поле концентрации и совмещённые поля.
Сверху течение без колеблющейся струи, снизу течение с колебаниями струи

Осциллограммы поперечной скорости демонстрируют симметричные квазипериодические колебания, причем воздействие струи приводит к увеличению частоты пульсаций (рис. 4б). Спектральный анализ подтверждает это наблюдение, показывая для случая со струей два доминирующих пика на частотах 12,5 Гц и 20,5 Гц, тогда как без струи регистрируется только один пик на более низкой частоте 9,6 Гц.

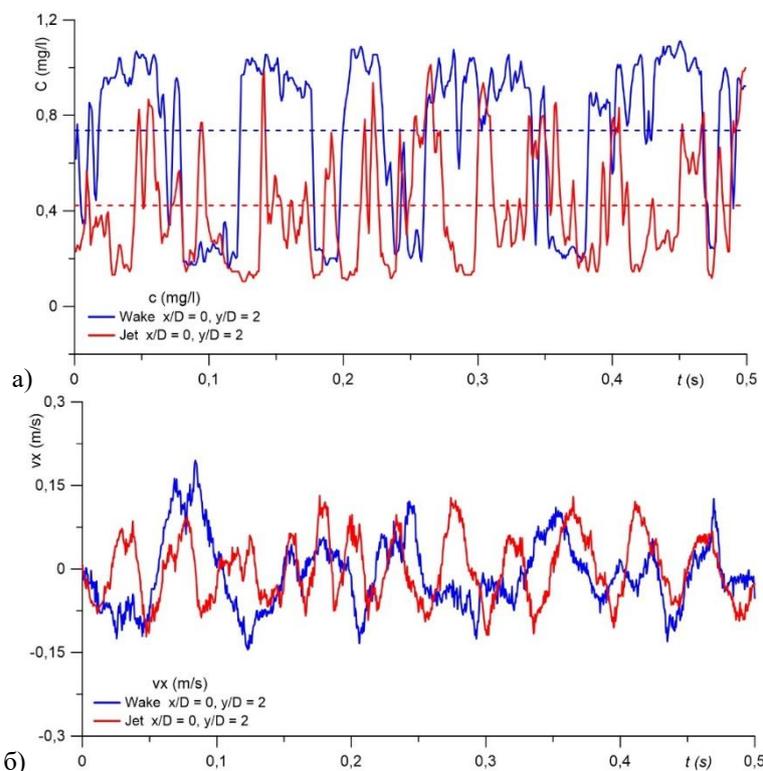


Рис. 4. Осциллограммы мгновенной концентрации (а) и скорости (б), построенные в точках, расположенных на оси узкого зазора в центре измерительной области

Анализ осреднённых профилей концентрации и её пульсаций (рис. 5а-б) демонстрирует значительное влияние колеблющейся струи на эффективность смешения. Наблюдается снижение средних значений концентрации примерно на 15% в области справа от центрального сечения зазора, что обусловлено интенсификацией процессов перемешивания. Колебания струи способствуют захвату и переносу окрашенной жидкости в противоположный канал, о чём свидетельствует ширина профиля пульсаций концентрации, которая распространяется за пределы зазора ($|x/D| > 0,5$). Профиль пульсаций концентрации имеет асимметричную форму, что обусловлено добавлением в поток дополнительной чистой жидкости из струйного осциллятора. По направлению потока пик пульсаций смещается за границу зазора с постепенным затуханием (рис. 5б). В отсутствие колебаний струи профиль пульсаций концентрации симметричен с максимумом в центре зазора ($x/D = 0$), что связано с меандрированием границы вода – краситель, характерным для следов. Далее вниз по потоку наблюдается расширение профиля вследствие развития слоёв смешения и увеличения амплитуды меандрирования.

Исследование структуры течения (рис. 5в-г) выявило кардинальное изменение характера поперечных движений при генерации колебаний струи. В отсутствие колеблющейся струи профиль поперечной скорости соответствует возвратным течениям в ограниченном следе с вовлечением внешней жидкости в зазор [15], интенсивность которых уменьшается по направлению потока. При наличии колеблющейся струи направление поперечного течения изменяется на противоположное, что свидетельствует о слабом истечении жидкости из зазора, вызванном поперечными колебаниями струи. В отсутствие струи в ближней зоне ($y/D = 2$) наблюдается симметричный профиль пульсаций поперечной скорости с максимумом на оси

зазора, локализованный в пределах его ширины. По мере удаления от осциллятора профиль становится более пологим и расширяется на всю ширину зазора, что отражает развитие процессов смешения: расширение сдвиговых слоев, вовлечение внешней жидкости из примыкающих каналов и увеличение амплитуды меандрирования границы вода – краситель. При работе струйного осциллятора картина существенно изменяется – ширина профиля пульсаций скорости превышает ширину зазора, а его форма становится более заполненной. Возникающая асимметрия профиля связана с 10%-ной разницей скоростей в прилегающих каналах. На расстоянии $y/D = 4$ амплитуда пульсаций скорости уменьшается вдвое, при этом профиль приобретает симметричную форму с четырьмя выраженными максимумами: двумя вблизи границ зазора и двумя в центральных областях каналов.

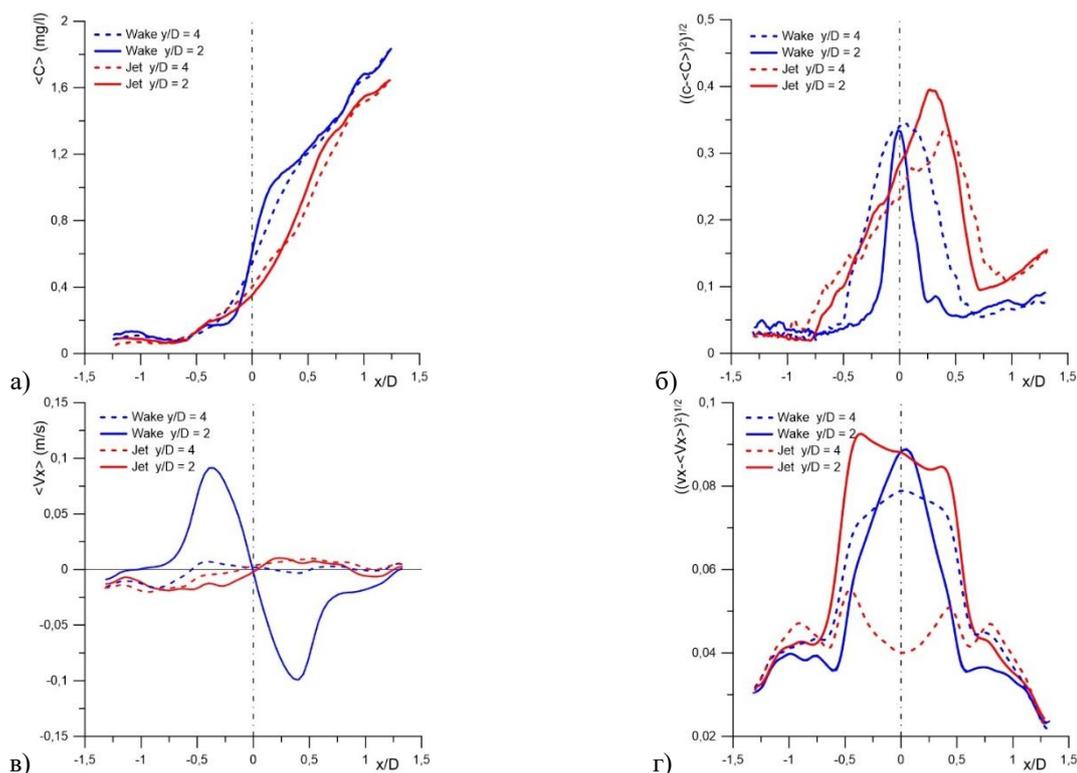


Рис. 5. Профили осредненной концентрации (а) и поперечной скорости (в) и профили пульсаций концентрации (б) и скорости (г)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование методами PIV и PLIF с высоким временным разрешением позволило изучить влияние колеблющейся струи на структуру течения и процессы смешения в узком зазоре. Синхронные измерения мгновенных полей концентрации и скорости в центральной плоскости зазора показали, что колебания струи существенно интенсифицируют перемешивание за счет нескольких механизмов: генерации периодических возмущений, турбулизации потока и образования сдвиговых вихревых структур с высокой способностью к увлечению жидкости. Однако область эффективного смешения оказывается ограниченной из-за малой дальности колеблющейся струи. Экспериментально установлено, что размеры этой зоны определяются геометрическими параметрами зазора, режимом течения в каналах и значениями чисел Рейнольдса струи. Полученные результаты имеют практическую значимость для совершенствования энергетического оборудования, где эффективность теплообмена и массопереноса в узких зазорах является критически важным фактором.

Исследование поддержано грантом РНФ (грант № 24-29-20223, <https://rscf.ru/project/24-29-20223/>) и Правительства Новосибирской области (соглашение № р-100 от 22.03.2024).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Phillips E., Wygnanski I.** Use of sweeping jets during transient deployment of a control surface // *AIAA J.* 2013. Vol. 51. № 4. Pp. 819-828.
2. **Schmidt H.J., Wozidlo R., Nayeri C.N., Paschereit C.O.** Fluidic oscillators for bluff body drag reduction in water // *54th AIAA Aerosp. Sci. Meet.* 2016. Pp. 1-12.
3. **Hossain M.A., Agricola L., Ameri A., Gregory J.W., Bons J.P.** Sweeping jet film cooling on a turbine vane // *J. Turbomach.* 2019. Vol. 141. № 3. P. TURBO-18-1257.
4. **Guyot D., Paschereit C.O., Raghu S.** Active combustion control using a fluidic oscillator for asymmetric fuel flow modulation // *Int. J. Flow Control.* 2009. Vol. 1. № 2. Pp. 155-165.
5. **Zhou W., Yuan L., Liu Y., Peng D., Wen X.** Heat transfer of a sweeping jet impinging at narrow spacings // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2019. Vol. 103. Pp. 89-98.
6. **Ostermann F., Wozidlo R., Nayeri C.N., Paschereit C.O.** Properties of a sweeping jet emitted from a fluidic oscillator // *J. Fluid Mech.* 2018. Vol. 857. Pp. 216-238.
7. **Nguyen T., Goth N., Jones P., Lee S., Vaghetto R., Hassan Y.** PIV measurements of turbulent flows in a 61-pin wire-wrapped hexagonal fuel bundle // *Int. J. Heat Fluid Flow.* 2017. Vol. 65. Pp. 47-59.
8. **Wang X., Wang R., Du S., Chen J., Tan S.** Flow visualization and mixing quantification in a rod bundle using laser induced fluorescence // *Nucl. Eng. Des.* 2016. Vol. 305. Pp. 1-8.
9. **Eltayeb A., Tan S., Ala A.A., Zhang Q.** The study of the influence of slug density on the mixing performance in the reactor vessel, using PLIF experiment and FLUENT simulation // *Prog. Nucl. Energy.* 2021. Vol. 131. P. 103558.
10. **Li X., Mi Z., Tan S., Wang X., Wang R., Ding H.** Experimental investigation of fluid mixing inside a rod bundle using laser induced fluorescence // *Prog. Nucl. Energy.* 2019. Vol. 110. Pp. 90-102.
11. **Borg A., Bolinder J., Fuchs L.** Simultaneous velocity and concentration measurements in the near field of a turbulent low-pressure jet by digital particle image velocimetry-planar laser-induced fluorescence // *Exp. Fluids.* 2001. Vol. 31. № 2. Pp. 140-152.
12. **Shestakov M. V.** Experimental study of flow dynamics of a sweeping jet in a slot channel // *J. Phys. Conf. Ser.* 2021. Vol. 2119. № 1. P. 012034.
13. **Chen D., Jirka G.H.** Experimental study of plane turbulent wakes in a shallow water layer // *Fluid Dynamics Research.* 1995. Vol. 16. № 1. Pp. 11-41.
14. **Daoyi Chen B., Jirka G.H.** Absolute and convective instabilities of plane turbulent wakes in a shallow water layer // *J. Fluid Mech.* 1997. Pp. 157-172.
15. **Shestakov M. V., Markovich D.M.** 3D structure of the flow in a near wake behind a cylinder in the slot channel // *Thermophys. Aeromechanics.* 2021. Vol. 28. № 6. Pp. 765-770.

Shestakov M.V.

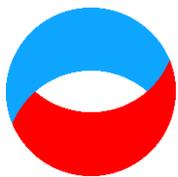
*Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Russia,
630090 Novosibirsk, Russia, 1 Lavrentiev Ave., E-mail: maximvsh@gmail.com*

**STUDY OF OSCILLATING JET EFFECTS
ON MIXING AND THE FLOW STRUCTURE IN A NARROW GAP**

ABSTRACT

Flows in narrow gaps are characteristic of power engineering equipment, particularly fuel assemblies. In densely packed rod bundles, the flow structure is highly anisotropic and exhibits large-scale quasi-periodic fluctuations in both longitudinal and transverse velocities, which significantly affect inter-subchannel mixing processes. The study employed simultaneous PIV and PLIF measurements to investigate the effect of an oscillating jet, generated by a fluidic oscillator, on mixing and quasi-periodic flow structure in a narrow gap. Experimental results demonstrate that the oscillating jet effectively modifies both mixing processes and flow structure. However, due to the jet's limited penetration range, its area of influence remains constrained and depends on gap parameters, flow regime in the channels, and jet Reynolds number.

PIV, PLIF, COMPLEX-GEOMETRY CHANNELS, FLOW CONTROL, NARROW GAP, FLUIDIC OSCILLATOR, OSCILLATING JET



*Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.*

УДК 53.083.9

Софурев Д.В., Усманова Ш.Ш., Скорнякова Н.М., Сапронов М.В.

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: UsmanovaSS@mpei.ru*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ ПРИМЕНИМОСТИ КОМПЛЕКСА ДИАГНОСТИКИ ПОТОКОВ МЕТОДОМ МУЛЬТИЦВЕТНОЙ АНЕМОМЕТРИИ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ ЧАСТИЦ

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена определению границ применимости ранее разработанного оптико-электронного комплекса 3D диагностики потока на основе метода мультицветной анемометрии по изображениям частиц. Метод мультицветной анемометрии по изображениям частиц (МАИЧ) представляет собой одну из современных модификаций метода анемометрии по изображениям частиц (АИЧ). Главное отличие метода МАИЧ от других близких по сути модификаций заключается в количестве зондирующих плоскостей, для МАИЧ измерений предполагается применять три лазерных плоскости с длинами волн 450, 550 и 650 нм. В результате подобная модернизация позволяет визуализировать структуру потока одновременно в трех плоскостях. В работе описан принцип работы разработанного комплекса и сформулирован алгоритм обработки экспериментальных результатов. Для определения границ применимости комплекса в качестве объекта исследования был рассмотрен водный поток, созданный в стеклянной трубке с внутренним диаметром 8,6 мм. Для формирования в трубке потока была использована система сообщающихся сосудов, представляющих собой две стеклянные кюветы, и вода самотеком пускалась по трубке из одной кюветы в другую. Для оценки точности МАИЧ измерений во время эксперимента также регистрировалось положение уровня воды в кюветах. На основе экспериментальных данных, полученных двумя разными методами, была рассчитана объёмная скорость потока в кювете и объёмная скорость потока в цилиндрической трубке.

МУЛЬТИЦВЕТНАЯ АНЕМОМЕТРИЯ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ ЧАСТИЦ, 3D ДИАГНОСТИКА ПОТОКОВ, ДИАГНОСТИКА ПОТОКОВ В ЖИДКИХ СРЕДАХ, ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ПОТОКОВ

ВВЕДЕНИЕ

Многообразие современных задач, связанных с промышленными технологиями, мониторингом и прогнозированием состояния окружающей среды, фундаментальными научными исследованиями, в которых гидродинамические процессы являются определяющим фактором постоянно расширяется. Примеров областей огромное количество: авиа-, авто-, судостроение, энергетические установки включая ядерные, химико-технологические процессы, лабораторное моделирование различных природных гидродинамических процессов и пр.

Эффективность и безопасность функционирования систем, основанных на применении потоков сплошных сред в значительной степени зависит от того насколько хорошо известны

их параметры и, в первую очередь, пространственно-временное распределение скорости течения – основной гидродинамической характеристики. Поэтому наличие средств и способов диагностики и измерения характеристик потоков жидкостей является залогом успешного решения поставленных задач.

Существует множество методов диагностики потоков, но наиболее значимое место среди них занимают оптические методы, поскольку они бесконтактны, дистанционны и многофункциональны [1-3]. На сегодняшний день одним из широко используемых бесконтактных оптических методов диагностики и визуализации потоков в газовых и жидких средах является метод анемометрии по изображению частиц (АИЧ). Основным достоинством метода является возможность измерения распределения скорости потока и его визуализации в плоскости в некотором сечении исследуемого объема. Но наиболее полную информацию о структуре исследуемого потока по сравнению с классическим планарным методом исследования АИЧ возможно получить с помощью основных модификаций метода АИЧ, таких как стерео и томографическая АИЧ [4-6].

Метод мультицветной анемометрии по изображениям частиц (МАИЧ) является еще одной современной модификацией метода АИЧ. Основное отличие отечественного метода МАИЧ от существующих зарубежных модификаций метода АИЧ заключается в том, что в качестве источника зондирующего излучения предполагается использовать не одну лазерную плоскость, а три, причём разных длин волн, соответствующих синему, зеленому и красному цвету. Подобная модификация открывает возможность в визуализации и получении информации о распределении вектора скорости одновременно в трёх плоскостях и восстановлении информации о распределении вектора скорости в промежуточных областях, заключенных между зондирующими плоскостями. Также метод не требует дорогостоящего оборудования. Несмотря на все достоинства метода МАИЧ, на сегодняшний день он находится только в стадии разработки и до сих пор на мировом и отечественном рынке отсутствуют готовые приборы, позволяющий проводить МАИЧ измерения. Поэтому разработка подобных комплексов является актуальной задачей [7-12].

Настоящая работа является продолжением работы по разработке оптико-электронного комплекса 3D-2С диагностики потоков на основе метода МАИЧ и посвящена определению возможности его применения для диагностики потоков в сплошных средах.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Для определения границ применимости ранее разработанного оптико-электронного комплекса в качестве объекта исследования был рассмотрен водный поток, созданный в стеклянной трубке U-образной формы (табл. 1).

Табл. 1. Характеристики стеклянной U-образной трубки

Внешний диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм	Высота, мм	Тип стекла
12	8,6	200	Simax

В ходе проведения эксперимента, за область измерения была принята область трубки, выделенная на рис. 1. красным квадратом, и расположенная на расстоянии на много большем, чем пять диаметров трубки от места перегиба.

Для формирования в трубке водного потока была использована система сообщающихся сосудов, представляющих собой две стеклянных кюветы, и вода самотёком пускалась по трубке 1 из кюветы 3 в кювету 2. Поскольку стеклянная трубка работала как цилиндрическая линза в силу своих конструктивных особенностей, то для уменьшения ее оптической силы трубка была помещена в кювету с водой. Также вода в кювете 3 предварительно засеивалась частицами-трассерами, представляющими собой частицы сажи с линейными размерами в пределах от 70 до 100 мкм.

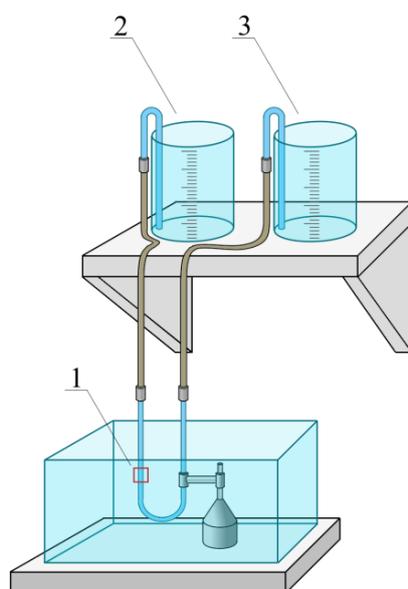


Рис. 1. Система сообщающихся сосудов

Схема экспериментальной установки для проведения МАИЧ измерений приведена на рис. 2. Для формирования параллельных лазерных плоскостей в измерительной области, расположенной внутри трубки, в состав оптической системы комплекса были включены две цилиндрические линзы с фокусными расстояниями равными 45 мм ($f = 45$ мм).

Для точного определения расстояния между лазерными плоскостями после юстировки оптической системы был сделан калибровочный кадр поверхности воды внутри трубки и линейки с помощью цифровой камеры. В результате чего, было получено, что калибровочный коэффициент был равен 0,019 мм/пикс, расстояние между центрами красной и зелёной лазерными плоскостями составило 81 пиксель = 1,539 мм \approx 1,5 мм, расстояние между центрами зелёной и синей лазерными плоскостями составило 83 пикселя = 1,577 мм \approx 1,6 мм. Также центр зелёной лазерной плоскости был расположен по центру стеклянной трубки. Толщина лазерных плоскостей составляла 0,5 мм.

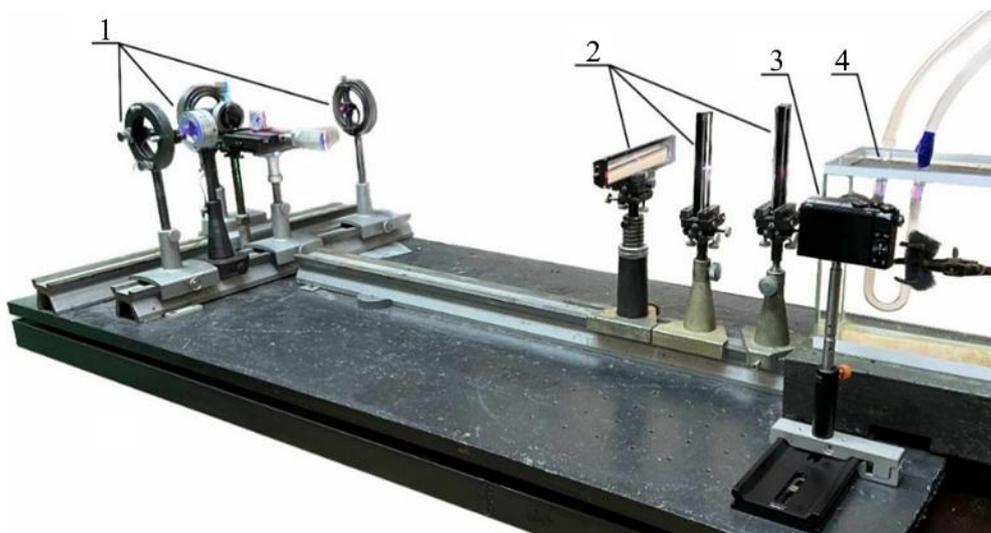


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для проведения МАИЧ измерений:
1 – лазерные модули с длинами волн 450, 550 и 650 нм; 2 – оптическая система формирования лазерных плоскостей; 3 – цветная цифровая камера Nikon 1 J5; 4 – стеклянная трубка

Регистрация положения частиц сажи производилась с помощью цифровой фотокамеры с цветной КМОП матрицей Nikon 1 J5 и объектива с фокусным расстоянием 10-30 см. Запись производилась с частотой съёмки 60 кадров в секунду. Для оценки точности МАИЧ измерений

во время эксперимента также регистрировалось положение уровня воды в кюветах 2 и 3 (рис. 1) с помощью видеокамеры. Запись производилась с разрешением 4К 3840×2160 пикселей с частотой съёмки 60 кадров в секунду в течение одной минуты. В период этого времени на камеру Nikon 1 J5 была зарегистрирована серия из 16 кадров. Серая была сделана через 26 секунд после начала съёмки видеокамерой.

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В ходе обработки видеозаписи, содержащей информацию об уровне воды в кюветах, на первом этапе оно было разделено на кадры с шагом в одну секунду с помощью программы «VirtualDub». Далее по каждому изображению определялось расстояние вдоль линейки от 110 мм до точки пересечения уровня воды во второй кювете в пикселях с помощью графического редактора. Линейка и видеокамера были наклонены относительно уровня воды в кювете 2. Поэтому полученные значения положения уровня воды в пикселях были умножены не только на калибровочный коэффициент, а ещё и на косинус суммы углов наклона камеры и линейки (формула 1).

$$H = h \cdot k \cdot \cos(\alpha_1 + \alpha_2), \quad (1)$$

где H – уровень воды в кювете 2 в мм; h – расстояние вдоль линейки от 110 мм до точки пересечения уровня воды в пикселях; k – калибровочный коэффициент равный 0,018 мм/пикс.; α_1 – угол наклона линейки относительно уровня воды равный $2,36^\circ$; α_2 – угол наклона камеры относительно уровня воды равный $1,47^\circ$.

На рис. 3 приведен график зависимости уровня воды от времени в кювете построенный в среде «Mathcad» на основе результата обработки видеозаписи. Вертикальной пунктирной линией обозначен момент съёмки серии, зарегистрированной камерой Nikon 1 J5.

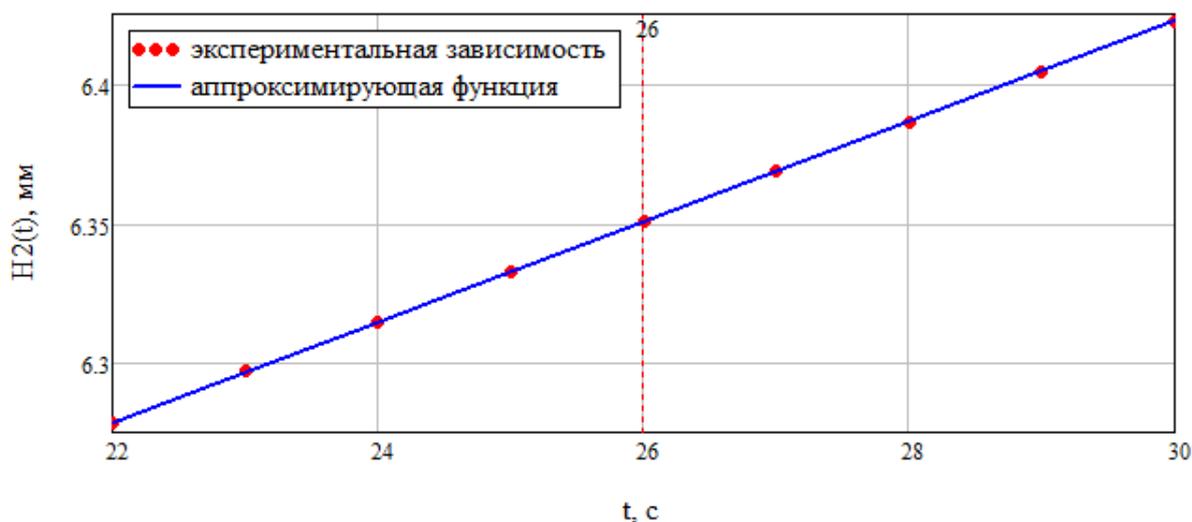


Рис. 3. График зависимости уровня воды в кювете от времени

Для сравнения результатов МАИЧ измерений с экспериментальными результатами измерения уровня воды в кювете, на основе полученной аппроксимированной зависимости была рассчитана объёмная скорость потока в стеклянной трубке по формуле

$$Q = \frac{d(H(t))}{dt} \cdot a \cdot b, \quad (2)$$

где $H(t)$ – зависимость уровня воды в кювете в мм; a – длина основания кюветы равная 158 мм; b – ширина основания кюветы равная 256 мм.

В ходе расчёта было получено, что объёмная скорость потока Q составила

$$Q = 738 \frac{\text{мм}^3}{\text{с}}.$$

В результате МАИЧ измерений каждое регистрируемое изображение содержало информацию о положении частиц трассеров одновременно в трех плоскостях. Поэтому на первом этапе обработки каждое изображение из каждой серии было разложено по трём цветовым RGB каналам в среде «Mathcad». Далее к каждой паре изображений из каждой серии по каждому цветовому каналу применялся стандартный кросскорреляционный алгоритм обработки в программе PIVviewd2C. Перекрытие составляло 75%. В результате кросс-корреляционного анализа рассчитанные значения скорости выводились из программы в виде текстового файла, и на их основе производился дальнейший анализ структуры потока. На рис. 4 приведен пример кросскорреляционной обработки одной из пар МАИЧ изображений. Как видно из векторных полей скоростей, для каждого цветового канала наблюдается изменение скорости смещения трассирующих частиц. При этом наибольшая скорость потока наблюдается в центре стеклянной трубки, а по краям скорость падает.

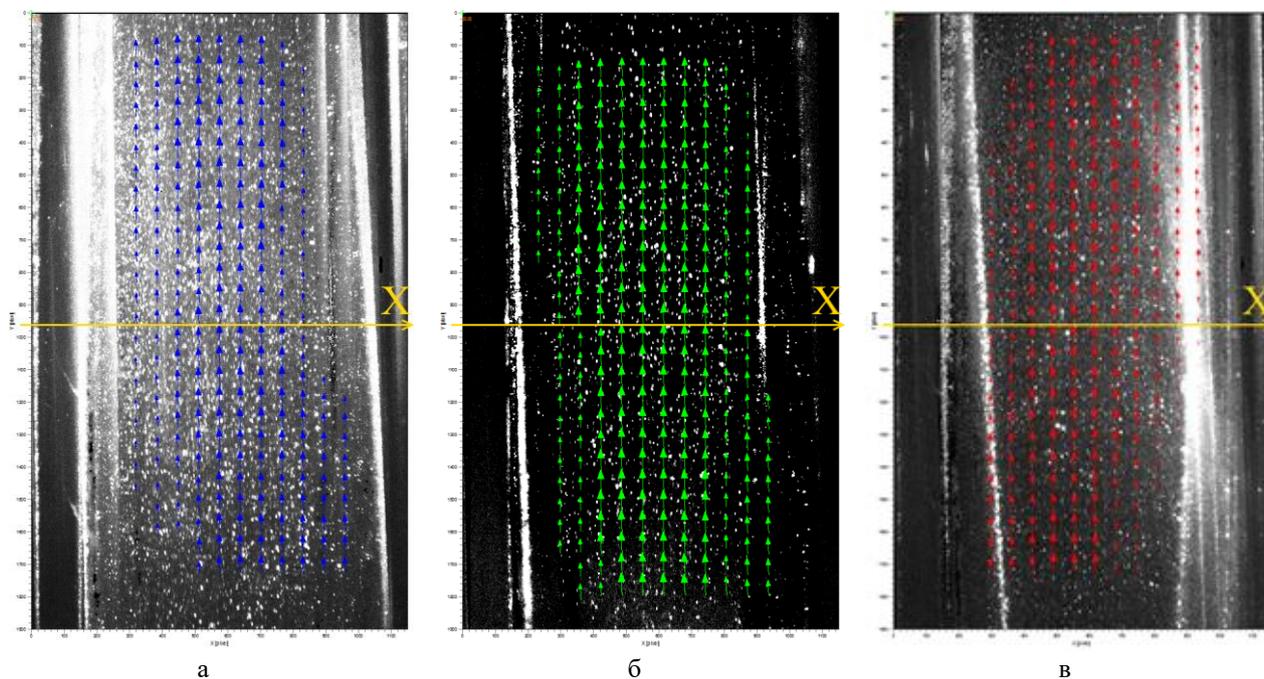


Рис. 4. Результат кросскорреляционной обработки МАИЧ изображений:
а – синяя плоскость; б –зелёная плоскость; в – красная плоскость

После осуществления кросскорреляционной обработки дальнейший анализ МАИЧ измерений производился на основе одной из пар изображений в редакторе «Visual Studio Code» на языке программирования «Python». Для расчёта объемной скорости потока в стеклянной трубке сначала было построено распределение скорости потока вдоль оси X при фиксированной координате вдоль оси Y , которая составляла $y = 960$ пикселей $= 9,402$ мм ≈ 9 мм и аппроксимировано полиномом второго порядка (рис. 5).

Далее аппроксимирующие функции были дискретизированы с шагом 0,086 мм и представлены в виде матрицы. В результате для каждой пары изображений было получено по три матрицы, каждая из которых соответствовала определенной лазерной плоскости. После чего на основе полученных матриц производился дальнейший процесс восстановления распределения скорости вдоль оси Z по всему сечению трубки с шагом 0,086 мм на основе применения полинома второй степени в качестве аппроксимирующей функции, который подбирался по методу наименьших квадратов.

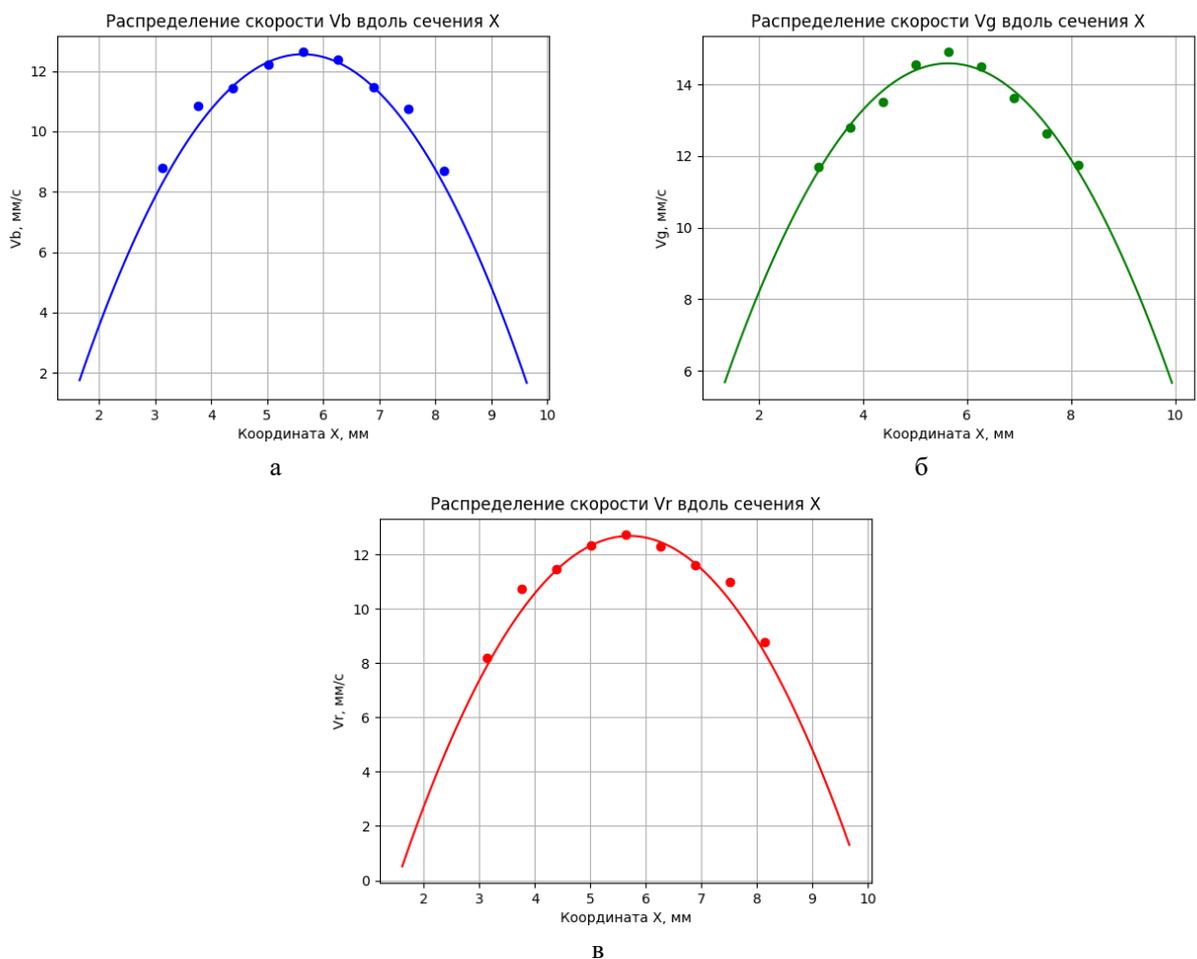


Рис. 5. Аппроксимированные распределения скорости вдоль оси X:

а – синяя лазерная плоскость; б – зеленая лазерная плоскость; в – красная лазерная плоскость

Расчёт объёмной скорости потока в стеклянной трубке был произведен по формуле

$$Q = Sum \cdot \frac{\pi \cdot R^2}{k}, \quad (3)$$

где Sum – сумма значений скорости по всему сечению трубки в мм/с; k – количество сложенных по всему сечению трубки значений скорости (для каждой пары изображений $k = 1829$); R – радиус трубки равный 4,3 мм.

В ходе расчёта было получено, что объёмная скорость потока составила

$$Q_{MPIV} = 764 \frac{\text{мм}^3}{\text{с}}.$$

Далее было рассчитано отклонение объёмной скорости в стеклянной трубке, полученной на основе измерений методом МАИЧ от объёмной скорости, полученной на основе измерений уровня воды в кювете

$$\delta Q = \frac{|Q - Q_{MPIV}|}{Q_{MPIV}} \cdot 100 \approx 4\%.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы была успешно доказана работоспособность ранее разработанного комплекса и возможность его применения для диагностики потоков в жидких

средах на основе МАИЧ измерений. Для этого в качестве объекта исследования был рассмотрен водный поток. В ходе экспериментов с помощью экспериментальной установки была проведена серия МАИЧ измерений положения частиц-трассеров, представляющих собой частицы сажи с линейными размерами в пределах от 70 до 100 мкм, одновременно в трёх сечениях цилиндрической трубки. Для оценки точности МАИЧ измерений во время эксперимента также регистрировалось положение уровня воды в кюветах с помощью дополнительной видеокамеры. На основе экспериментальных данных, полученных двумя разными методами, была рассчитана объёмная скорость потока в кювете и объёмная скорость потока в цилиндрической трубке для каждой серии. Поскольку отклонение результатов МАИЧ измерений от измерений, основанных на регистрации положения уровня воды в кювете, составило 4%, то следует отметить, что верификация метода МАИЧ прошла успешно, и как следствие, доказана работоспособность оптико-электронного комплекса и возможность его применения для диагностики потоков в жидких средах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Антоненков Д.А.** Определение скорости течения водного потока с использованием методов визуализации // Научная визуализация. Т. 12. № 5. 2020. С. 102-111.
2. **Skornyakova N.M., Anikeev A.V., Parshin A.V.** Optical study of the concentration and particle size distribution of octadecylamine in water // Journal of Physics: Conference Series : 15th International Conference on Optical Methods of Flow Investigation. 2019. Vol. 1421. P. 012010.
3. **Kuchmenko A.V., Koshelev D.A., Skornyakova N.M., et al.** Development of the system for quantitative gas-liquid flow visualization // Journal of Physics: Conference Series : 15th International Conference on Optical Methods of Flow Investigation. 2019. Vol. 1421. P. 012025.
4. **Raffel M., Willert C., Kompenhans J., et al.** Particle image velocimetry. A practical guide. Springer International Publishing. 2018. 669 p.
5. **Arroyo M.P., Greated C.A.** Stereoscopic particle image velocimetry // Measurement Science and Technology. 1991. Vol. 2. № 12. Pp. 1181-1186.
6. **Elsinga G.E., Scarano F., Wieneke B., et al.** Tomographic particle image velocimetry // Exp. Fluids. 2006. Vol. 41. Pp. 933-947.
7. **Ruck B.** Colour-coded tomography in fluid mechanics // Optics and Laser Technology. 2011. Vol. 43. № 2. Pp. 375-380.
8. **Xiong J., Qiang F., Idoughi R., et al.** Reconfigurable rainbow PIV for 3D flow measurement // Conference Paper IEEE International Conference on Computational Photography. 2018. Pp. 1-9.
9. **Park H.J., Yamagishi S., Osuka S., et al.** Development of multi-cycle rainbow particle tracking velocimetry improved by particle defocusing technique and an example of its application on twisted Savonius turbine // Experiments in Fluids. 2021. Vol. 62. № 71.
10. **Баюн С.В., Скорнякова Н.М.** Исследование тепловых потоков методом мультицветной анемометрии по изображению частиц // Радиоэлектроника, электроника и энергетика: Двадцать вторая Междунар. науч.-техн. конф. Студентов и аспирантов: тез. докл. М.: Издательский дом МЭИ. 2016. С. 123.
11. **Usmanova S.S., Skornyakova N.M., Anikeev V.A., et al.** The study of vortexes based on the multi colored particle image velocimetry technique // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1421. P. 012004.
12. **Usmanova S.S., Skornyakova N.M., Belov S.Yu., et al.** Visualization of water toroidal vortex by multicolor particle image velocimetry // Scientific Visualization. 2022. Vol. 14. № 4. Pp. 62-70.

Sofuev D.V., Usmanova S.S., Skornyakova N.M., Sapronov M.V.

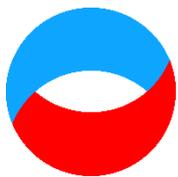
*National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: UsmanovaSS@mpei.ru*

DETERMINATION OF APPLICABILITY LIMITS OF FLOW DIAGNOSTICS COMPLEX BASED ON MULTICOLOR PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY

ABSTRACT

The work is devoted to determining applicability limits of the previously developed optical electronic complex for 3D flow diagnostics based on multicolor particle image velocimetry. Multicolor particle image velocimetry (MPIV) is one of the modern modifications of the particle image velocimetry (PIV). The main difference between MPIV and other similar modifications is the number of probing planes; for MPIV measurements, three laser planes with wavelengths of 450, 550 and 650 nm are supposed to be used. As a result, such an upgrade makes it possible to visualize the flow structure simultaneously in three planes. The paper describes operation principle of the developed complex and formulates an algorithm for processing experimental results. To determine complex applicability limits, a water stream created in a glass tube with an inner diameter of 8,6 mm has been considered as an object of research. To form a flow in the tube, a system of communicating vessels was used, consisting of two glass cuvettes, and the water was gravity-fed through the tube from one cuvette to the other. To assess MPIV measurements accuracy, the position of the water level in the cuvettes was also recorded during the experiment. Based on experimental data obtained by two different methods, the volumetric flow rate in a cuvette and the volumetric flow rate in a cylindrical tube were calculated.

**MULTICOLOR PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY, 3D FLOW DIAGNOSTICS, FLOW
DIAGNOSTICS IN LIQUID MEDIA, FLOW STRUCTURE VISUALIZATION**



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 533.6.071.082.5

Могорычная А.В.

*Федеральное автономное учреждение «Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского», (ФАУ ЦАГИ), Россия,
140181, Жуковский г., МО, Жуковского ул., 1, E-mail: anna.mogoruchnaya@phystech.edu*

**ИЗМЕРЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ТРЕНИЯ НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ
ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДОМ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ В ТОНКОЙ МАСЛЯНОЙ ПЛЕНКЕ**

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрен метод регистрации поверхностного трения оптическим методом интерференции в тонкой масляной пленке на плоской поверхности. Основное внимание уделено выбору схемы эксперимента: осветителя, материала исследуемой поверхности, объектива камеры регистрации. Сравнивается качество интерференционной картины, полученной на поверхности из распространенных материалов, экспериментально подтверждается клиновидности капли вблизи передней кромки.

**ПОВЕРХНОСТНОЕ ТРЕНИЕ, ИЗМЕРЕНИЯ, ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ,
ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ, МАСЛЯНАЯ ПЛЕНКА, ПОВЕРХНОСТЬ, ОСВЕТИТЕЛЬ,
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА**

ВВЕДЕНИЕ

Поверхностное трение является важным параметром, характеризующим тело в воздушном потоке. Точное определение местного поверхностного трения важно, как для авиационной промышленности – сопротивление трения может определять существенную часть полного сопротивления тела, так и для исследований строения пограничного слоя.

С целью исследования поверхностного трения было разработано большое количество методов. Их можно разделить на прямые методы (метод плавающего элемента, оптические методы), методы, основанные на аналогии Рейнольдса, манометрические методы и методы, основанные на анализе профиля скорости в пограничном слое.

В непрямых методах трение определяется исходя из распределения давления или скорости у стенки, чтобы получить их значения обычно используют интерполяцию, основываясь на каких-то предположениях относительно распределения этих величин. Такие методы подходят для измерений в уже изученных течениях, но измерения в более сложных потоках необходимо вести прямыми методами.

В то же время плавающий элемент имеет ряд недостатков: он дорог, сложен в изготовлении и настройке, должен быть заранее встроен в поверхность. Все эти неудобства отсутствуют в оптических методах.

В данной статье описывается метод определения напряжения поверхностного трения на плоской пластине в воздушном потоке с помощью анализа интерференционной картины в масляной капле, нанесенной на поверхность.

Основной причиной начала работы послужила необходимость иметь прямые и независимые измерения напряжения трения для изучения структуры турбулентного пограничного слоя.

ОСНОВНАЯ ИДЕЯ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА

Основа метода заключается в наблюдении того, как масляная пленка деформируется под действием воздушного потока. На масло будут действовать сила трения, градиент давления, сила тяжести и сила поверхностного натяжения. Будем считать, что силы тяжести и поверхностного натяжения пренебрежимо малы. Также примем следующие предположения:

- 1) Скорость по оси y пренебрежимо мала.
- 2) Поток стационарен, т.е. $\frac{\partial v}{\partial t} = 0$
- 3) Плотность и вязкость масла постоянны
- 4) $\frac{\partial P}{\partial x}$ постоянен и $\frac{\partial P}{\partial y}$ очень мала, то есть давление по вертикали не меняется.
- 5) движение в целом достаточно медленное, чтобы конвекционные слагаемые можно было опустить

Тогда уравнения ползущего движения вязкой жидкости упрощаются до одного уравнения по оси x [1]:

$$\mu \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = \frac{\partial P}{\partial x}.$$

Интегрируем два раза, учитывая, что скорость масла у стенки обращается в ноль и получим следующее выражение для скорости в потоке масла:

$$v = \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \left(\frac{y^2}{2} - hy \right) + \frac{\tau_{\Pi}}{\mu} y.$$

Найдем объёмный поток через сечение x :

$$Q = \int_0^h v dy = \frac{\tau_{\Pi} h^2}{\mu} - \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \frac{h^3}{3}.$$

Так как толщина пленки очень мала, то вторым слагаемым можно пренебречь, если $\frac{\partial P}{\partial x}$ не очень велико:

$$Q = \frac{\tau_{\Pi} h^2}{\mu}.$$

Расход остается постоянным на характеристической прямой $x = x_0 + V_w(t - t_0)$, где $V_w = \frac{\partial Q}{\partial h}$ – скорость переноса постоянной высоты, а значит и постоянного расхода. Тогда

$$\frac{\tau_0}{\tau} = \frac{h^2}{h_0^2}, \frac{h}{h_0} = \frac{\sqrt{\tau_0}}{\sqrt{\tau}};$$

$$\frac{dx}{dt} = V_w = \frac{\partial Q}{\partial h} \Rightarrow \mu dx = h_0 \sqrt{\tau \tau_0} dt;$$

$$\Delta x = \frac{h_0 \sqrt{\tau_0}}{\mu} \int_{t_0}^t \sqrt{\tau} dt.$$

Если предположить, что напряжение поверхностного трения остается постоянным, начальный момент времени t_0 и точка отсчета x_0 нулевые, тогда:

$$x = \frac{h\tau}{\mu} t \Rightarrow \tau = \frac{x}{h} \mu \frac{1}{t}.$$

В работах [2-4] проводится доказательство, что масляная пленка в потоке принимает форму, зависящую только от распределения поверхностного трения по исследуемой пластине. При постоянном трении такой формой профиля является клин. Поэтому высоту пленки можно найти с помощью интерференции.

При интерференции в клине наблюдаются полосы равной толщины, при этом расстояние между ними зависит от угла клина.

Разность хода лучей описывается выражением $\Delta l = 2nh \cdot \cos(\psi)$, $\sin(\varphi) / \sin(\psi) = n$, где φ – угол падения луча, а ψ – угол отражения. Максимумы освещенности соответствуют разнице хода в целое число волн, что осуществляется при толщине пленки

$$h = \frac{\lambda m}{2n \cdot \sin(\psi)}.$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Установка состоит из следующих компонент: масло, осветитель, подложка под масло и камера. Для создания потока воздуха применяется компрессор. Схема расположения оборудования приведена на рис. 1.

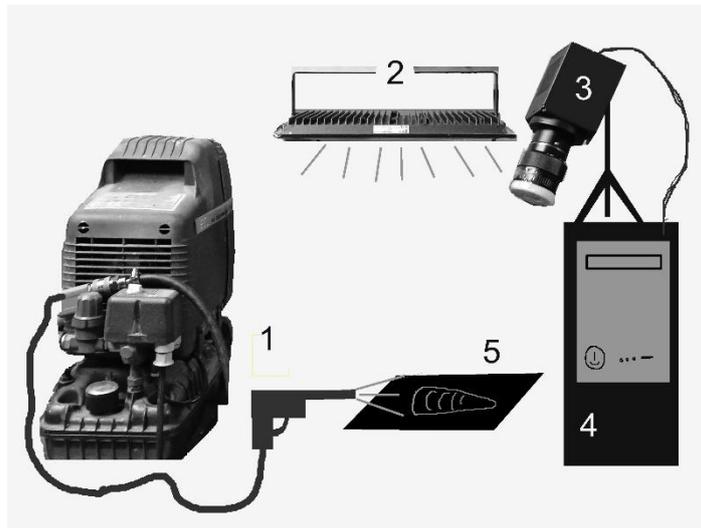


Рис. 1. Оборудование для наблюдения интерференции в пленке:
1 – компрессор, 2 – осветитель, 3 – камера с интерференционным фильтром, 4 – ПК для сбора данных,
5 – поверхность под каплю

Масло

Силиконовое масло (полиметилсилоксановая жидкость, ГОСТ 13032-77[5]) ПМС-50 имеет следующие характеристики:

Плотность: $0,96 \text{ г/см}^3$

Кинематическая вязкость: 45-55 сСт

Коэффициент преломления: 1,4015

Поверхностное натяжение: 20,8 Н/м

Сохраняет рабочие свойства до 220 С°. Из-за относительно низкой вязкости подходит для исследования медленных потоков.

Выбор осветителя

Осветители можно разделить на два основных класса: когерентные и некогерентные.

Когерентное излучение генерируется лазерами и имеет длину когерентности порядка метра и более, однако, чтобы осветить элемент поверхности с каплей равномерно, необходимо расширить пучок с помощью системы линз. Лазерный луч дифрагирует на всех элементах оптической системы и неоднородностях на его пути, поэтому на интересующую нас картину интерференции накладываются случайные минимумы и максимумы, называемые спеклами. Спеклы могут существенно усложнять интерпретацию результатов, поэтому применение лазера в большинстве случаев нежелательно.

Если пластинка освещается излучением с длиной волны примерно 500 нм и наблюдается 10 полос, то длина когерентности должна быть 5 мкм. Оценим допустимую ширину спектра излучения исходя из соотношения неопределенностей.

Соотношение неопределенностей для энергии и времени записывается как $\delta E \cdot \tau \sim h$, где δE – ширина энергетического уровня, τ – время жизни частицы на этом уровне (время излучения). Так как $E = \nu h$, то $\delta \nu \cdot \tau \sim 1$, откуда следует $\delta \nu \sim \frac{1}{\tau} = \frac{l}{c}$, где l – длина когерентности, c – скорость света. Учитывая, что $\delta \nu = \frac{c \delta \lambda}{\lambda^2}$, перейдем от частоты к длине волны. Для длины когерентности получим оценку

$$l \sim \frac{\lambda^2}{\delta \lambda} = \frac{250 \text{ нм}}{\delta \lambda} \text{ мкм} \geq 5 \text{ мкм}.$$

Максимальная ширина спектра – 50 нм, её можно легко обеспечить с помощью интерференционного фильтра, поэтому предпочтение отдается некогерентным источникам.

В данной работе используется мощная диодная лампа. В книге [6] авторы сравнивают картины интерференции в диффузном и отраженном свете и приходят к выводу, что изображения в рассеянном свете обладают лучшим качеством и позволяют наблюдать интерференционную картину на криволинейных плоскостях. Для наблюдения интерференции в рассеянных лучах необходимо рассеять излучение от лампы. В качестве рассеивающего элемента применяется бумага, которая крепится к лампе.

Выбор поверхности под масло

Подходящая поверхность выбирается исходя из требования хорошей видимости интерференционных полос.

Во-первых, поверхность должна быть достаточно гладкая, её средняя шероховатость не должна превышать четверти длины волны видимого света, то есть $\delta \approx 0,1$ мкм. Для стали условие выполняется при полировке 13-14 классов, то есть необходима почти зеркальная полировка.

Во-вторых, отражательная способность материала должна быть такой, чтобы интенсивность излучения, отраженного от границы раздела масло-воздух была сопоставима с интенсивностью излучения, отраженного от поверхности. Пусть видимость интерференционной картины определяется выражением $V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$. Согласно работе [7], максимальная видимость полос ($V = 1$) достигается при коэффициенте преломления материала подложки равным двум $n = 2$, если для силиконового масла принять $n = 1,4$.

В последующем планируется перенести эксперимент в аэродинамическую трубу, где будут одновременно проводиться измерения напряжения трения (методом тонкой масляной пленки) и профиля скорости в пограничном слое методом горячей проволоки. Поэтому дополнительно предъявляются требования к температурной стойкости поверхности.

В процессе перебора доступных материалов были рассмотрены следующие поверхности:

Стеклотекстолит

Поверхность текстолита обладает необходимой гладкостью, однако на ней располагаются бугорки на равном расстоянии друг от друга. Они препятствуют течению масла, и чем тоньше становится пленка, тем сильнее бугорки начинают искажать интерференционную картину на ней, в итоге, полосы полностью размываются со временем при длительном эксперименте (рис.2).

На графике нанесены значения точек, взятых с оси капли в момент 25 с, по нему легко найти видность первых порядков интерференции:

Для оригинального снимка: $V_1 = 0,27, V_2 = 0,22, V_3 = 0,13$.

Для кадра после обработки: $V_1 = 0,8, V_2 = 0,67, V_3 = 0,45$.

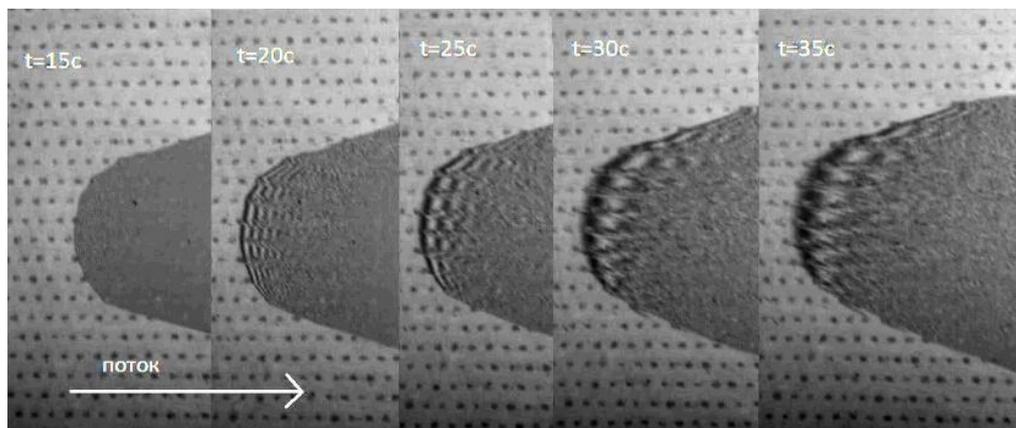


Рис. 2. Интерференция в масляной капле на текстолите.

Нормализация гистограммы изображения помогает сделать полосы более видимыми, однако качественно картина интерференции не меняется. Количество максимумов, видимых на текстолите не превышает 3–4, что видно на рис.3. Этого недостаточно для того, чтобы убедиться в линейности профиля, поэтому материал не подходит в качестве поверхности.

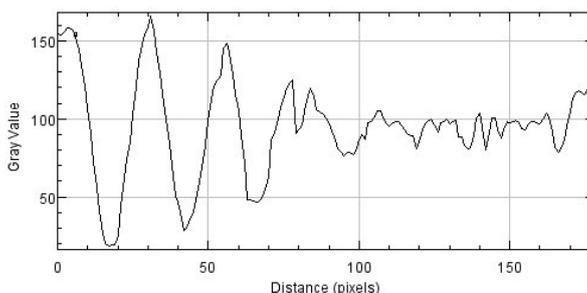


Рис. 3. Распределение интенсивности по оси капли в момент времени 25 с, построено по снимку.

Гетинакс

Полос не видно (рис. 4).

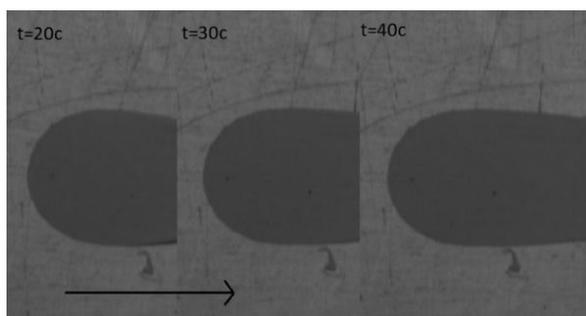


Рис. 4. Растекание капли по гетинаксу, гетинакс не обладает достаточной гладкостью поверхности и отражательной способностью, поэтому полос нет

Стекло

Отражение от границы масло-стекло мало, поэтому видимые полосы соответствуют интерференции лучей, отраженных от границы масло-воздух и нижней грани стеклянной пластинки. Если пластинка толстая, то дополнительная разность хода может превышать длину когерентности некогерентных источников и необходимо использовать лазер в качестве осветителя. Также необходимо учитывать возможную неравномерность пластинки по толщине.

Амплитудный стеклянный светофильтр

Интерференция наблюдается между отраженными от границ масло-воздух и стекло-масло лучами. Прощедшее внутрь излучение почти полностью поглощается. Отличная видимость полос (рис. 5-6), что позволяет увидеть, где заканчивается область линейного профиля (рис. 7).

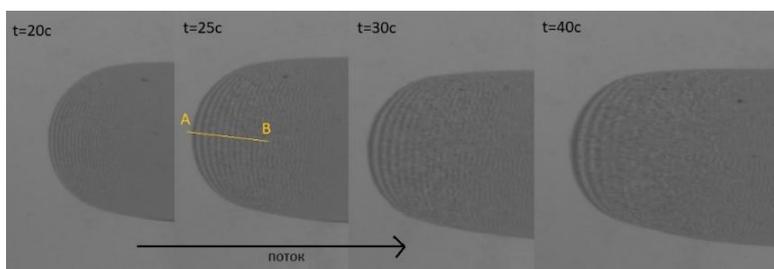


Рис. 5. Эволюция интерференционной картины в капле на стеклянной пластине в воздушном потоке, кадры соответствуют времени: 20 с, 25 с, 30 с, 40 с; поток направлен слева направо

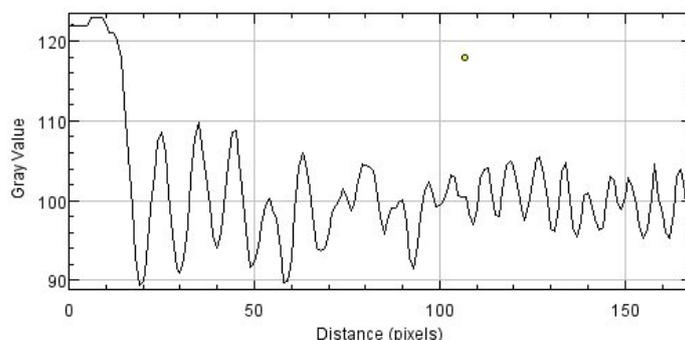


Рис. 6. Распределение интенсивности по оси капли в момент времени 25 с

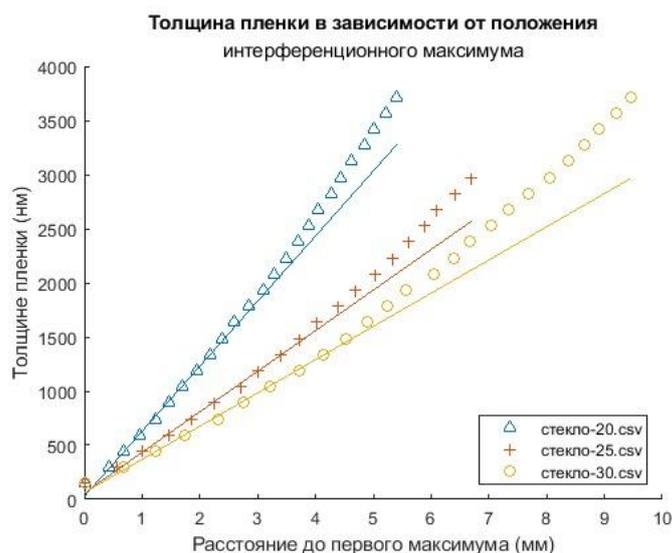


Рис. 7. Зависимость толщины пленки от расстояния до её кромки при растекании на амплитудном светофильтре
Полированная сталь

Из-за большого коэффициента отражения от стали интенсивность в минимумах ненулевая, однако полосы все равно видны достаточно хорошо (рис. 8).

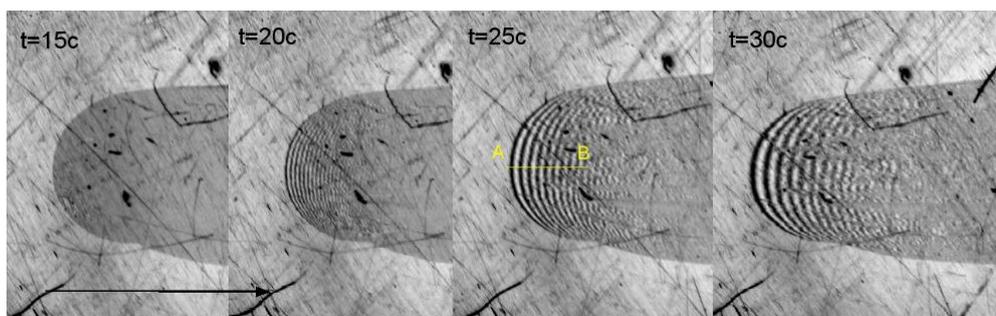


Рис. 8. Эволюция интерференционной картины в капле на стальной пластине в воздушном потоке, кадры соответствуют времени: 15 с, 20 с, 25 с, 30 с; поток направлен слева направо

На следующем графике (рис.9) изображено, как меняется значение яркости пикселей на прямой АВ. Видно, что отчетливо различаются 7-8 максимумов.

Если взять положения этих максимумов и построить их относительно порядка максимума, то для точек времени 20, 25, 30 с получатся графики, приведенные на рис. 10. Понятно, что мы наблюдаем полосы равной ширины на участках, где график описывается прямой: для времени 20 с это промежуток между 2-м и 14-м максимумами, для 25 и 30 – между 2-м и 8-м. На этих участках капля принимает клиновидную форму.

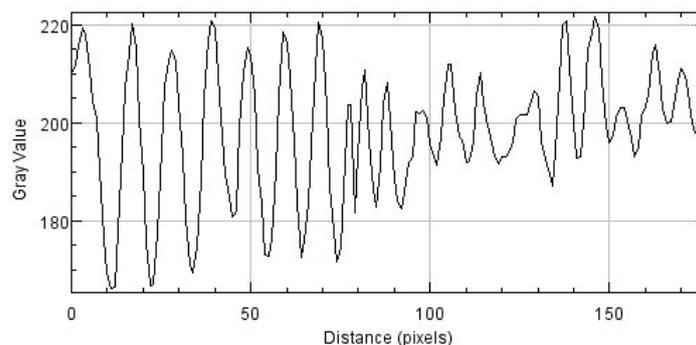


Рис. 4. Распределение интенсивности по прямой АВ

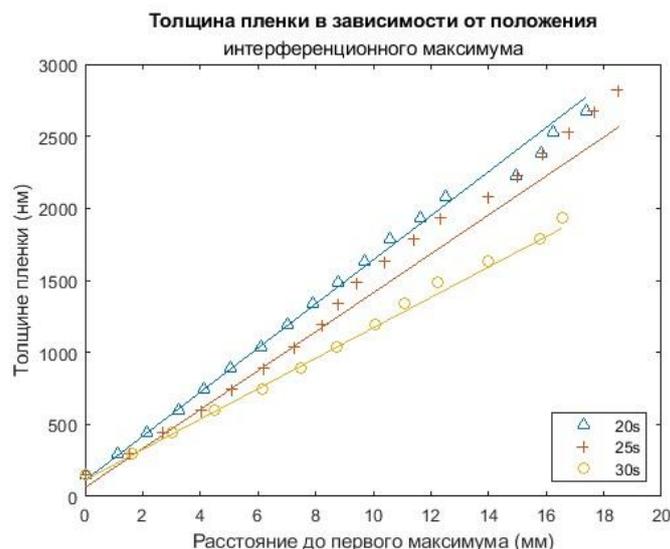


Рис. 10. Толщина пленки в зависимости от расстояния до первого максимума освещенности. Прямые посчитаны с помощью МНК, по данным о положениях 2-8 пиков

Засвеченная фотопленка

Неожиданно хорошая видимость полос (рис.11), однако материал легко плавится, вдобавок есть проблемы в технологии её закрепления на поверхности.

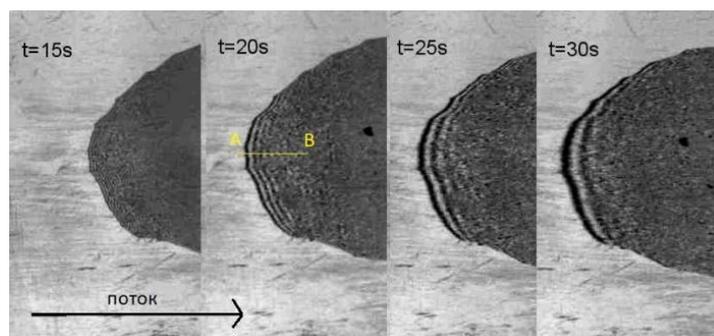


Рис. 11. Эволюция интерференционной картины в капле на фотопленке, наклеенной на гетинакс, в воздушном потоке, кадры соответствуют времени: 15с, 20с, 25с, 30с; поток направлен слева направо

Регистрация интерференции

Для регистрации процесса используется камера TUCSEA DHYANA 2100 sCMOS camera с разрешением 5120×4096, оборудованная светосильным объективом ZENIT 1,2/50s со встроенной диафрагмой от 22 до 1,2 и минимальным расстоянием фокусировки 0,45 м. Для выделения узкой полосы спектра перед объективом располагается интерференционный фильтр SL 443\16 для длины волны в 443 нм.

Эксперимент проводился следующим образом: Капля масла с помощью иглы наносилась на поверхность подложки, выжидалось некоторое время, чтобы капля успела растечься по поверхности. Затем с помощью компрессора создавался поток воздуха, параллельный пластине. Деформация капли регистрировалась в серию кадров, снятых через промежуток в 1 с.

Чтобы определить количество пикселей на миллиметр была сфотографирована линейка (рис. 12).

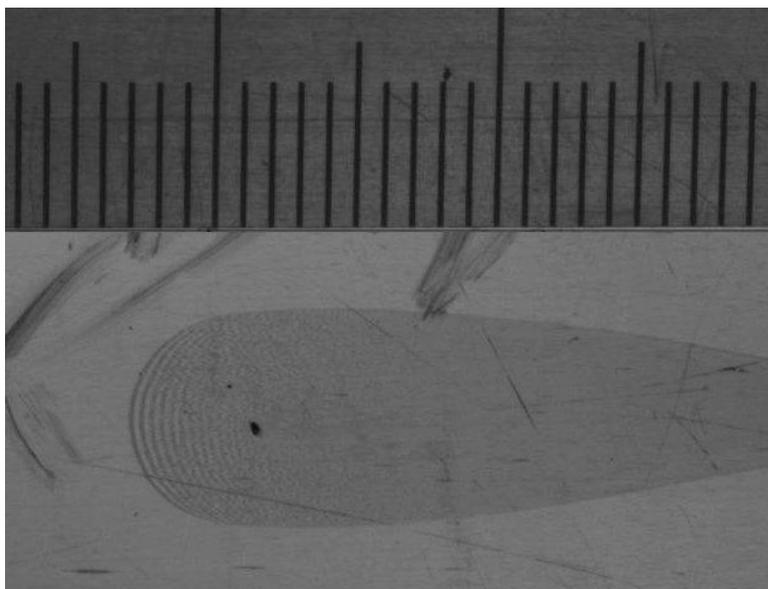


Рис.12. Миллиметровая линейка, снята на рабочую камеру с расстояния 45 см

Среднее расстояние между соседними миллиметровыми делениями составило 22,5 пикселей.

ВЫВОДЫ

Для обеспечения работ по исследованию пограничного слоя были выполнены работы по оптическому определению напряжения поверхностного трения.

На данном этапе работы была определена оптимальные условия эксперимента для его последующего проведения в аэродинамической трубе. Для возможности наблюдения интерференции в каплях на криволинейных поверхностях была выбрана схема с рассеянным источником света. Для этого были проанализированы возможные типы рабочих поверхностей под масло.

Выявлено, что наиболее четкие картины интерференции можно получить при следующих условиях:

- 1) Рабочая поверхность – полированная сталь;
- 2) Источник освещения протяженный некогерентный;

Поскольку основные исследования погранслоя планируется проводить с помощью термоанемометра, то поверхность должна быть термостойкой.

В настоящее время готовится эксперимент в дозвуковой аэродинамической трубе – эталоне скорости воздушного потока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 111 с.
2. Tanner L.H., Blows L.G. A study of the motion of oil films on surfaces in air flow, with application to the measurement of skin friction// J. Physics E: Scientific Instruments. 1976. Vol. 9, №. 3. Pp. 194-202.
3. Squire L.C. The motion of a thin oil sheet under the steady boundary layer on a body // J. Fluid Mech. 1961. Vol. 11, part 2. Pp. 161-179.
4. Naughton, J.W.; and Brown, J.L. Uncertainty analysis for oil-film interferometry skin-friction measurement techniques // ASME Paper FEDSM 97- 3475, 1997. ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, FEDSM97, June 22-26. P. 199.
5. ГОСТ 13032-77 Жидкости полиметилсилоксановые. Технические условия

6. **Бойко В.М., Оришич А.М., Павлов А.А., Пикалов В.В.** Методы оптической диагностики в аэрофизическом эксперименте: Монография / Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича. Новосибирск: НГУ, 2009. 450 с.
7. **Zilliac G.G.** Further developments of the fringe-imaging skin friction technique // NASA TM 110425, NASA Ames Research Center, Moffett Field, California, 1996. 38 p.
8. **Segalini A., Rüedi J.-D., Monkewitz P.** Systematic errors of skin-friction measurements by oil-film interferometry // Journal of Fluid Mechanics. 2015. Vol. 773. Pp. 298-326. 10.1017/jfm.2015.237.

Mogorychnaya A.V.

*Federal Autonomous Institution "Central Aerohydrodynamic Institute
named after Professor N.E. Zhukovsky", (FAU TsAGI)
140181, Zhukovsky, Moscow region, Zhukovsky St., 1
E-mail: anna.mogoruchnaya@phystech.edu*

FRINGE IMAGING TECHNIQUE FOR MEASURING SKIN-FRICTION ON A PLANE SURFACE

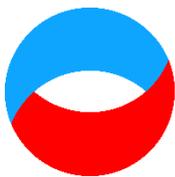
ABSTRACT

This paper concerns itself with fringe imaging skin-friction (FISF) technique – an optical method of measuring skin friction based on interference in oil films, here in the case of a plane surface. The focus is on choosing the following components of experimental set-up: lights source, surface material, camera parameters. Fringe visibilities on several common materials are compared, the profile of an oil drop near the leading edge is experimentally proved to take a wedge shape.

SKIN-FRICTION, MEASUREMENT, INTERFEROMETRY, OIL FILM, SET-UP

Секция 2

Теневые и рефрактометрические методы



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 53.082.532:004.932

Винниченко Н.А., Пуштаев А.В., Руденко Ю.К.

*Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Россия,
119991, Москва, Ленинские горы, 1/2, E-mail: nickvinn@yandex.ru*

**УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕНЕВОГО ФОНОВОГО МЕТОДА С
ПЕРИОДИЧЕСКИМ ЦВЕТНЫМ ФОНОМ И ОПРЕДЕЛЕНИЕМ СМЕЩЕНИЯ
МЕТОДОМ СДВИГА ФАЗЫ**

АННОТАЦИЯ

В работе рассмотрен новый вариант теневого фонового метода с периодическим цветным фоном и определением поля смещения с помощью метода сдвига фазы. Он позволяет получать достоверные результаты при измерении нестационарных течений, содержащих области сильной рефракции с градиентом смещения более 1 пикс/пикс, такие как фронты ударных волн или тонкие тепловые и концентрационные пограничные слои. Рассмотрены погрешности, связанные со смешением цветных каналов изображения, нелинейной аппаратной функцией фотокамеры и случайным шумом матрицы. Предложены способы коррекции этих погрешностей без потери пространственного разрешения метода и скорости обработки изображений. Эффективность предложенных улучшений подтверждена с помощью синтетических изображений с известным полем смещения. Проведен реальный эксперимент для диффузионного слоя в системе вода-глицерин. Сравнение полученных результатов с численным моделированием показало высокую точность предложенного метода.

ТЕНЕВОЙ ФОНОВЫЙ МЕТОД, ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ, МЕТОД СДВИГА ФАЗЫ

ВВЕДЕНИЕ

Благодаря простоте экспериментальной реализации и возможности получения количественных результатов с хорошим пространственным разрешением, теневой фоновый метод (ТФМ) [1, 2] все чаще применяется для измерения различных течений прозрачных сред, в которых из-за пространственных изменений температуры, плотности или концентрации компонент наблюдается рефракция. Для измерений требуются только фотокамера, освещенный фоновый экран и исследуемый объект. Камера фотографирует фон через исследуемое течение. Из-за рефракции детали фона в полученных рабочих снимках оказываются смещены по сравнению с опорным снимком, сделанным в отсутствие градиентов показателя преломления. Найдя векторное поле смещения с помощью компьютерной обработки изображений, можно восстановить мгновенное поле показателя преломления, усредненное вдоль пути луча, из полей его первых пространственных производных и опорного значения, заданного в какой-то точке или на одной из границ области измерения. Затем, в зависимости от исследуемой среды и характера течения, из поля показателя преломления можно определить поля плотности, температуры или концентрации, если рассматривается многокомпонентная среда.

Кросскорреляционная обработка изображений, заимствованная из метода цифровой трассерной визуализации, при использовании фонов из случайно расположенных пятен размером 2-3 пикс позволяет находить поля смещения с точностью 0,1-0,2 пикс. Однако из-за конечного размера области опроса, в которой должно находиться хотя бы 5-7 пятен, кросскорреляционный метод разрешает возмущения с длиной волны не менее 20-25 пикс. Более того, при наличии в течении зон с резким перепадом показателя преломления (ударные волны, тонкие тепловые или концентрационные пограничные слои) кросскорреляция, как правило, заметно занижает пиковое значение смещения. Это связано как с различным смещением соседних пятен, так и с деформацией изображения каждого пятна из-за того, что лучи от него, попадающие в объектив камеры, проходят через участки течения с различным градиентом показателя преломления и испытывают различное преломление. В результате при градиенте смещения более 0,4 пикс/пикс заметно занижается перепад показателя преломления при переходе через такую зону. Это ограничивает возможности проведения количественных измерений ТФМ, особенно в жидкостях (где изменения показателя преломления заметно больше, чем в газах) и в течениях, содержащих ударные волны.

В лабораторных условиях возможно использование специальных фоновых экранов и методов определения смещения, адаптированных к конкретному типу изображений. В частности, можно использовать периодические фоны, для которых смещение пропорционально разности фаз полос в рабочем и опорном снимках. Недавно в ТФМ были применены два таких метода – фурье-профилометрия и метод сдвига фазы с цветным фоном (Color Phase-Shifting Profilometry, CPSP [3]). Было показано, что они превосходят кросскорреляционный метод и методы оптического потока по пространственному разрешению и позволяют получать точные результаты в зонах с большим градиентом смещения – до 0,8-0,9 пикс/пикс для фурье-профилометрии и по крайней мере до 8 пикс/пикс для метода сдвига фазы с цветным фоном с периодом 50 пикс и более. В настоящей работе кратко описан метод CPSP и предложены его улучшения, касающиеся учета смещения цветных каналов, коррекции нелинейной аппаратной функции фотокамеры и снижения погрешности, связанной с шумом матрицы фотокамеры.

МЕТОД СДВИГА ФАЗЫ С ЦВЕТНЫМ ФОНОМ

Этот метод давно и успешно применяется в интерферометрии и при измерении трехмерной формы предметов [4]. Обычно используют фон, состоящий из параллельных полос с синусоидальным профилем яркости, позволяющий измерять только смещение поперек полосы. В ТФМ желательно измерять обе компоненты смещения, поэтому используется двумерный фон

$$I(x, y) = A + B \left(\cos \left(\frac{2\pi x}{\lambda_{\text{фон}}} \right) + \cos \left(\frac{2\pi y}{\lambda_{\text{фон}}} \right) \right). \quad (1)$$

Смещение элементов фона приводит к изменению фазы полос в рабочем снимке, которое связано со смещением ξ соотношением

$$\xi_i = -\frac{\lambda_{\text{фон}}}{2\pi} \Delta\varphi_i, \quad i = x, y. \quad (2)$$

В классическом многокадровом варианте метода сдвига фазы распределение фазы полос определяется из значений яркости каждого пиксела в $N \geq 3$ изображениях фона, сдвинутых по фазе на $2\pi/N$. Таким образом, для измерения обеих компонент смещения в ТФМ необходимо сделать минимум 6 опорных и 6 рабочих снимков. Фон при этом создается с помощью компьютерного монитора или проектора, распределение показателя преломления в исследуемом объекте должно оставаться неизменным в ходе съемки рабочих снимков.

Поскольку это возможно только при измерениях квазистационарных течений, в [3] был применен цветной вариант метода (CPSP), предложенный в [5]. В нем используется цветной фон, каналы которого составляют три серых изображения (1), сдвинутых по обеим осям на $2\pi/3$. Горизонтальные и вертикальные полосы каждого цвета разделяются при помощи фильтрации спектра Фурье (рис. 1). Это позволяет извлекать необходимые 6 изображений полос из одного снимка и проводить измерения нестационарных течений, используя статичный фон, напечатанный на бумаге или прозрачной пленке.

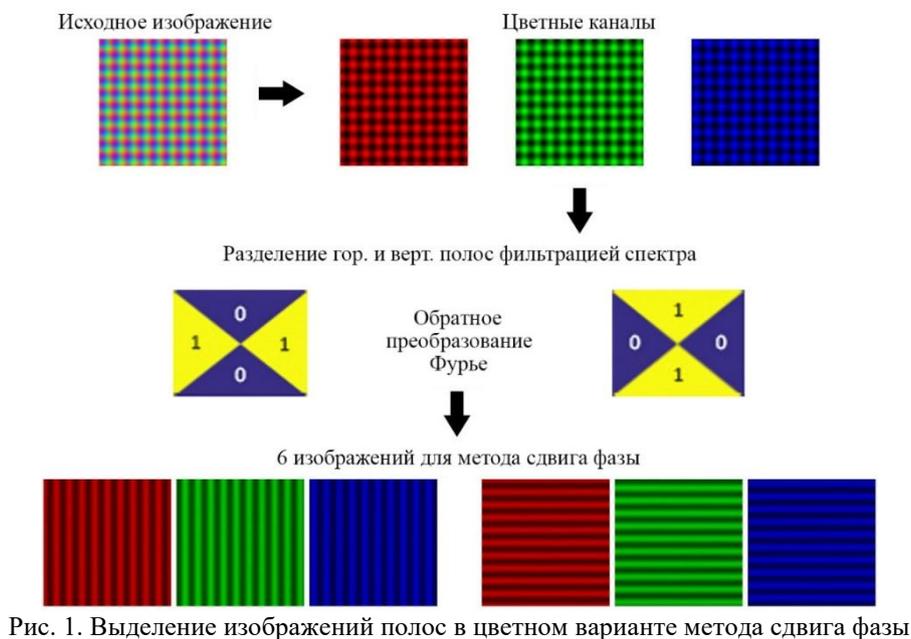


Рис. 1. Выделение изображений полос в цветном варианте метода сдвига фазы

Яркость изображений вертикальных полос описывается уравнениями

$$I_{n \text{ верт}}(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos\left(\varphi_x(x, y) - \frac{2\pi n}{N}\right), \quad n = 0..N - 1. \quad (3)$$

Фаза полос, как для опорного, так и для рабочих снимков, определяется решением этой системы уравнений

$$\varphi_x(x, y) = \arctg\left(\frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_{n \text{ верт}}(x, y) \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right)}{\sum_{n=0}^{N-1} I_{n \text{ верт}}(x, y) \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right)}\right). \quad (4)$$

При этом определяется свернутая фаза, заключенная в интервале от $-\pi$ до π . Если максимальное смещение превышает половину периода фона, для определения смещения с помощью (2) необходима развертка разности фаз между рабочим и опорным снимками. В настоящей работе используется пространственная развертка фазы [6], основанная на быстром преобразовании Фурье. Из развернутой разности фаз вертикальных полос определяется горизонтальное смещение. Аналогично из развернутой разности фаз горизонтальных полос определяется вертикальное смещение. За исключением развертки фазы, остальные вычисления выполняются отдельно для каждого пиксела, без использования информации из соседних пикселов. Этим обусловлены особые свойства метода сдвига фазы – способность разрешать возмущения с длиной волны не менее 6 пикс и достоверность в зонах с градиентом смещения, существенно превышающим 1 пикс/пикс [3]. Основным недостатком метода сдвига фазы является высокая случайная погрешность, связанная с шумом матрицы фотокамеры. Погрешность фазы пропорциональна отношению шума матрицы к контрасту полос b [4] и не зависит от периода фона, поэтому погрешность смещения растет пропорционально периоду

фона. Однако развертка фазы, необходимая для измерения смещений, превышающих половину периода фона, лучше работает при большом периоде фона. Оптимальный период фона для CPSP лежит в диапазоне от 30 до 100 пикс.

ПРЕДЛОЖЕННЫЕ УЛУЧШЕНИЯ

Поскольку метод сдвига фазы предполагает, что яркость полос описывается уравнениями (3), отличия реальных изображений от этой модели приводят к погрешностям определения фазы и смещения, требующим коррекции. Во-первых, цветные каналы изображения, снятого фотокамерой, могут иметь различную яркость и контраст. Их спектры перекрываются, что приводит к смешению изображений, заданных в соседних каналах, и к уменьшению эффективных сдвигов по фазе по сравнению с исходно заданным сдвигом $2\pi/3$. В [3] для нормировки яркости и контраста разных цветных каналов использовалась процедура, предложенная в [7]. Для учета смешения цветных каналов был применен вариант метода сдвига фазы [8], позволяющий находить распределение фазы при произвольных значениях сдвигов между изображениями. Величины сдвигов при этом определялись с помощью фурье-профилометрии каналов опорного снимка. Эта процедура устраняет погрешность, связанную со смешением цветных каналов, но приводит к увеличению времени обработки пары снимков примерно в 9 раз из-за необходимости решения системы трех линейных уравнений для каждого пиксела снимка. В настоящей работе вместо этого применен метод, предложенный в [9]. Он основан на известном факте, что линейная комбинация синусоид с одной частотой, но с разными фазами и амплитудами также является синусоидой с этой частотой. Предполагая, что изображение содержит число периодов полос, достаточное для того, чтобы среднее от косинуса фазы было близко к нулю, а среднее от квадрата косинуса фазы было близко к $1/2$, можно построить из распределений яркости в цветных каналах изображения и их средних значений выражение для фазы полос, не зависящее от сдвигов фазы между каналами. При этом устраняется погрешность, связанная со смешением цветных каналов, а время определения фазы снижается в 20-30 раз по сравнению с методом [8]. Полное время обработки пары снимков ненамного превышает значение для стандартного метода сдвига фазы (4).

Во-вторых, аппаратная функция системы фон-камера нелинейна, т.е. если при печати фона задано синусоидальное распределение яркости, спектр изображения, снятого камерой, будет содержать также кратные гармоники и перекрестный член, пропорциональный произведению косинусов по x и y . У каждого цветного канала своя калибровочная функция, поэтому коррекция нелинейности (так называемая гамма-коррекция) с помощью калибровочных изображений требует съемки большого числа изображений с различной интенсивностью всех трех цветов, что возможно при создании фона с помощью монитора или проектора, но не при использовании статичного напечатанного фона. Поэтому в настоящей работе предложен метод коррекции нелинейности по опорному снимку. Он заключается в аппроксимации всего распределения яркости в каждом канале опорного снимка функцией

$$I(x, y) = c_1 + c_2 I'(x, y) + c_3 (I'(x, y))^2, \quad (5)$$

где

$$I'(x, y) = \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda_{\text{фон}}} + \varphi_{0x}\right) + \cos\left(\frac{2\pi y}{\lambda_{\text{фон}}} + \varphi_{0y}\right). \quad (6)$$

При этом период фона определяется с помощью двумерного преобразования Фурье, а коэффициенты c_1 , c_2 , c_3 и начальные фазы являются параметрами аппроксимации. Для коррекции нелинейности в каждом канале каждого изображения сначала определяется неискаженная яркость (6) (как положительный корень квадратного уравнения (5)), затем изображение нормируется до заданной яркости и контраста. Расчет аппроксимации по

формулам (5), (6) выполняется только для опорного снимка, поэтому общее время обработки серии с большим числом рабочих снимков увеличивается незначительно.

В-третьих, как уже упоминалось, основным недостатком метода сдвига фазы является большая погрешность, связанная с шумом матрицы камеры. В [3] было показано, что применение двумерного фильтра нижних частот к исходным изображениям, хотя и подавляет шум, существенно ухудшает как пространственное разрешение, так и достоверность результатов в зонах с большим градиентом смещения. В настоящей работе предлагается использовать фильтр нижних частот или другой сглаживающий фильтр, но только одномерный, и применять его отдельно к уже разделенным изображениям горизонтальных и вертикальных полос для сглаживания вдоль полосы. Как показано ниже, такой фильтр не ухудшает точность измерения резких изменений смещения $\xi_x(x)$ или $\xi_y(y)$, которые часто встречаются в ТФМ. Однако он влияет на способность метода измерять резкие изменения смещения в перпендикулярном направлении, т.е. $\xi_x(y)$ или $\xi_y(x)$. Большие градиенты смещения, перпендикулярные смещению, чаще встречаются при измерениях поля скорости методом цифровой трассерной визуализации, чем в ТФМ. Тем не менее, этот вопрос анализируется в следующем разделе. С ним связана еще одна модификация метода сдвига фазы по сравнению с [3] – изменение фильтров для разделения изображений горизонтальных и вертикальных полос. Границы треугольных областей фильтров, показанных на рис. 1 (“галстук-бабочка” для вертикальных полос и “песочные часы” для горизонтальных полос), могут проводиться не под 45° , а под любым заданным углом α к горизонтали. Например, на рис. 2 показаны спектры рабочих снимков с фильтром, предназначенным для измерения резких изменений $\xi_x(y)$.

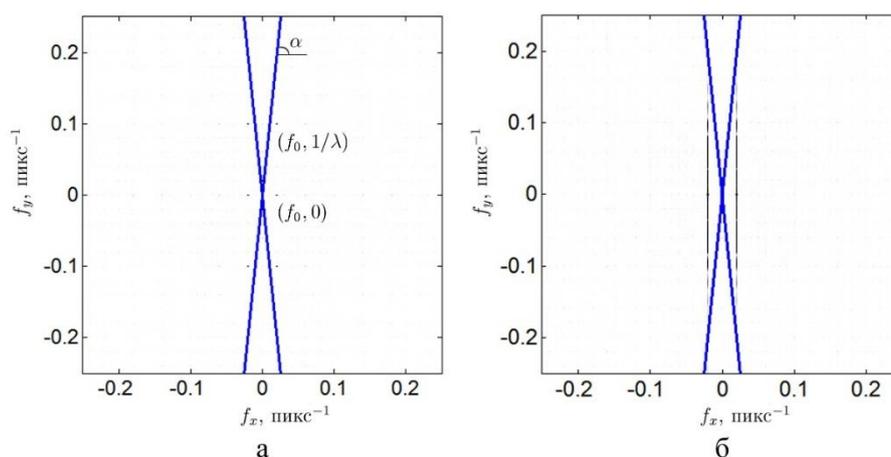


Рис. 2. Спектры рабочих снимков для метода сдвига фазы с фоном с периодом 50 пикс:
а – синусоидальное распределение смещения $\xi_x(y)$ с амплитудой 2 пикс и длиной волны $\lambda = 10$ пикс, б – поле смещения с градиентом $\partial\xi_x/\partial y = 3$ пикс/пикс. $f_0 = 1/\lambda_{\text{фон}}$, $\text{tg}(\alpha) = 10$

Пики в точках $(\pm f_0, 0)$, где $f_0 = 1/\lambda_{\text{фон}}$, соответствуют периоду невозмущенных вертикальных полос. Длина волны возмущения λ создает в спектре дополнительные пики в точках $(\pm f_0, \pm 1/\lambda)$, а градиент смещения $\partial\xi_x/\partial y$ приводит к уширению этих пиков по вертикали. Использование фильтра с $\text{tg}(\alpha) > 1$ позволяет сохранить спектр сигнала внутри области фильтра для вертикальных полос. При этом уменьшается область фильтра для горизонтальных полос и ухудшается возможность измерения резких изменений $\xi_y(x)$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВ С СИНТЕТИЧЕСКИМИ ИЗОБРАЖЕНИЯМИ

Для определения точности, пространственного разрешения и достоверности результатов в зонах с большими градиентами смещения, как и в [3], проводились тесты с синтетическими изображениями с заданными полями смещения разных типов: постоянным смещением, синусоидальным смещением $\xi_x = A \cdot \sin(2\pi x/\lambda)$, треугольным профилем смещения, имитирующим тонкий слой с большим градиентом смещения. Также задавались

синусоидальные и треугольные профили смещения в направлении, перпендикулярном вектору смещения. В качестве мер погрешности использовались абсолютная и нормированная на $\sqrt{\langle \xi_x^2 \rangle}$ полная погрешность смещения, отношение интеграла от найденного смещения $\int \xi_x(x) dx$ к его точному значению (в случае треугольного профиля $\xi_x(x)$) и аналогичное отношение для интеграла $\int \xi_x(y) dy$ в случае треугольного профиля $\xi_x(y)$. Перепад показателя преломления при переходе через слой с большим градиентом смещения пропорционален интегралу $\int \xi_x(x) dx$, поэтому точность воспроизведения этого интеграла имеет огромную важность для ТФМ.

На рис. 3 показана погрешность метода сдвига фазы с цветным фоном при различной величине смещения соседних цветных каналов для расчетов по стандартному алгоритму (4) и при учете смещения каналов по методу [9]. Метод [9] эффективно устраняет погрешность, связанную со смещением каналов. Тем не менее, полная погрешность растет с увеличением процента смещения из-за уменьшения контраста изображения. Метод [8] дает неотличимые результаты, но требует значительно большего времени на обработку изображений. Следует отметить, что при перекрытии соседних каналов на треть контраст зеленого канала обращается в ноль и измерение смещения становится невозможным. Методы [8] и [9] дают правильные значения смещения и при большем проценте смещения каналов, когда контраст зеленого канала снова становится ненулевым.

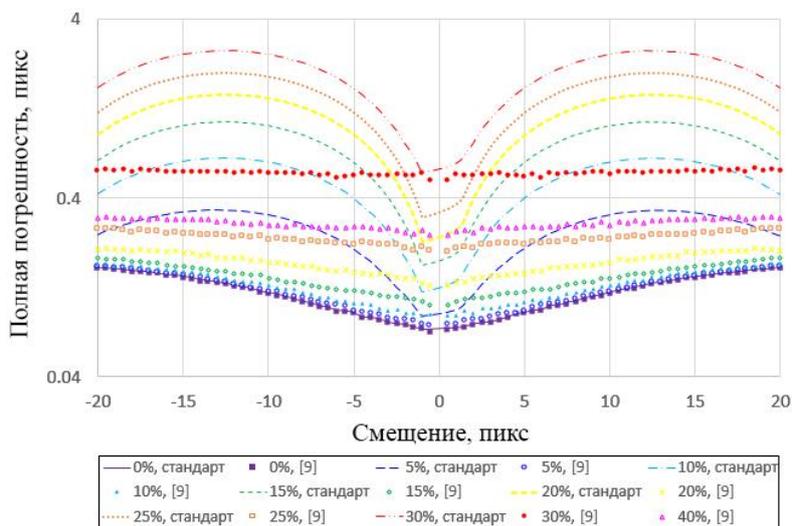


Рис. 3. Погрешность CPSP, связанная со смещением цветных каналов. Тесты с постоянным смещением, период фона 50 пикс

В тестах погрешности CPSP, связанной с нелинейностью аппаратной функции системы фон-камера, синтетические 8-битные изображения дополнительно искажались преобразованием

$$f(I) = 10 + 0,4I + kI^2. \quad (7)$$

Величина коэффициента k варьировалась от $-5 \cdot 10^{-4}$ до $1,5 \cdot 10^{-3}$, поскольку экспериментальные измерения с фоном, напечатанным на бэклите, показали, что для разных цветных каналов возможны калибровочные функции как с положительной второй производной, так и с отрицательной. Результаты показаны на рис. 4. Погрешность, обусловленная нелинейностью аппаратной функции, может составлять от 0,5 до 2 пикс. Предложенная коррекция с помощью параболической аппроксимации (5) позволяет уменьшить ее в несколько раз. Остаточная погрешность для отрицательной величины k больше, чем для положительной, из-за меньшего контраста изображения.

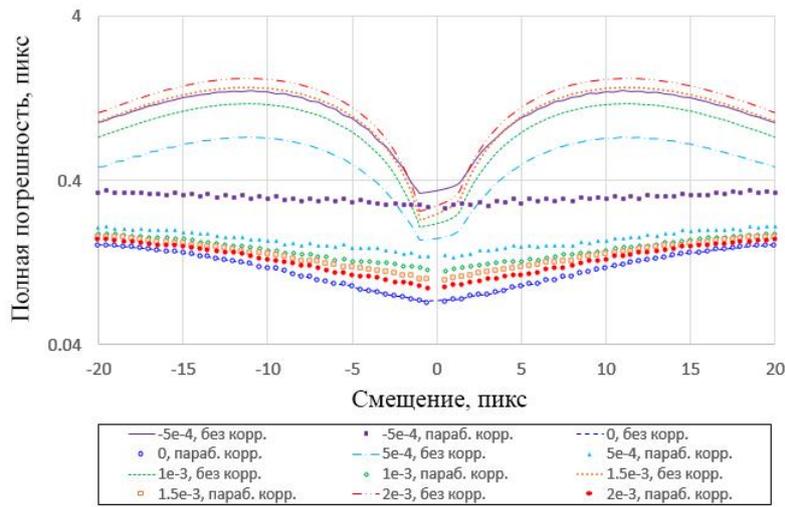


Рис. 4. Погрешность CPSP, связанная с нелинейностью аппаратной функции. Тесты с постоянным смещением, период фона 50 пикс

Для проверки эффективности подавления шумов CPSP одномерным фильтром нижних частот к синтетическим изображениям с синусоидальным распределением смещения добавлялся случайный шум со стандартным отклонением, пропорциональным корню из локальной нормированной яркости (модель дробного шума). Тесты были проведены для уровня шума от 0 до $0,1 \cdot 255 \cdot \sqrt{I/255}$. Тесты с профилем смещения $\xi_x = A \cdot \sin(2\pi x/\lambda)$, результаты которых представлены на рис. 5, показывают, что фильтр, даже с пороговой частотой, соответствующей длине волны 50 пикс, не приводит к ухудшению пространственного разрешения.

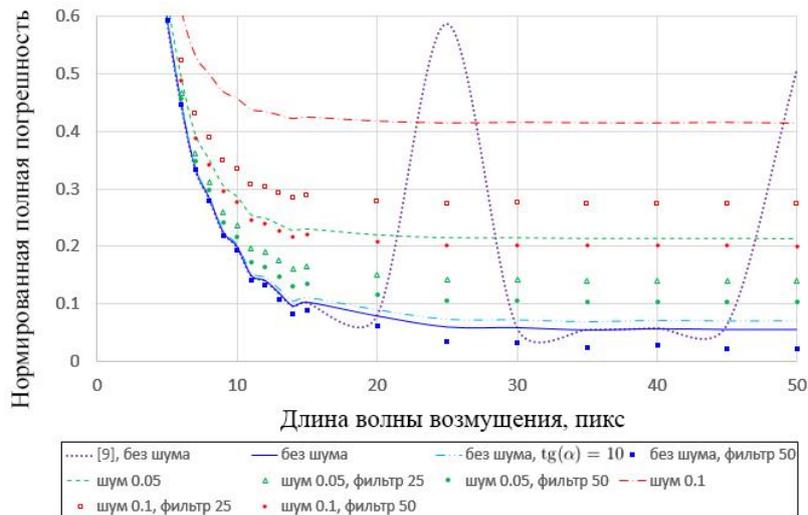


Рис. 5. Результаты тестов с синусоидальным профилем смещения $\xi_x = A \cdot \sin(2\pi x/\lambda)$. $A = 2$ пикс

Большинство представленных результатов были получены с определением фазы по стандартному алгоритму (4) с разделением горизонтальных и вертикальных полос фильтром с $\alpha = 45^\circ$. Применение фильтра с $\text{tg}(\alpha) = 10$ не приводит к заметному изменению результатов, поскольку для смещения $\xi_x(x)$ расширение пика в спектре происходит вдоль оси x . Кривая, полученная для учета смещения цветных каналов по методу [9], демонстрирует рост погрешности вблизи резонансных длин волн 25 и 50 пикс. При этих длинах волн, а также при длинах волн, кратных периоду фона 50 пикс, нарушаются предположения, что среднее от косинуса фазы близко к нулю (при $\lambda = 50$ пикс и при кратных) и что среднее от квадрата косинуса фазы близко к 1/2 (при $\lambda = 25$ пикс). В более сложных полях смещения, измеряемых в реальных экспериментах, эти предположения выполняются при условии, что снимок содержит достаточное число периодов фона.

Тесты с синусоидальным распределением смещения $\xi_x(y)$ показали, что из-за расширения спектра вдоль оси y (см. рис. 2) разделение горизонтальных и вертикальных полос отсекает все длины волн возмущения, меньшие, чем $\lambda_{\text{фон}}/\text{tg}(\alpha)$. В результате CPSP с периодом фона 50 пикс и $\text{tg}(\alpha) = 1$ не разрешает возмущения $\xi_x(y)$ с длиной волны менее 50 пикс (хотя разрешает возмущения $\xi_x(x)$ с длиной волны 6 пикс). Возможное наличие мелкой структуры поля смещения в направлении, перпендикулярном основной компоненте смещения, следует учитывать при определении фильтра для разделения горизонтальных и вертикальных полос. Что касается влияния сглаживающего фильтра на пространственное разрешение в перпендикулярном направлении, то применение фильтра с пороговой частотой, соответствующей определенной длине волны $\lambda_{\text{фильтр}}$, отсекает все длины волн возмущения $\xi_x(y)$, меньшие этой длины волны. Это ограничивает возможность подавления шума. Заведомо можно использовать фильтр с $\lambda_{\text{фильтр}} = \lambda_{\text{фон}}/\text{tg}(\alpha)$, поскольку меньшие длины волн в любом случае отсекаются фильтром разделения горизонтальных и вертикальных полос. Тесты с треугольным профилем смещения $\xi_x(y)$ показывают, что понижение пороговой частоты фильтра приводит к понижению предельного достоверно измеримого градиента смещения $\partial\xi_x/\partial y$ приблизительно до $\lambda_{\text{фон}}/\lambda_{\text{фильтр}}$.

РЕАЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ: ДИФФУЗИЯ В СИСТЕМЕ ВОДА-ГЛИЦЕРИН

На рис. 6 представлены результаты, полученные при измерении диффузии в системе вода-глицерин с помощью метода сдвига фазы с цветным фоном. Эксперимент проводился в прямоугольной стеклянной кювете размером 100x100x13 мм. С помощью трубки, опущенной на дно кюветы, под слой дистиллированной воды был залит слой глицерина, что позволило создать резкую границу между жидкостями. Период фона 48 пикс, расстояние от фона до кюветы 11 мм. Экспериментальная установка и численное моделирование, выполненное для сравнения с результатами ТФМ, подробно описаны в [3]. Поле показателя преломления было определено с помощью решения уравнения Пуассона с опорным значением для воды, заданным на верхней границе области измерения. Таким образом, достоверность измерений можно проверить по полученному значению массовой доли глицерина на нижней границе. Результаты, показанные на рис. 6, были получены при обработке рабочего снимка, сделанного через 35 минут после начала диффузии, с учетом смещения цветных каналов по методу [9]. Поскольку исследуемое распределение показателя преломления близко к одномерному, разделение горизонтальных и вертикальных полос осуществлялось с помощью фильтра с $\text{tg}(\alpha) = 1$, для подавления шума использовались одномерные фильтры нижних частот с пороговой длиной волны до 400 пикс. Результаты, представленные на рис. 6б-е, получены для фильтра с $\lambda_{\text{фильтр}} = 400$ пикс. Видно, что сильное сглаживание вдоль полос фона не препятствует точному измерению градиента смещения, достигающего почти 8 пикс/пикс. Наблюдается хорошее согласие с результатами численного моделирования. Хорошо заметна асимметрия пика вертикального смещения, связанная с уменьшением коэффициента диффузии с ростом концентрации глицерина. Полученное максимальное смещение около 290 пикс демонстрирует возможность измерения больших смещений при использовании пространственной развертки фазы. На вкладке к рис. 6ж показаны фрагменты вертикальных профилей смещения при $x = 3$ см, полученных при использовании различных вариантов алгоритма и фильтров подавления шума. Как следует из рис. 3 и 4, погрешности, связанные со смещением цветных каналов и нелинейностью аппаратной функции камеры, сравнительно невелики. Тем не менее, учет смещения цветных каналов по методу [9] позволяет уменьшить амплитуду периодических осцилляций смещения, наблюдающихся при использовании классического алгоритма (4). Еще сильнее нефизические осцилляции подавляет фильтр нижних частот.

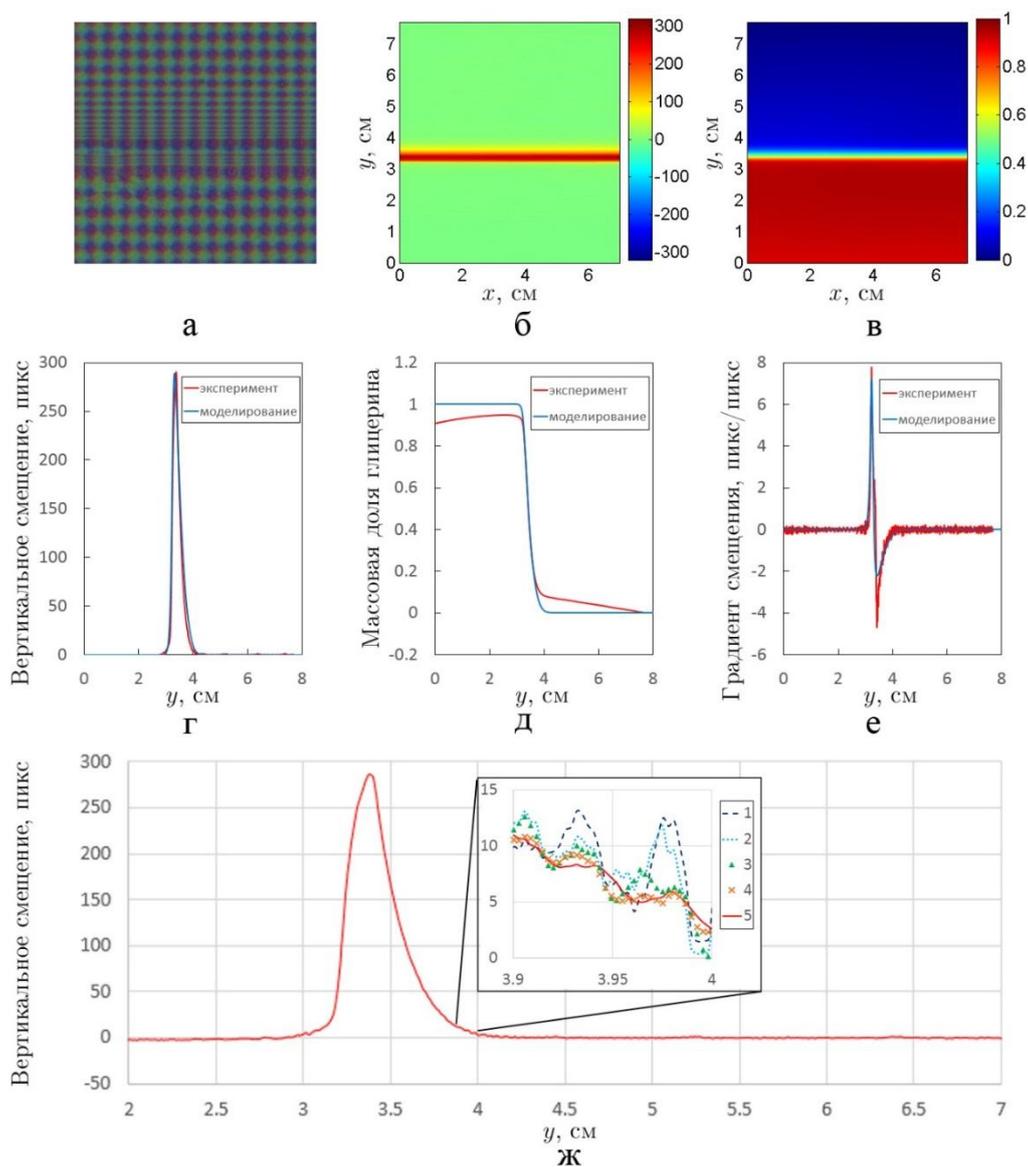


Рис. 6. Результаты измерений диффузионного слоя в системе вода-глицерин с помощью метода сдвига фазы с цветным фоном:

а – фрагмент рабочего снимка, б – поле вертикального смещения (пикс), в – поле массовой доли глицерина, г-е – вертикальные профили вертикального смещения, массовой доли глицерина и градиента смещения, усредненные по полосе $x = 1-6$ см, ж – локальный вертикальный профиль вертикального смещения при $x = 3$ см и сравнение шума при использовании разных параметров обработки. Кривые на вкладке получены: 1 – по алгоритму (4) без фильтрации шумов, 2 – с учетом смещения цветных каналов по методу [9] без фильтрации шумов, 3-5 – по методу [9] с фильтром с $\lambda_{\text{фильтр}} = 50$ пикс, 100 пикс и 400 пикс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе описан новый вариант теневого фонового метода с определением смещения методом сдвига фазы. В нем используется периодический фон и смещение определяется по разности фаз полос в рабочем и опорном снимках. Соответственно, если максимальное смещение превышает половину периода фона, возникает неоднозначность, разрешимая с помощью алгоритмов пространственной развертки фазы. Метод сдвига фазы является многокадровым методом, однако минимальный набор из трех сдвинутых по фазе серых изображений может быть представлен в виде одного цветного изображения. Это позволяет проводить измерения нестационарных течений, используя статичный фон. Данный метод значительно превосходит кросскорреляционную обработку с точки зрения минимальной разрешимой длины волны возмущения и максимального измеримого градиента смещения. При использовании фона с периодом 50 пикс и более разрешаются возмущения с

длиной волны не менее 6 пикс, а предельный градиент смещения составляет не менее 8 пикс/пикс. Основным недостатком метода сдвига фазы является высокая случайная погрешность смещения, связанная с шумом матрицы фотокамеры и пропорциональная периоду фона. Дополнительными источниками погрешности являются смешение цветных каналов и нелинейность аппаратной функции системы фон-камера. В работе предложены и протестированы процедуры, позволяющие уменьшить эти погрешности в несколько раз без съемки дополнительных калибровочных изображений. Проанализировано пространственное разрешение в направлении, перпендикулярном основной компоненте смещения. На примере измерений диффузионного слоя в системе вода-глицерин продемонстрирована возможность получать достоверные результаты при большой величине смещения и градиенте смещения, существенно превышающем 1 пикс/пикс. Также подтверждено, что подавление случайного шума с помощью одномерного фильтра нижних частот не приводит к ухудшению этих характеристик.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ им. М.В. Ломоносова и при поддержке Российского Научного Фонда (грант № 24-79-00137). Ю.К. Руденко также благодарит Фонд развития теоретической физики и математики «Базис» за персональную финансовую поддержку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Raffel M.** Background-oriented schlieren (BOS) techniques // *Exp. Fluids*. 2015. Vol. 56. № 3. Pp. 1-17.
2. **Vinnichenko N.A., Pushtaev A.V.** Measurements of strongly refracting objects using background oriented schlieren with different patterns and image processing techniques: a review // *J. Flow Vis. Image Process*. 2025. Vol. 32. № 2. Pp. 1-33.
3. **Vinnichenko N.A., Pushtaev A.V., Rudenko Yu.K., Plaksina Yu.Yu., Uvarov A.V.** Background-oriented schlieren with image processing based on phase-shifting profilometry // *Exp. Fluids*. 2025. Vol. 66. № 3. Pp. 1-18.
4. **Zuo C., Feng S., Huang L., Tao T., Yin W., Chen Q.** Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: a review // *Opt. Lasers Eng*. 2018. Vol. 109. Pp. 23-59.
5. **Trumper I., Choi H., Kim D.W.** Instantaneous phase shifting deflectometry // *Opt. Express*. 2016. Vol. 24. № 24. Pp. 27993-28007.
6. **Volkov V.V., Zhu Y.** Deterministic phase unwrapping in the presence of noise // *Opt. Lett*. 2003. Vol. 28. № 22. Pp. 2156-2158.
7. **Juarez-Salazar R., Robledo-Sanchez C., Guerrero-Sanchez F., Barcelata-Pinzon A., Gonzalez-Garcia J., Santiago-Alvarado A.** Intensity normalization of additive and multiplicative spatially multiplexed patterns with n encoded phases // *Opt. Lasers Eng*. 2016. Vol. 77. Pp. 225-229.
8. **Wang Z., Han B.** Advanced iterative algorithm for phase extraction of randomly phase-shifted interferograms // *Opt. Lett*. 2004. Vol. 29. № 14. Pp. 1671-1673.
9. **Ochoa N.A., Garcia-Isáis C.A.** Alternative interpretation of color phase-shifting profilometry and a self-contained method for fringe analysis // *Appl. Opt*. 2021. Vol. 60. № 4. Pp. 935-941.

Vinnichenko N.A., Pushtaev A.V., Rudenko Yu.K.

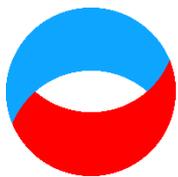
*M.V. Lomonosov Moscow State University, Russia,
119991, Moscow, Leninskiye Gory, 1/2, E-mail: nickvinn@yandex.ru*

**IMPROVEMENT OF PERFORMANCE FOR BACKGROUND ORIENTED SCHLIEREN
WITH PERIODIC COLOR PATTERN AND DISPLACEMENT DETERMINATION
USING PHASE-SHIFTING PROFILOMETRY**

ABSTRACT

We consider new variant of Background Oriented Schlieren technique with periodic color pattern and displacement determination using Phase-Shifting Profilometry. It allows reliable measurements of unsteady flows, which contain regions of strong refraction leading to displacement gradient above 1 pix/pix, such as shock fronts or thin thermal and diffusion boundary layers. Errors, related to the color cross-talk, nonlinear response of the camera and random noise of the sensor, are considered. Corrections are proposed, which do not sacrifice the spatial resolution of the technique or the image processing rate. The performance of the proposed improvements is confirmed using synthetic images with known displacement field. Real experiment is performed for diffusion layer in water-glycerol system. Comparison of the obtained results with numerical simulation demonstrates high accuracy of the proposed technique.

**BACKGROUND ORIENTED SCHLIEREN, IMAGE PROCESSING, PHASE-SHIFTING
PROFILOMETRY**



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 519.688

Назаров Н.А., Миськив Н.Б., Старинская Е.М.

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия,
630090, г. Новосибирск, ул. Лаврентьева, 1, E-mail: nazarov.nik.an@gmail.com*

**МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ИСПАРЯЮЩИХСЯ КАПЕЛЬ ПО ЦИФРОВЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ**

АННОТАЦИЯ

В настоящее время актуальными задачами являются исследования в области спреинового охлаждения, взаимодействия капель со сложноструктурированными поверхностями, испарения капель различных жидкостей с твёрдой стенки и т.п. При проведении такого рода экспериментов, требующих записи большого количества видеоданных, ключевую роль играют методы автоматической обработки цифровых изображений. Предложены методы распознавания капель жидкости на цифровом изображении для получения геометрических характеристик объекта в условиях не теневого эксперимента. Разработаны новые алгоритмы выделения и замыкания границ объектов в условиях недостаточной контрастности, с помощью которых выполнены измерения геометрических параметров испаряющихся капель. Проведены эксперименты по воссозданию трехмерной поверхности свисающих капель и капель на наклонной поверхности. Проведено сравнение с данными, полученными методом ручной обработки изображений, продемонстрированы условия применимости предложенных алгоритмов.

**ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ, ИСПАРЯЮЩИЕСЯ КАПЛИ, МЕТОД
ВЫПУКЛОЙ ОБОЛОЧКИ, РЕКОНСТРУКЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ**

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к изучению испарения капель на наклонных поверхностях обусловлен рядом практических применений, включая капельное охлаждение. Последнее считается одним из наиболее эффективных методов отвода тепла в теплонагруженных системах [1, 2, 3]. Главное преимущество этого метода заключается в использовании энергии, затрачиваемой на фазовый переход жидкости, что минимизирует расход хладагента и подготавливает поверхность для последующего сбора конденсата. В отличие от традиционных контурных систем, спреинное охлаждение требует простой инфраструктуры, что особенно важно при ограниченном пространстве или работе с малыми объемами жидкости.

В настоящее время одним из наиболее перспективных подходов для определения морфологии капель является компьютерный анализ их цифровых изображений, полученных современными оптическими методами визуализации. Этот подход позволяет получать статистически значимые данные о больших ансамблях капель за короткий срок. Однако на практике возникает целый ряд сложностей, связанных с недостаточным качеством изображений реальных полидисперсных систем, к которым можно отнести размытые контуры капель, их взаимные наложения и слияния, неравномерность освещения поля зрения,

отражения и блики на криволинейной поверхности капль, ограниченную разрешающую способность оптики и многое другое.

Зачастую определение формы капли при проведении экспериментов происходит теневым методом, основанным на регистрации цифровых изображений теней от освещенных капль с последующей компьютерной обработкой [4-7]. Однако этот метод не всегда применим и имеет ряд ограничений. В частности, теневой метод требует наличия мощного источника освещения, который может повлиять на скорость испарения капль, кроме того, использование этого метода затруднительно в замкнутых системах, где нет возможности организовать освещение. В данных ситуациях более перспективным является подход на основе компьютерной обработки прямых цифровых изображений. Однако такая постановка задачи предполагает ряд сложностей при распознавании контура исследуемого объекта.

В работе предложены алгоритмы сегментации испаряющихся капль, основанные на замыкании контуров методом выпуклой оболочки. Дальнейшее их применение для создания трехмерных моделей капль, позволяющих пролить свет на механизмы испарения капль на наклонной поверхности в условиях свободной конвекции. Данные, полученные при сегментации капль прошли сравнение с результатами обработки экспериментов ручным методом.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В представленной на рис. 1 экспериментальной установке использовалась закрытая камера, обеспечивающая стабильные условия для изучения испарения капль. Для создания контролируемых условий испарения с заданной влажностью в начале эксперимента в камеру помещался осушитель. Медная пластина крепилась к оси шагового двигателя, после чего на её поверхность наносился слой термопасты для обеспечения теплового контакта. На подготовленную таким образом поверхность фиксировался бифильный кремниевый субстрат, обеспечивающий стабильность и равномерность распределения температуры. Бифильные поверхности были изготовлены с использованием комбинации лазерной абляции и фторполимерного покрытия методом HW CVD [8]. Капля дистиллированной воды наносилась на поверхность подложки с помощью высокоточного дозатора. Угол наклона поверхности относительно горизонта с погрешностью позиционирования $\pm 0,1^\circ$ задавался автоматизированной системой управления шаговым двигателем.

Для реконструкции 3D поверхности капли использовались изображения, полученные с двух различных камер, установленных перпендикулярно друг другу и работающих синхронно от внешнего триггера. Для съемки использовались цифровая камера Baumer VCXU-04M с частотой съемки до 2 кГц разрешением 720×540 пикселей и камера Phantom VEO-E 310S с частотой съемки до 3,2 кГц разрешением 1280×800 пикселей. Освещенность рабочего участка составляла 300 лк.

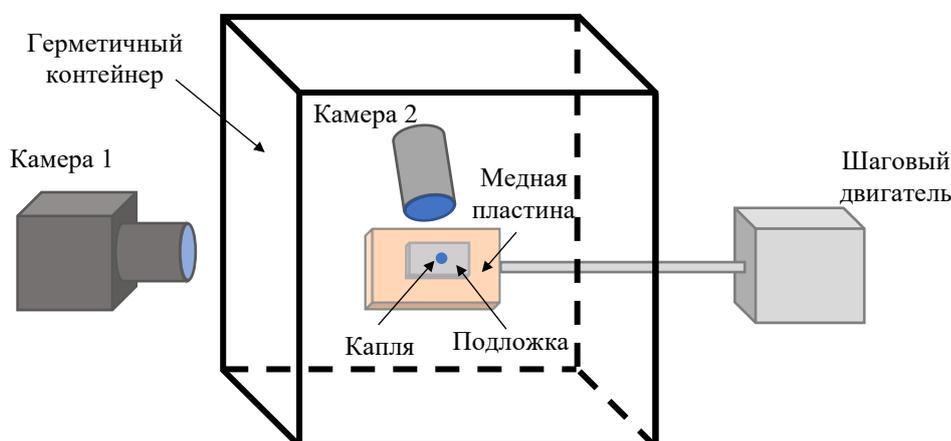


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

РЕАЛИЗОВАННЫЙ АЛГОРИТМ

В настоящее время для сегментации капель воды в экспериментах доминирующей техникой является комбинация методов Кэнни [9] и адаптивной бинаризации Оцу [10]. В [11, 12] представлены возможности применения данных методов в теневых экспериментах, однако при недостаточном освещении объекта с их помощью невозможно выделить замкнутую линию, описывающую контур капли. В качестве метода замыкания контуров было предложено выделение выпуклого многоугольника, включающего в себя все точки границы объекта, с последующей интерполяцией контура капли кубическим сплайном.

Основная идея предложенного метода заключается в использовании гипотезы о выпуклости исследуемого объекта. Первый этап обработки включает в себя конвертирование изображения в оттенки серого и применение фильтра Гаусса, являющееся распространённой техникой для уменьшения шумов матрицы камеры. Для условий освещения рассмотренных далее экспериментов был использован гауссов фильтр с большим ядром 9×9 для ослабления шума матрицы и сглаживания мелких деталей фона. Следующим этапом алгоритма является бинаризация, которая может быть достигнута такими методами, как обыкновенный отсев по яркости пикселей, адаптивная бинаризация с выбором критерия по взвешенному значению интенсивности пикселей, метод Оцу [10], метод Кэнни [9] или комбинацией этих методов. Построение процесса бинаризации является ключевым в выделении контуров объекта и зависит от условий проведения эксперимента. Бинарное изображение должно включать в себя как можно больше деталей контура объекта или его содержимого. В разработанном методе используется комбинация метода Кэнни [9] и отсева по пороговому значению интенсивности фильтра Собеля.

В методе Кэнни граница объекта находится с помощью локального максимума градиента интенсивности пикселей. Этот метод применяет два пороговых значения интенсивности градиента для определения вероятных действительных и ложных границ. Подбор этих пороговых значений не всегда приводит к успешному отделению объекта от фона, поскольку зачастую захватывает детали окружения капли. Поэтому в предложенном методе используется дополнительный отсев пикселей контуров по пороговому значению интенсивности Собеля, согласно формулам

$$S_x = \begin{vmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad S_y = \begin{vmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{vmatrix}$$
$$R = (\sqrt{(S_x * I)^2 + (S_y * I)^2} > T),$$

где S_x – горизонтальный оператор Sobel, S_y – вертикальный оператор Sobel, I – сглаженное изображение, $*$ – оператор свертки, T – значение порога интенсивности, R – результирующая матрица. Между результатами операций Кэнни и Собеля происходит побитовое перемножение. Задание параметров бинаризации. Подбор пороговых значений для методов Кэнни и Собеля происходит с применением обратной связи: результат обработки изображения визуализируется, и, в зависимости от качества обработки, выбираются пороговые значения. Как правило, для подбора параметров анализируются первое, последнее и центральное изображения в выборке, и полученные значения распространяются на всю выборку при обработке.

Затем, при наличии пикселей, которые не относятся к объекту, применяется процедура исключения изолированных регионов пикселей. Для этого применяется ядро поиска 9×9 , выделяется паттерн, при котором в регионе 5×5 вокруг положительного пикселя могут содержаться как положительные, так и отрицательные элементы, но положительные пиксели отсутствуют в остальной части окна опроса. В найденных регионах, область 5×5 в центре окна опроса зануляется. В результате данной морфологической операции, бинарное изображение очищается от малых элементов фона, которые ошибочно принимаются за границы объекта.

Следующим этапом алгоритма является тонкая настройка полученной бинарной маски вблизи основания капли. Зачастую после бинаризации остается плохо разрешенной межфазная граница жидкость – воздух – твердое тело, при этом ложно проходят бинаризацию микроскопические объекты пыли попадающие в область видимости вблизи краев капли, или же расположенные ниже линии контакта капли с подложкой. Для решения этой проблемы требуется искусственная фильтрация полученной бинарной маски. В частности, необходимо вручную задать примерное расположение линии контакта и занулить как правило около 5 рядов пикселей над линией контакта и все пиксели, расположенные ниже ее. Таким образом тройная граница капли будет достроена за счет интерполяции получаемых далее контуров. Не смотря на необходимость задания линии контакта оператором, процесс получения контуров капли остается в достаточной степени автоматизированным, поскольку при испарении капли линия контакта не изменяет свое положение, при этом ее длина также меняется слабо. Таким образом, при задании линии контакта, как правило выбирается ее меньшая наименьшая длина входе процесса испарения. Данная операция выполняется один раз для одного набора изображений.

К полученному набору пикселей применяется алгоритм поиска выпуклой оболочки [13], который находит наименьшую замкнутую выпуклую область, содержащую в себе все экстрагированные пиксели. Данный алгоритм реализует гипотезу о выпуклости объекта и позволяет приближенно определить его контур при отсутствии четкой видимой границы. Результатом работы алгоритма выпуклой оболочки является набор вершин выпуклого многоугольника, аппроксимирующего искомый контур. На примере капель воды, наибольшая сторона данного многоугольника является оценкой основания капли. Полученные вершины контура затем интерполируются кубическим сплайном, для повышения гладкости и увеличения разрешения. Основные этапы метода схематически представлены на рис. 2.

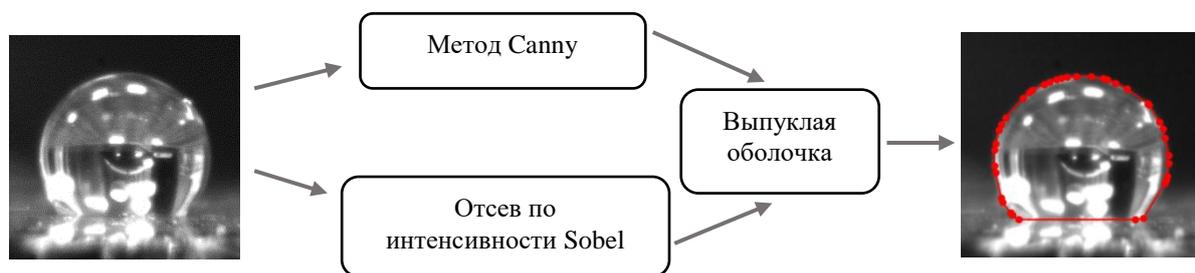


Рис. 2. Схематическое представление разработанного метода

Полученный контур затем используется для оценки объема и высоты объекта. Высота капли определяется как наиболее удаленная от основания точка контура. Объем вычисляется интегралом вращения полученного контура перпендикулярно основанию капли в двумерном случае.

Для реконструкции трехмерной поверхности капли использовались изображения, полученные с двух различных камер, установленных перпендикулярно друг другу и работающих синхронно от внешнего триггера. К кадрам из полученного видеоряда применялся алгоритм выделения контуров капель, рассмотренный ранее. Затем, полученные с перпендикулярных ракурсов контуры капли приводятся к единому масштабу таким образом, чтобы высота капель на изображениях с разного ракурса совпадала, поскольку в данной постановке эксперимента высота капли на изображении не должна зависеть от азимутального угла съемки. При преобразовании контуров используется билинейная интерполяция, при этом контуры остаются дискретными, то есть преобразуются так маски от исходных изображений. В итоге мы получаем контуры с одинаковым расстоянием от основания капли до ее верхушки в пикселях (рис. 3а). Таким образом контуры капли были разбиты на слои пикселей, которые соответствуют одному и тому же реальному горизонтальному слою капли, но с перпендикулярных ракурсов.

Трёхмерная поверхность капли затем была восстановлена с помощью полученных пар слоев, которые использовались в качестве двух полуосей эллипса, описывающего реальный срез капли. Имея подобную дискретизацию изображений капли, мы уже не обязаны моделировать объем капли фигурой вращения, а можем численно проинтегрировать полученные эллиптические слои капли (рис. 3б). Для численного интегрирования объема капли был использован метод трапеций.

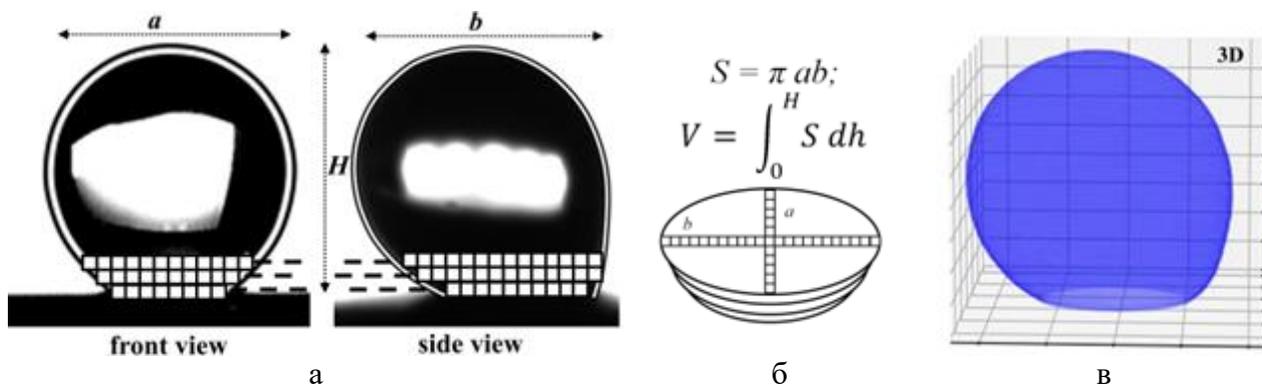


Рис 3. Схема алгоритма построения трехмерной поверхности капли: а – выделение контуров капли, их масштабирование и соотнесение, б – послойная реконструкция формы капли, каждый слой приближается плоским эллипсом с полуосями, полученными на предыдущем этапе алгоритма, в – 3D модель капли

ВАЛИДАЦИЯ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА

При использовании ручного метода изображения обрабатываются оператором с помощью программы ImageJ. Поскольку в процессе испарения капля принимает различную форму (шар, эллипсоид, шаровой сегмент), то анализ обработок изображений представляется достаточно сложным процессом и требует от оператора контроля за текущей формой объекта. Кроме того, оценка таких параметров как объема возможна для оператора только при эллиптической форме капли, когда объем можно приблизить фигурой вращения. Для различных этапов испарения капли использовалась оценка объема жидкости, соответствующая видимой форме капли. Погрешность измерения размеров капли определялась с учётом следующих составляющих: погрешность от разрешения изображения $\delta_{pix} = 0,0035$ мм вычисляется с учётом линейного размера одного пикселя (0,012 мм); субъективная погрешность, возникающая при ручном измерении диаметра в графическом редакторе из-за ошибки субъективности и зависимости от точности «захвата» линии, оценивалась как среднеквадратичное отклонение при серии повторных измерений одного размера разными операторами ($\delta_{sub} = 0,005$ мм); погрешность масштабирования δ_{scale} , для оценки которой нужно точно знать масштаб изображения в пикселях на единицу длины (мм), определялась как среднеквадратичное отклонение при серии повторных измерений эталонного размера на изображении ($\delta_{scale} = 0,005$ мм); погрешность измерения диаметра капли, вызванная нерезкостью её краев $\delta_{blur} = 0,05$ мм. Полная погрешность измерения размера капли составляет: $\delta_m = \sqrt{\delta_{pix}^2 + \delta_{sub}^2 + \delta_{scale}^2 + \delta_{blur}^2} = 0,05$ мм.

Для проверки точности разработанного метода была проведена съёмка 500 изображений испаряющейся капли в сидячем и подвешенном состояниях в условиях низкой контрастности. Ошибка метода ручной обработки экспериментов считалась намного ниже, чем ошибки автоматических методов. Таким образом, погрешность рассмотренных методов считалась как среднеквадратическая ошибка относительно данных, полученных ручной обработкой. На рис. 4 приведено сравнение оценки высоты (рис. 4а) и объема (рис. 4б) капли для метода замыкания контура выпуклой оболочкой и ручной обработкой эксперимента.

Значение среднеквадратической ошибки определения высоты капли оказалось равным 1,7% от начального значения высоты капли. Отклонение метода выпуклой оболочки составило

2,6% от начального объема капли. На рис. 4 также продемонстрировано, что на последних этапах испарения при малом размере капли разобранный метод автоматической оценки перестает работать. Это связано со значительным падением видимости границы капли при уменьшении её размеров, что, в свою очередь, определяется условиями проведения эксперимента. Для оценки критерия применимости метода была исследована динамика средней интенсивности градиента изображения в точках, выделенных алгоритмом выпуклой области. Данный критерий был выбран, поскольку алгоритм чувствителен к изменению градиента. Исследование показало, что метод перестает работать при падении интенсивности градиента до отметки в 48,1% от начального значения.

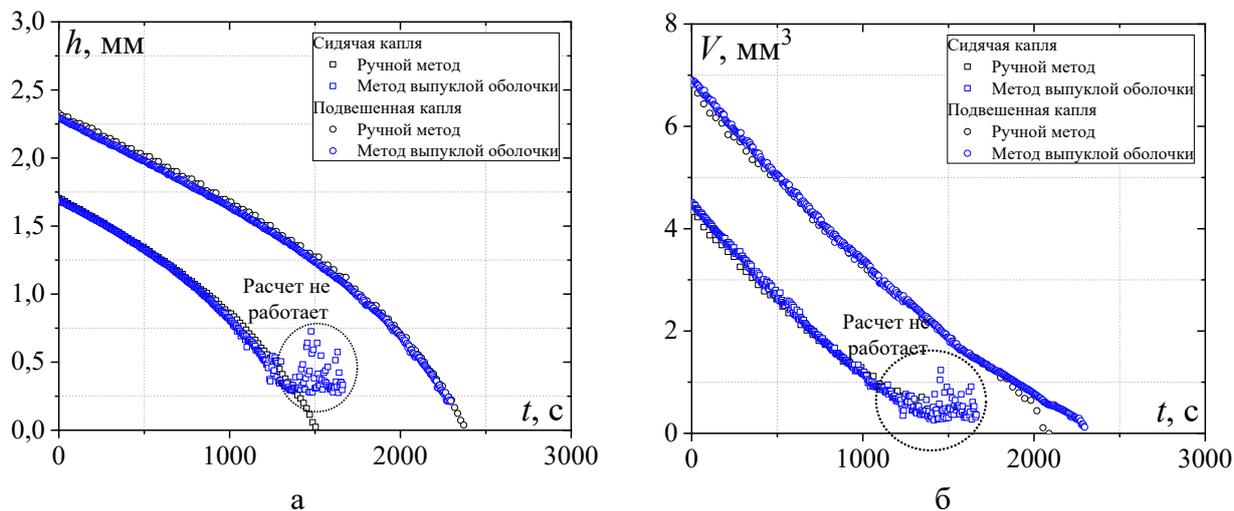


Рис 4. Сопоставление различных способов обработки изображений для вычисления а – высоты и б – объема испаряющейся капли

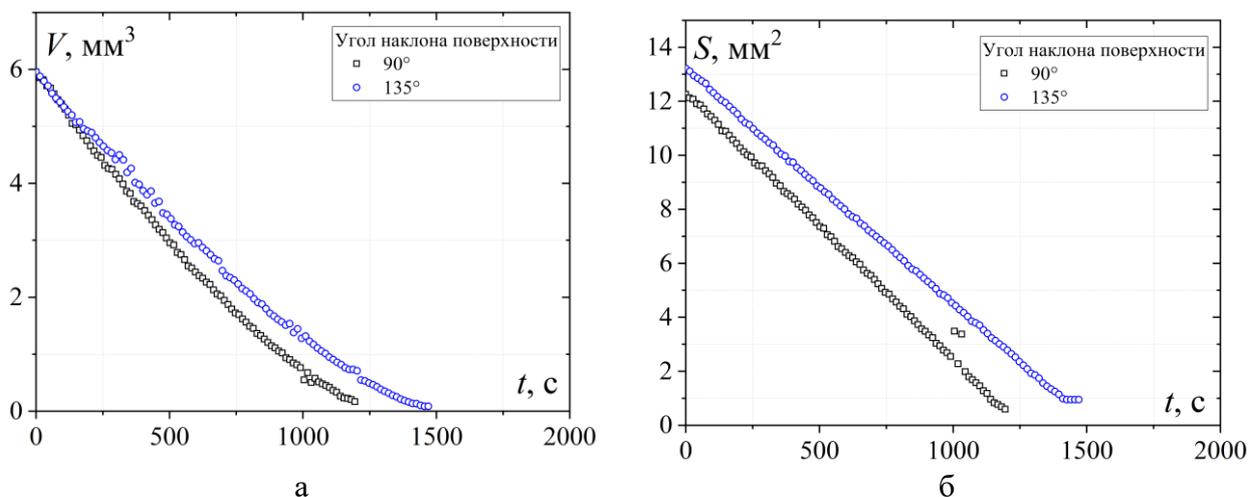


Рис 5. Сравнение динамики изменения: а – объема и б – площади поверхности капель на наклонных поверхностях под углом 90° и 135°

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАПЛИ НА НАКЛОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Для проверки метода реконструкции трехмерной поверхности капли было проведено исследование испарения капель дистиллированной воды на бифильной поверхности, ориентированной под углами 90° и 135° к горизонту. Как известно, капля воды на супергидрофобной поверхности стремится минимизировать площадь своей поверхности, принимая форму, близкую к сферической, что обусловлено преобладанием сил поверхностного натяжения над силами адгезии. Однако при наклоне поверхности форма капли существенно искажается из-за воздействия гравитации, приводящей к асимметричной деформации. Поскольку скорость испарения капли пропорциональна площади ее

поверхности, актуальной задачей является количественная оценка данного параметра при различной ориентации капли в пространстве. На рис. 5б представлена динамика изменения площади поверхности испаряющихся капель на поверхностях с углами наклона 90° и 135° . Наибольшая скорость испарения наблюдается у капли, находящейся на поверхности с углом наклона 90° , рис. 5б. Кроме того, следует отметить, что при угле наклона поверхности в 90° капля имеет меньшую начальную площадь поверхности при том же значении объема. Это связано с тем, что в таком положении поверхность капли имеет большую площадь контакта с твердой стенкой, что способствует интенсификации процесса испарения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе разработан метод определения формы капли в экспериментах с недостаточной контрастностью. Предложенный метод на основе алгоритма поиска выпуклой оболочки был использован для реконструкции трехмерной поверхности капель. Продемонстрированный алгоритм обработки цифровых изображений апробирован на реальных экспериментах испаряющихся с твердой поверхности капель под различным углом к гравитационной силе. Показаны границы применимости разработанного метода. Были проведены оценки точности разработанного алгоритма путем сравнения с данными, полученными в результате ручной обработки.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН № 121031800217-8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Куликов В.А., Куликов А.В., Тихонова М.А., Киричук В.С.** Оценка влияния антидепрессантов в тесте принудительного плавания // *Автометрия*. 2009. Т. 45. № 6. С. 46-51.
2. **Грибов М.Г., Хачумов В.М.** Определение геометрических параметров объектов по растровым изображениям // *Автометрия*. 2001. Т. 37. № 1. С. 40-49.
3. **Кревецкий А.В.** Распознавание трёхмерных объектов по форме пространственных контуров // *Автометрия*. 2001. Т. 37. № 2. С. 21-30.
4. **Xiao B., Rutherford G.N., Sharma A. P. et al.** Surface modification and charge injection in a nanocomposite of metal nanoparticles and semiconductor oxide nanostructures // *Sci. Rep.* 2020. Vol. 10. P. 4743.
5. **Li D., Wang T., Chen S. et al.** Experimental investigation on droplet deformation and breakup under uniform DC electric field // *Microgravity Sci. Technol.* 2020. Vol. 32. Pp. 837-845.
6. **Almohammadi H., Amirfazli A.** Sessile drop evaporation under an electric field // *Colloids and Surfaces A*. 2018. Vol. 555. Pp. 580-585.
7. **Starinskiy S., Starinskaya E., Miskiv N. et al.** Spreading of impacting water droplet on surface with fixed microstructure and different wetting from superhydrophilicity to superhydrophobicity // *Water*. 2023. Vol. 15. № 4. P. 719.
8. **Starinskaya E., Miskiv N., Terekhov V., Safonov A., Li Y., Lei M., Starinskiy S.** Evaporation dynamics of sessile and suspended almost-spherical droplets from a biphilic surface // *Water*. 2023. Vol. 15 P. 273.
9. **Canny J.A.** Computational Approach to Edge Detection // *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intell.* 1986. PAMI-8. № 6. Pp. 679-698.
10. **Otsu N.A** Threshold selection method from gray-level histograms // *IEEE Trans. Syst., Man and Cybernetics*. 1979. Vol. 9. № 1. Pp. 62-66.
11. **Quetzeri-Santiago M.A., Castrejón-Pita J.R., Castrejón-Pita A.A.** On the analysis of the contact angle for impacting droplets using a polynomial fitting approach // *Exp. Fluids*.

2020. Vol. 61. P. 143.

12. **Dash A., Bange P.G., Patil N.D., Bhardwaj R.** An image processing method to measure droplet impact and evaporation on a solid surface // S^{adha}na. 2020. Vol. 45. Pp.1-10.
13. **Sklansky J.** Finding the convex hull of a simple polygon // Patt. Recogn. Lett. 1982. Vol. 1. № 2. Pp. 79-83.

Nazarov N.A., Miskiv N.B., Starinskaya E.M.,

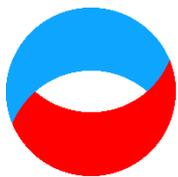
*Kutateladze Institute of Thermophysics, Russia,
630090, Novosibirsk, Lavrentiev Ave., 1, E-mail: nazarov.nik.an@gmail.com*

METHODS FOR DETERMINING GEOMETRIC PARAMETERS OF EVAPORATING DROPLETS FROM DIGITAL IMAGES

ABSTRACT

Currently, urgent tasks include research in the field of spray cooling, droplet interaction with complexly structured surfaces, evaporation of droplets of various liquids from a solid wall, etc. When conducting such experiments that require recording a large amount of video data, automatic digital image processing methods play a key role. Methods for recognizing liquid droplets on a digital image are proposed to obtain geometric characteristics of an object in a non-shadow experiment. New algorithms have been developed for selecting and closing the boundaries of objects in conditions of insufficient contrast, which are used to measure the geometric parameters of evaporating droplets. Experiments have been conducted to recreate the three-dimensional surface of hanging droplets and droplets on an inclined surface. A comparison is made with the data obtained by manual image processing, and the conditions of applicability of the proposed algorithms are demonstrated.

DIGITAL IMAGE PROCESSING, EVAPORATING DROPLETS, CONVEX HULL METHOD, SURFACE RECONSTRUCTION



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 535.016

Федоров Е.К., Павлов И.Н., Лапицкая И.А.

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: FedorovYK@mpei.ru*

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ЖИДКОСТИ МЕТОДАМИ ЛАЗЕРНОЙ РЕФРАКТОГРАФИИ И НАРУШЕННОГО ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ

АННОТАЦИЯ

Целью работы является сравнение распределения показателя преломления воды по высоте внутри кюветы, полученное с помощью двух методов: лазерной рефрактографии и метода нарушенного полного внутреннего отражения. Температурная неоднородность создается с помощью нагревания кипятильником воды в жестяной емкости. В ходе работы были получены распределения показателя преломления от вертикальной координаты для разных моментов времени.

МЕТОД НАРУШЕННОГО ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ, ЛАЗЕРНАЯ РЕФРАКТОГРАФИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРНАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ

ВВЕДЕНИЕ

Основными методами для изучения прозрачной стратифицированной жидкости являются оптические методы. Они содержат в себе ряд преимуществ, таких как точность, высокая чувствительность и способность осуществлять визуализацию процесса. Также важным преимуществом является возможность осуществлять исследование на расстоянии от объекта интереса. Еще одним преимуществом, присущим оптическим методам, является способность к мгновенной регистрации изменения в исследуемом объекте. Существующие методы исследования оптически неоднородных сред отличаются большим разнообразием. Одними из основных – являются метод нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО), метод лазерной рефрактографии и, похожие на него, метод лазерного отклонения и метод Винера [1]. Также широко распространены интерференционные методы. В работах [2] и [3] использовался интерферометр Маха-Цендера. В работе [4] чувствительный элемент выполнен в виде интерферометра Рэлея. В методе лазерной рефрактографии показатель преломления определяется с помощью сравнения расчетных распределений интенсивности структурированного лазерного излучения с экспериментально полученными изображениями.

Одной из задач данной работы было создание температурной оптической неоднородности, в которой изменение показателя преломления зависит от вертикальной координаты. Для этого была разработана и создана нагревательная система, состоящая из прямоугольной жестяной емкости и кипятильника. Нагревание воды в кювете происходило за счет увеличения температуры в жестяной емкости.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Метод исследования

Схема установки изображена на рис. 1. Экспериментальная установка состоит из лазерного модуля 1 с длиной волны излучения 670 нм и мощностью 5 мВт, оптической системы формирования структурированного лазерного излучения 2, стеклянной кюветы 3, одной из стенок которой является стеклянная призма с известным показателем преломления, экрана 5 для наблюдения рефрактограммы, фотокамеры 6 для ее регистрации, лазерного модуля 7 с длиной волны излучения 658 нм и мощностью 30 мВт, телескопической системы формирования широкого коллимированного пучка 8, состоящей из двух собирающих линз с разными фокусными расстояниями и точечной диафрагмы в фокусе между ними, поляризатора 9 для выделения компоненты, параллельной плоскости падения, экрана 10 для наблюдения изображения отраженного широкого коллимированного пучка, видеокамеры 11 для регистрации этого изображения и компьютера 12 для хранения и обработки полученных изображений, а также емкости 4 для создания температурной неоднородности и кипятильника.

Одна из особенностей данной установки заключается в том, что она позволяет сравнить распределение показателя преломления воды по высоте внутри кюветы, полученное с помощью двух методов: метода лазерной рефрактографии и метода нарушенного полного внутреннего отражения. Фотография экспериментальной установки представлена на рис. 2.

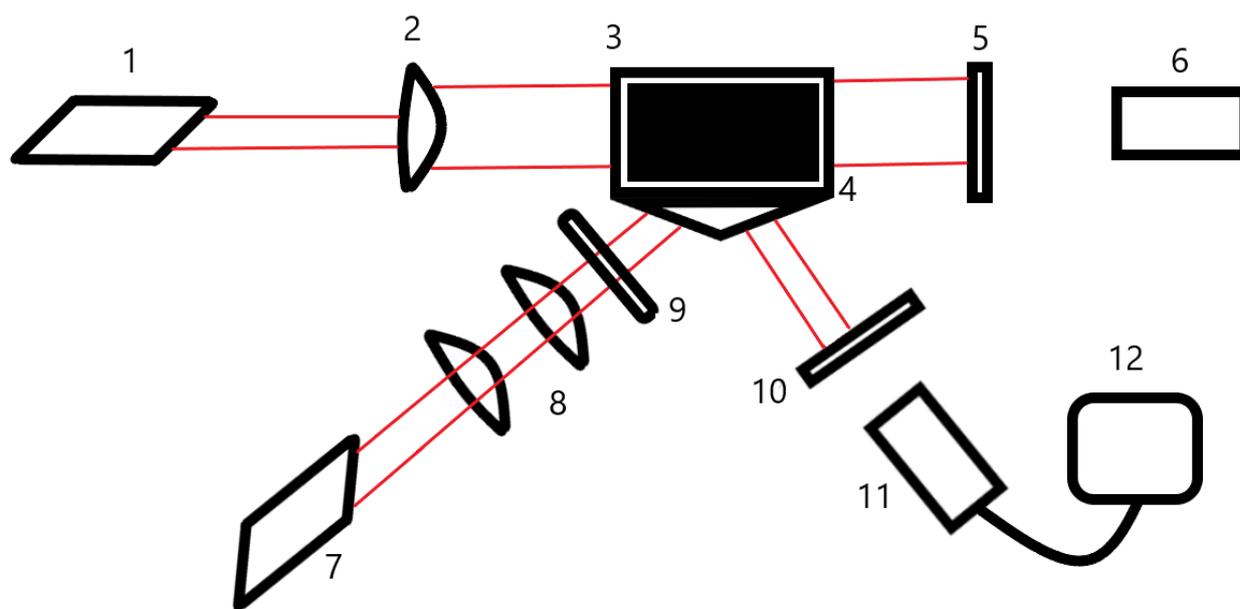


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

1 – лазерный модуль 1, 2 – оптическая система формирования лазерной плоскости, 3 – кювета, 4 – жестяная емкость, 5 – экран 1, 6 – видеокамера 1, 7 – лазерный модуль 2, 8 – система формирования широкого коллимированного пучка, 9 – поляризатор, 10 – экран 2, 11 – видеокамера 2, 12 – компьютер

Для проведения эксперимента необходимо было произвести юстировку установки.

Фиксация кюветы производилась с помощью неодимовых магнитов, два из которых располагались под столиком, а два других – над столиком. Данная конструкция позволяла удерживать кювету в двух направлениях. В случае сдвига кюветы в одном из свободных направлений, ее можно вернуть в прежнее место, тем самым избежав повторной юстировки. Также данная конструкция позволяет снимать кювету со столика, что сильно упрощает слив воды из нее и, при необходимости, очистку стенок от загрязнений.

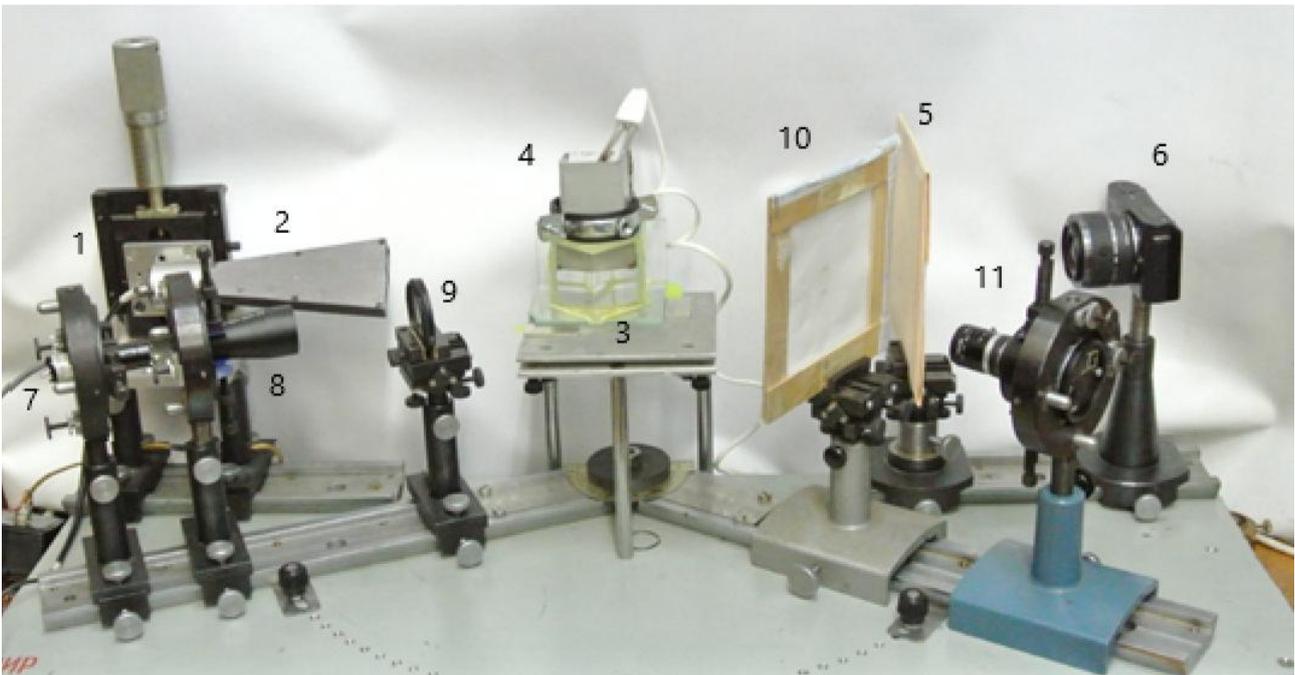


Рис. 2. Экспериментальная установка

1 – лазерный модуль 1, 2 – оптическая система формирования лазерной плоскости, 3 – кювета, 4 – жестяная емкость, 5 – экран 1, 6 – видеокамера 1, 7 – лазерный модуль 2, 8 – система формирования широкого коллимированного пучка, 9 – поляризатор, 10 – экран 2, 11 – видеокамера 2

Как было описано выше, создание стратифицированной среды производилось с помощью жестяной емкости, помещенной в кювету. Одним из условий получения послойной стратификации среды была фиксация емкости так, чтобы ее дно касалось уровня воды. Другим условием являлось параллельность дна емкости и уровня воды. Емкость создавалось из жестяного листа посредством его сгибания и, для получения герметичной емкости, спайки сложенных краев. Так как дно емкости ровное, то показатель преломления воды меняется от вертикальной координаты. Зависимость показателя преломления воды от температуры для лазерного излучения с длиной волны 0,6328 мкм определяется аппроксимационной зависимостью [5]

$$n(T) = 1,3328 - 0,000051T - 0,0000011T^2, \quad (1)$$

где T – температура в градусах Цельсия [5].

Математическое моделирование рефракции лазерного пучка в температурном поле нагретой емкости шириной R , помещенного в кювету с водой, проводится для зависимости температуры от вертикальной координаты, определяется выражением [5].

$$T(x) = T_0 + \Delta T \cdot e^{-\frac{(x-R-\Delta R)^2}{a^2}}, \quad (2)$$

где T_0 , ΔT , ΔR , a – параметры модели температурного поля. Параметр T_0 определяется температурой стенок кюветы с жидкостью, значение $T(r)$ равно температуре дна емкости, а отношение $\Delta T/a$ соответствует градиенту температурного поля в пограничном слое толщиной a .

Схема создания температурной неоднородности представлена на рис. 3.

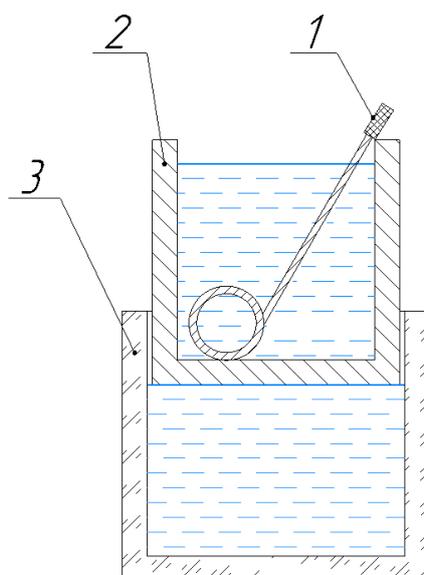


Рис. 3. Схема создания температурной неоднородности
1 – кипятильник, 2 – жестяная емкость, 3 – стеклянная кювета

Методика проведения эксперимента

После выполнения действий по юстировке установки, видеокамерой 2 фиксировалось изображение распределения интенсивности отраженного пучка при пустой кювете. Оно необходимо для расчета коэффициента отражения, который используется для получения распределения показателя преломления.

После этого проводилось наполнение кюветы чистой водой комнатной температуры. Перед тем, как поставить жестяную емкость на кювету, производилась регистрация на видеокамеру 1 и видеокамеру 2. Это выполнялось для сопоставления рефрактограммы и изображения, полученного методом нарушенного полного внутреннего отражения.

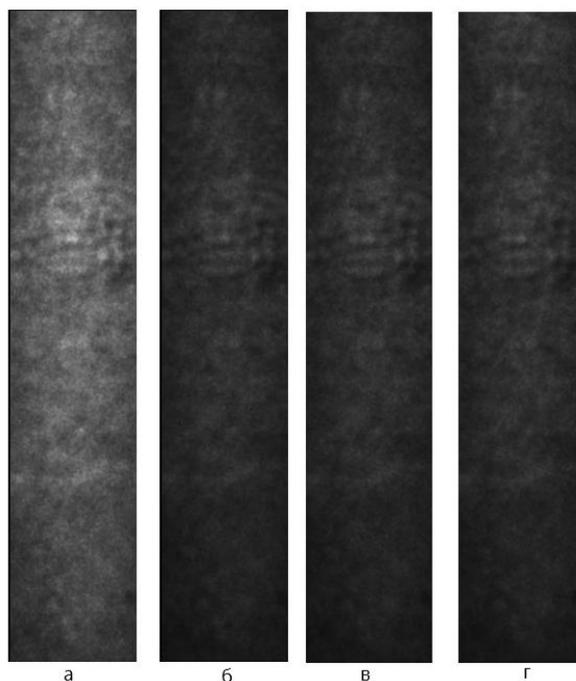


Рис. 4. Распределение интенсивности в информативной области
а – для полного внутреннего отражения, б – сразу после включения кипятильника,
в – через 50 секунд после включения кипятильника, г – после закипания воды в емкости

Затем производились действия по созданию температурной неоднородности, такие как наполнение емкости водой комнатной температуры и помещение в емкость кипятильника. Перед включением его в сеть производилось включение устройств регистрации. В момент включения кипятильника в сеть выполнялась отмашка, которая необходима для определения момента старта на полученных изображениях. Регистрация осуществлялась до момента закипания воды в емкости. Время эксперимента составило 1 минуту 50 секунд. Для обработки было выбрано 3 момента времени: сразу после включения кипятильника, через 50 секунд после включения кипятильника, после закипания воды в емкости.

В процессе выполнения эксперимента были получены распределения интенсивности в разные моменты времени. После чего из полученных распределений выделялась информативная область, по которой и происходило усреднение интенсивности. Это необходимо для расчета коэффициента отражения. На рис. 4 представлены распределения интенсивности в информативной области.

На рис. 5 представлены рефрактограммы, полученные в ходе эксперимента.

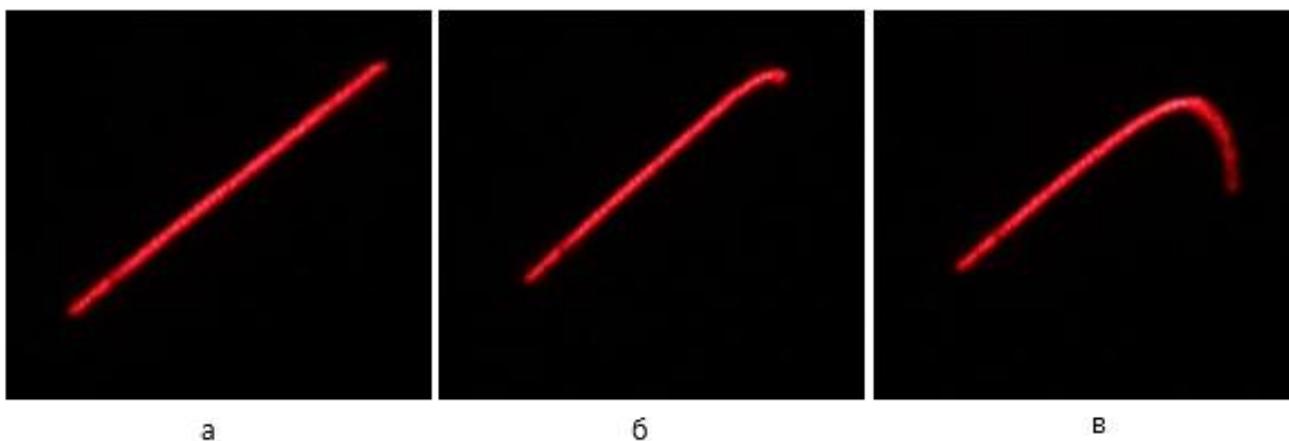


Рис. 5. Полученная рефрактограмма
 а – сразу после включения кипятильника, б – через 50 секунд после включения кипятильника,
 в – после закипания воды в емкости

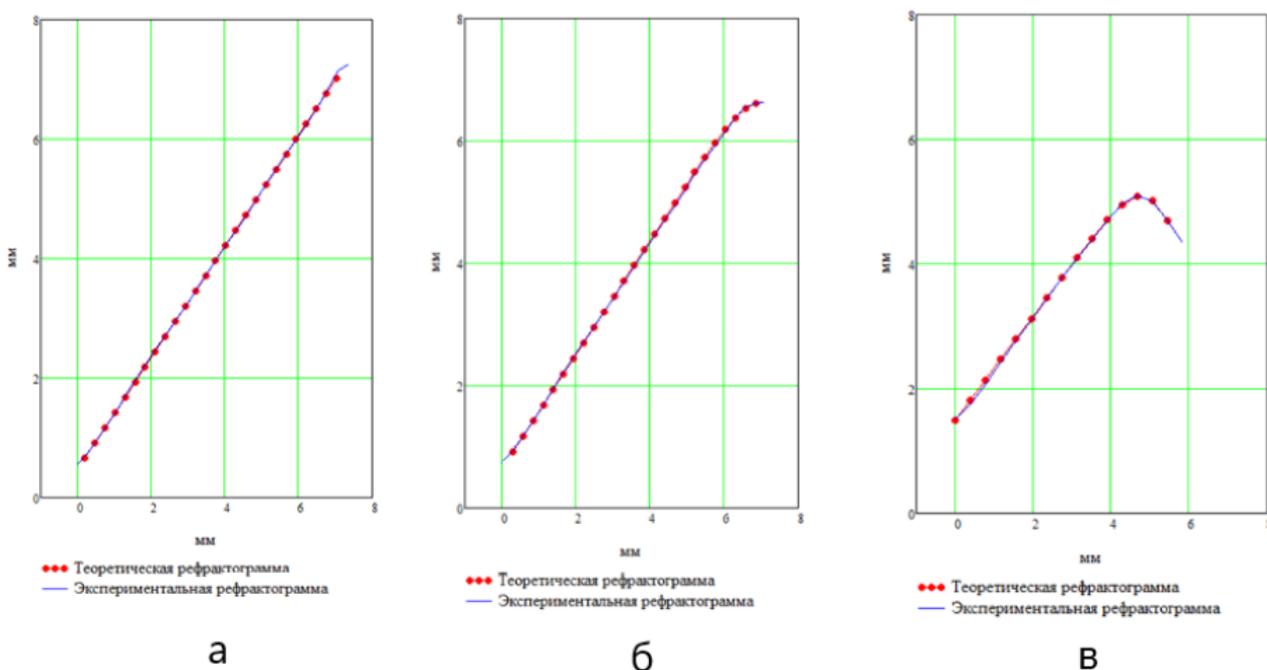


Рис. 6. Сравнение экспериментальной и теоретической рефрактограммы
 а – сразу после включения кипятильника, б – через 50 секунд после включения кипятильника,
 в – после закипания воды в емкости

Результаты обработки

Для обработки рефрактограмм необходимо представить их в виде тонкой линии. Перед тем, как оцифровывать изображения, нужно обрезать части изображения, не несущие информацию. Для оцифровки необходимо провести бинаризацию полученных картин, а затем их преобразование в тонкую линию. Получение тонкой линии происходило по центральной линии сечения. Затем производилось сравнение экспериментально полученных и теоретических рефрактограмм. На рис. 6 представлена сравнение экспериментальных и теоретических рефрактограмм.

Из полученных рефрактограммах видно, что экспериментальные изображения полностью соответствуют теоретическим.

На рис. 7 приведено распределение показателей преломления, полученных методом лазерной рефрактографии и методом нарушенного полного внутреннего отражения в разные моменты времени.

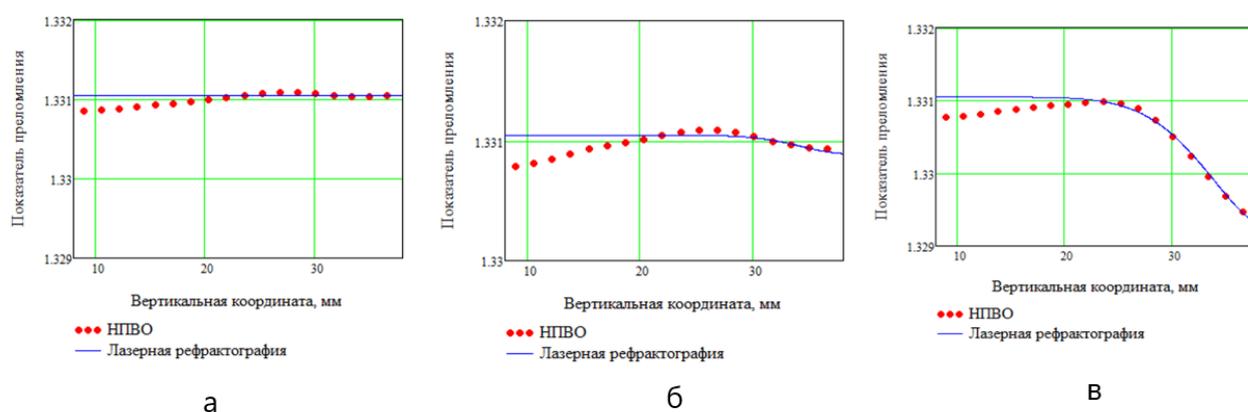


Рис. 7. Распределение показателя преломления от вертикальной координаты
а – сразу после включения кипятильника, б – через 50 секунд после включения кипятильника,
в – после закипания воды в емкости

В ходе сравнения можно сделать вывод, что распределение показателя преломления совпадает только до середины слоя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы была собрана экспериментальная установка для одновременного исследования неоднородной жидкости в кювете методом лазерной рефрактографии и методом нарушенного полного внутреннего отражения. Реализован способ создания температурной неоднородности посредством нагревания воды в емкости, получено распределения показателя преломления от вертикальной координаты для разных временных точек. С помощью полученных распределений можно рассчитать температуру в разных слоях жидкости. В ходе эксперимента температура слоя жидкости, находившегося вблизи емкости, увеличилась на 15,4 градуса. Результаты проведенного экспериментального сравнения двух методов на примере температурной стратификации в жидкости показывают, что оба метода дают практически идентичные результаты. Отличия связаны с особенностями работы каждого из методов. Так, на результаты метода НПВО сильно влияет качество используемого широкого коллимированного пучка, качество цифровой камеры и фоновая засветка, а ключевой проблемой метода лазерной рефрактографии является правильный выбор модели распределения показателя преломления исследуемой оптической неоднородности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Tyrrell H.J.V., Harris K.R.** Diffusion in liquids: a theoretical and experimental study. Butterworth-Heinemann, 2013. 464 p.
2. **Полетаева М.А., Стецюк И.В.** Экспериментальные исследования оптических неоднородностей в водной среде с помощью // Морские исследования и образование (MARESEDU-2019): Труды VIII Международной научно-практической конференции, Москва, 28–31 окт. 2019 года. Том I. М: ООО "ПолиПРЕСС", 2020. С. 183-186.
3. **Ahadi A., Saghir M.Z.** New experimental method to measure pure and cross diffusion coefficients of transparent ternary mixtures using Mach–Zehnder interferometry // Optics and Lasers in Engineering. 2014. Vol. 59. Pp. 72-81.
4. **Васильев А.Б., Дроздов И.Р., Никулин И.Л.** Волоконно-оптическое устройство измерения показателя преломления // Патент РФ № 156297– МПК G01N 21/45, G01B 9/02.
5. **Евтихиева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С.** Лазерная рефрактография. М: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 175 с.

Fedorov E.K., Pavlov I.N., Lapitskaya I.A.

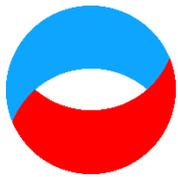
*National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: FedorovYK@mpei.ru*

INVESTIGATION OF STRATIFIED LIQUID BY LASER REFRACTOGRAPHY AND FRUSTRATED TOTAL INTERNAL REFLECTION

ABSTRACT

The aim of the work is to compare the distribution of the refractive index of water along the height inside the cuvette, obtained using two methods: laser refractography and the method of frustrated total internal reflection. Temperature heterogeneity is created by heating water in a tin container with a boiler. In the course of the work, distributions of the refractive index from the vertical coordinate were obtained for different time points.

**LASER REFRACTOGRAPHY, FRUSTRATED TOTAL INTERNAL REFLECTION
TECHNIQUE, OPTICAL INHOMOGENEITY**



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 532.5

Чашечкин Ю.Д.

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Россия,
119526, Москва, проспект Вернадского 101/1, E-mail:yulidch@gmail.com*

**ЦВЕТНЫЕ ПАНОРАМНЫЕ И УЗКОПОЛЬНЫЕ ТЕНЕВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ
ТЕЧЕНИЙ ГЕТЕРОГЕННЫХ ЖИДКОСТЕЙ**

АННОТАЦИЯ

Описание динамики и структуры течений гетерогенных жидкостей и газов на основе системы фундаментальных уравнений механики жидкостей стимулировало развитие и новой техники наблюдений, и классических теневых методов. Совершенствование численных методов обработки информации, источников и приемников света в широком спектральном диапазоне расширяет возможности получения и анализа визуальных образов течений. Новые качества приобретают как классические теневые приборы серии ИАБ, так и оригинальные разработки. Подбор формы источника и визуализирующей диафрагмы позволяет регистрировать поля различных компонентов градиента коэффициента преломления и плотности в стратифицированных течениях (приводятся примеры). Особый интерес представляет разработка инструментов с высоким временным и пространственным разрешением, позволяющим одновременно регистрировать и крупномасштабные компоненты – струи, следы, вихри, волны, и лигаменты – математические образы тонких компонентов стратифицированных течений. Приводятся примеры теневой визуализации стратифицированных спутных течений и их расчетов на основе редуцированной системы фундаментальных уравнений.

ТЕНЕВЫЕ ПРИБОРЫ, СТРАТИФИКАЦИЯ, ПЛОТНОСТЬ, СЛЕД, ЛИГАМЕНТЫ, ВОЛНЫ

ВВЕДЕНИЕ

Прообразы теневых методов исследования течений, которые можно найти в работах Р. Гука, Ж.-П. Марата и других ученых, стали активно развиваться во второй половине XIX века после изобретения «ножа Фуко», частично перекрывавшего диафрагмой изображение источника в фокальной плоскости линзы с целью контроля качества деталей оптических инструментов [1]. Эффективность их применения в физическом эксперименте показали работы Э. Маха и Р. Вуда по визуализации ударных и акустических волн. Широкое распространение теневых приборов в середине прошлого века совпало с развитием универсальных оптических инструментов [2] и специализированных приборов для решения проблем аэродинамики полета [3]. Быстрый рост скоростей летательных аппаратов сопровождался развитием методов визуализации обтекания в широком диапазоне скоростей в дозвуковом, транс-, сверх- и гиперзвуковых режимах.

Расширение диапазона длин электромагнитных волн подсветки, который включает и радиоволны, и оптические, и рентгеновские лучи, использование поляризованного света и модулированного лазерного излучения привело к увеличению объема данных, допускающих непосредственное сравнение с результатами аналитических и численных расчетов в рамках

различных моделей течений. По мере расширения исследований теневые инструменты совершенствовались и адаптировались для изучения картины течений в аэродинамических трубах [3], баллистических трассах [4], в естественных условиях – в атмосфере и океане [5].

Для расширения функциональных возможностей инструментов наряду с традиционными моно- и полихромными источниками света, классическими диафрагмами, формирующими теневые изображения, стали разрабатываться лазерные и светодиодные осветители, поляризационные полихромные и фотохромные светофильтры с различными функциональными возможностями [6].

Созданные для аэродинамических исследований теневые приборы с некоторым запаздыванием стали модифицироваться для изучения течений в стратифицированных лабораторных бассейнах, в условиях, когда вариации показателя коэффициента преломления на порядки больше, чем в воздухе [7]. Стабильная функциональная (близкая к линейной) связь плотности и коэффициента преломления водных растворов обеспечивает надежность физической интерпретации результатов наблюдений. Выраженная естественная дисперсия света в водных растворах электролитов позволила создать информативный цветной теневой метод без введения дополнительных светоделительных инструментов, позволяющий одновременно наблюдать и крупные, и тонкие компоненты структуры регистрируемых полей [8]. Опыты выявили глубокое рассогласование результатов наблюдений течений реальных гетерогенных среды и распространенных теорий течений однородных жидкостей – математической абстракции, не реализуемой в природе.

Развитие теории течений жидкостей и газов, основанной на системе фундаментальных уравнений механики гетерогенных жидкостей [9, 10] восстанавливает интерес к регистрации полей базовых независимых физических величин – плотности, импульса, полной энергии. Необходимость идентификации лигаментов – тонких структурных компонентов, разделяющих волны и вихри – структурно выделенные области течений [11], предъявляет высокие требования к пространственно-временному разрешению инструментов. Здесь большие возможности открывает доступная модификация отечественных теневых приборов [4]. В докладе приводятся методики и некоторые примеры черно-белой и цветной визуализации стратифицированных течений на стендах УИУ «ГФК ИПМех РАН» [12].

ТЕНЕВЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕЧЕНИЙ ГЕТЕРОГЕННЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Развитие аналитической и вычислительной математики возрождает интерес к описанию динамики течений гетерогенных жидкостей, плотность которых зависит от температуры, давления, концентрации растворенных веществ и взвешенных частиц и характеризуется уравнениями состояния [13] в рамках полной системы фундаментальных уравнений механики жидкостей [9], включающей уравнение состояния для потенциала Гиббса [13]. Включение в описание течений потенциала Гиббса позволяет учесть все механизмы передачи энергии – и макроскопические с течениями, волнами, вихрями, и микроскопические – диссипативно-конверсионные, обусловленные трансформацией зернистой супрамолекулярной структуры текущих сред [10].

Одни элементы супрамолекулярной структуры – ассоциаты физической и химической природы, обладающие потенциальной поверхностной энергией (ППЭ), распадаются, другие ячейки медленно формируются, захватывая внутреннюю энергию среды и кинетическую энергию локального течения. При уничтожении поверхности ассоциатов ППЭ быстро преобразуется в другие формы – флуктуации температуры, давления, концентрации и кинетическую энергию мельчайших компонентов течений. Процессы конверсии обеспечивают существование лигаментов – наиболее тонких компонентов течений.

Течения гетерогенных жидкостей обладают тонкой структурой, включающей толстые слои, разделенные резкими прослойками. Прослойки описываются сингулярными решениями системы фундаментальных уравнений, крупные компоненты – волны, вихри, струи – регулярными решениями [11]. Малость характерных масштабов лигаментов предъявляет

высокие требования к разрешающей способности регистрирующих инструментов. Одновременная визуализация сосуществующих крупных и тонких компонентов течений проводится с помощью оптических инструментов, обладающих широким динамическим диапазоном [12].

Связь плотности большой группы веществ с показателем преломления света в оптическом диапазоне длин волн функциональным (во многих случаях – линейным) соотношением обосновывает целесообразность применения оптических методов. Интерес представляет и визуализация пространственной картины течения с помощью панорамных оптических инструментов [1, 3], и регистрация локальных вариаций градиента плотности с помощью узкопольных теневых приборов [5], и применение комбинированных инструментов, объединяющих и панорамные, и локальные методы наблюдений [13].

МЕТОДЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ТЕЧЕНИЙ

Выбор системы фундаментальных уравнений механики гетерогенных жидкостей с физически обоснованными начальными и граничными условиями в качестве логической и математической основы методики экспериментов по изучению картин обтекания тел непрерывно стратифицированной жидкостью с периодом плавучести $T_b = 2\pi/N = 2\pi/\sqrt{|g d \ln \rho/dz|^{-1}}$ и масштабом $A = |d \ln \rho/dz|^{-1}$ (ось Oz направлена вертикально вверх, ρ – плотность, g – ускорение свободного падения) позволяет выделить собственные пространственные и временные масштабы, определяющие размер поля наблюдения, длительность регистрации процесса эволюции течений, пространственное и временное разрешение инструментов.

В данных опытах тело диаметром (характерным размером) D буксируется со скоростью U в бассейне, заполненном водным раствором поваренной соли переменной концентрации с кинематической вязкостью $\nu = 0,01 \text{ см}^2/\text{с}$ и коэффициентом диффузии $\kappa_s = 1,41 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$. Базовые макромасштабы задачи – диаметр тела D , длина присоединенной внутренней волны $\lambda = UT_b$, масштаб плавучести A , микромасштабы – толщины плотностного $\delta_N^n = \sqrt{\nu/N}$ концентрационного $\delta_N^{ks} = \sqrt{\kappa_s/N}$ лигаментов, динамического вязкого $\delta_U^v = \nu/U$ и плотностного лигаментов $\delta_U^{ks} = \kappa_s/U$. Характерные времена – период плавучести T_b и отношения собственных масштабов к скорости тела. Базовыми безразмерными параметрами традиционно выбираются числа Рейнольдса $Re = UD/\nu$, Фруда $Fr = U/ND = \lambda/2\pi D$ отношение масштабов $C = A/D$.

Стенд для изучения динамики и тонкой структуры стратифицированных течений ИПМех РАН [12], схема которого приведена на рис. 1, включает оптический и гидравлический блоки.

Оптический блок на основе теневого прибора ИАБ-458 состоит из разнесенных осветительной и приемной частей. В осветительную часть входит источник света 1, конденсор 2 для формирования его изображения на диафрагме 3, расположенной в фокальной плоскости зеркала 5, поворотное зеркало 4, основное зеркало 5, мениск 6. Симметричная приемная часть включает мениск 7, основное зеркало 8, поворотное зеркало 9, визуализирующую диафрагму 10, согласующий объектив 11 и регистрирующий инструмент 12 (фотоаппарат или видеокамера).

Гидравлический блок включает накопительные баки 13, заполненные пресной водой и водным раствором поваренной соли, подводящие трубопроводы с запирающими устройствами 14 для заполнения бассейна с оптическими иллюминаторами стратифицированной жидкостью – водным раствором поваренной соли переменной концентрации.

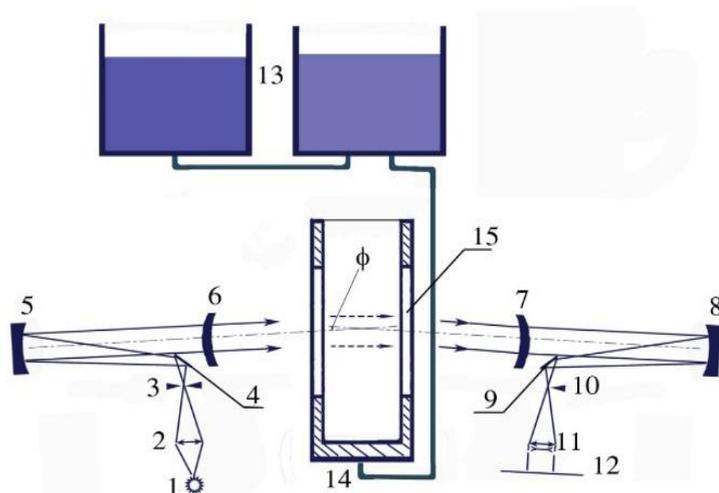


Рис. 1. Схема стенда для изучения динамики и структуры течений гетерогенных жидкостей

Наблюдения течений в толще жидкости обычно проводится в боковой проекции, наиболее удобной для получения теневых изображений картин течений. В зависимости от настройки, прибор ИАБ-458 позволяет получать прямые теневые изображения, в которых визуализируются поля второй производной коэффициента преломления, интерферометрические (поля плотности) и классические теневые с визуализацией различных компонент градиента плотности. Вид наблюдаемого поля определяется выбором формы и ориентации распределенного источника света (широко используются круглое отверстие и щель Максудова [2]), а также формы и ориентации визуализирующей диафрагмы («ножа Фуко – «лезвия бритвы», нити или щели [3]).

Для получения цветного теневого изображения (natural rainbow schlieren image [8]) вместо ножа устанавливается линейная решетка. При вертикальном расположении щели и ножа визуализируется поле горизонтальной компоненты градиента коэффициента преломления, при горизонтальном – вертикальной компоненты. Важное достоинство цветного теневого метода – высокое пространственное разрешение и широкий динамический диапазон, позволяющий наблюдать на одном кадре и слабые, и сильные возмущения одновременно.

Фотография Стенда «Лабораторный передвижной бассейн (ЛПБ)» с теньвым прибором ИАБ-458 приведена на рис. 2.



Рис. 2. Фотография лабораторного передвижного бассейна с теньвым прибором ИАБ-458 (I), кареткой (II), генератором внутренних волн (III), контроллером (IV)

Для повышения качества изображения в прозрачные стенки рабочего бассейна встроены иллюминаторы из оптического стекла. В центре изображения располагается приемная часть

теневого прибора *I*. Над бассейном находится каретка *II* для размещения датчиков и транспортировки моделей. На бассейне установлен механизм генератора внутренних волн *III*. Справа позади бассейна находится стойка управления *IV*. Технические параметры стенда ЛБП приведены в [12].

ПРИМЕРЫ ТЕНЕВЫХ КАРТИН ТЕЧЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ БУКСИРОВКЕ ТЕЛ В НЕПРЕРЫВНО СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ЖИДКОСТИ

Теневые фотографии иллюстрируют сложность многомасштабной структуры стратифицированных течений и существенные отличия теневых изображений, полученных с применением различных способов визуализации картины обтекания пластины, равномерно движущейся вдоль изопикнической поверхности в непрерывно стратифицированной жидкости. Классический метод с вертикальным ножом Фуко при цветной регистрации четко прорисовывает контуры фазовых поверхностей присоединенных внутренних волн, выделяет линии смены структуры поля, обусловленные интерференцией волн, порождаемых передней и задней кромкой тела (рис. 3а). Лигаменты – тонкие прослойки, слабо выражены в отстающем следе.



Рис.3 Теневые картины возмущений при движении полосы длиной $L_x = 7,5$ см, в жидкости с периодом плавучести $T_b = 7,6$ с: а) – $U = 0,27$ см/с (вертикальная щель – нож Фуко), б) – $U = 0,39$ см/с, вертикальная щель – нить Максудова), в) – $U = 0,29$ см/с (цветной теневой метод – горизонтальная щель – решетка)

При регистрации цветного изображения в технике Д.Д. Максудова (вертикальная щель – нить) фазовые поверхности внутренних волн не затевают изображения плотностных меток, смещения которых визуализируют профиль горизонтальной компоненты скорости, показывают структуру области смены геометрии интерферирующих фазовых поверхностей, их искажение в спутном течении и сдвиг на лигаментах следа (рис. 3б).

Цветное теневое изображение, полученное с помощью горизонтальной щели и горизонтальной линейной решетки, проявляет влияние возмущений вертикальной компоненты градиента плотности, иллюстрирует пространственную картину распределения амплитуд в присоединенных волнах и опережающем возмущении. Метод визуализирует сложную мелкомасштабную картину распределения плотности во внутренних волнах и лигаментах в окрестности тела, выделяет границы плотностного следа позади пластины и его внутреннюю линейчатую структуру (рис. 3в).

Классическое черно-белое изображение с ножом Фуко визуализирует многомасштабную картину обтекания равномерно движущегося полого цилиндра в ползучем режиме при $Re < 100$, в которой представлены опережающее возмущение, периодические внутренние волны, высокоградиентные прослойки и волокна – лигаменты (рис. 4а). Одни прослойки, ооконтуривающие след, контактируют с донной частью тела. Другие, «висящие», появляются в поле присоединенных волн и не соприкасаются с телом.

Метод Максудова выделяет богатую структуру лигаментов – высокоградиентных прослоек как контактирующих с телом, так и висящих в поле внутренних волн. На передней кромке нижней висящей прослойки выражен «завиток» – зародыш вихря, который визуализируется при увеличении скорости тела.

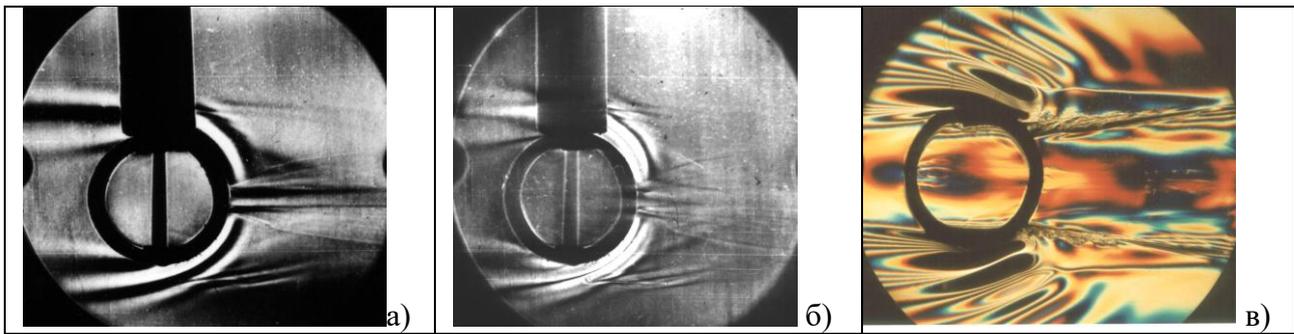


Рис.4. Картина возмущений в непрерывно стратифицированной жидкости при равномерном движении полого горизонтального цилиндра ($T_b = 20,5$ с, $D = 7,6$ см, $U = 0,04$ см/с, $Re = 30$, $Fr = 0,017$, $C = 1370$): – а) – вертикальные щель – нож Фуко, б) – вертикальная щель – нить Максутава, в) – горизонтальная щель – решетка, обеспечивающие визуализацию дисперсии белого света в воде ($T_b = 6,1$ с, $D = 7,6$ см, $U = 0,24$ см/с, $Re = 182$, $Fr = 0,03$)

Наиболее информативным оказывается цветное теневое изображение, приведенное на рис. 4в. Распределение изолиний иллюстрирует опережающее возмущение, оконтуренное группой нестационарных волн; семейство присоединенных волн, продолжающееся висящим разрывом, спутный след с гладким ядром; семейство наклонных лигаментов, стартующих в области отрыва спутного следа от тела, доходящее до висящего разрыва [14].

Теневая визуализация картины обтекания вертикальной пластины и в целом, и в тонких деталях согласуется с результатами расчета на основе редуцированной системы фундаментальных уравнений в приближении Буссинеска, когда вариации плотности учитываются только в членах уравнений с большими коэффициентами [15]. В ползучем режиме отрыв лигаментов – оболочек плотностного следа смещается с острых кромок пластины на донную поверхность и в теневой, и в расчетной картине течения (рис. 5а). Позади пластины располагается спутный след.

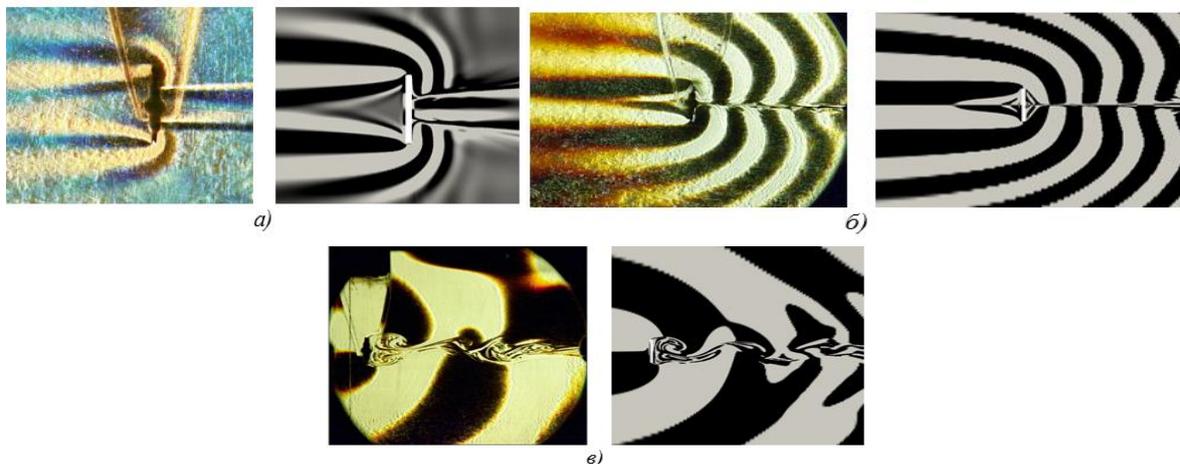


Рис.5. Сравнение теневых изображений и рассчитанных картин горизонтальной компоненты градиента плотности непрерывно стратифицированной жидкости ($T_b = 12,5$ с) около вертикальной пластины высотой $H = 2,5$ см, буксируемой с постоянной скоростью:
а – в) – $U = 0,03; 0,18; 0,75$ см/с (левая часть рисунка – теневая визуализация градиента коэффициента преломления методом «вертикальная щель-нить», правая – расчет)

В волновом режиме в опережающем возмущении выражено отдельное ядро (рис. 5б). В вихревом режиме вариации положения границ следа коррелируют с фазовыми поверхностями присоединенных внутренних волн. За пластиной располагается нестационарный донный вихрь, на размеры и положение которого также влияет текущая фаза волны.

Следует подчеркнуть, что природа формирования лигаментов в гетерогенной среде универсальна, они проявляются в течениях и жидкостей, и газов. В качестве иллюстрации на рис. 6 приводятся теневые картины обтекания крыла в аэродинамической трубе, где

неоднородность плотности создается глобальной температурной стратификацией и ее локальными вариациями, и при буксировке наклонной пластины в стратифицированном бассейне, заполненном стратифицированным раствором поваренной соли.

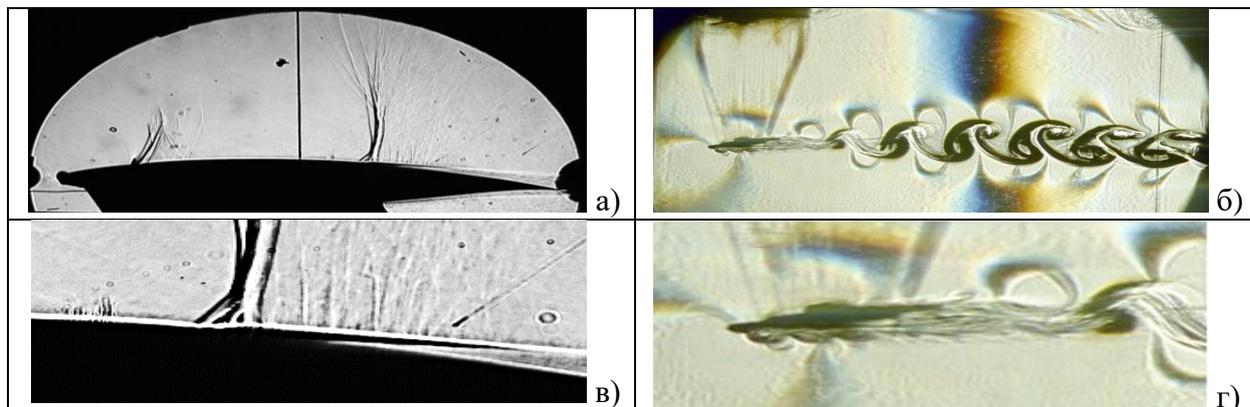


Рис. 6. Теневые фотографии картины обтекания: а) – модели крыла прямым воздушным потоком в аэродинамической трубе при числе Маха $Ma = 0,77$; б) – наклонной пластины, буксируемой в бассейне со стратифицированной жидкостью, в, г) – увеличенные участки изображений, иллюстрирующие сложную структуру лигаментов – тонких высокоградиентных волокон и прослоек

Лигаменты образуют сложную сеть волокон над крылом (рис. 6а). Увеличенное изображение области контактов лигаментов с телом приведено на рис. 6в. В течении над пластиной выраженное семейство лигаментов постепенно сворачивается в тонкие вихревые структуры, формирующие регулярную дорожку (рис. 6б). На увеличенной части изображения можно видеть, что наклонные лигаменты вначале вытягиваются в направлении среднего течения, а затем деформируются и образуют вихри (рис. 6г).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие аналитических исследований системы фундаментальных уравнений механики гетерогенных жидкостей, вычислительной техники, методов программирования, оптических инструментов создает новые возможности проведения оптической визуализации течений жидкости. Применение новых инструментов с учетом результатов анализа полных решений системы фундаментальных уравнений позволит уточнить известные и получить новые результаты в изучении динамики и структуры течений в широком диапазоне параметров, усовершенствовать методики переноса данных модельных экспериментов на технические и природные условия.

Эксперименты по теневой визуализации внутренних волн проведены на стендах УИУ «ГФК ИПМех РАН». Работа выполнена по госзаданию, номер госрегистрации: 124012500442-3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Settles G.S.** Schlieren and shadowgraph techniques. Berlin: Springer, 2001. 376 p.
2. **Максутов Д.Д.** Теневые методы исследования оптических систем. Л.-М.: ГТТИ, 1934. 171 с.
3. **Васильев Л.А.** Теневые методы. М: Наука, 1968. 408 с.
4. **Герасимов С.И., Файков Ю.И., Холин С.А.** Кумулятивные источники света. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011. 327 с.
5. **Стефанов С.Р., Трохан А.М., Чашечкин Ю.Д.** Об исследовании турбулентных пульсаций коэффициента преломления воды теплеровским методом // Журнал ПМТФ. 1971. № 5. С. 103-108.

6. **Бойко В.М., Оришич А.М., Павлов А.А., Пикалов В.В.** Методы оптической диагностики в аэрофизическом эксперименте. Новосибирск: НГУ, 2009. 450 с.
7. **Mowbray D.** The use of schlieren and shadowgraph techniques in the study of flow patterns in density stratified liquids // J. Fluid Mech. 1967. Vol. 27. № 3. Pp. 595-608.
8. **Chashechkin Yu.D.** Schlieren Visualization of a Stratified Flow around a Cylinder // J. Visualization. 1999. Vol. 1. № 4. Pp. 345-354.
9. **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** Курс теор. физ. Т. 6. Гидродинамика. М.: Наука. 1986. 736 с.
10. **Chashechkin Y.D.** Foundations of engineering mathematics applied for fluid flows // Axioms. 2021. Vol. 10. № 4. P. 286.
11. **Chashechkin Yu.D.** Singularly perturbed components of flows – linear precursors of shock waves // Math. Model. Nat. Phenom. 2018. Vol. 13. №. 2. Pp. 1-29.
12. **Комплекс УИУ “ГФК ИПМех РАН”:** Сайт: <http://www.ipmnet.ru/uniquequip/gfk/#equip>.
13. **Чашечкин Ю. Д., Гуменник Е. В., Сысоева Е. Я.** Трансформация плотностного поля трехмерным телом, движущимся в непрерывно стратифицированной жидкости // ПМТФ. 1995. № 1. С. 20-32.
14. **Chashechkin Yu.D., Mitkin V.V.** Soaring interfaces, vortices and vortex systems inside the internal waves wake past the horizontally moving cylinder in a continuously stratified fluid // J. of Visualization. 2006. Vol. 9. № 3. Pp. 301-308.
15. **Chashechkin Yu. D., Zagumennyi I. V.** 2D hydrodynamics of a plate: from creeping flow to transient vortex regimes // Fluids. 2021. Vol. 6. P. 310.

Chashechkin Yu.D.

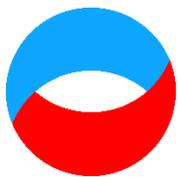
*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Russia,
119526, Moscow, Prospekt Vernadskogo 101/1, E-mail: yulidch@gmail.com*

COLOR PANORAMIC AND NARROW-FIELD SCHLIEREN OBSERVATIONS OF HETEROGENEOUS FLUID FLOWS

ABSTRACT

Description of the dynamics and structure of heterogeneous liquid and gas flows based on the system of fundamental equations of fluid mechanics stimulated the development of both new observation techniques and classical schlieren instruments. Developments of numerical methods for data processing, sources and receivers of light in a wide spectral range expands the possibilities of obtaining and analyzing visual images of flows. Both classical schlieren instruments and original developments acquire new qualities. Selection of the shape of the source and the visualizing diaphragm allows recording the fields of various components of the refractive index and density gradient in stratified flows (examples are given). Of particular interest is the development of instruments with high temporal and spatial resolution, allowing simultaneous recording of large-scale components - jets, wakes, vortices, waves, and ligaments - mathematical images of thin components of stratified flows. Examples of schlieren visualization of 2D stratified wakes and their calculations based on a reduced system of fundamental equations are given.

SCHLIEREN DEVICES, STRATIFICATION, DENSITY, WAKES, LIGAMENTS, WAVES



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 535.8

Дубнищев Ю.Н.¹, Арбузов Э.В.², Золотухина О.С.¹, Лапиков М.М.³

¹ ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия,
630090, г. Новосибирск, Академика Лаврентьева пр-т, 1, E-mail: dubnistchev@itp.nsc.ru

² ФГБУН Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, Россия,
630090, г. Новосибирск, Академика Коптюга пр-т, 4, E-mail: arbuzov@math.nsc.ru

³ ФГБУН Новосибирский государственный технический университет, Россия,
630073, г. Новосибирск, Карла Маркса пр-т, 20, E-mail: oit@ftf.nstu.ru

ОПТИЧЕСКАЯ ГИЛЬБЕРТ-ТОМОГРАФИЯ ГАЗОВЫХ, КОНДЕНСИРОВАННЫХ И РЕАГИРУЮЩИХ СРЕД

АННОТАЦИЯ

В работе на примере численных моделей показана возможность применения алгоритма Гершберга-Папулиса в задаче реконструкции фазовой структуры исследуемой среды по результатам гильберт-томографии. Разработанный на базе широкоапертурного теневого прибора ИАБ-463М метод гильберт-томографии полей фазовой оптической плотности выполняет четырёхракурсное зондирование исследуемой среды с использованием световых пучков, ориентированных под углами 0 , $\pi/4$, $\pi/2$ и $3\pi/4$ к оптической оси прибора, и одновременно регистрирует на ПЗС-матрице камеры все томографические проекции. Это позволяет фиксировать фрагменты изображений в точках, которые соответствуют интегралам Радона вдоль прямых, проходящих через узлы сетки дискретизации, соответствующей разрешению фотоматрицы, и даёт возможность в формулах обращения использовать исходные данные без предварительной интерполяции. Приведённые результаты будут использованы для обработки экспериментальных данных.

ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА, ГИЛЬБЕРТ-ТОМОГРАФИЯ, АЛГОРИТМ ГЕРШБЕРГА-ПАПУЛИСА

ВВЕДЕНИЕ

Методы оптической томографии широко применяются в диагностике газовых, конденсированных и реагирующих сред [1, 2]. Для получения проекционных данных обычно используются классические интерференционные и теневые способы измерений [3]. Алгоритмы обработки томограмм существенно зависят от регистрируемого числа проекций [4].

Известны методы гильберт-оптики [5], реализующие визуализацию исследуемых сред с применением фазового гильберт-фильтра, согласованного со спектральной полосой излучения светового источника, формирующего зондирующее поле. Применение преобразования Гильберта позволяет представить теорию классических теневых приборов в виде компактного математического аппарата. В отличие от интерферометрических системы гильберт-диагностики не содержат пространственно разнесённых каналов, чем обеспечивается большая надёжность работы.

Итерационный алгоритм Гершберга-Папулиса является одним из распространенных методов решения задачи реконструкции исследуемых структур в малоракурсной томографии [6, 7]. Он основан на использовании априорной информации об исследуемом объекте в координатном и частотном пространствах, которая вычисляется из данных Радона с использованием теоремы о центральном сечении [8]. Целью настоящей работы является адаптация алгоритма Гершберга-Папулиса к задаче реконструкции фазовой структуры исследуемой среды по результатам гильберт-томографии в случае малого числа ракурсов наблюдения.

ГИЛЬБЕРТ-ТОМОГРАФ

Ранее на конференции «ОМИП-2023» было представлено описание разработанного на базе модернизированного широкоапертурного теневого прибора ИАБ-463М гильберт-томографа (рис. 1), позволяющего синхронно регистрировать визуализированные фазовые структуры газовых, конденсированных и реагирующих сред – гильбертограммы с четырёх ракурсов $\theta_k = \pi k/4$ ($k = 0, \dots, 3$) одной фото-видеокамерой [9].

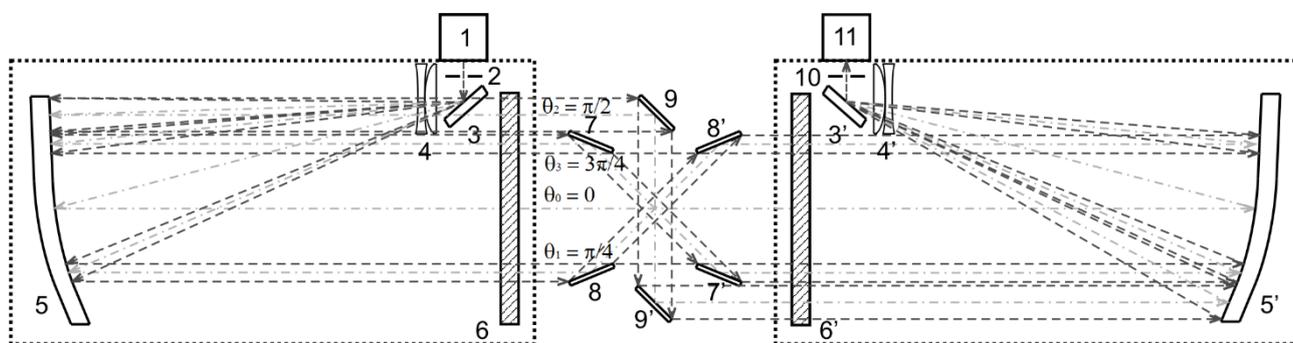


Рис. 1. Гильберт-томограф: 1 – осветительный модуль; 2 – щелевая диафрагма; 3 и 3' – диагональные зеркала; 4 и 4' – элементы афокальных компенсаторов; 5 и 5' – сферические коллиматорные зеркала; 6 и 6' – защитные плоскопараллельные стёкла коллиматоров; 7, 7', 8, 8' и 9, 9' – пары зеркал, формирующие зондирующие световые пучки; 10 – гильберт-фильтр в частотной плоскости; 11 – фото-видеокамера

Пространственная система расположения зеркал 7, 7', 8, 8' и 9, 9' и регистрация выходного оптического сигнала одной фото-видеокамерой позволяют фиксировать гильберт-проекции для всех четырёх ракурсов в точках, которые соответствуют интегралам Радона вдоль прямых, проходящих через узлы сетки дискретизации, соответствующей разрешению фотоматрицы. Это даёт возможность при применении формул обращения использовать исходные данные без предварительной интерполяции.

В результате пространственно-частотный фурье-спектр фазовых возмущений, индуцируемых в зондирующих полях исследуемой средой и регистрируемых в каждой проекции, локализуется в фурье-плоскости 10, совмещённой с плоскостью изображения источника 1. В этой плоскости помещён квадрантный гильберт-фильтр [5]. Использование линейного светового источника в сочетании с фильтром даёт возможность реализовать одномерное гильберт-преобразование возмущённого исследуемой средой поля. В этом случае математическую модель, соответствующую визуализации фазовой функции $\varphi_k(x_k, y)$ в каждой проекции k , можно представить через интегральный оператор

$$I_k(x_k, y) = \left| \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\cos[\varphi_k(x', y)]}{x_k - x'} dx' \right|^2 + \left| \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin[\varphi_k(x', y)]}{x_k - x'} dx' \right|^2,$$

где $I_k(x_k, y)$ – интенсивность поля, регистрируемого фото-видеокамерой. Функция $\varphi_k(x_k, y)$ определяется преобразованием Радона от распределения показателя преломления $n(x_k, y, z_k)$ в исследуемой среде

$$\varphi_k(x_k, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \int_{z'}^{z''} [n(x_k, y, z_k) - n_\infty] dz_k, \quad (1)$$

где λ – длина волны излучения, n_∞ – показатель преломления воздуха, z' и z'' – координаты входа и выхода компонент зондирующего поля. Обратная задача заключается в том, чтобы из значений $I_k(x_k, y)$, регистрируемых в эксперименте, реконструировать функции $\varphi_k(x_k, y)$ для каждой проекции.

В работах [10, 11] для решения данной задачи с учётом физических условий в случае линейных $n = n(x)$ и осесимметричных ($n = n(x), r^2 = x^2 + z^2$) объектов было предложено параметризовать фазовую функцию кривыми Безье [12] и с использованием метода Гаусса-Ньютона [13] минимизировать функционал

$$f(I_{exp}, I_{mod}) \rightarrow \min,$$

равный сумме квадратов расстояний между точками экстремумов в экспериментальной I_{exp} и модельной I_{mod} гильбертограммах.

При таком подходе фазовая функция $\varphi(x, y_0)$ в сечении y_0 линейных и осесимметричных объектов аппроксимируется полиномом Безье, что и является решением задачи оптимизации. В случае осесимметричного объекта интегральное преобразование Радона (1) в сечении y_0 обращается в интеграл Абеля [11]. Если объект не обладает осевой симметрией (и не является линейным), необходимо регистрировать данные Радона с различных направлений и для восстановления показателя преломления применять методы томографии.

ОБРАБОТКА МОДЕЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ

Алгоритм Гершберга-Папулиса является одним из наиболее эффективных итерационных способов восстановления функций по проекциям Радона, особенно в тех случаях, когда число направлений сканирования невелико или ограничен их угловой диапазон. Суть его заключается в том, что априорная информация об искомой функции n и её известных проекциях используется для начального приближения и последующей корректировки в координатной и частотной плоскостях.

Алгоритм восстановления искомой функции по методу Гершберга-Папулиса [9] можно записать в виде

$$\begin{aligned} n^{m+1} &= C_M F^{-1} [S_M + F^{+1} [n^m] (1 - H_M)], \\ n^0 &= C_M F^{-1} [S_M], \end{aligned} \quad (2)$$

где F^{+1} и F^{-1} – операторы прямого и обратного преобразования Фурье соответственно; m – шаг итерации; C_M – оператор априорной информации об объекте; S_M – спектр измеряемого суммарного изображения; H_M – оператор искажений. Критерием окончания итерационного процесса является малость нормы отклонения полученной томограммы Δ_m от её оценки на предыдущем этапе

$$\Delta_m^2 = \frac{\sum_i \sum_j (n_{i,j}^m - n_{i,j}^{m+1})^2}{\sum_i \sum_j (n_{i,j}^m)^2}.$$

В результате многократного выполнения операций спектр будет получен на всей частотной плоскости. При этом качество восстановления будет зависеть от свойств самой функции $n(z, x)$ и её спектра, которые включаются в определение операторов S_M и S_M .

Для оценки эффективности метода Гершберга-Папулиса (2) были рассмотрены модельные функции $n(z, x)$, представленные на рис. 2а и 3а. Реконструированные функции n с указанием на графиках числа итераций и среднеквадратической ошибки показаны на рис. 2б и 3б, гильбертограммы из восстановленных проекций с критерием информативности Q_{inf} исходных функций n приведены на рис. 4. Все реконструкции выполнены при углах сканирования $\theta_k = 0, \pi/4, \pi/2$ и $3\pi/4$.

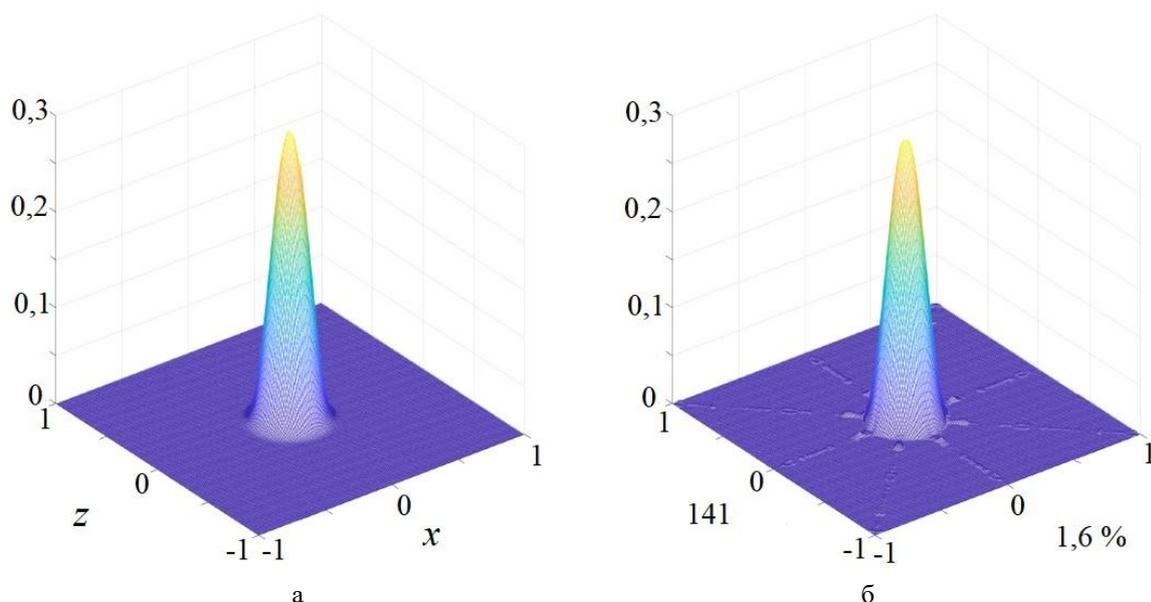


Рис. 2. Первая модельная функция: а – начальная функция $n_1(z, x)$ объекта; б – результат реконструкции $n_1(z, x)$ методом Гершберга-Папулиса, среднеквадратическая ошибка восстановления $\Delta_m = 1,6\%$, число итераций $m = 141$

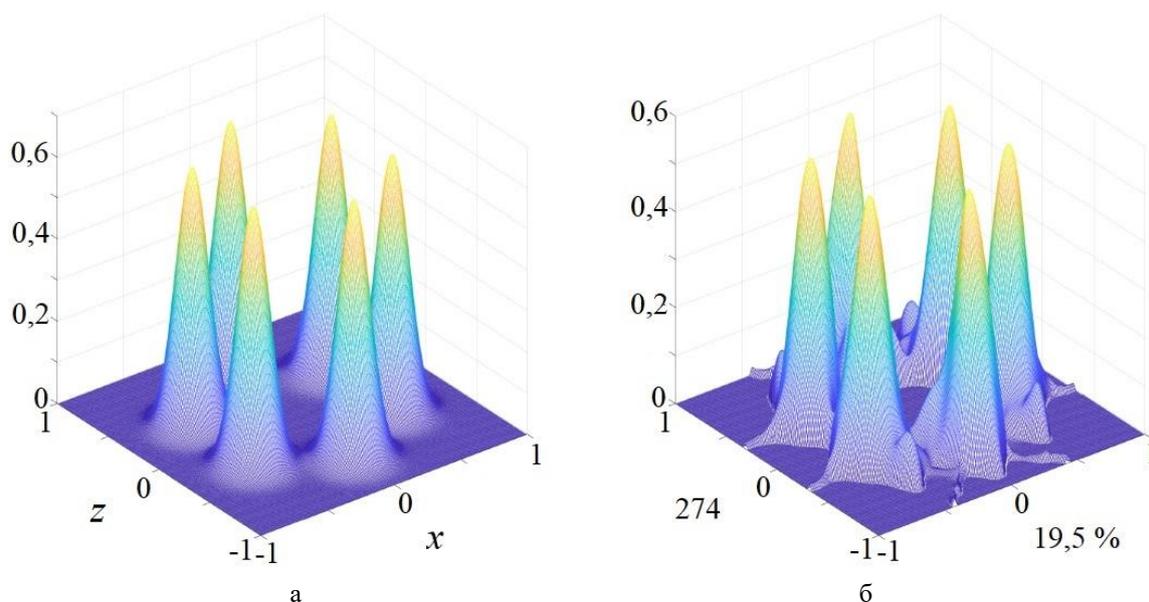


Рис. 3. Вторая модельная функция: а – начальная функция $n_2(z, x)$ объекта; б – результат реконструкции $n_2(z, x)$ методом Гершберга-Папулиса, среднеквадратическая ошибка восстановления $\Delta_m = 19,5\%$, число итераций $m = 274$

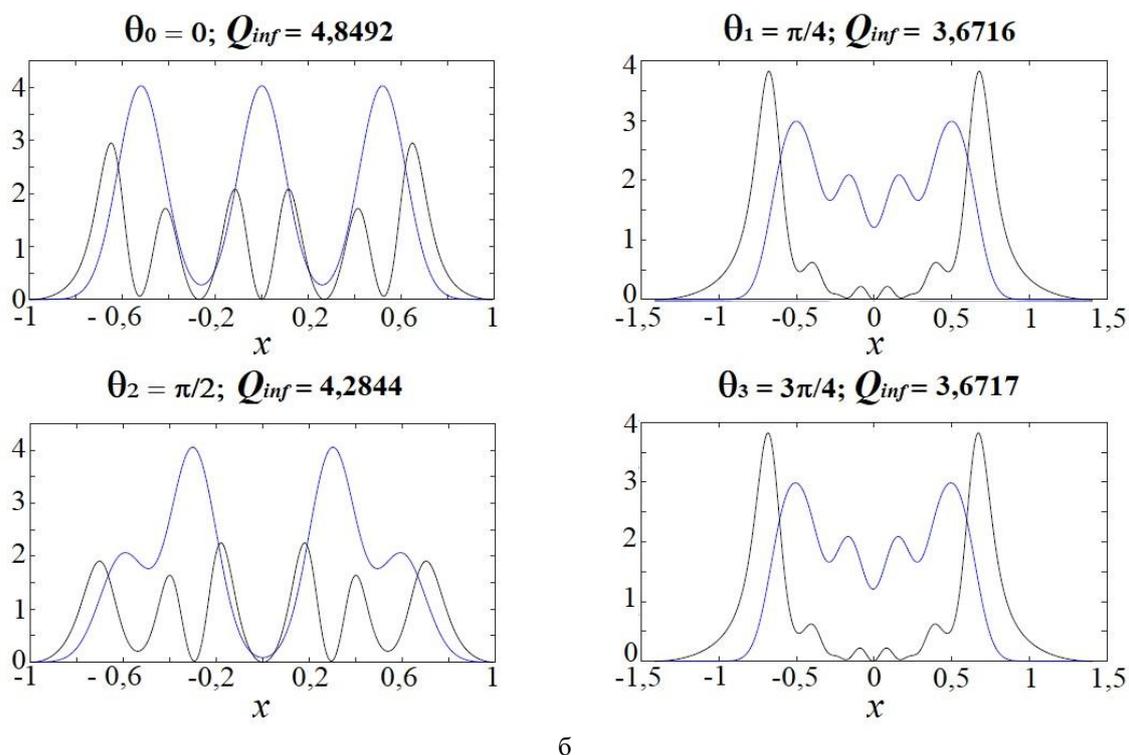
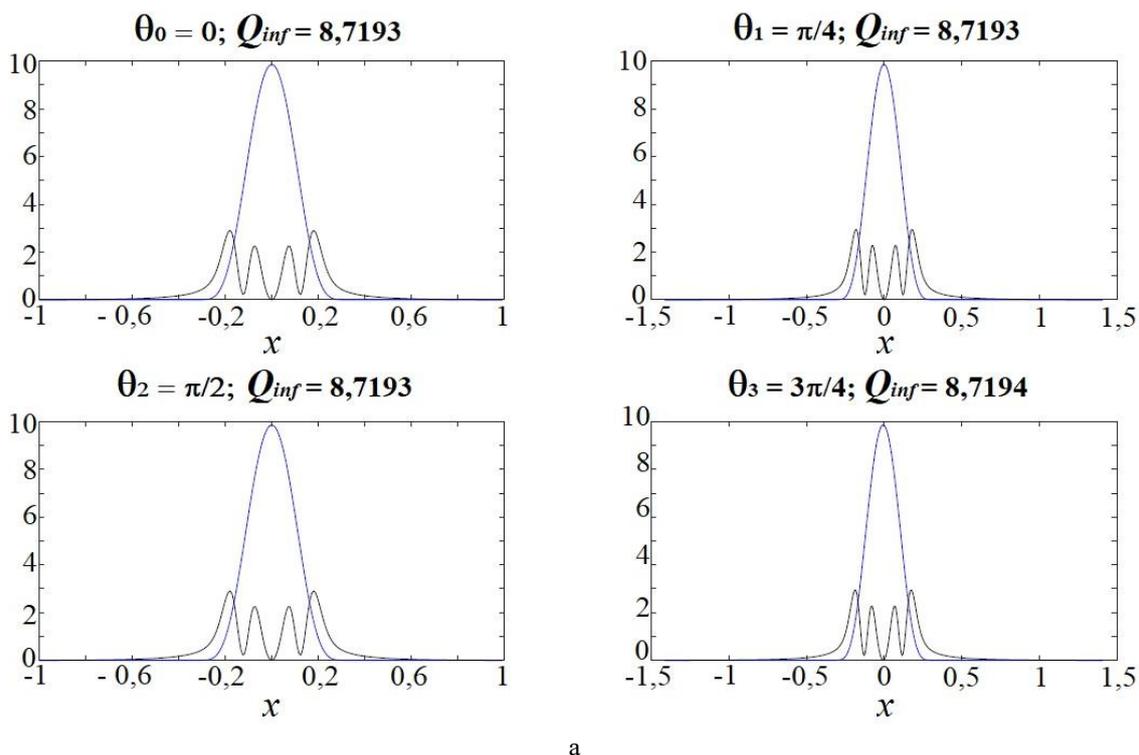


Рис. 4. Гильбертограммы из восстановленных проекций с критерием информативности Q_{inf} :
а – исходной функции $n_1(z, x)$; б – исходной функции $n_2(z, x)$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе на примере численных моделей показана возможность применения алгоритма Гершберга-Папулиса для решения проблемы малоракурсной оптической гильберт-диагностики. Метод Гершберга-Папулиса представляет собой важный инструмент в области компьютерной томографии и оптики. Он позволяет решать проблемы, связанные с

восстановлением изображений при ограниченном количестве проекций. Полученные в работе результаты в дальнейшем будут использованы для обработки экспериментальных данных.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН № 121031800217-8, проведение математических расчётов выполнено в рамках государственного задания ИМ СО РАН № FWNF-2022-0009.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Steven B.** Advanced optical diagnostic technology application progress in combustion testing of energetic materials // *EJST*. 2024. Vol. 6. № 2. Pp. 10-24.
2. **Dolecek R., Psota P., Ledl V., Vit T.** Heat and mass transfer measurement using method of digital holographic tomography // *Optics and Measurement International Conference: Proc.*, 2016. Vol. 10151. P. 1015119.
3. **Пикалов В.В., Мельникова Т.С.** Низкотемпературная плазма. Томография плазмы (том 13). Новосибирск: Наука, 1995. 229 с.
4. **Левин Г.Г., Вишняков Г.Н.** Оптическая томография. М.: Радио и связь, 1989. 224 с.
5. **Арбузов В.А., Дубнищев Ю.Н.** Методы гильберт-оптики в измерительных технологиях. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. 316 с.
6. **Gerchberg R.W.** Super-resolution through error energy reduction // *Opt. Acta*. 1974. Vol. 21. № 9. Pp. 709-720.
7. **Papoulis A.A.** New algorithm in spectral analysis and band-limited extrapolation // *IEEE Transactions on Circuits and Systems*. 1975. Vol. 22. № 9. Pp. 735-742.
8. **Хелгасон И.М.** Преобразование Радона. М.: Мир, 1983. 152 с.
9. **Арбузов В.А., Арбузов Э.В. и др.** Гильберт-томография газовых струй и пламён // *Оптические методы исследования потоков: Тез. докл. 17-й Межд. конф.* М.: Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, 2023. С. 100-108.
10. **Арбузов В.А., Арбузов Э.В. и др.** Реконструкция интерференционных и гильберт-структур из численных моделей поля изотерм в конвективных течениях, индуцированных в вертикальном слое воды нестационарными граничными условиями // *Научная визуализация*. 2019. Т. 11. № 5. С. 119-125.
11. **Arbuzov V.A., Arbuzov E.V., etc.** Hilbert-optic diagnostics of hydrogen-oxygen inverse diffusion flame // *Energies*. 2022. Vol. 15. № 24. P. 9566.
12. **Интернет-учебник** [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://learn.javascript.ru/bezier-curve> (дата обращения 26.04.2025).
13. **Floudas C.A., Pardalos P.M.** Encyclopedia of optimization. New York: Springer, 2008. 4622 p.

Dubnishchev Yu.N.¹, Arbuzov E.V.², Zolotukhina O.S.¹, Lapikov M.M.³

¹ *Kutateladze Institute of Thermophysics of the SB RAS, Russia,
630090, Novosibirsk, ave. Academician Lavrentiev, 1, E-mail: dubnistchev@itp.nsc.ru*

² *Sobolev Institute of Mathematics of the SB RAS, Russia,
630090, Novosibirsk, ave. Academician Koptug, 4, E-mail: arbuzov@math.nsc.ru*

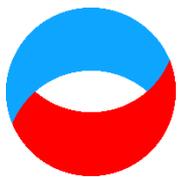
³ *Novosibirsk State Technical University NETI, Russia,
630073, Novosibirsk, ave. Karl Marx, 20, E-mail: oit@ftf.nstu.ru*

OPTICAL HILBERT TOMOGRAPHY OF GASEOUS, CONDENSED AND REACTIVE MEDIA

ABSTRACT

The possibility of using the Gershberg-Papoulis algorithm in the problem of phase structure reconstructing of the studied medium based on the Hilbert tomography results using numerical models as an example is shown in the paper. The Hilbert tomography method of phase optical density fields, developed on the basis of the wide-aperture shadow device IAB-463M, performs four-angle probing of the studied medium using light beams oriented at angles of 0 , $\pi/4$, $\pi/2$ and $3\pi/4$ to the device optical axis, and simultaneously records all tomographic projections on the camera's CCD matrix. This allows images fragments to be fixed at points that correspond to Radon integrals along straight lines passing through the nodes of the sampling grid corresponding to the photomatrix resolution, and makes it possible to use the original data in the inversion formulas without preliminary interpolation. The presented results will be used to process experimental data.

**OPTICAL DIAGNOSTICS, HILBERT TOMOGRAPHY, GERSHBERG-PAPOULIS
ALGORITHM**



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 536.46

Арбузов Э.В.^{1,2}, Дубнищев Ю.Н.^{1,3}, Лукашов В.В.¹, Тупикин А.В.¹

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия,
630090, Новосибирск, пр-т ак. Лаврентьева, 1, E-mail luka@itp.nsc.ru

²Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, Россия,
630090, г. Новосибирск, Академика Коптюга пр-т, 4

³Новосибирский государственный технический университет, Россия,
630073, г. Новосибирск, Карла Маркса пр-т, 20

**ГИЛЬБЕРТ-ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ОТСОЕДИНЁННОГО ПЛАМЕНИ В
ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ**

АННОТАЦИЯ

Внешние электрические поля являются одним из эффективных способов управления процессами горения. При этом решаются задачи как экологической безопасности, так и повышения энергоэффективности технологических установок. Гильберт – диагностика параметров пламени позволяет исключить внесение дополнительных изменений в распределении зарядов и протекании токов при наличии внешнего электрического поля. В работе обсуждается исследование структуры диффузионного пламени, стабилизированного продольным электрическим полем. Адаптированная к изучению проблем горения оптическая диагностика основана на визуализации фазовых возмущений, индуцированных в зондирующем световом поле изучаемой средой, методами гильберт-оптики. Диагностический комплекс реализован на основе теневого прибора ИАБ–463М с модифицированными узлами оптической фильтрации, светового источника, регистрации и обработки информации.

**ТОПЛИВНАЯ СМЕСЬ CH_4/H_2 , ДИФФУЗИОННОЕ ПЛАМЯ, ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ,
ГИЛЬБЕРТ-ВИЗУАЛИЗАЦИЯ**

ВВЕДЕНИЕ

Одним из приоритетных направлений мировой науки является поиск решений, обеспечивающих экологическую безопасность и высокую эффективность энергетических установок. Значительное внимание уделяется вопросу декарбонизации в промышленности, энергетике и транспорте [1-4]. Для снижения «углеродного следа» предлагаются различные решения от термического разложения метана на H_2 и C , с последующей переработкой углерода на удобрения, до создания альтернативных топливных смесей на основе углеводородов и аммиака с добавлением водорода. Перспективы использования NH_3 связаны с простотой хранения и транспортировки водородосодержащего топлива, сжигание которого не несет выработку CO_2 . В [5] представлено численное исследование использования аммиака и водорода при сжигании двухкомпонентного топлива под высоким давлением. Показано, что при повышении давления и температуры реализуются более устойчивые режимы горения аммиаком. Заметим, что полный отказ от использования углеводородов для получения электроэнергии пока не выглядит привлекательным. Поэтому повышенный интерес также вызывают разработки газотурбинных систем, способных эффективно работать на смесях

углеводородного топлива с водородом [6] в диапазоне концентраций водорода в топливной смеси 0...100%. Исследования эффективности работы двигателей на смесях водорода с природным газом при искровом зажигании [7, 8] показали возможность повышения КПД двигателей по сравнению с чистым водородом. Углеводородные пламена обладают значительными концентрациями носителей зарядов ($\sim 10^{12}-10^{14} \text{ см}^{-3}$), что обеспечивается за счет реакций хемоионизации [9-13]. Для слабых электрических полей ($E[\text{В/см}]/P[\text{тор}] < 2$) важное значение имеет вовлечение ионами нейтральных частиц в дрейф, т.н. ионный ветер. Одним из первых этот эффект описал Маркштейн Г. в работе [14]. Для оценки эффекта при ЕГД-взаимодействии Ватажиным А.Б. была предложена модель, в которой для стационарного процесса принималось равенство электрических и инерционных сил [15]. Влияние ионного ветра изучается экспериментально и численно [16-19]. В работе [20] была сформулирована гипотеза о локализации воздействия электрического поля на области горения, что подтвердили исследования, результаты которых представлены [21-23]. Согласно [24] расчеты показали, что происходит уменьшение локальной деформации фронта горения и изменение скорости выделения энергии, что ведет к увеличению локальной скорости горения в диффузионном факеле. Тем самым диапазон стабилизации пламени расширяется за счет электрогидродинамического воздействия внешнего электрического поля.

Добавка H_2 в углеводородные топлива влияет на электрохимические свойства пламени [25]. Установлено, что для смесей с объемной долей метана в топливе более 40% величина электрического тока линейно зависит от количества метана. Регистрация хемилюминесценции радикала CN^* демонстрирует аналогичную зависимость интенсивности свечения пламени от объемной доли метана в топливе. Это свидетельствует о снижении производства ионов в реакциях хемоионизации при увеличении в топливной смеси доли водорода. Протекающие токи ведут к изменению гидродинамики течения с реакциями, что сказывается на условиях стабилизации факела.

Таким образом, при разбавлении метана водородом получаются смеси, с одной стороны, более безопасные с точки зрения экологии, с другой стороны, ослабляется стабилизирующая роль внешних электрических полей. В работе экспериментальными методами исследовалось влияние состава метано-водородной смеси на стабилизирующий эффект слабого электрического поля. Для этого наряду с измерением интегральных характеристик (протекающий ток, скорость истечения топливной смеси, состав) выполнялась Гильберт – диагностика пламени, позволяющая исключить внесение дополнительных изменений в распределении зарядов и протекании токов при наличии внешнего электрического поля.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 1 представлена упрощенная схема оптического диагностического комплекса, реализующего метод гильберт–визуализации исследуемой среды. Диагностический комплекс выполнен на базе оптического затеняющего устройства ИАБ-451 [26]. Комплекс содержит модуль освещения, состоящий из источника света 1 – светодиода с рабочей длиной волны 636 нм, коллиматорной линзы 2 и щелевой диафрагмы 3. Щелевая диафрагма размещена в передней фурье-плоскости объектива 4. Этот объектив формирует зондирующее световое поле в исследуемой среде. Фурье-спектр фазовых возмущений, наводимых в зондирующем поле горелкой 9, локализуется в частотной плоскости объектива 5, где размещен квадрантный фильтр Гильберта 6, ориентация которого согласована с диафрагмой 3. Линза 7 осуществляет обратное преобразование Фурье отфильтрованного поля, формируя в зависимости от спектральных характеристик источника света аналитический или связанный по Гильберту оптический сигнал [27]. Этот сигнал регистрируется цифровой видеокамерой 8, подключенной к компьютеру 16. Система подачи воздуха и топлива 10–15 обеспечивала поддержание требуемых расходных параметров метана и спутного потока. Горелочное устройство 9 представляет собой два соосно расположенных цилиндрических канала изготовленных из металла. Внутренний канал, через который подается чистый метан, это

трубка внутренним диаметром 2 мм (толщина стенки 2 мм, длина трубки 53 мм). Внутренний диаметр внешнего канала, через который подавался спутный поток воздуха, составлял 20 мм.

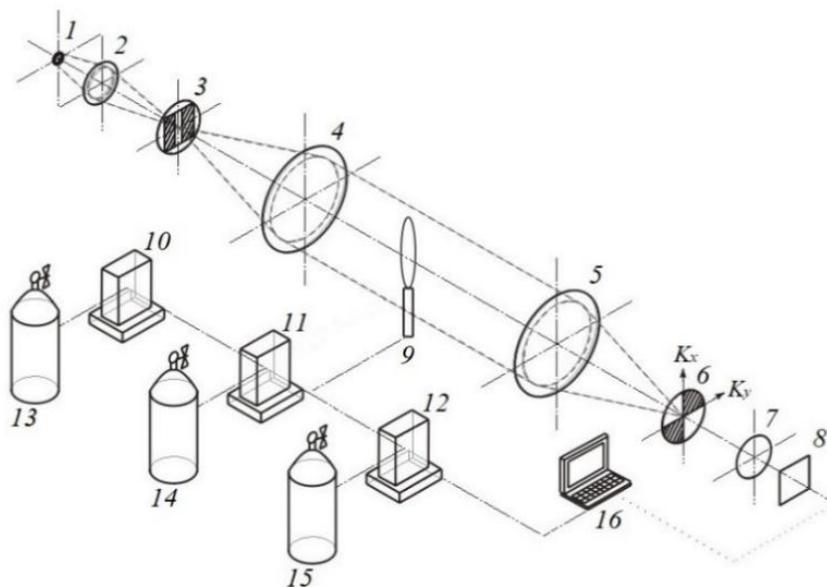


Рис. 1. Оптическая схема установки

Турбулентная струя топлива при числе Рейнольдса $Re = 3900$ (30 м/с) вытекает из трубки диаметром $d = 2$ мм в спутный поток воздуха при комнатных условиях 25°C и атмосферном давлении. В наших опытах параметр спутности s (отношение скоростей спутного потока к скорости истечения топлива) $s < 0,017$. Скорость спутного потока устанавливалась в диапазоне $0,3 \dots 0,6$ м/с. На расстоянии 200 мм от среза горелки на оси потока размещался электрод, на который от источника подавалось постоянное напряжение $V = 0 \dots 3,8$ кВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ

Визуализация на рис. 2 показывает типичную для отсоединённого диффузионного факела картину течения. На расстоянии h от среза горелки ($h/d = 25 \dots 30$) устанавливается фронт турбулентного горения. Расстояние пламени от среза сопла совершает квазипериодические колебания. Динамика этих перемещений, как известно, зависит от скорости распространения пламени в рассматриваемой топливно-воздушной смеси.

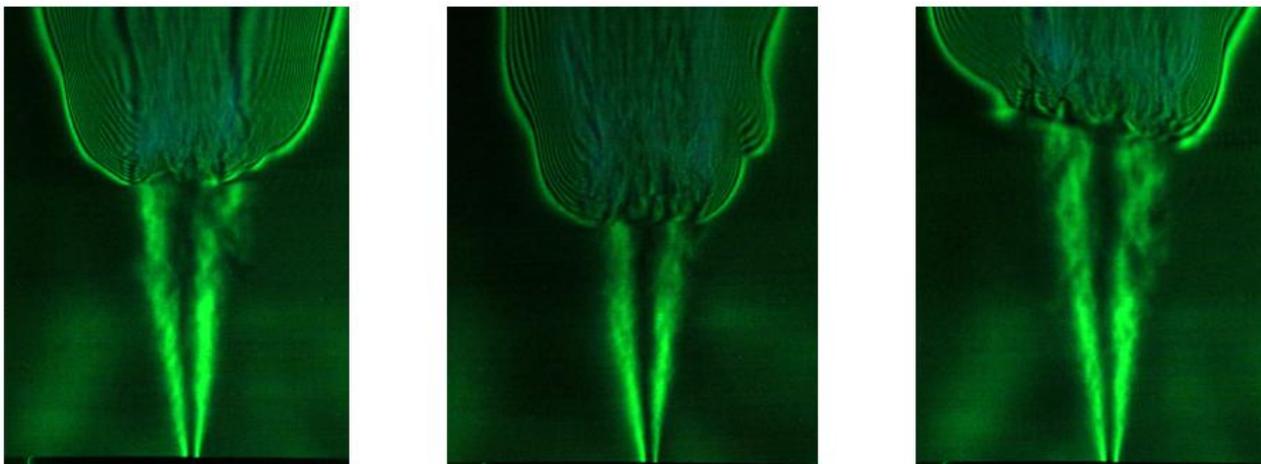


Рис. 2. Отсоединённое пламя метана в спутном потоке воздуха, $V=0$ В

После подачи напряжения выше 0,8 кВ происходит присоединение пламени. Зона горения начинается непосредственно от среза горелки (рис. 3). Это приводит к улучшению стабилизации пламени. Как видно из визуализации течения, в области непосредственно примыкающей к срезу горелочного устройства, наблюдается газодинамическая структура развитого вихревого течения, аналогичная картине натекания струи на преграду. По-видимому, в факеле вблизи поверхности с максимальными температурами «ионный ветер» приводит к формированию зоны возвратного потока, что может быть причиной нарушения симметрии течения и появлению «выбросов» горячего газа в радиальном направлении. В отсутствие спутного потока (рис. 4) течение имеет более упорядоченный характер, вероятность появления выбросов вещества в радиальном направлении заметно снижается. Применение зондовых методов для измерений температуры в исследуемом объекте крайне затруднительно.

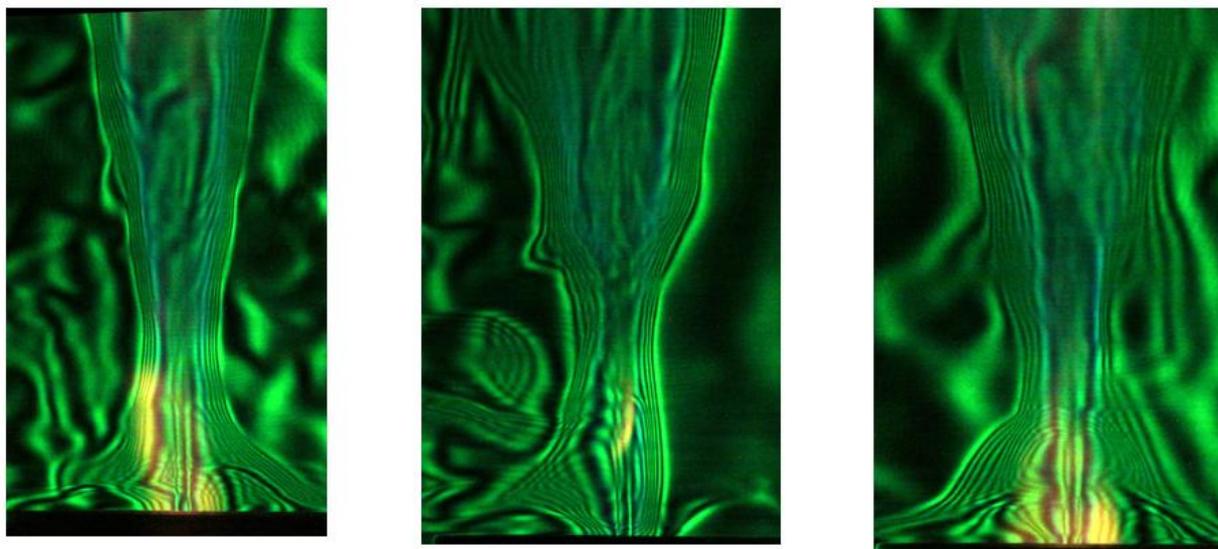


Рис. 3. Присоединённое пламя метана в спутном потоке воздуха, $V = 3,8$ кВ, $s = 0,017$

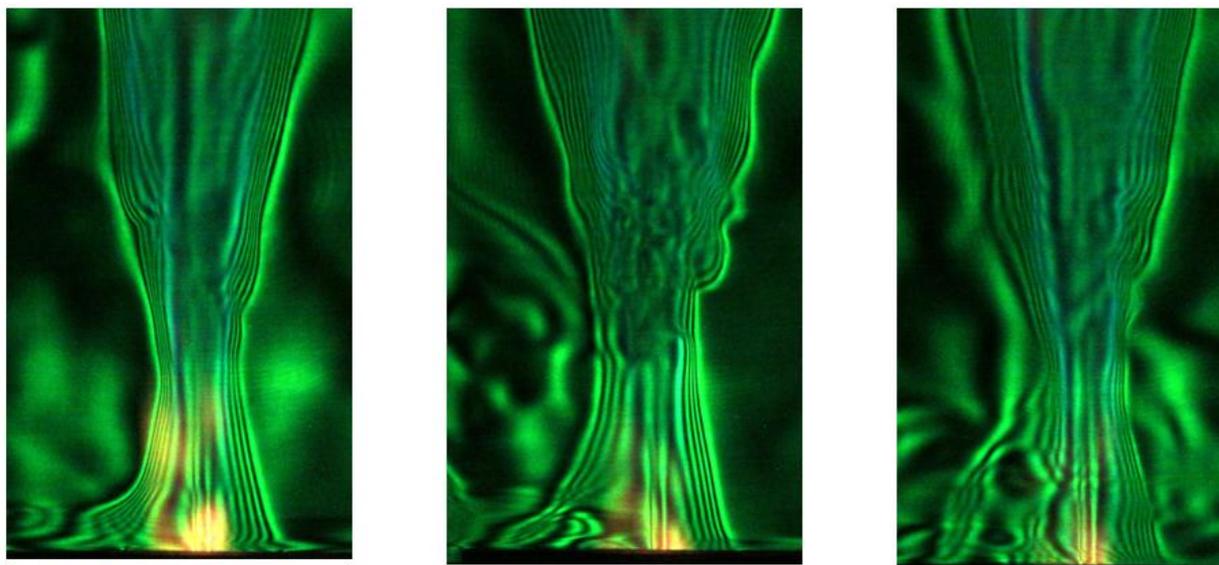


Рис. 4. Присоединённое пламя метана без спутного потока воздуха, $V = 3,8$ кВ, $s = 0$

В данном случае оптические средства диагностики вне конкуренции. Для гильбертограмм, представленных слева на рис. 3 и рис. 4 соответственно, в фиксированном сечении были определены распределения коэффициента преломления газовой смеси реагирующего потока и затем используя методику из работы [28] были получены распределения температуры, представленные на рис. 5. В данном случае использовалось т.н.

«приближение воздуха», когда коэффициент преломления газовой смеси принимается зависящим только от температуры. Как видно из представленных данных, наличие спутного потока приводит к уширению зоны смешения топливной струи с воздухом и смещению положения фронта пламени к оси течения.

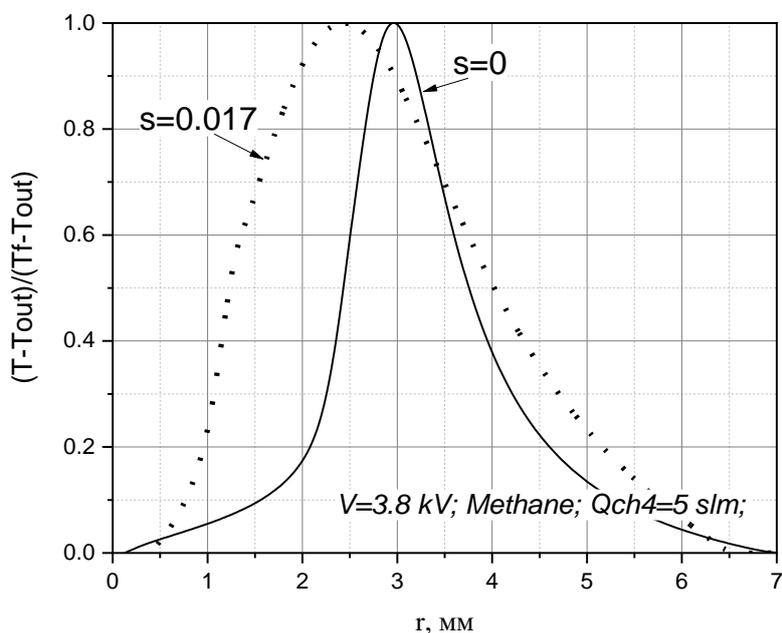


Рис. 5. Мгновенные профили температуры в диффузионном факеле метана в электрическом поле, $V = 3,8$ кВ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение гильберт-визуализация для исследования диффузионного метано-воздушного факела в постоянном электрическом поле позволило детализировать характер реагирующего течения. Влияние спутного потока на топологию области химического реагирования связано с изменением гидродинамики течения из-за движения ионов вдоль фронта пламени. В рассмотренных условиях ионный ветер приводит к формированию сложного вихревого течения и неустойчивости потока, что необходимо учитывать при анализе факторов, стабилизирующих горение.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, грант № 075-15-2020-806.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. De Pee A., Pinner D., Roelofsen O., Somers K., Speelman E., Witteveen M. Decarbonization of industrial sectors: the next frontier. McKinsey & Company, 2018. 68 p.
2. Valera-Medina A., Xiao H., Owen-Jones M., David W.I.F., Bowen P.J. Ammonia for power // Progress in Energy and Combustion Science. 2018. Vol.69. Pp. 63-102.
3. Nose M., Kawakami T., Nakamura S., Kuroki H., Kataoka M., Yuri M. Development of hydrogen/ammonia firing gas turbine for decarbonized society // Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. 2021. Vol. 58. № 3. Pp. 1-11.
4. Kumar L., Sleiti A.K. Systematic review on ammonia as a sustainable fuel for combustion // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2024. Vol. 202. P. 114699.
5. Frankl S., Gleis S., Karmann S., Prager M., Wachtmeister G. Investigation of ammonia and hydrogen as CO₂-free fuels for heavy duty engines using a high pressure dual fuel combustion process // International J. of Engine Research. 2020. Vol. 22. № 10. Pp. 1-13.

6. **Jin U., Kim K.T.** Experimental investigation of combustion dynamics and NO_x/CO emissions from densely distributed lean-premixed multinozzle CH₄/C₃H₈/H₂/air flames // *Combustion & Flame*. 2021. Vol. 229. P. 111410.
7. **Jin Yu., Luo H., Zhang G., Zhai Ch., Ogata Yo., Matsumura Yu., Ichikawa T., Nakashimada Yu., Kim W., Nishida K.** Ignition timing effect on the combustion performance of hydrogen addition in me-thane fermentation gas in a local energy system // *Fuel*. 2022. Vol. 324. P. 124714.
8. **Smygalina A., Tsyplakov A., Kiverin A. and Zaichenko V.** Combustion of lean hydrogen-based mixtures in spark ignition engine // *Thermal Engineering*. 2018. Vol. 65. № 13. Pp. 1009-1018.
9. **Colcote H.F.** Mechanism of the formation of ions of flames // *Combustion & Flame*. 1957. Vol. 1. Pp. 385-403.
10. **Gooding J. M., Bohme D. K. and Chung-Wai Ng.** Detailed ion chemistry in methane-oxygen flames. I. Positive ions // *Combustion & Flame*. 1979. Vol. 36. Pp. 27-43.
11. **Gooding J. M., Bohme D. K. and Chung-Wai Ng.** Detailed ion chemistry in methane-oxygen flames. II. Negative ions // *Combustion & Flame*. 1979. Vol. 36. Pp. 45-62.
12. **Rodrigues J.M., Agneray A., Jaffr'ezic X., Bellenoue M., Labuda S., Leys C., Chernukho A.P., Migoun A.N., Cenian A., Savel'ev A.M., Titova N.S., Starik A.M.** Evolution of charged species in propane/air flames: mass-spectrometric analysis and modeling // *Plasma sources science and technology*. 2007. Vol. 16. Pp. 161-172.
13. **Knyazkov D.A., Gerasimov I.E., Bolshova T.A., Kiselev V.G., Shmakov A.G., Paletsky A.A.** Cationic structure of premixed near-stoichiometric CH₄/O₂/Ar flames at atmospheric pressure: New insights from mass spectrometry, quantum chemistry, and kinetic modeling // *Combustion & Flame*. 2022. Vol. 241. P. 112106.
14. **Markstein G.H.** Interaction of flame propagation and flow disturbances // *Third Symposium on Combustion and Flame and Explosion Phenomena*. 1948. Vol. 3. Pp. 162-167.
15. **Vatazhin A.B., Lichter V.A., Sepp V.A., Shulgin V.I.** The effect of an electric field on the emission of nitrogen oxides and the structure of a diffusion laminar propane flame // *Fluid Dynamics*. 1995. Vol. 31. Pp. 13-23.
16. **Park D.G., Chung S.H., Cha M.S.** Visualization of ionic wind in laminar jet flames // *Combustion & Flame*. 2017. Vol. 184. Pp. 246-248.
17. **Belhi M., Lee B.J., Cha M.S., Im H.G.** Three-dimensional simulation of ionic wind in a laminar premixed Bunsen flame subjected to a transverse DC electric field // *Combustion & Flame*. 2019. Vol. 202. Pp. 90-106.
18. **Tang Y., Simeni M.S., Yao Q., Adamovich I.V.** Non-premixed counterflow methane flames in DC/AC/NS electric fields // *Combustion & Flame*. 2022. Vol. 240 P. 112051.
19. **Li Y., Wang J., Xia H., Ju R., Yu J., Mu H., Huang Z.** Effect of DC electric field on turbulent flame structure and turbulent burning velocity. // *Combustion Science and Technology*. 2023. Vol. 195. Pp. 692-712.
20. **Altendorfner F., Kuhl J., Zigan L., Leipertz A.** Study of the influence of electric fields on flames using planar LIF and PIV techniques // *Proceedings of the Combustion Institute*. 2011. Vol. 33. № 2. Pp. 3195-3201.
21. **Тупикин А.В., Третьяков П.К., Денисова Н.В., Замашников В.В., Козулин В.С.** Диффузионный факел в электрическом поле с изменяемой пространственной конфигурацией // *Физика горения и взрыва*. 2016. Т. 52. № 2. С. 49-53.
22. **Kuhl J., Seeger T., Zigan L., Will S., Leipertz A.** On the effect of ionic wind on structure and temperature of laminar premixed flames influenced by electric fields // *Combustion & Flame*. 2017. Vol. 176. Pp. 391-399.
23. **Тупикин А.В., Замашников В.В.** Растяжение ламинарного пламени в слабом электрическом поле // *Физика горения и взрыва*. 2020. Т. 56. № 2. С. 3-9.

24. **Di Renzo M., Urzay J., De Palma P., De Tullio M.D., Pascazio G.** The effects of incident electric fields on counterflow diffusion flames // *Combustion & Flame*. 2018. Vol. 193. Pp. 177-191.
25. **Арбузов В.А., Арбузов Э.В., Дубнищев Ю.Н., Золотухина О.С., Леманов В.В., Лукашов В.В., Тупикин А.В., Шаров К.А.** Влияние водорода на электрохимические свойства метановоздушного пламени // *Физика горения и взрыва*. 2025. Т. 61. № 4. С. 1-11.
26. **Васильев Л.А.** Теневые методы. М.: Наука. 1968. 400 с.
27. **Дубнищев Ю.Н.** Теория и преобразование сигналов в оптических системах. СПб.: Лань. 2011. 368 с.
28. **Arbuzov V., Arbuzov E., Dubnishchev Yu., Zolotukhina O., Lukashov V., Tupikin A.** Hilbert-Optic Diagnostics of Hydrogen-Oxygen Inverse Diffusion Flame // *Energies*. 2022. Vol. 15. № 24.

Arbuzov E.V.^{1,2}, Dubnishchev Yu.N.^{1,3}, Lukashov V.V.¹, Tupikin A.V.¹

¹ *Kutateladze Institute of Thermophysics SB, Russia, 630090, Novosibirsk, Lavrent'ev ave, 1, E-mail: luka@itp.nsc.ru, dubnistchev@itp.nsc.ru*

²*Sobolev Institute of Mathematics SB RAS, arbuzov@math.nsc.ru, Russia, 630090, Novosibirsk, ave. Academician Koptyug, 4*

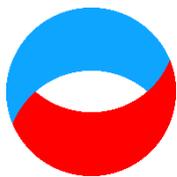
³*Novosibirsk State Technical University NETI, Russia, 630073, Novosibirsk, ave. Karl Marx, 20*

GILBERT VISUALIZATION OF A DETACHED FLAME IN AN ELECTRIC FIELD

ABSTRACT

External electric fields are one of the effective ways to control combustion processes. At the same time, the problems of both environmental safety and increasing the energy efficiency of process plants are solved. Gilbert diagnostics of flame parameters allows to exclude additional changes in the distribution of charges and the flow of currents in the presence of an external electric field. The paper discusses the study of the structure of a diffusion flame stabilized by a longitudinal electric field. Optical diagnostics adapted to the study of combustion problems is based on the visualization of phase disturbances induced in the probing light field of the studied medium, using Gilbert optics methods. The diagnostic complex is implemented on the basis of the IAB-463M shadow device with modified units of optical filtration, a light source, registration and processing of information.

FUEL MIXTURE CH₄/H₂, DIFFUSION FLAME, ELECTRIC FIELD, HILBERT VISUALIZATION



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 535.314

Ведяшкина А.В.¹, Расковская И.Л.², Павлов И.Н.²

¹Акционерное общество «Концерн «Калашников» (АО «Концерн «Калашников»), Россия,
117218, Москва, Кржижановского, 18 к. 4, E-mail: an.vedyashkina@gmail.com

²Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КАУСТИК ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ РЕФРАКЦИИ В МУТНЫХ СРЕДАХ

АННОТАЦИЯ

Исследование распределения показателя преломления в неоднородных мутных средах представляет сложную задачу из-за интенсивного рассеяния, приводящего к снижению точности традиционных оптических методов диагностики. Авторами рассматривается применение метода каустик лазерного излучения для диагностики оптических неоднородностей в условиях ограниченной прозрачности среды. В работе показано, что, несмотря на рассеяние лазерного излучения в мутных средах, каустики, представляющие собой особые линии и особые поверхности, вблизи которых резко возрастает интенсивность светового поля, несут информацию о распределении показателя преломления. В задачах, где излучение, проходящее через оптическую неоднородность, значительно теряет интенсивность из-за эффекта рассеяния, регистрация каустик на рефракционных картинах возможна без использования специализированного оборудования, а геометрические параметры каустик могут быть использованы для восстановления распределения показателя преломления. В качестве исследуемой среды в работе рассматривается диффузионный слой жидкости, содержащий частицы каолина.

**МЕТОД КАУСТИК, ЛАЗЕРНАЯ РЕФРАКТОГРАФИЯ, ДИФФУЗИОННЫЙ СЛОЙ
ЖИДКОСТИ, РАССЕЯНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ

Оптические методы на сегодняшний день являются одними из наиболее востребованных и информативных подходов при изучении пространственно-временной динамики неоднородностей в средах различной природы. Особенно актуальны они при решении задач диагностики жидких систем, в которых происходят диффузионные или тепло- и массообменные процессы. Однако при работе с мутными средами, содержащими взвешенные частицы, применимость и точность классических рефракционных методов могут быть существенно ограничены. Рассеяние приводит к снижению контрастности рефракционных изображений и искажению информации о преломляющих свойствах среды, что затрудняет количественный анализ показателя преломления и его градиентов. Тем не менее, в таких условиях сохраняется возможность регистрации особых областей концентрации светового

потока, каустик, формирующихся в результате преломления лазерного излучения в неоднородной среде.

Каустики, представляющие собой огибающие семейства лучей [1], обладают рядом характерных особенностей: в их области наблюдается значительное увеличение интенсивности светового поля, они устойчивы к возмущениям и могут быть зарегистрированы при наличии рассеяния. Эти свойства делают метод каустик особенно перспективным для задач, связанных с визуализацией и анализом оптических неоднородностей в условиях ограниченной прозрачности. В отличие от теневых и градиентных методов, не предполагающих регистрацию таких особых областей, методика, основанная на анализе формы и положения каустик, позволяет выявлять информацию о распределении показателя преломления в условиях, если основная часть пучка испытывает существенные потери.

В контексте мутных сред, например, водных растворов с дисперсными примесями (в частности, суспензий каолина), метод каустик оказывается особенно перспективным. Такая среда является модельной для исследования процессов, происходящих в реальных промышленных, биологических или природных системах. При этом, несмотря на значительное светорассеяние, каустические поверхности сохраняются и могут быть зарегистрированы с использованием простой экспериментальной установки, включающей лазерный источник, плоский экран и цифровую камеру. Визуализация и последующий анализ геометрических параметров каустик позволяют оценить распределение показателя преломления в среде.

Метод каустик находит свое теоретическое обоснование в рамках геометрической оптики и теории сингулярностей [2-4]. С точки зрения геометрической оптики, каустики возникают в тех областях, где происходит концентрация световых лучей, и именно эти области несут информацию о распределении показателя преломления в среде, что лежит в основе метода каустик. Этот подход, ранее нашедший применение в механике разрушения и при изучении напряжений в твердых телах [5-7], в последние годы начал рассматриваться и как инструмент для оптической диагностики жидких систем. Его применение не требует сложного или дорогостоящего оборудования, метод может быть реализован с минимальным набором оптических компонентов и в широком диапазоне условий прозрачности.

ОГРАНИЧЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ КЛАССИЧЕСКОЙ ЛАЗЕРНОЙ РЕФРАКТОГРАФИИ В МУТНЫХ СРЕДАХ

Лазерная рефрактография [8] на сегодняшний день является одним из оптических методов визуализации градиентов показателя преломления в стратифицированных жидких средах. Её высокая чувствительность к изменениям оптической плотности и относительная простота реализации позволяют эффективно использовать метод при изучении процессов массопереноса, моделируемых, например, в виде водно-солевых слоёв. Однако при наличии в исследуемой среде рассеивающих примесей, таких как частицы каолина, эффективность метода резко снижается. Это связано с тем, что свет, проходя через мутную среду, многократно рассеивается, что приводит к потере пространственной чёткости рефракционной картины и, как следствие, невозможности количественного анализа распределения показателя преломления.

В ряде ранее выполненных исследований [9-11] была реализована экспериментальная методика регистрации рефрактограмм при прохождении плоского лазерного пучка через стратифицированную жидкость без рассеивающих примесей. В этих работах использовался источник когерентного излучения с длиной волны 532 нм, формирующий с помощью цилиндрической линзы лазерную плоскость, проходящую через исследуемую кювету. После взаимодействия с оптически неоднородной средой изображение пучка проецировалось на экран и фиксировалось цифровой камерой с широким динамическим диапазоном, что позволяло получать рефрактограммы с высоким пространственным разрешением.

Полученные изображения служили эталоном для последующего сравнения с результатами, получаемыми при наличии неоднородностей различной природы.

Как было показано в данных работах, в условиях прозрачной среды с диффузионным градиентом (например, в системе из солевого раствора и чистой воды) классическая лазерная рефрактография позволяет надёжно регистрировать рефракционные изображения, отражающие распределение показателя преломления в переходном слое, что подтверждает высокую чувствительность метода к градиентам оптической плотности и его применимость в системах с хорошей прозрачностью.

Для оценки границ применимости метода в мутной среде была разработана методика по определению предельной концентрации каолина. Концентрация варьировалась в серии последовательных экспериментов путём добавления заранее подготовленного раствора каолина в исследуемую кювету. При этом масса добавляемого вещества и объём жидкости точно контролировались. Взвешивание проводилось с точностью до 0,001 г, а диспергирование частиц осуществлялось с помощью ультразвука для достижения минимального размера фракций и равномерного распределения в объёме жидкости.

Результаты серии экспериментов показали, что при увеличении концентрации рассеивающих частиц происходит прогрессирующее снижение интенсивности лазерной плоскости и деградация структуры рефрактограммы. На рис. 1 приведены примеры изображений, полученных при различных концентрациях каолина.

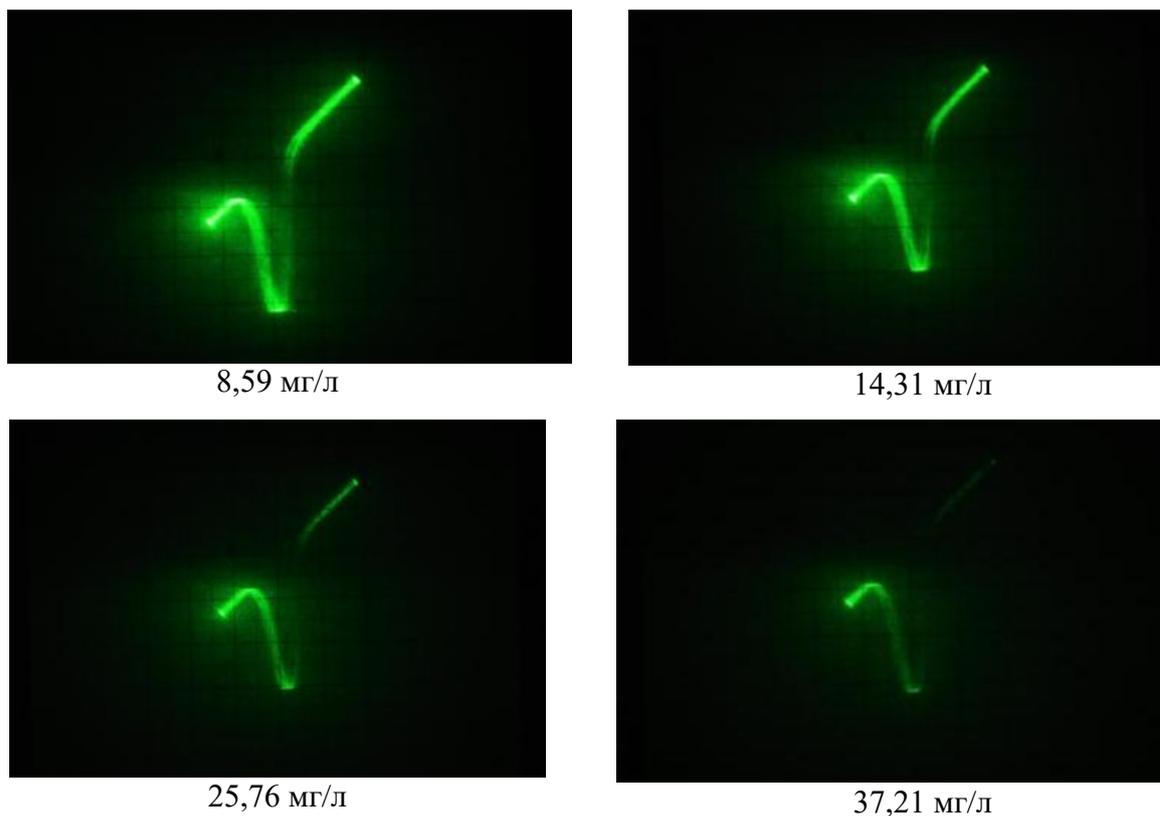


Рис. 1. Экспериментальные рефрактограммы, полученные при различных концентрациях каолина

Анализ экспериментальных рефрактограмм показывает, что по мере увеличения концентрации рассеивающих частиц наблюдается прогрессирующее ухудшение качества изображения: отдельные участки рефракционной картины начинают исчезать, а при достижении предельной концентрации значительная часть изображения вовсе не отображается на экране. Это связано с тем, что свет рассеивается в объёме среды до того, как достигает области регистрации, в результате чего локальные градиенты показателя преломления становятся визуально неразличимыми и недоступными для количественного анализа. Данный эффект объясняется переходом среды в режим кратного рассеяния, когда

свет, прежде чем достичь плоскости регистрации, многократно взаимодействует с частицами, теряя направленность. В таких условиях невозможно корректное восстановление формы лучевых траекторий, а значит, и получение количественной информации о распределении показателя преломления. При этом увеличение чувствительности системы регистрации не компенсирует потерю пространственной чёткости изображения.

Таким образом, классическая лазерная рефрактография может быть применима в условиях, когда рассеивающие примеси не превышают концентрационный порог, соответствующий режиму однократного рассеяния. За пределами этого режима метод теряет диагностическую ценность. Это ограничение особенно важно учитывать при исследовании природных или технологических систем, содержащих взвешенные частицы, таких как сточные воды, суспензии или биологические жидкости.

В связи с этим возникает необходимость перехода к альтернативным методам оптической диагностики, устойчивым к рассеянию. Одним из таких подходов является метод анализа каустик, в основе которого лежит регистрация локальных максимумов интенсивности, формирующихся в результате фокусировки световых лучей. В отличие от традиционной рефрактографии, метод каустик остаётся информативным при значительном ослаблении общего светового потока и позволяет регистрировать параметры преломляющей среды за счёт анализа геометрии и положения каустик.

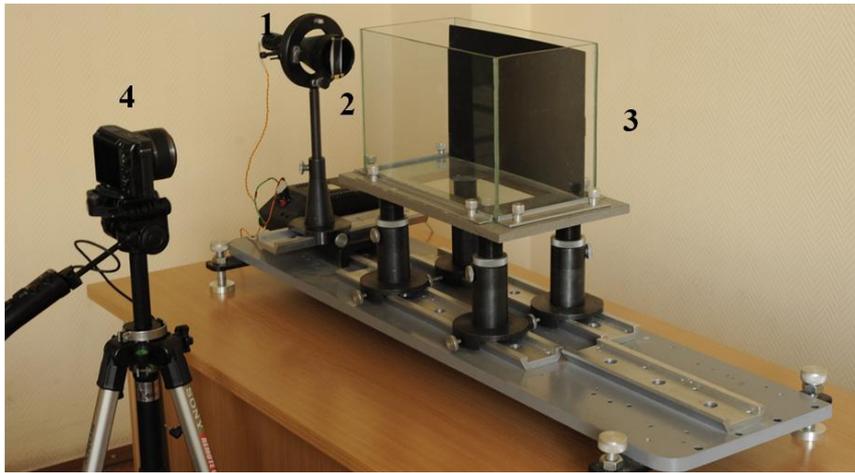
МЕТОД КАУСТИК В УСЛОВИЯХ СИЛЬНОГО РАССЕЯНИЯ В МУТНЫХ СРЕДАХ

В условиях, когда традиционная рефрактография становится неэффективной из-за сильного рассеяния света в мутной среде, метод каустик сохраняет свою применимость благодаря специфике формирования наблюдаемой картины. Как показано в работе [12], при продольном зондировании стратифицированной оптически неоднородной среды каустики, области, где происходит резкое увеличение плотности лучей, в плоскости наблюдения отображаются как огибающие экстремумов рефракционного искажения элементов пучка. Это ключевое свойство может быть использовано для анализа в случаях, когда общая структура рефрактограммы теряется.

С практической точки зрения это означает, что при регистрации лазерного пучка, проходящего через мутную среду, полное изображение может быть искажено или частично утрачено, однако локальные участки с повышенной яркостью (экстремумы) могут быть зарегистрированы. Эти участки на изображении соответствуют проекциям каустических поверхностей на экран наблюдения и могут быть использованы для определения положения каустик. Таким образом, при отсутствии на экране основной части рефрактограммы из-за сильного рассеяния света, сохранение и анализ экстремумов позволяет зафиксировать проекцию каустик и использовать её для качественного и количественного анализа распределения показателя преломления.

В работах [11, 14] описана методика регистрации каустик лазерного излучения при прохождении света через стратифицированную жидкость. В этих работах применялась оптико-электронная установка, обеспечивающая зондирование диффузионного слоя широким коллимированным лазерным пучком. Регистрация рефрактограмм осуществлялась через фронтальную стенку кюветы. Геометрические параметры каустических поверхностей, регистрируемых с помощью цифровой фотокамеры, использовались для восстановления распределения показателя преломления и расчёта коэффициентов диффузии (рис. 2).

В настоящей работе результаты указанных экспериментов используются как методологическая основа для анализа поведения лазерного излучения в мутной среде, содержащей рассеивающие частицы каолина. В таких условиях наблюдается значительное ухудшение видимости полной рефракционной картины. Однако, несмотря на рассеяние, в проекциях на экран сохраняется видимость локальных экстремумов интенсивности, которые представляют собой проекции каустических поверхностей.



1 – лазер, 2 – оптическая система, 3 – кювета, 4 – цифровая фотокамера
 Рис. 2. Внешний вид экспериментальной установки для определения параметров диффузионного слоя жидкости с помощью метода каустик

Результаты численного моделирования, представленные на рис. 3 для стратифицированных сред, позволяют наглядно проанализировать поведение светового пучка при прохождении через диффузионный слой. В частности, показано, что локальные экстремумы на рефрактограммах совпадают с областями максимального отклонения лучей и соответствуют проекциям каустических поверхностей.

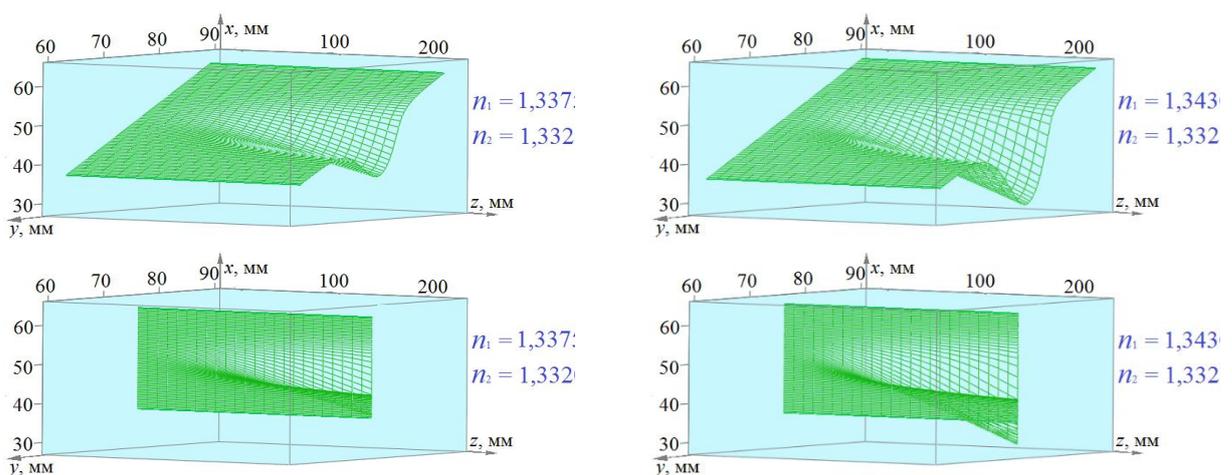


Рис. 3. Результаты моделирования 3D-рефрактограмм плоского лазерного пучка в диффузионном слое жидкости (угол наклона 45° и 90°) для различных показателей преломления солевого раствора

Результаты моделирования подтверждают, что при частичной утрате общей структуры рефракционной картины на выходе среды, проекции каустик остаются информативными для восстановления параметров преломляющей среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена возможность применения метода каустик лазерного излучения для диагностики оптически неоднородных мутных сред, где классический метод лазерной рефрактографии теряет эффективность в результате рассеяния. Показано, что при частичной утрате рефракционной картины на экране сохраняются экстремумы интенсивности, представляющие собой проекции каустических поверхностей. Эти проекции несут информацию о распределении показателя преломления и могут быть использованы для его восстановления с допустимой точностью.

Сравнение с ранее выполненными численными и экспериментальными работами подтвердило, что геометрия каустических ветвей остаётся устойчивой к рассеянию. Таким образом, метод каустик является перспективным инструментом для оптической диагностики в условиях ограниченной прозрачности и может быть применён при изучении диффузионных и многокомпонентных жидких систем, где классические методы имеют существенные ограничения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И.** Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. 304 с.
2. **Whitney H.** On singularities of mappings of Euclidean spaces. I. Mappings of the plane into the plane // *Annals of Mathematics*. 1955. Vol. 62. №. 3. Pp. 374-410.
3. **Арнольд В.И.** Теория катастроф. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1990. 128 с.
4. **Thorn R.** Structural Stability and Morphogenesis. Benjamin, New York 1972. 348 p.
5. **Kiser T., Eigensatz M., Nguyen M.M., Bompas P., Pauly M.** Architectural caustics – controlling light with geometry // *Advances in Architectural Geometry*. 2012. Pp. 91-106.
6. **Hao W., Yao X., Ma Y., Yuan Y.** Experimental study on interaction between matrix crack and fiber bundles using optical caustic method // *Engineering Fracture Mechanics*. 2015. Vol. 134. Pp. 354-367.
7. **Gdoutos E.E.** The optical method of caustics // *Optics and Lasers in Engineering*. 2016. Pp. 68–77.
8. **Евтихиева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С.** Лазерная рефрактография. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 176 с.
9. **Крикунов А.В.** Лазерная рефрактографическая система диагностики диффузионного слоя жидкости: дис...к-та тех. наук. М., 2011. 138 с.
10. **Суровцев П.Ю., Ринкевичюс Б.С.** Восстановление профиля показателя преломления в диффузионном слое жидкости // XX МНТКСиА Радиотехника, электротехника и энергетика. Тезисы докладов. Т. I. Москва, 2014. С. 163.
11. **Ринкевичюс Б.С., Ведяшкина А.В., Павлов И.Н., Расковская И.Л., Толкачев А.В.** Визуализация динамических тепловых процессов в прозрачных средах с помощью структурированного лазерного излучения // *Научная визуализация*. 2016. Т. 8. № 4. С. 50.
12. **Расковская И.Л.** Особенности отображения каустик при рефракции структурированного лазерного излучения в стратифицированных средах // *Журнал технической физики*. 2015. Т. 85. № 6. С. 126-131.
13. **Ведяшкина А.В., Расковская И.Л., Павлов И.Н., Ринкевичюс Б.С.** Бесконтактный непрерывный контроль параметров пограничных слоев в жидкостях с помощью метода каустик // В сборнике: *Оптические методы исследования потоков*. Труды XVI Международной научно-технической конференции. Под общей редакцией Ю.Н. Дубнищева, Н.М. Скорняковой. Москва, 2021. С. 35-43.
14. **Егорченков Н.М., Павлов И.Н., Расковская И.Л., Янина Г.М.** Исследование влияния рассеяния на работоспособность метода лазерной рефрактографии // В сборнике: *Оптические методы исследования потоков*. Труды XVII Международной научно-технической конференции. Москва, 2023. С. 710-717.

Vedyashkina A.V.¹, Raskovskaya I.L.², Pavlov I.N.²

¹Joint Stock Company "Kalashnikov Concern" (JSC "Kalashnikov Concern"), Russia, 117218, Moscow, Krzhizhanovskogo, 18, bldg. 4, E-mail: an.vedyashkina@gmail.com

²National Research University "MPEI", Russia, 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14

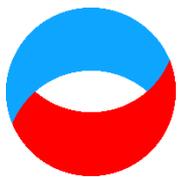
CAUSTIC LASER RADIATION METHOD APPLICATION FOR SOLVING OF THE REFRACTION PROBLEMS IN TURBID MEDIA

The study of refractive index distribution in inhomogeneous turbid media presents a significant challenge due to strong light scattering, which reduces the accuracy of traditional optical diagnostic methods. This paper explores the application of the laser radiation caustics method for diagnosing optical inhomogeneities under conditions of limited transparency. It is shown that, despite scattering in turbid media, caustics—defined as specific lines and surfaces where the intensity of the light field increases sharply—retain information about the refractive index distribution. In cases where the intensity of radiation is substantially attenuated while passing through an optically inhomogeneous medium, caustics can still be observed in refraction patterns without the need for specialized equipment. Furthermore, the geometric characteristics of the caustics can be used to reconstruct the refractive index profile. A diffusion layer containing suspended kaolin particles is used in this study as the model turbid medium.

CAUSTIC METHOD, LASER REFRACTOGRAPHY, LIQUID DIFFUSION LAYER, SCATTERING

Секция 3

Визуализация потоков



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 533.6.071.5

Иншаков С.И.

*Федеральное автономное учреждение «Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского», (ФАУ ЦАГИ), Россия,
140181, г. Жуковский, Моск. обл., ул. Жуковского, 1
E-mail mera@tsagi.ru*

ОСОБЕННОСТИ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ВИХРЕВЫХ НИТЕЙ

АННОТАЦИЯ

Рассмотрен ряд вихревых течений, характерных для аэрофизического эксперимента. Приведены такие способы их визуализации, как теневой и прямотеневой методы, теневой фоновый метод (BOS), метод лазерного ножа и сдвиговая интерферометрия. Даны схемы реализации методов и описаны доработки систем визуализации, адаптированных для применения на аэродинамических стендах. Приведены картины визуализации тороидальных вихрей, в том числе одновременно теневым фоновым методом и методом сдвиговой интерферометрии, а также вихрей с наплывов крыльев и концевых вихрей. Даны общие рекомендации по выбору параметров схем.

ВИХРЕВЫЕ ТЕЧЕНИЯ, АЭРОФИЗИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ, МЕТОДЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

ВВЕДЕНИЕ

Вихревые течения часто встречаются как в природе, так и в прикладных исследованиях. В работе [1] приведена их систематизация, согласно ей, вихри существуют в трёх видах: распределённые вихри, поверхностные и вихревые нити. По причине их прикладного значения в нашем случае ограничимся классом «вихревые нити», а в них течениями двух типов – линейной вихревой нити и тороидальным вихрем. Для визуализации необходимо выделить те возмущения, которые образуются в исходном однородном потоке этими вихрями. Иногда эти возмущения видны сами непосредственно либо с помощью специальной аппаратуры, а иногда требуются визуализирующие добавки.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЛИНЕЙНОЙ ВИХРЕВОЙ НИТИ

Данный вихрь образуется на острой передней кромке стреловидного крыла, так называемый «вихрь над наплывом». Он используется в компоновках летательных аппаратов для улучшения их маневренных характеристик (рис. 1 из [2]).

Детально он был изучен в 60-80-х годах прошлого века. В работе [3] дан теоретический анализ этого течения и приведено сравнение с экспериментальными данными. Ядром вихря называется область, где окружная скорость меняется линейно (т. е. происходит вращение по закону твёрдого тела), а вне ядра окружная скорость спадает по гиперболическому закону. (рис. 2)

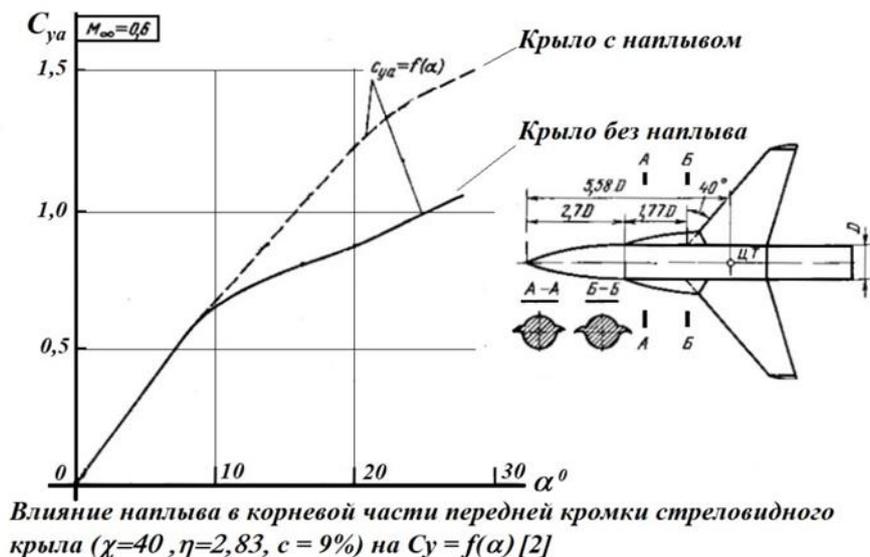


Рис. 1. [2]

Осевая скорость в центре ядра принимает значение в 3,5-4 раза больше, чем скорость набегающего потока (рис. 3а), на оси наблюдается при этом сильное разрежение (рис. 3б). Подобная структура обычно реализуется до достижения критерия Босселя (степень закрутки потока $\arctg(v_\tau/v_x) \sim 40^\circ$ [3]), после чего происходит т. н. «взрыв» вихря с разрушением ядра, пик осевой скорости уменьшается до значения < 1 , разрежение при этом падает. Случаются и некоторые исключения из этого правила [4]. Вопросам разрушения вихря уделялось большое внимание, так как повышение несущих свойств крыла происходит именно вследствие области разрежения над крылом, взорвавшийся вихрь перестаёт улучшать несущие свойства крыла.

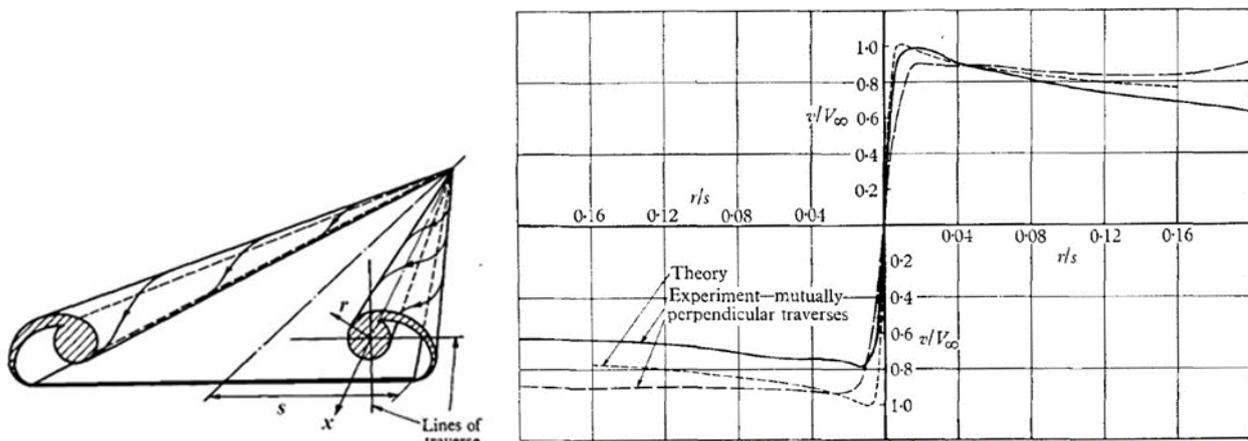
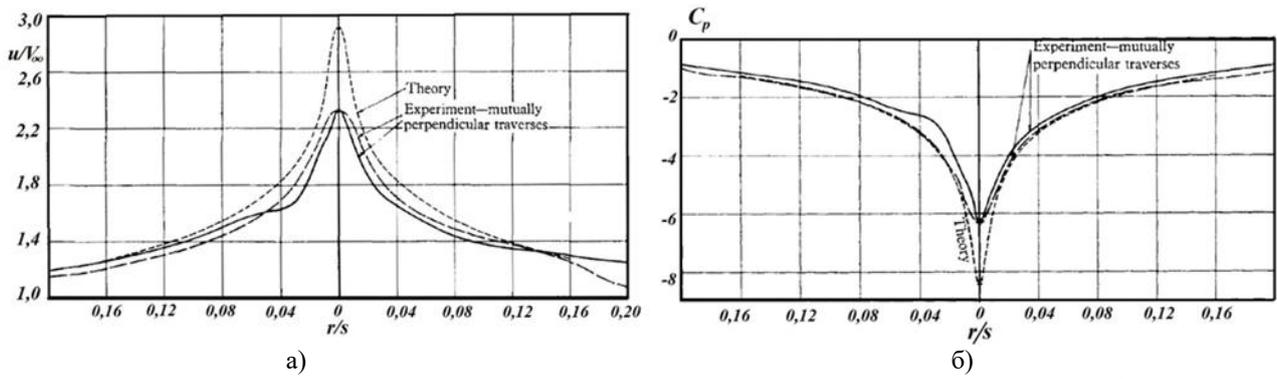


Рис. 2. Теоретические и экспериментальные профили безразмерной окружной скорости [3]

Визуализировать течение можно либо по пониженному давлению (а значит и плотности) в ядре вихря, либо по окружной скорости, достигающей максимального значения на его границе. Теневыми и интерференционными методами вполне можно зарегистрировать область пониженного давления в ядре вихря, но из-за малого поля зрения оборудования (стандартный теневой прибор ИАБ-451 имеет поле зрения 230 мм) и значительных массогабаритных характеристик, они обычно для этих целей не используются. Стандартно для визуализации используется метод лазерного ножа [5].



а) теоретические и экспериментальные значения безразмерной осевой скорости на различных безразмерных расстояниях от центра ядра вихря,

б) - профили коэффициента статического давления C_p [3]. $C_p = \frac{(P - P_\infty)}{\frac{1}{2}\rho v_\infty^2}$ [3]

Рис. 3.

Для визуализации лазерным ножом используется то свойство, что центробежной силой из-за значительной окружной скорости все рассеивающие частицы выносятся из ядра, при этом ядро выглядит тёмной областью (рис. 4). Рассеивающими частицами может быть либо генератор аэрозоля (обычно сценический), либо воздушный конденсат (в трансзвуковых трубах), либо тетрахлорид титана, подаваемый в область зарождения вихревого течения. В работе [4] использовался тальк. В гидротрубах исследования такого вихря происходит традиционно с помощью красителей (рис. 5) [6].

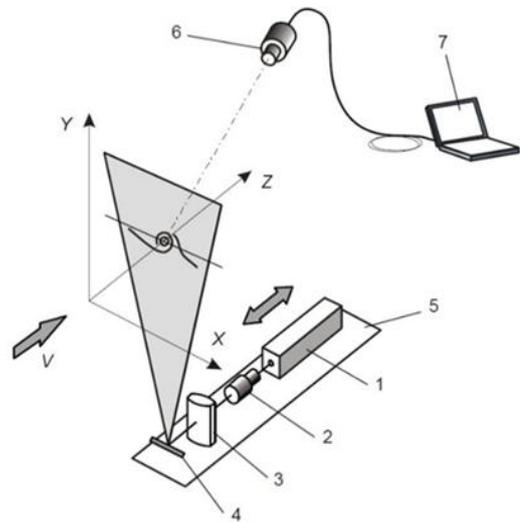
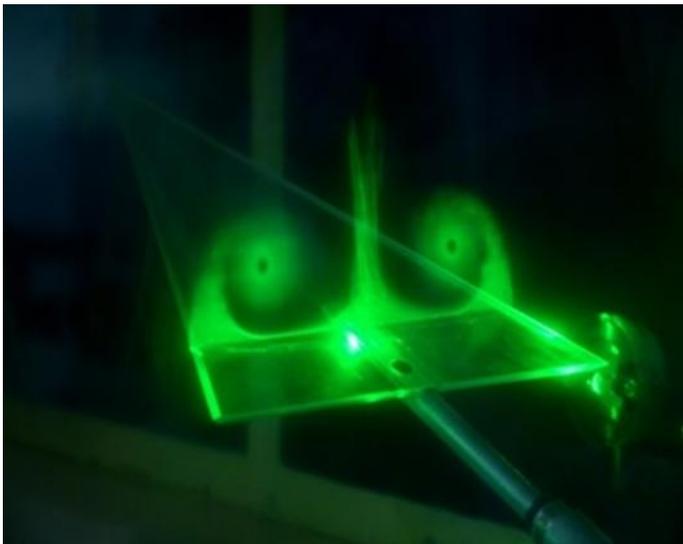


Рис. 4. Визуализация вихрей лазерным ножом [5]

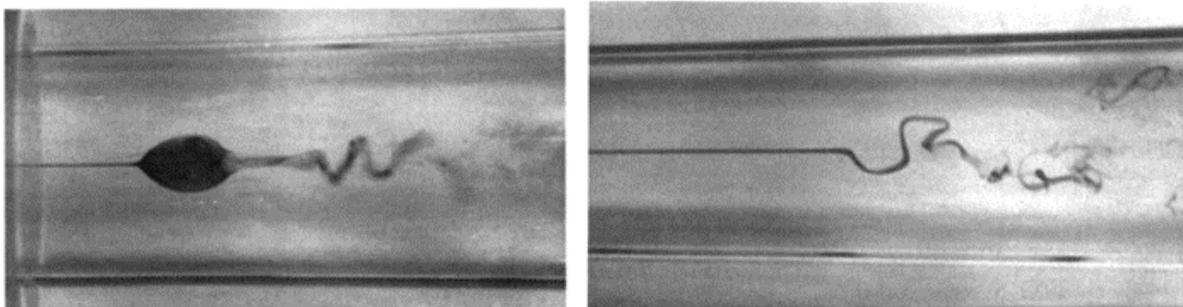


Рис. 5. Два типа взрыва вихря в гидротрубе [6]

Измерение компонент скорости проводилось в 60-е года пневмометрическим методом (рис. 2-3 [3]), в начале 80-х годов с помощью ЛДИСа (рис. 6в) [4]), а позже – PIV методом (рис. 6б) [7] и термоанемометром (рис. 146) [8].

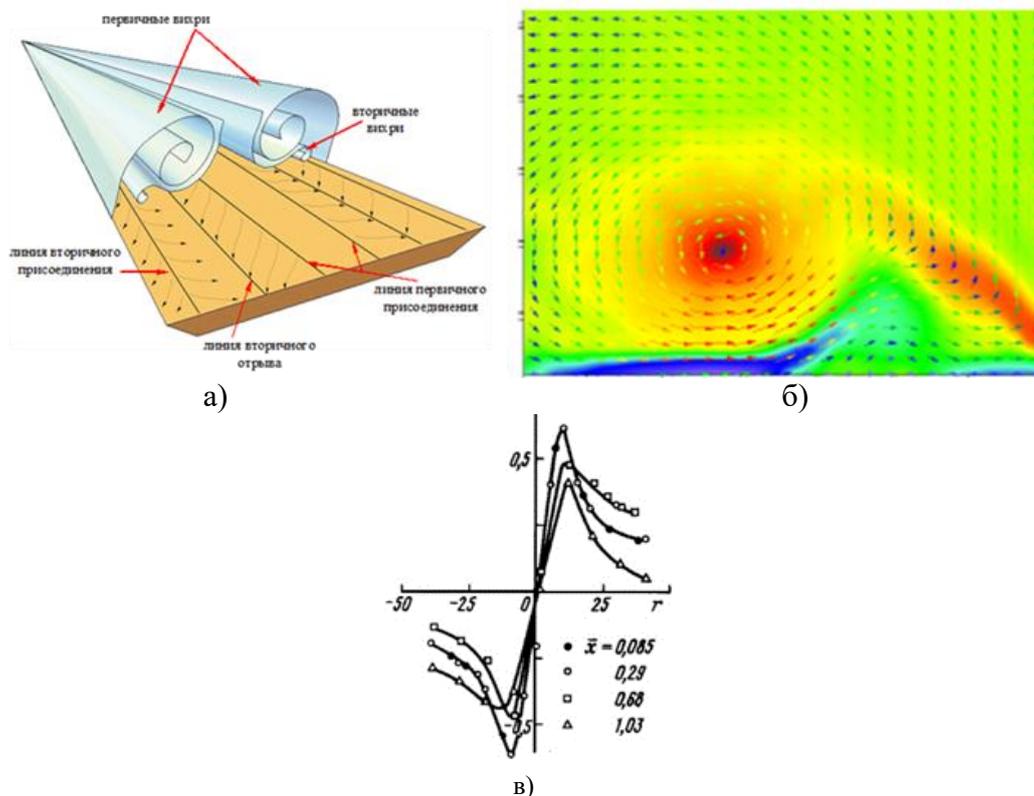


Рис. 6. Распределение безразмерной скорости в ядре вихря, полученные в различных сечениях методом PIV б) [7], и ЛДИС в) [4]

При визуализации как лазерным ножом, так и PIV с дымовыми методами особой задачей становится засев потока рассеивающими свет частицами и регистрация картины обтекания, желательна в плоскости, перпендикулярной плоскости лазерного ножа. Учитывая малые размеры иллюминаторов в АДТ с закрытыми рабочими частями, это иной раз становится непростой задачей.

КОНЦЕВОЙ ВИХРЬ

Вихрь данного типа аналогичен вихрю на наплыве и часто визуализируется в натуральных условиях, когда температура во влажном воздухе близка к температуре точки росы (рис. 7). Точно так же капли конденсата выносятся на периферию, визуализируя тем самым ядро потока.

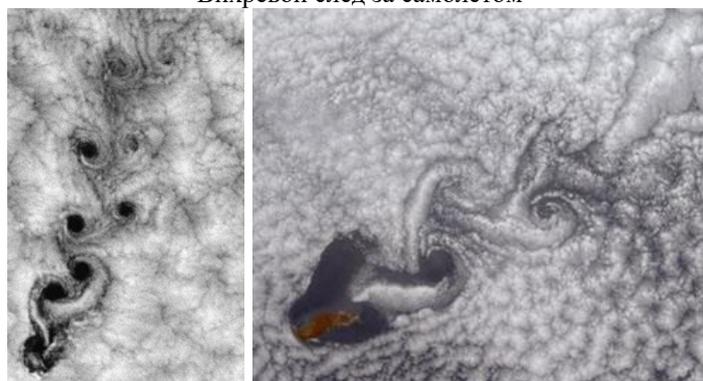


Рис. 7.

Облачность тоже является прекрасным визуализатором вихревого течения (рис. 8).



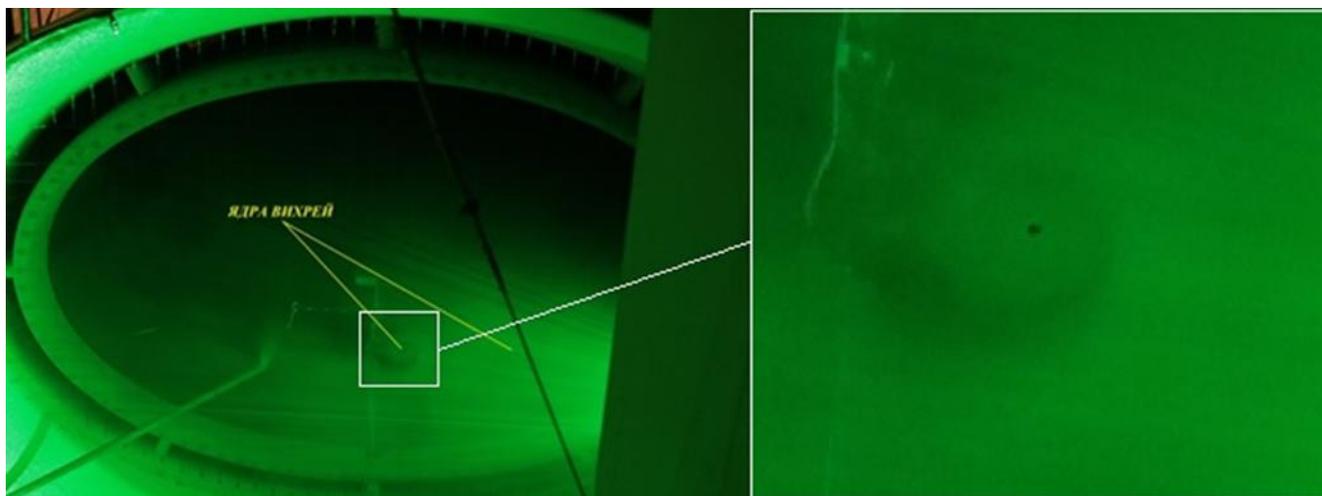
Вихревой след за самолётом



Дорожка Кармана при обтекании ветром горных вершин. Снимок с орбиты.

Рис. 8. Облака как средство визуализации

В аэродинамической трубе концевые вихри традиционно визуализируются с помощью лазерного ножа, проблемой является лишь достаточный для регистрации засев потока рассеивающими частицами. Для дозвуковых труб с диаметром рабочих частей до 4 м обычно вполне хватает одного сценического генератора аэрозоля. На рис. 9 представлены картины визуализации концевых вихрей с прямого крыла. Модель была в трубном положении (перевернутая). Ядра вихрей – тёмные окружности, вокруг которых даже визуализируется закрученное потенциальное течение. Для масштаба – диаметр трубки подачи дыма в левом нижнем углу 50 мм, диаметр ядер 11 мм. Схема эксперимента аналогична показанной на рис. 5.



Диаметр ядра вихря 11 мм

Рис. 9.

ТОРОИДАЛЬНЫЙ ВИХРЬ

Вихри данного вида также довольно обычны в окружающей нас действительности. Они возникают при резком начале истечения газа из трубы, в частности, при артиллерийских выстрелах (рис. 10) или истечении плазмы электрического разряда из трубы (рис. 11).



Рис. 10.



Рис. 11.

Если тороидальный вихрь достаточно горячий, то его самосвечения хватает для регистрации, (рис. 10-11), где на первом изображён выстрел из миномёта «Тюльпан», на втором — формирование вихревого кольца из плазмоида, возникшего при электрическом разряде в трубке. В последнем случае съёмка велась на камеру «Видеоспринт» с частотой 2500 к/с.

В случае отсутствия самосвечения структуру тороидального вихря можно увидеть лишь с помощью того или иного метода визуализации. На рис. 12 представлен вид формирования вихревого кольца и его отражения при начале истечения воздуха из сопла, расположенного напротив плоской преграды. Снимки получены с помощью линзового прибора Теплера, регистрация велась камерой «Видеоспринт» с частотой съёмки 488 к/с.

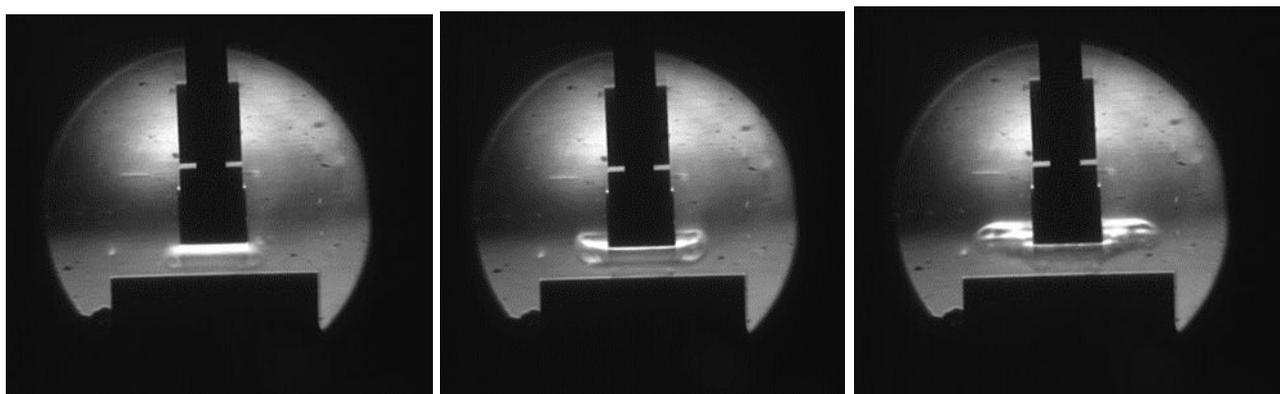


Рис. 12.

Прямотеневой метод тоже может быть использован для визуализации структуры. На рис. 13 показан начальный момент формирования вихревого кольца, снятый прямотеневым методом на открытый затвор с помощью точечного искрового источника света длительностью 1 мкс.

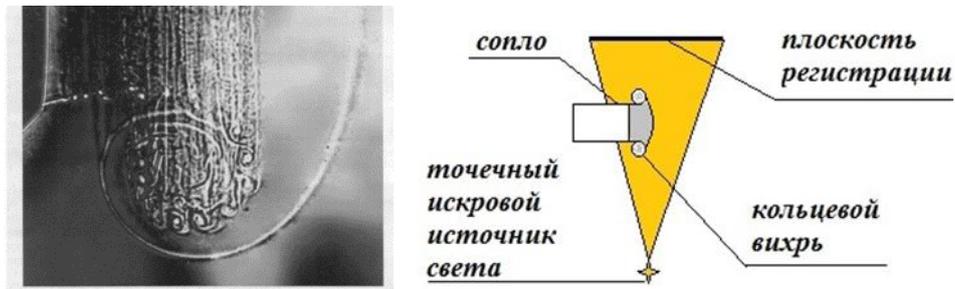


Рис. 13. Формирование вихревого кольца, прямотеневой метод

В работе [8], изложены результаты экспериментальных исследований свойств вихревых колец в зависимости от параметров струи воздуха, выталкиваемой из круглого сопла специальным устройством. Характеристики течения определялись по полю скоростей, измеренному с помощью термоанемометра. Там же представлена математическая модель вихревого кольца, основанная на законах сохранения. Визуализация проводилась дымовым методом. На рис. 14а из [8] приведена схема вихревого кольца, на рис. 14б – результаты измерений скорости термоанемометром, 14в-д даны сечения кольца, фронтальное и меридиональное, полученные дымовым методом при различных числах Рейнольдса.

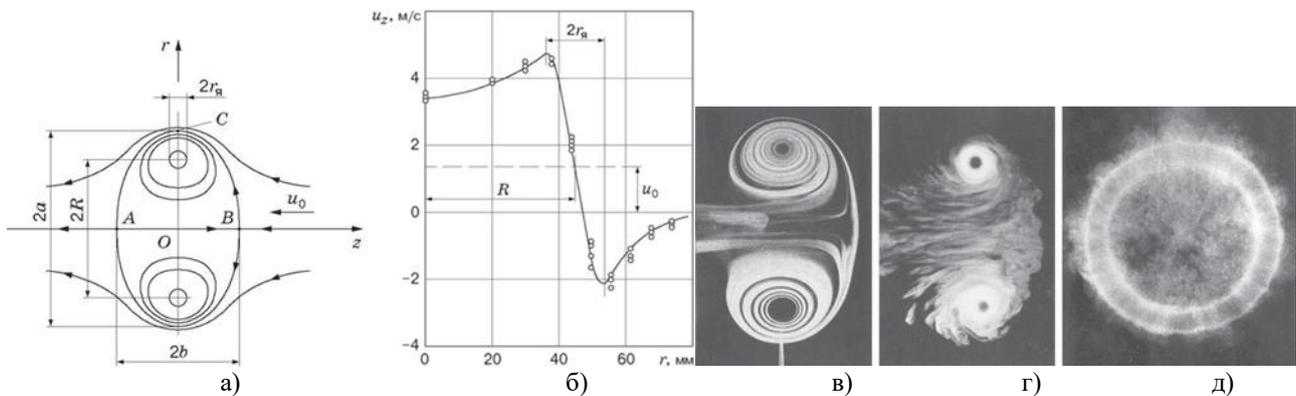


Рис. 14. [8] а) схема кольца, б) скорость в) $Re \leq (1 \div 2) \cdot 10^4$ г) $Re > 2 \cdot 10^4$ д) фронтальное сечение

В зависимости от числа Рейнольдса струи формируется ламинарное либо турбулентное кольцо. Если $Re \leq (1 \div 2) \cdot 10^4$, то образуются ламинарные вихри (рис. 14в), если число Re превышает это значение, то вихрь становится турбулентным (рис. 14г-д) ($Re = V \cdot R_0 \cdot \rho / \mu$, где R_0 – радиус сопла, V – скорость струи). Как и ранее, ядро вихря отчётливо визуализируется за счёт выноса частиц дыма на его периферию.

Наиболее чувствительным прибором для регистрации оптических неоднородностей является сдвиговой интерферометр (рис. 15).

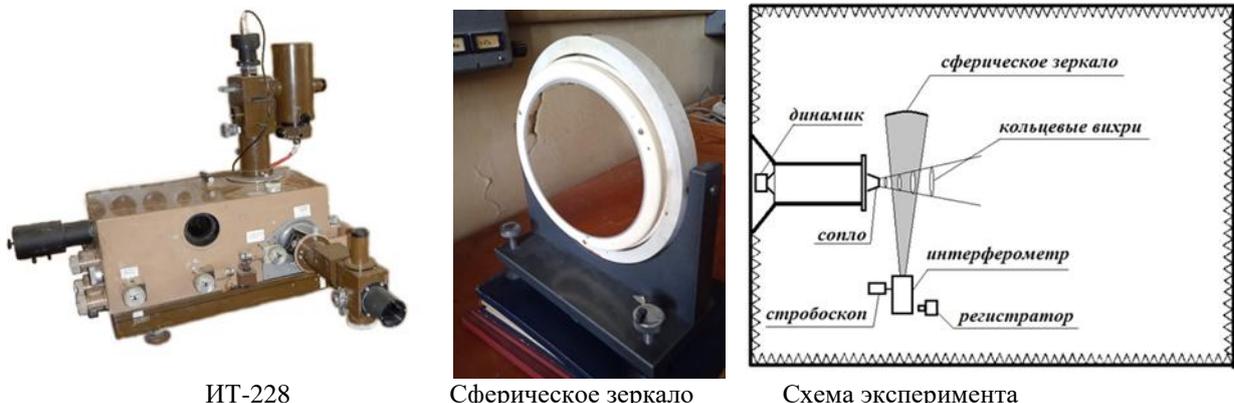


Рис. 15. Оборудование и схема эксперимента по регистрации когерентных структур в акустически возбуждённой струе в заглушенной камере

С помощью зеркального интерферометра бокового сдвига ИТ-228 в ЦАГИ были впервые зарегистрированы тороидальные вихри в слое смешения в акустически возбуждённой затопленной дозвуковой струе (рис. 15-16 [9]).

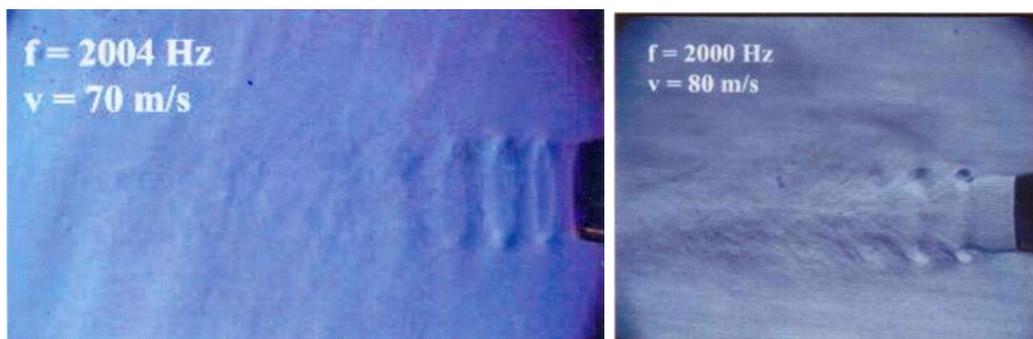


Рис. 16. Когерентные вихревые структуры

Визуализация проводилась при стробоскопическом освещении, синхронизированном с частотой возбуждения струи. Благодаря чувствительности интерферометра тороидальные вихри визуализировались без каких-либо визуализирующих добавок в струю и без нагрева (охлаждения) струи.

В ЦАГИ также регулярно проводились эксперименты с тороидальными вихрями, генератором которых было устройство, аналогичное применённому в [8]. На рис. 17 [10] представлено фото вихревого кольца при его соударении с плоской поверхностью. Отчётливо видно его ядро. Как и ранее, никаких визуализирующих добавок здесь не было.

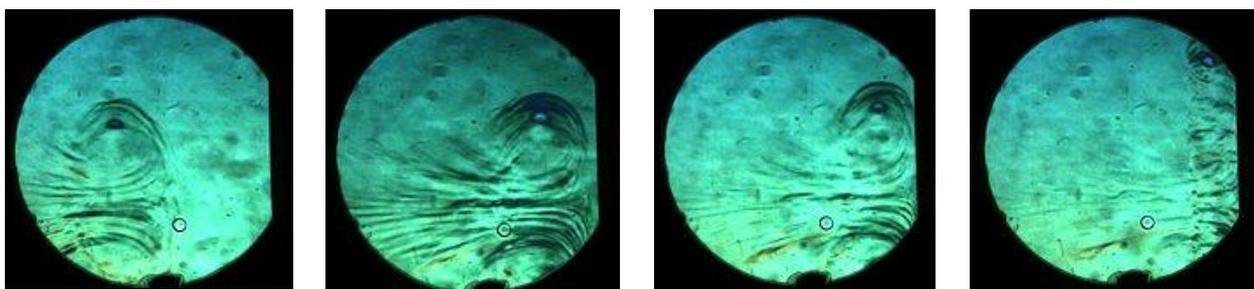


Рис. 17. [9]

В случае горячего вихря проблем с визуализацией вообще не возникает, на рис. 18 представлены кадры вылета кольца из плазмотрона, причём этот вихрь не самосветящийся. Впереди него – ударная волна.

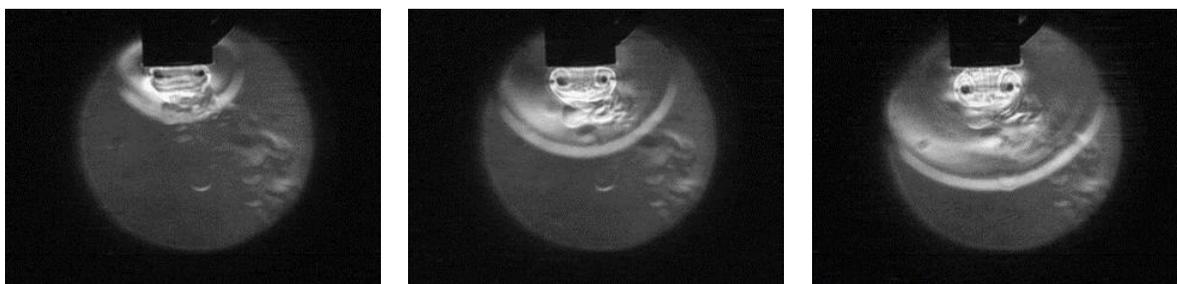


Рис. 18.

Для визуализации тороидального вихря хорошо себя зарекомендовал теневой фоновый метод (ТФМ, BOS в английской транскрипции), который, как и теневые с интерференционными методами, относится к рефрактометрическим методам [11].

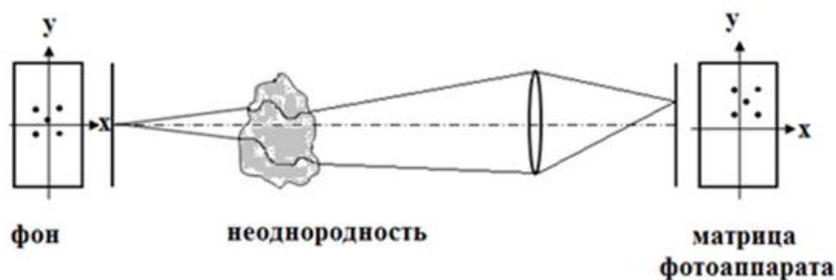


Рис 19. Принцип теневого фонового метода

Его принцип заключается в том, что сначала регистрируется неискажённое поле маркеров, а затем – искажённое, и по различиям в их положении находится изображение фазового объекта, который это искажение вызвал. На рис. 20 представлено фото визуализации тороидального вихря, одновременно сделанного ТФМ методом и сдвиговой интерферометрией. В данном случае воздух внутри вихрегенератора пришлось греть, поскольку при охлаждении газа его плотность растёт, а в ядре – падает, поэтому факторы будут компенсироваться. При нагреве они работают в одну сторону – плотность будет уменьшаться и из-за нагрева, и из-за пониженного давления.

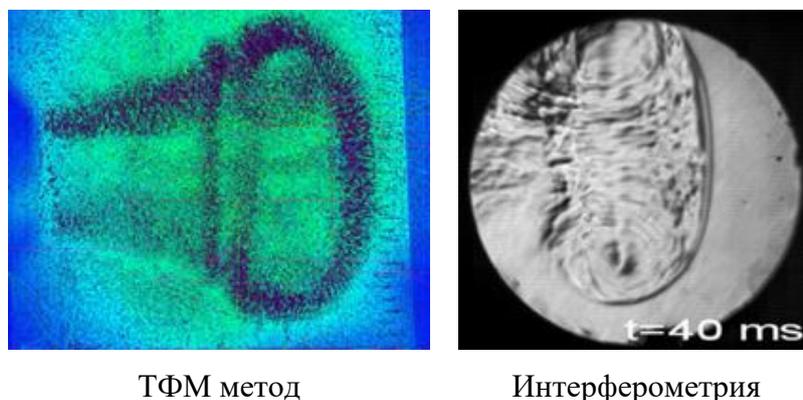


Рис. 20. Визуализация одного и того же тороидального вихря разными методами

ТФМ метод обладает малой чувствительностью, но в реализации весьма прост, может иметь очень большую область визуализации и не требует дорогостоящего оборудования.

ВЫВОДЫ

- Методы лазерного ножа и PIV требуют введения в течение рассеивающих свет добавок.
- Такие рефрактометрические методы как теневой, прямотеневой и интерферометрический надёжно выделяют структуру вихревого течения без добавок.
- Наиболее чувствительным методом является интерферометрический метод. Его поле визуализации ограничено лишь размерами сферического зеркала и в мобильном варианте достигает 500 мм. Он не требует введения неоднородности в течение.
- Теневой фоновый метод уступает интерферометрическому в чувствительности, но превосходит по размеру поля визуализации, которое определяется лишь полем зрения регистрирующей аппаратуры, а также требует предварительного нагрева струи, формирующей вихревое кольцо
- Автору не удалось найти данные по прямым измерениям осевой скорости в тороидальном вихре, хотя из картин визуализации эта скорость явно должна быть (пятно разрежения в ядре). В линейном вихре такие измерения производились.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бетяев С.К., Гайфуллин А.М.** Спиральные вихри. М.: ЦАГИ, 2001. 36 с.
2. **Петров К.П.** Аэродинамика элементов летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1985. 272 с.
2. **Hall M.G.** A theory for the core of a leading-edge vortex // *Journal of Fluid Mechanics*. 1961. Vol. 11. Pp. 209-228.
3. **Бурдин И.Ю., Песецкий В.А.** Исследование особенностей кинематики отрывных вихревых течений методом ЛДИС // *Учёные записки ЦАГИ*. 1993. Т. XXIV, №4. С. 55-62.
4. **Leibovich S.** The structure of vortex breakdown // *Ann. Rev. Fluid Mech.* 1978. Vol. 10. Pp. 221-246.
5. **Маркович Д.М., Липницкий Ю.М.** Применение оптических панорамных методов для газодинамических исследований // *Материалы XXIV научно-технической конференции по аэродинамике, 28.02-01.03 2013г., п. Володарского, Моск. обл.* С. 167-168.
6. **Кулеш В.П., Иншаков С.И., Масленников Г.Я.** Измерения траектории вихря над крылом модели пассажирского самолета методом лазерного ножа // *Труды XIII Международной научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков», (ОМИП-2015), Москва, МЭИ 29 июня-03 июля 2015 г.* С. 31-37.
7. **Ахметов Д.Г.** Формирование и основные параметры вихревых колец // *Прикладная механика и техническая физика*. 2001. Т. 42, №5. С. 70-83.
8. **Kopiev V.F., Zaitsev M.Yu., Guriashkin L.P., Inshakov S.I.** Visualization of the Large-scale Vortex Structures in Exited Turbulent Jets // *Journal of Visualization*. 2003. Vol. 6, № 3. Pp. 303-311.
9. **Иншаков С.И., Пельменёв А.Г., Сахно Д.В., Ширин А.С., Шехтман В.Н.** Оптическая система для газодинамических исследований на базе модернизированного интерферометра ИТ-183 // *Труды 8 Тихоокеанского симпозиума по визуализации потоков и обработке изображений, 21-25 августа 2011 г., Москва*.
10. **Inshakov S.I., Skornyakova N.M., Poroykov A.Yu., Sychev D.G.**, Visualization of the aerodynamic vortices by Background Oriented Schlieren // *Proceedings of 10th pacific symposium on flow visualization and image processing. Naples, Italy, 15-18 June, 2015.* 13 p. Paper ID: 176.

Inshakov S.I.

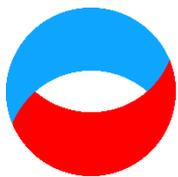
*Federal Autonomous Institution "Central Aerohydrodynamic Institute
named after Professor N.E. Zhukovsky", (FAU TsAGI), Russia,
140181, Zhukovsky, Moscow region, Zhukovsky St., 1
E-mail mera@tsagi.ru*

FEATURES OF VISUALIZATION OF VORTEX FILAMENTS

ABSTRACT

A number of vortex flows characteristic of the aerophysical experiment are considered. Such visualization methods as schlieren and direct shadow methods, background oriented schlieren method (BOS), laser knife method and shear interferometry are given. Schemes for the implementation of methods are given and improvements to visualization systems adapted for use on aerodynamic stands are described. The visualization patterns of toroidal vortices, including both the background oriented schlieren method and the method of shear interferometry, as well as vortices with inflows of wings and end vortices, are presented. General recommendations on the selection of circuit parameters are given.

VORTEX FLOWS, AEROPHYSICAL EXPERIMENT, VISUALIZATION METHODS



*Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.*

УДК 533.6.011, 537.52

Иванова А.А., Мурсенкова И.В.

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Физический факультет, Россия,
119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, E-mail: militcina.aa18@physics.msu.ru*

ОПТИЧЕСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СТАЦИОНАРНОГО СВЕРХЗВУКОВОГО ТЕЧЕНИЯ ОКОЛО ОБТЕКАЕМОГО ТЕЛА

АННОТАЦИЯ

Экспериментально исследована пространственная структура сверхзвукового течения в канале ударной трубы при стационарном обтекании осесимметричного затупленного тела. Числа Маха потоков воздуха составляли 1,36-1,60. Стационарное течение около тела формировалось в течение 30 мкс в процессе дифракции плоской ударной волны и длилось до 300 мкс. Течение визуализировалось путем регистрации свечения комбинированного объемного разряда и прямым теневым методом. Комбинированный объемный разряд длительностью до 500 нс реализовался при импульсном напряжении 25 кВ в объеме протяженностью 100 мм в направлении потока. Высокоскоростная теневая визуализация проводилась с частотой 150 000 кадров в секунду. Сопоставление изображений свечения разряда с кадрами теневой съемки позволило восстановить трехмерную структуру сверхзвукового течения с головной ударной волной и наклонными скачками уплотнения.

**УДАРНАЯ ВОЛНА, СВЕРХЗВУКОВОЙ ПОТОК, НАНОСЕКУНДНЫЙ
КОМБИНИРОВАННЫЙ ОБЪЕМНЫЙ РАЗРЯД, ГАЗОРАЗРЯДНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ,
ТЕНЕВАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ**

ВВЕДЕНИЕ

Методы визуализации газодинамических потоков с помощью электрических разрядов приобрели широкое распространение в решении различных задач плазменной аэродинамики [1-4]. Использование разрядов различного типа позволяет не только организовать разные режимы управления потоков, но и получать информацию об их структуре [2, 4]. Традиционные методы визуализации, такие как прямой теневой метод, шлирен-метод и интерференционный метод, доказали свою эффективность при исследовании сверхзвуковых течений в трубах, где наблюдаются резкие изменения параметров среды, в том числе плотности и показателя преломления [1, 4, 5]. В комбинации с классическими методами регистрация свечения газового разряда позволяет получить дополнительную информацию о течении, включая восстановление трёхмерной структуры.

Помимо классических методов, за последние десятилетия развиваются способы визуализации, основанные на регистрации свечения различных типов газовых разрядов [1-4]. Такие методы особенно полезны при низких давлениях газа, поскольку локальная интенсивность свечения газоразрядной плазмы может быть непосредственно связана с величинами приведенного электрического поля и плотностью газа [5, 2, 4]. Объемные

наносекундные разряды, длительность которых значительно меньше характерных газодинамических времён, позволяют фиксировать структурные элементы высокоскоростных потоков, такие как головные, косые скачки уплотнения и другие характерные особенности течения [4, 6].

Целью настоящей работы являлась определение трехмерной структуры сверхзвукового потока с числами Маха 1,36-1,60, обтекающего осесимметричное затупленное тело. Визуализация течения проводилась путем регистрации свечения комбинированного объемного разряда длительностью 500 нс в разрядной секции ударной трубы.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводились на ударной трубе с разрядной секцией, имеющей внутреннее прямоугольное сечение 24×48 мм² ($y \times z$) [6]. В качестве рабочего газа использовался воздух при начальном давлении $p_0 = 10-30$ торр. После разрыва диафрагмы в канале формировалось течение с плоской ударной волной, за которой следовал однородный спутный поток [4, 6]. Исследование проводилось при числах Маха плоских ударных волн 3,0-4,2 и, соответственно, числах Маха потоков за ними 1,36-1,60.

По центру разрядной секции под нулевым углом атаки к набегающему потоку было установлено осесимметричное тело – цилиндр диаметром 7,5 мм со сферическим затуплением, длиной 200 мм. При прохождении ударной волны происходила дифракция, завершающаяся образованием головной ударной волны и установлением стационарного обтекания (рис. 1). Стационарное течение формировалось в течение 30-50 мкс в процессе дифракции плоской ударной волны и продолжалось до 300 мкс в пределах длительности однородного спутного течения. На рис. 1 показано теневое изображение течения около тела на стационарной стадии обтекания, включающее головную ударную волну, косые, а также отраженные от стенок и от тела наклонные скачки уплотнения. После окончания стационарной стадии течение перестраивалось с изменением конфигурации всех ударных волн.

Визуализация течения осуществлялась через плоскопараллельные кварцевые боковые стенки разрядной секции. Теневые изображения регистрировались высокоскоростной камерой с частотой 150 000 кадров в секунду. В качестве источника света использовался непрерывный лазер с длиной волны 532 нм. Оптическая система формировала параллельный пучок света шириной около 40 мм, который проходил через стекла разрядной секции и зондировал поле течения. Для измерения скорости ударной волны и синхронизации процессов использовались пьезодатчики давления, подключённые к осциллографу.

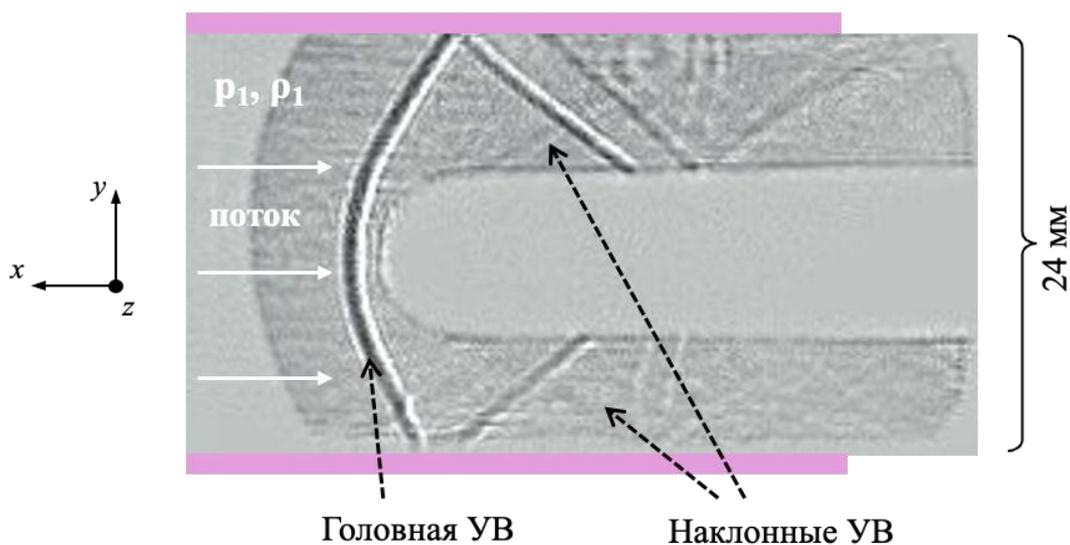


Рис. 1. Теневое изображение элементов сверхзвукового течения около модели при числе Маха потока 1,6 и плотности потока $\rho_1 = 0,10$ кг/м³, цветом обозначена область приложения импульсного напряжения

В основной серии экспериментов наносекундный комбинированный объемный газовый разряд использовался для визуализации элементов течения. Для формирования разряда использовалась специальная электрическая схема наносекундного комбинированного объемного разряда, включающая два поверхностных скользящих разряда [6]. На верхней и нижней стенках разрядной секции, расположенных на расстоянии 24 мм друг от друга, при приложении импульсного напряжения создавалась система каналов скользящих разрядов, которые формировали верхний и нижний плазменные электроды площадью 30×100 мм², обеспечивая предварительную ионизацию объема УФ-излучением. Разрядный объем имел протяжённость 100 мм вдоль направления потока. Носовая часть тела длиной 25 мм располагалась внутри разрядного объема (рис. 1). При импульсной разрядке конденсатора, заряжаемого до рабочего напряжения 25 кВ, происходил объемный пробой газа. Ток разряда достигал 1 кА, а его продолжительность составляла менее 500 нс. Запуск разряда осуществлялся через генератор импульсов, запускаемый сигналом от пьезоэлектрического датчика давления.

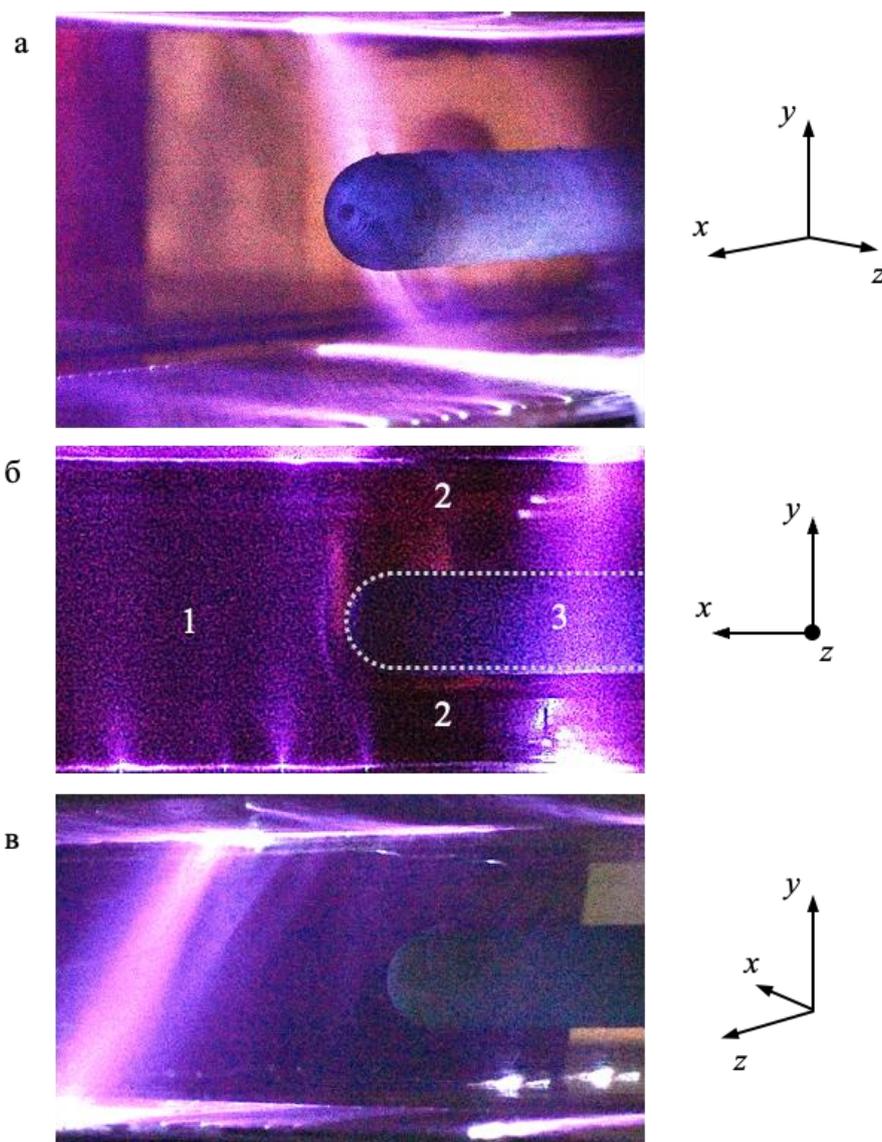


Рис. 2. Свечение разряда при стационарном сверхзвуковом обтекании тела потоком с числом Маха 1,52 и плотности $\rho_1 = 0,09$ кг/м³ при регистрации под разными углами

Свечение комбинированного объемного разряда регистрировалось фотокамерами, расположенными с двух сторон разрядной секции под разными углами. Время экспозиции

соответствовало времени излучения разряда [4, 6]. Фотоизображения обрабатывались с помощью графического редактора для повышения резкости и контрастности изображений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

После дифракции плоской ударной волны течение около тела устанавливалось в течение 30-50 мкс. В этот период формировались устойчивые структурные элементы течения, включая головную ударную волну и наклонные скачки уплотнения. Стационарное состояние сохранялось до 300-400 мкс в пределах спутного потока.

В неподвижном воздухе свечение объемной фазы разряда характеризуется высокой однородностью [6]. Серия фотоизображений свечения разряда в сверхзвуковых потоках при обтекании тела (рис. 2) дала возможность проанализировать его пространственное распределение, связанное с особенностями протекания разрядного тока. В объемной части свечение в основном однородно (1) (рис. 2б). При этом область между головной ударной волной и носовой частью обтекаемого тела (2) характеризовалась пониженной интенсивностью излучения (рис. 2а, 2в). В приповерхностных зонах распределение свечения скользящих поверхностных разрядов так же было неоднородным (рис. 2а, 2в). Так, в области приповерхностного течения до головной ударной волны свечение разряда проявлялось равномерно (1), область между головной ударной волной и носом (2) характеризовалась сниженной интенсивностью излучения, а в зонах взаимодействия косых скачков уплотнения с пограничным слоем (3) свечение вновь усиливалось. Таким образом, пространственное распределение свечения визуализирует распределение плотности: области более низкой плотности и давления, в которых, соответственно, увеличена концентрация электронов, излучают интенсивнее, а области с повышенной плотностью – менее интенсивно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение наносекундного комбинированного объемного разряда в качестве оптического диагностического инструмента показало свою высокую эффективность при исследовании пространственной структуры сверхзвуковых потоков. Комплексный метод, сочетающий регистрацию свечения разряда и высокоскоростную теневую съемку, позволил получить подробную информацию о структурах в потоке, включая ударные волны, косые скачки уплотнения и области их взаимодействия с пограничным слоем. Результаты работы подтверждают перспективность дальнейшего использования данных методов в исследованиях плазменной аэродинамики и могут способствовать совершенствованию подходов к диагностике и контролю аэродинамических явлений в условиях сверхзвукового обтекания.

Иванова А.А. благодарит Фонд развития теоретической физики и математики «БАЗИС» за поддержку исследования, грант 24-2-10-54-1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Знаменская И.А.** Методы панорамной визуализации и цифрового анализа теплофизических полей. Обзор // Научная визуализация. 2021. Т. 13. № 3. С. 125-158.
2. **Leger L., Sellam M., Barbosa E., Depussay E.** Visualization by discharge illumination technique and modification by plasma actuator of rarefied Mach 2 airflow around a cylinder // Meas. Sci. Technol. 2013. Vol. 24. N 6. P. 065401.
3. **Jiang W, Qiu H, Yang Y et al.** High frequency AC electric glow discharge visualization technology and application in big diameter hypersonic low-density wind tunnel // Adv. Aerodyn. 2021. Vol. 3. P. 14.

4. **Mursenkova I., Ivanova A., Ivanov I.E., Sysoev N., Karimov A.** High-speed flow visualization by a nanosecond volume discharge during shock wave diffraction on an obstacle // *Scientific Visualization*. 2023. Vol. 15. № 3. Pp. 40-49.
5. **Райзер Ю.П.** Физика газового разряда. М., 1987. 592 с.
6. **Иванова А.А., Мурсенкова И.В.** Экспериментальное исследование движения ударной волны в плазме импульсного объемного разряда в воздухе // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон.* 2023. № 2. С. 58-66.

Ivanova A.A., Mursenkova I.V.

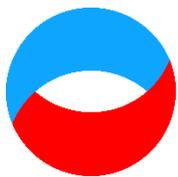
*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Russia,
119991, Moscow, Leninskie Gory, 1, E-mail: militcina.aa18@physics.msu.ru*

GAS DISCHARGE VISUALIZATION OF STEADY SUPERSONIC FLOW AROUND A BLUNT BODY

ABSTRACT

The spatial structure of a supersonic flow in a shock-tube channel under steady-state oblique flow around an axisymmetric blunt body was investigated experimentally. The Mach numbers of the airflow behind the diffracted planar shock wave ranged from 1.36 to 1.60. The steady flow around the model formed within 30 μ s after shock-wave diffraction and persisted up to 300 μ s, remaining within the duration of the uniform driver flow. Visualization was performed by recording the glow of a combined volume discharge and by the direct shadowgraph method. The volume discharge, with a duration of up to 500 ns, was generated by a 25 kV pulsed voltage applied over a 100 mm long region aligned with the flow. High-speed shadowgraphy was carried out at 150 000 fps. Correlating discharge-glow images with shadowgraph frames made it possible to reconstruct the three-dimensional structure of the supersonic flow, revealing the bow shock in front of the body and the oblique compression waves downstream.

SHOCK WAVE, SUPERSONIC FLOW, NANOSECOND COMBINED VOLUME DISCHARGE, GAS DISCHARGE VIZUALIZATION, SHADOWGRAPHY VIZUALIZATION



УДК 533.6.011, 537.52

Сазонов А.С.¹, Мурсенкова И.В.^{1,2}

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Россия,
119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, E-mail: as.sazonov@physics.msu.ru

²Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СВЕЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СКОЛЬЗЯЩЕГО РАЗРЯДА В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ С ОБТЕКАЕМЫМ ТЕЛОМ

АННОТАЦИЯ

Проведено экспериментальное исследование пространственного распределения излучения поверхностного скользящего разряда длительностью 500 наносекунд в сверхзвуковых потоках воздуха с обтекаемым осесимметричным телом. Сверхзвуковые потоки с числами Маха 1,36-1,55 создавались за плоскими ударными волнами с числами Маха 3,0-4,0 в канале ударной трубы прямоугольного сечения. Течение в разрядной камере включало ударные волны, генерируемые при обтекании потоком осесимметричного тела, и отраженные от стенок ударной трубы. Поверхностный скользящий разряд протяженностью 100 мм инициировался на нижней стенке разрядной камеры в заданный момент времени. Проанализированы пространственные характеристики излучения разряда, инициированного на различных стадиях нестационарного газодинамического течения. Для определения газодинамической структуры течения проводилась высокоскоростная теневая визуализация течения с частотой 150000 кадров в секунду. Проведены цифровая обработка и анализ изображений свечения, полученных при развитии разряда в зоне взаимодействия ударных волн с ламинарным и турбулентным пограничным слоем, а также их сравнение с теневыми изображениями газодинамического поля течения в моменты времени, соответствующие излучению разряда. Показана связь интенсивности свечения скользящего поверхностного разряда в сверхзвуковых потоках с характером и состоянием пограничного слоя, в котором происходит развитие разряда.

НАНОСЕКУНДНЫЙ ПОВЕРХНОСТНЫЙ СКОЛЬЗЯЩИЙ РАЗРЯД, СВЕРХЗВУКОВОЙ ПОТОК, ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ, ТЕНЕВАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ, ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

ВВЕДЕНИЕ

Наносекундный поверхностный скользящий разряд – импульсный газовый разряд, распространяющийся вдоль диэлектрической поверхности. Он привлекает внимание исследователей благодаря своему потенциалу в плазменном управлении высокоскоростными потоками. Наносекундный скользящий разряд формирует квазиоднородную плазму, распределенную по площади диэлектрика [1, 2]. По сравнению с другими типами поверхностных разрядов, скользящий разряд создаёт существенно более широкую зону

воздействия, что делает его удобным для применения в газодинамических потоках [1-3]. Излучение разряда определяется второй положительной системой молекулярного азота, спектр свечения имеет максимум в ультрафиолетовом диапазоне [4].

Целью работы являлось изучение распределения свечения импульсного поверхностного скользящего разряда в сверхзвуковых потоках воздуха с обтекаемым телом. В экспериментах инициирование разряда проводилось на разных стадиях нестационарного газодинамического течения. Вследствие малой длительности разряда (~500 нс) в сравнении с газодинамическими временами регистрация свечения разряда может служить способом визуализации структуры течения. В частности, взаимодействие ударных волн с пограничными слоями создает сложное поле течения (скачки уплотнения, зоны разрежения, отрыв потока), которое может существенно влиять на форму и интенсивность свечения скользящего поверхностного разряда за счет её непосредственной связи со значениями приведенного электрического поля E/N (E – напряженность электрического поля, N – концентрация молекул газа) [1, 5].

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальные исследования проводились на ударной трубе с разрядной камерой прямоугольного сечения 24×48 мм² (рис. 1) [1, 6]. Сверхзвуковые потоки воздуха с числами Маха 1,36-1,55 генерировались за фронтом плоских ударных волн с числами Маха 3,0-4,0. Ударные волны создавались в результате разрыва диафрагмы, размещенной между камерой высокого давления и камерой низкого давления, в которой находился воздух при давлениях до 30 Торр. Однородный спутный поток за фронтом ударной волны имел длительность 200-500 мкс. В качестве обтекаемого тела в потоке использовался затупленный цилиндр диаметром 7,5 мм, размещенный в разрядной камере под нулевым углом атаки к набегающему потоку. В экспериментах разряд реализовывался на различных стадиях нестационарного течения от начала дифракции плоской ударной волны на теле до окончания спутного потока. В ударной трубе толщина пограничного слоя возрастает по направлению к контактной поверхности, и на определенном расстоянии от фронта ударной волны пограничный слой из ламинарного становится турбулентным [6].

Течение в разрядной камере вблизи обтекаемого тела визуализировалось прямым теневым методом [7]. Оптическая схема прямого теневого метода включала создание плоскопараллельного пучка лучей, просвечивающего исследуемую область вблизи обтекаемого тела. Регистрация теневых изображений проводилась высокоскоростной камерой с частотой 150000 кадров в секунду.

На нижней стенке разрядной камеры в заданный момент времени инициировался поверхностный скользящий разряд протяженностью 100 мм в направлении потока. Носовая часть обтекаемого тела длиной 25 мм располагалась над разрядным промежутком. При импульсном напряжении 25 кВ ток разряда ~1-2 кА. Момент инициирования разряда задавался генератором импульсов относительно прохождения ударной волной пьезоэлектрического датчика давления, размещенного в канале ударной трубы (рис. 1). Свечение разряда в видимом диапазоне спектрально регистрировалось фотоаппаратом через прозрачные кварцевые стекла разрядной камеры под значительным углом наклона к плоскости разряда; время экспозиции соответствовало времени излучения разряда. Сопоставление изображений свечения поверхностного скользящего разряда и соответствующих теневых картин течения проводилось для установления связи излучения плазмы разряда с характером газодинамического течения около нижней поверхности канала.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Высокоскоростная теневая съемка показала формирование сложной системы ударных волн при установлении сверхзвукового обтекания тела в разрядной камере, областей отрыва пограничного слоя. При этом после дифракции плоской ударной волны на теле установление

стационарного течения занимает меньше 50 мкс, а его длительность составляет 250-400 мкс. Стационарное течение в разрядной камере включало ударные волны, генерируемые при обтекании потоком осесимметричного тела, и отраженные от стенок разрядной камеры ударной трубы. Эти ударные волны взаимодействовали с пограничными слоями, формирующимся на плоских стенках разрядной камеры. Переход к нестационарной фазе происходит после окончания спутного течения или после прихода отраженных ударных волн, движущихся навстречу потоку.

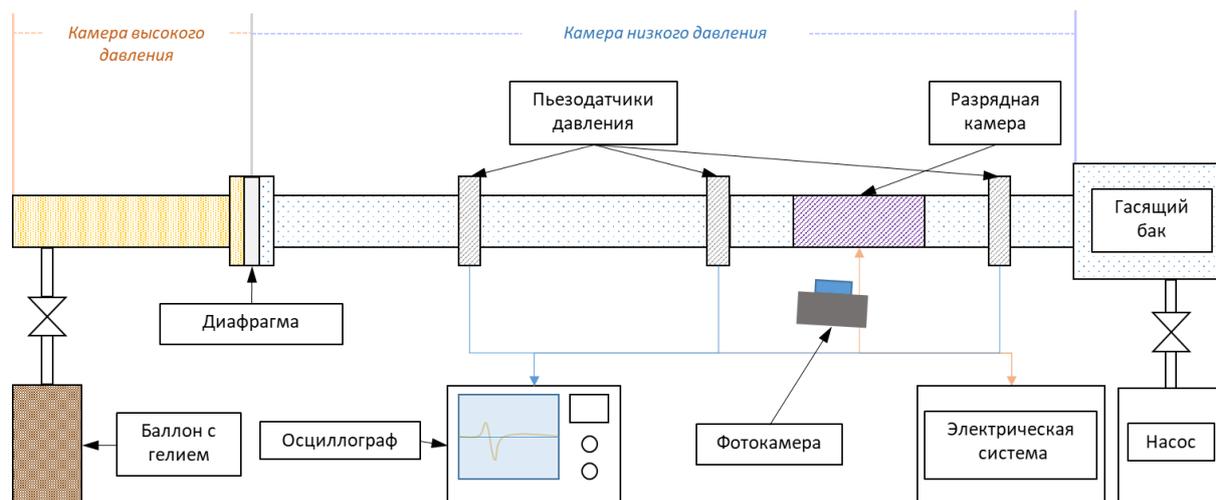


Рис. 1. Схема ударной трубы с разрядной камерой и расположение измерительной аппаратуры

В неподвижном воздухе свечение поверхностного скользящего разряда достаточно однородно, с появлением некоторой филаментации при повышении плотности газа (рис. 2а). Распределение свечения разряда в сверхзвуковых потоках показывает четкую корреляцию с газодинамической структурой приповерхностного течения (рис. 2б-г). Фотоизображения свечения практически мгновенно визуализируют структуру приповерхностного течения, так как смещение потока не превышает 1 мм за время регистрации свечения. На фрагментах б, в, г рис. 2 показаны изображения свечения разряда, инициированного через 15 мкс после начала дифракции ударной волны на теле (б), через 250 мкс (в) и через 326 мкс (г).

После прохождения фронта плоской ударной волны пограничный слой на стенках разрядной камеры является ламинарным (рис. 2б), на более поздних стадиях течения он становится турбулентным (рис. 2в, 2г). Характер пограничного слоя влияет на однородность свечения поверхностного скользящего разряда, что видно на полученных изображениях в набегающем потоке в их левой части (рис. 2б-г). Характер пограничного слоя также влияет на формирование области низкой плотности при взаимодействии с наклонной ударной волной и повышенное свечение разряда в правой части изображения.

На начальных стадиях установления обтекания (рис. 2б) хорошо видна область пересечения головной ударной волны перед телом и пограничного слоя. В этой области свечение разряда имеет характерное закругление, после которого свечение на некотором протяжении отсутствует. Яркое свечение в правой части этого изображения свечения реализуется перед фронтом плоской ударной волны, немного выходящей за пределы разрядного промежутка.

На стационарной стадии обтекания (рис. 2в) область, где свечение разряда отсутствует, становится шире, что соответствует картине стационарного обтекания, наблюдаемой на теневых изображениях. Яркая область свечения разряда находится в зоне низкой плотности, образовавшейся при взаимодействии наклонной ударной волны с турбулентным пограничным слоем.

Начало нестационарной газодинамической стадии течения характеризуется изменением положения и формы головной ударной волны перед обтекаемым телом. Распределение

свечения в области потока перед телом изменяется, яркая область свечения разряда в правой части модифицируется (рис. 2г).

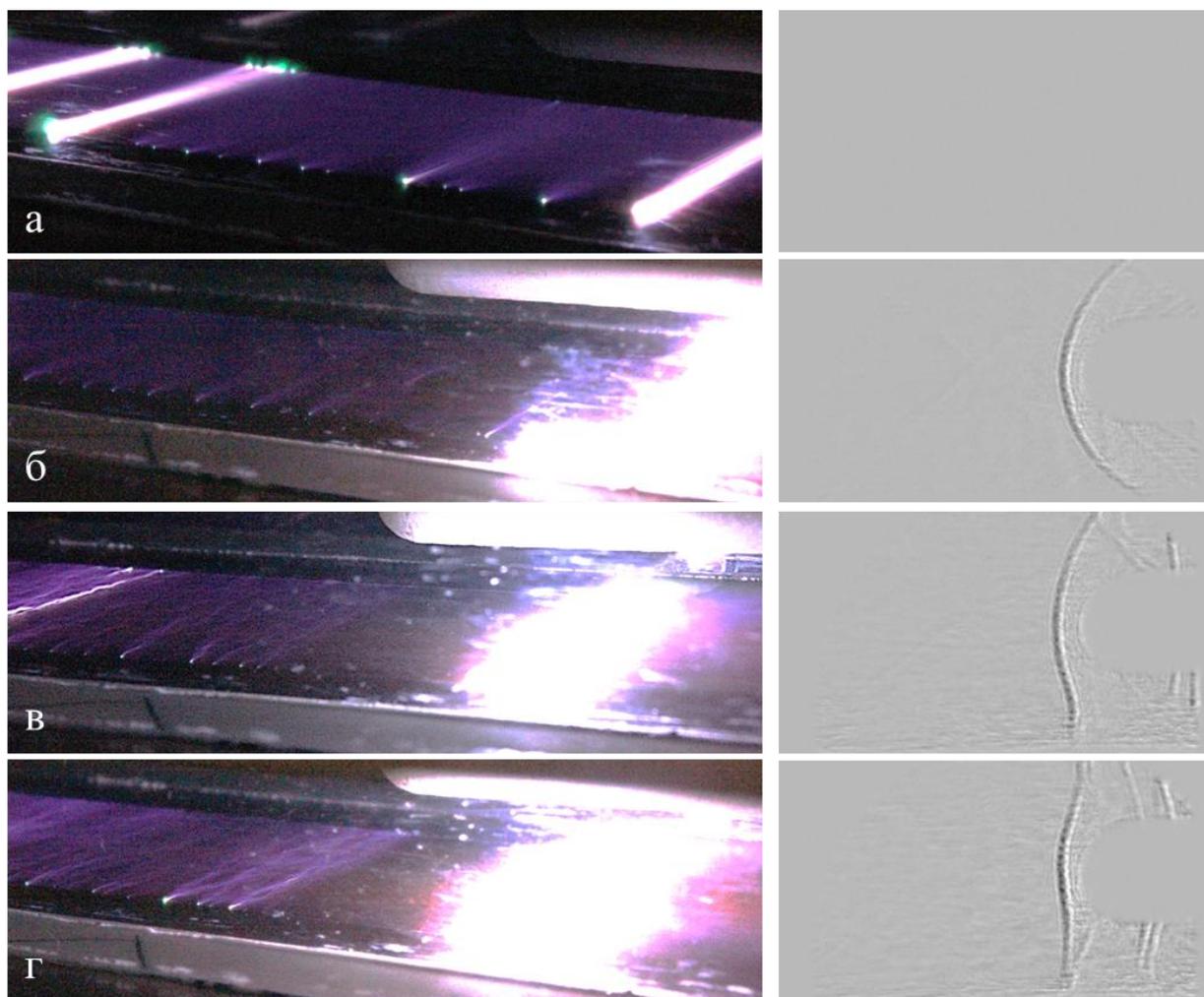


Рис. 2. Свечение поверхностного скользящего разряда (слева) и соответствующие теневые изображения (справа): а – неподвижный воздух, б – 15 мкс после дифракции ударной волны, в – 250 мкс, г – 326 мкс. Плотность воздуха $0,09 \text{ кг/м}^3$. Число Маха потока 1,54, поток движется слева направо

Сопоставление кадров теневой визуализации с изображениями свечения демонстрирует явную связь между положением газодинамических неоднородностей и распределением свечения плазмы разряда. В неоднородных потоках в областях низкой плотности скорость ионизации повышена, и ток разряда концентрируется в локализованных каналах [1, 7]. Соответственно, области низкой плотности в пограничном слое хорошо визуализируются свечением поверхностным скользящим разрядом. Таким образом, пространственное распределение свечения поверхностного скользящего разряда служит своего рода "отображением" структуры сверхзвукового течения – плазма наиболее интенсивно светится там, где имеются области разрежения или резкие градиенты плотности, связанные с газодинамическими структурами в сверхзвуковом потоке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе экспериментальных данных показано, что характер протекания тока и пространственное распределение свечения наносекундного поверхностного скользящего разряда тесно связаны с газодинамической структурой сверхзвукового неоднородного потока. Ток разряда может локализоваться в областях пониженной плотности, преимущественно в зонах взаимодействия ударных волн с пограничным слоем. Корреляция между свечением

разряда и положением ударных волн, наклонных скачков уплотнения, границ отрывных областей демонстрирует возможность использования импульсных разрядов в качестве диагностического инструмента для визуализации приповерхностных течений газа. Пространственное распределение свечения разряда позволяет визуализировать структуры в сверхзвуковом потоке.

Полученные экспериментальные результаты позволяют уточнить механизмы, связывающие характеристики наносекундного разряда с локальной структурой пограничного слоя и ударно-волновыми взаимодействиями, а также определить направления для оптимизации плазменных актуаторов нового поколения.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мурсенкова И.В., Сазонов А.С., Ляо Ю., Иванов И.Э.** Визуализация области взаимодействия косога скачка уплотнения с пограничным слоем свечением наносекундного поверхностного скользящего разряда // Научная визуализация. 2019. Т. 11. № 3. С. 76-87.
2. **Bayoda K. D., Benard N., Moreau E.** Nanosecond pulsed sliding dielectric barrier discharge plasma actuator for airflow control: electrical, optical, and mechanical characteristics // Journal of Applied Physics. 2015. Vol. 118. P. 063301.
3. **Поливанов П.А., Вишняков О.И., Сидоренко А.А., Маслов А.А.** Сравнение течений, индуцированных диэлектрическим барьерным и скользящим разрядами // Прикладная механика и техническая физика. 2013. Т. 54. № 3. С. 21-29.
4. **Lago V., Grondona D., Kelly H., Sosa R., Marquez A., Artana G.** Sliding discharge optical emission characteristics // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2009. Vol. 16. № 2. Pp. 292-298.
5. **Райзер Ю.П.** Физика газового разряда. М., 1987. 592 с.
6. **Знаменская И.А., Латфуллин Д.Ф., Мурсенкова И.В.** Ламинарно-турбулентный переход в сверхзвуковом пограничном слое при инициировании импульсного поверхностного разряда // Письма в Журнал технической физики. 2008. Т. 34. № 15. С. 75-80.
7. **Ivanov I.E., Mursenkova I.V., Sazonov A.S., Sysoev N.N.** Investigation of a nanosecond sliding surface discharge in time-dependent supersonic air flow in a channel // Fluid Dynamics. 2025. Vol 60. № 8. P. 8.

Sazonov A.S.¹, Mursenkova I.V.^{1,2}

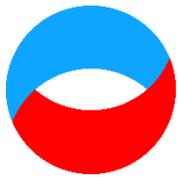
¹*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Russia,
119991, Moscow, Leninskie Gory, 1, E-mail: as.sazonov@physics.msu.ru*
²*National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14*

EMISSION DISTRIBUTION OF NANOSECOND SURFACE SLIDING DISCHARGE IN A SUPERSONIC FLOW OVER AN AXISYMMETRIC BODY

ABSTRACT

Experimental studies of the spatial emission distribution of a 500-ns duration surface sliding discharge in supersonic airflows over an axisymmetric streamlined body have been conducted. Supersonic flows with Mach numbers of 1.36–1.55 were generated behind planar shock waves with Mach numbers of 3.0–4.0 in a shock tube channel with a rectangular cross-section. The flow in the discharge chamber included shock waves generated by the supersonic flow around the axisymmetric body and those reflected from the shock tube walls. A surface sliding discharge with a length of 100 mm was initiated on the bottom wall of the discharge chamber at specific time. Spatial emission characteristics of the discharge initiated at various stages of gas-dynamic flow were analyzed. To determine the gas-dynamic flow structure, high-speed shadow visualization was performed at a frame rate of 150,000 frames per second. Digital processing and analysis of discharge emission images obtained during discharge evolution in regions of interaction between shock waves and laminar or turbulent boundary layers were carried out, along with their comparison to shadow images of the gas-dynamic flow fields corresponding to the discharge emission times. A correlation between the emission intensity of the sliding surface discharge in supersonic flows and the regime and state of the boundary layer where the discharge develops was demonstrated.

NANOSECOND SURFACE SLIDING DISCHARGE, SUPERSONIC FLOW, BOUNDARY LAYER, SHADOW VISUALIZATION, DIGITAL IMAGE PROCESSING



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 532.529

Здорников С.А., Исаенков С.В., Черданцев А.В.

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе, Россия,
630090, Новосибирск, пр. Акад. Лаврентьева, 1, E-mail: cherdantsev@itp.nsc.ru*

**ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ЖИДКОСТИ НА ПЕРЕХОД ОТ СТРАТИФИЦИРОВАННОГО
К КОЛЬЦЕВОМУ РЕЖИМУ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЕ**

АННОТАЦИЯ

Проведено экспериментальное исследование стратифицированного и кольцевого режимов течения для жидкостей с различными физическими свойствами с целью проверки применимости полученных ранее представлений к новым условиям, а также развития и уточнения этих представлений. В работе проводится измерение локальной мгновенной высоты подъема жидкости по стенкам канала при помощи визуализации потока с искажением фоновых изображений, а также измерение локальной мгновенной толщины пленки жидкости в трех азимутальных положениях при помощи метода лазерно-индуцированной флюоресценции. Измерения проводятся в протяженной пространственной области на больших расстояниях от входа в канал. Построены карты режимов течения для разных жидкостей. Изучены основные закономерности влияния свойств жидкости на режимные переходы и структуру течения, получены новые нетривиальные результаты.

**КОЛЬЦЕВОЕ ТЕЧЕНИЕ, РАССЛОЕННОЕ ТЕЧЕНИЕ, ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ ТРУБА,
ВИЗУАЛИЗАЦИЯ**

ВВЕДЕНИЕ

При течении газожидкостной смеси с низким содержанием жидкости в горизонтальной трубе при повышении скорости газового потока происходит переход от стратифицированного (расслоенного) режима течения к кольцевому. В литературе предложено несколько гипотез, объясняющих механизм подъема жидкости по стенкам трубы: срыв и осаждение капель [1-2], перенос жидкости крупными волнами [3-4] и воздействие вторичных течений в газе [5-6]. В недавнем исследовании авторов [7] была проведена количественная визуализация развития водо-воздушного потока из исходной вынужденно стратифицированной конфигурации. Это исследование позволило выделить механизмы, вносящие реальный вклад в подъем жидкости, определить режимные области, в которых механизмы работают, а также доказать необходимость и достаточность механизма, связанного с действием вторичных течений в газовой фазе. Также было показано, что волны возмущения зарождаются в нижней части трубы и, при достаточно высоких расходах фаз, расширяются в азимутальном направлении [8].

В данной работе рассматривается вопрос о влиянии свойств рабочей жидкости на механизмы подъема жидкости по стенкам канала. Целью работы является как проверка интерпретаций, предложенных на основе анализа экспериментов на воде, так и выявление влияния свойств жидкости на исследуемые процессы.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Измерения проводились в горизонтальной оргстеклянной трубе с внутренним диаметром 20 мм. Жидкость и газ подавались в канал в конфигурации стратифицированного течения: жидкость – через нижний сегмент поперечного сечения трубы высотой 2 мм, газ – через верхний сегмент высотой 17 мм. Входы жидкости и газа были разделены горизонтальной металлической пластиной толщиной 1 мм. Вниз по потоку при достаточно высоких расходах жидкости и газа происходил подъем жидкости по стенкам канала и переход к дисперсно-кольцевому режиму течения. В качестве рабочих жидкостей использовались: дистиллированная вода (кинематическая вязкость $\nu = 10^{-6}$ м²/с, поверхностное натяжение $\sigma = 0,073$ кг/с², плотность $\rho = 998$ кг/м³), 5%-раствор бутанола в воде, ВБР ($\nu = 1,1 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $\sigma = 0,034$ кг/с², $\rho = 990$ кг/м³) и 50% раствор глицерина в воде, ВГР ($\nu = 6 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $\sigma = 0,069$ кг/с², $\rho = 1130$ кг/м³). Таким образом, одна пара жидкостей (вода-ВБР) различалась величиной поверхностного натяжения, а другая (вода-ВГР) – величиной вязкости (и, в меньшей степени, плотности). Краевой угол на оргстекле составляет около 60° градусов для воды и ВГР, и примерно 45° для ВБР.

Диапазон расходов жидкости составил от 3,8 мл/с до 25,1 мл/с (для воды соответствует пленочным числам Рейнольдса жидкости $Q_L/\pi D\nu$ от 60 до 400), диапазон среднерасходных скоростей газа V_G составил от 5 до 40 м/с. Расходы жидкости и газа контролировались при помощи поплавкового ротаметра и автоматического газового расходомера, соответственно. Минимальная точность определения расхода жидкости составляла около 5%, для газа – 1%.

Измерения проводились двумя методами. Для измерения локальной мгновенной высоты подъема жидкости по стенкам канала применяется метод визуализации с фоновым изображением. С одной стороны канал наблюдается камерой, а с другой стороны освещается через рассеивающий экран, на котором напечатаны вертикальные линии. Линии видны сквозь сухой канал, однако если луч, ведущий к пикселю камеры, пересекает возмущенную межфазную поверхность, линия пропадает с изображения, получаемого камерой. Таким образом, по размеру изображения видимой части линии можно восстановить высоту подъема жидкости по стенкам канала в месте расположения линии.

Измерения локальной мгновенной толщины пленки жидкости проводились методом лазерно-индуцированной флюоресценции на основе яркости. Для возбуждения флюоресценции продольное сечение канала освещалось лазерным ножом. Яркость переизлученного света в этом сечении измерялась камерой с оптическим фильтром, отсекающим свет лазера, и пересчитывалась в толщину пленки на основе интегральной формы закона Ламберта-Бера и известного значения яркости флюоресценции, излученной в тех же условиях слоем жидкости известной толщины. ЛИФ-измерения проводились в трех азимутальных положениях: в нижней, боковой и верхней части канала. Измерения обоими методами проводились на расстояниях от 0 до 900 мм от входа в канал.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Режимы газожидкостного течения в горизонтальной трубе при низких расходах жидкой фазы проиллюстрированы на рис. 1. В левой колонке представлены мгновенные изображения трубы с фоновым изображением в виде вертикальных линий. Вход в канал виден в левой части изображений. Показан начальный участок трубы длиной 40 см. Внешний диаметр трубы составляет 30 мм. В правой колонке представлены схематические изображения предполагаемого распределения фаз в поперечном сечении канала.

В *стратифицированном* (расслоенном) режиме жидкость занимает нижнюю часть сечения канала (рис. 1а). Поверхность жидкости может быть покрыта волнами, однако их наличие не влияет на расположение фаз. Развития течения вниз по потоку практически не происходит.

В *кольцевом* режиме жидкая пленка покрывает всю внутреннюю поверхность трубы (рис. 1б). При этом толщина пленки остается неравномерной, уменьшаясь от нижней части трубы к верхней. Подъем жидкости по стенкам канала происходит плавно и монотонно, начиная от входа в канал. Такой подъем жидкости не связан ни с действием крупных волн, ни со срывом и осаждением капель. Методом исключения можно прийти к выводу, что ключевым механизмом подъема жидкости является действие вторичных течений в газовой фазе. Более того, подъем жидкости начинается до того, как в нижней части канала начинается формирование крупных волн и срыв капель. Исключить вклад действия крупных волн и капель в перенос жидкости в верхнюю часть канала нельзя. Однако ни один из этих механизмов не является необходимым для подъема жидкости.

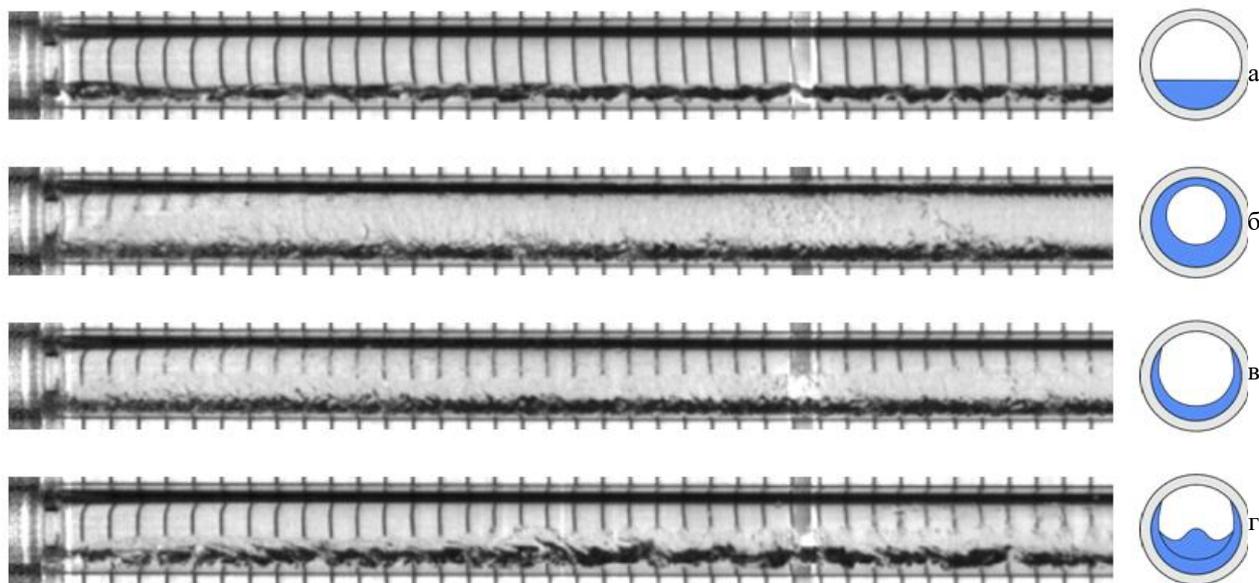


Рис. 1. Визуализация режимов течения. Сверху вниз:
а – стратифицированный, б – кольцевой, в – полукольцевой, г – волновой

Еще нагляднее важность вторичных течений демонстрируется в *переходном «полукольцевом»* режиме (рис. 1в). В этом случае вблизи входа в канал жидкость поднимается по стенкам так же, как и в кольцевом режиме, однако жидкости в потоке недостаточно, чтобы замкнуться в кольцо. Фронт смачивания останавливается на определенной высоте, которая не изменяется вниз по потоку. Сквозь пленку видно прохождение крупных волн в нижней части канала, однако они не влияют на положение фронта смачивания. Таким образом, в этом режиме подъем жидкости происходит полностью за счет вторичных течений, а подъем за счет волн и капель отсутствует.

В *переходном «волновом»* режиме, напротив, присутствуют очень крупные волны, которые время от времени испытывают быстрый рост и могут достичь верхней части канала, орошая ее жидкостью (рис. 1г). Заброшенная вверх жидкость быстро стекает вниз под действием силы тяжести. Очевидно, что в этих условиях вторичные течения слишком слабы, чтобы удержать пленку. Весь подъем осуществляется за счет крупных волн, однако этот механизм не может создать устойчивую кольцевую пленку. Таким образом, механизм подъема благодаря крупным волнам не только не необходим, но и не достаточен для перехода к кольцевому режиму течения.

Качественно режимы течения (стратифицированный, кольцевой и два переходных) одинаковы для разных жидкостей. Основное количественное отличие состоит в условиях реализации тех или иных режимов. Полученные режимные карты представлены на рисунке 2 для водно-бутанолового раствора (а), воды (б) и водно-глицеринового раствора (в). Стратифицированный режим реализуется при низких расходах обеих фаз, а кольцевой – при высоких расходах. Переходные режимы образуют на режимной карте полосу в форме

гиперболы: полукольцевой режим реализуется при низких расходах жидкости и высоких расходах газа, а переходный волновой режим – при низких скоростях газа и высоких расходах жидкости. Из этого можно заключить, что для волнового подъема жидкости требуется высокий расход жидкости, а для подъема за счет вторичных течений в газе – высокая скорость газа.

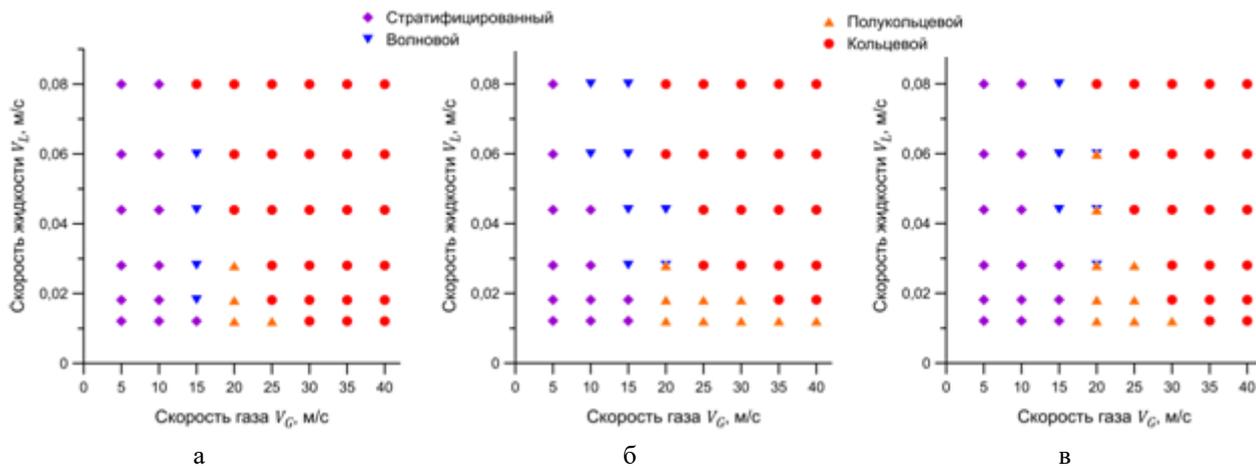


Рис. 2. Сравнение карт режимов течения для различных жидкостей:
а – ВБР, б – вода, в – ВГР

Эффект поверхностного натяжения жидкости можно изучить путем сравнения режимных карт для ВБР (рис. 2а) и воды (рис. 2б). Снижение поверхностного натяжения облегчает переход к кольцевому режиму по всей переходной области. При этом в области волнового переходного режима снижение поверхностного натяжения, по-видимому, облегчает волновое движение, в то время как в области переходного полукольцевого режима подъем жидкости облегчается за счет снижения контактного угла и снижения сопротивления смачиванию. Эффект вязкости виден из сравнения данных для воды (рис. 2б) и водно-глицеринового раствора (рис. 2в). В области волнового переходного режима подъем жидкости и переход к кольцевому режиму требует больших расходов фаз при увеличении вязкости за счет подавления волновой активности силами вязкого трения. Однако в области переходного полукольцевого режима переход к кольцевому режиму при увеличении вязкости облегчается, как и в случае низкого поверхностного натяжения. Такой эффект вязкости может объясняться рядом причин, включая затрудненное стекание более вязкой пленки под действием силы тяжести, снижение продольного переноса жидкости, а также повышение продольного напряжения межфазного трения.

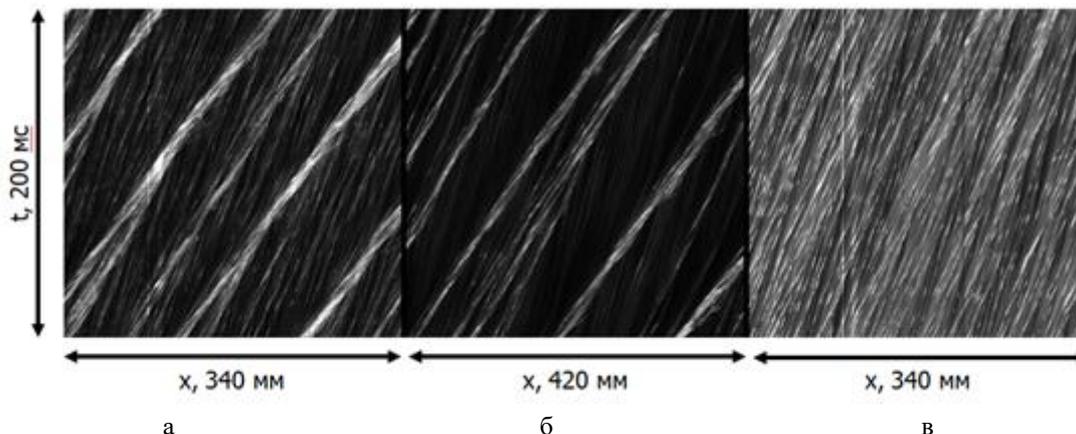


Рис. 3. Пространственно-временные записи толщины пленки жидкости:
а – ВБР, б – вода, в – ВГР

Определение причин того или иного поведения режимов течения связано с характеристиками пленки жидкости, ее азимутальной асимметрией и режимами волнового течения. На рисунке 3 представлены примеры пространственно-временных записей толщины пленки в графическом представлении, полученные методом лазерно-индуцированной флюоресценции для скорости газа 25 м/с, плотности орошения 2,2 см²/с для трех жидкостей в нижней части канала. Видно, что волновой режим одинаков для ВБР и воды: в обоих случаях имеет место развитое кольцевое течение с формированием крупных волн (т.н. волн возмущения), движущихся с высокой скоростью по тонкому остаточному слою жидкости. При этом пленка ВГР заметно толще пленки воды при одинаковых условиях (ср. яркость на рис. 3а и 3б). Увеличение толщины слоя в нижней части канала при низком поверхностном натяжении связано с усилением азимутальной асимметрии потока. Несмотря на то, что пленка ВГР раньше замыкается в кольцо, чем пленка воды, замыкание волн возмущения происходит при значительно больших расходах жидкости и газа, чем на воде. Таким образом, подъем тонкой пленки и крупных волн должны рассматриваться отдельно. Пленка ВГР значительно толще, чем пленки воды и ВБР (ср. рис. 3в с рис. 3а и 3б). Действительно, более вязкая жидкость хуже ускоряется газовым потоком, что при неизменном расходе дает большую толщину пленки. Кроме того, формирование волн возмущения даже в нижней части канала для ВГР происходит при значительно больших расходах жидкости и газа по сравнению с другими жидкостями. На рис. 3в пленка достаточно однородна: в ней отсутствуют выделенные зоны остаточного слоя и крупных волн. При течении ВГР для плотностей орошения ниже 2,2 см²/с волны возмущения не появляются в нижней части канала даже для скорости газа 40 м/с. В верхней части канала волны возмущения на ВГР не появляются во всем диапазоне расходов обеих фаз. Отсутствие выраженных волн возмущения дополнительно замедляет перенос жидкости вниз по потоку и снижает сечение просвета канала для газа. При этом шероховатость пленки остается высокой, благодаря наличию первичных волн высокой амплитуды и частоты. В результате при сильном азимутальном касательном напряжении трения в процесс подъема вовлечен большой объем жидкости, что облегчает подъем жидкости по стенкам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование влияния свойств жидкости на переход от стратифицированного к кольцевому режиму газожидкостного течения в горизонтальной трубе. Используются жидкости с двукратно различающимся поверхностным натяжением и шестикратно различающейся кинематической вязкостью. Показано, что снижение поверхностного натяжения облегчает переход к кольцевому режиму; при этом замыкание крупных волн, как ни странно, затруднено. Повышение вязкости затрудняет подъем жидкости крупными волнами, однако облегчает подъем жидкости при высоких скоростях газа и низких расходах жидкости. Парадоксальным образом отсутствие крупных волн в этом случае ускоряет переход к кольцевому течению, дополнительно подтверждая ключевую роль вторичных течений в газовой фазе в подъеме жидкости по стенкам канала.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 19-79-30075).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **James P.W., Wilkes N.S., Conkie W., Burns A.** Developments in the modelling of horizontal annular two-phase flow // *Int. J. Multiph. Flow.* 1987. № 13(2). Pp. 173-198.
2. **Baik S., Hanratty T.J.** Concentration profiles of droplets and prediction of the transition from stratified to annular flow in horizontal pipes // *Int. J. Multiph. Flow.* 2003. № 29(2). Pp. 329-338.

3. **Fukano T., Osaka A.** Prediction of the circumferential distribution of film thickness in horizontal and near-horizontal gas-liquid annular flow // *Int. J. Multiph. Flow.* 1989. 15(3). Pp. 403-419.
4. **Jayanti S., Hewitt G.F., White S.P.** Time-dependent behaviour of the liquid film in horizontal annular flow // *Int. J. Multiph. Flow.* 1990. № 16(6). Pp. 1097-1116.
5. **Flores A.G., Crowe K.E., Griffith P.** Gas-Phase Secondary Flow in Horizontal, Stratified and Annular Two-Phase Flow // *Int. J. Multiph. Flow.* 1995. № 21(2). Pp. 207-221.
6. **Vollestad P., Angheluta L., Jensen, A.** Experimental study of secondary flows above rough and flat interfaces in horizontal gas-liquid pipe flow // *Int. J. Multiph. Flow.* 2020. № 125. P. 103235.
7. **Cherdantsev A.V., Zdornikov S.A., Cherdantsev M.V., Isaenkov S.V., Markovich D.M.** Stratified-to-annular gas-liquid flow patterns transition in a horizontal pipe // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2022. № 132. P. 110552.
8. **Zdornikov S.A., Isaenkov S.V., Cherdantsev A.V.** Axial and azimuthal development of disturbance waves in annular flow in a horizontal pipe // *Int. J. Multiph. Flow.* 2024. № 172. P. 104704.

Zdornikov S.A., Isaenkov S.V., Cherdantsev A.V.

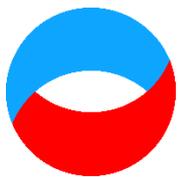
*Kutateladze Institute of Thermophysics, Russia,
630090, Novosibirsk, Lavrentiev ave., 1, E-mail: cherdantsev@itp.nsc.ru*

THE EFFECT OF LIQUID PROPERTIES ON TRANSITION FROM STRATIFIED TO ANNULAR FLOW PATTERN IN A HORIZONTAL PIPE

ABSTRACT

An experimental study of stratified and annular flow patterns is carried out for liquids with different physical properties in order to test the applicability of previously obtained interpretations to new conditions and to enhance our understanding of transition processes. Measurements of local instantaneous height of liquid lifting are carried out using distortion of background images. Measurements of local instantaneous film thickness are carried out in three azimuthal positions using Brightness-Based Laser-Induced Fluorescence technique. The measurements are carried out in a long spatial domain at large distances from the pipe inlet. The regime maps of flow patterns are obtained for different liquids. Main regularities of influence of liquid properties on the flow pattern transition and flow structure are investigated. New non-trivial results are obtained.

ANNULAR FLOW, STRATIFIED FLOW, HORIZONTAL PIPE, VISUALIZATION



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 004.932.2

Неткачев В.В., Скорнякова Н.М.

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: NetkachevVV@mpei.ru*

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ОБРАБОТКИ PIV ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ CNN АРХИТЕКТУРЫ U-NET

АННОТАЦИЯ

В работе представлена разработанная программа для автоматизированной обработки изображений, полученных методом Particle Image Velocimetry (PIV), с использованием сверточных нейронных сетей (CNN) архитектуры U-Net. Созданный метод обеспечивает эффективное построение векторных полей скорости потока с возможностью проведения данной операции в режиме реального времени, временная задержка которой составила 110 мс, из чего был сделан вывод о способности алгоритмов обрабатывать 10 кадров в секунду, и о возможности оперативно корректировать параметры экспериментальной установки в процессе исследований при работе. Используемые в работе возможности глубокого обучения были внедрены, с целью сохранения точности и скорости анализа PIV-данных для разработки более бюджетного варианта, по сравнению с зарубежным промышленным ПО DaVis. Результаты работы продемонстрировали способность разработанного метода на базе использования CNN архитектуры U-Net строить достоверные векторные поля скорости при шумах, составляющих не более 10% от полезного сигнала на изображениях. В дальнейшем планируется расширить функционал программной реализации для улучшения качества построения структуры исследуемых потоков и для интеграции с другими модификациями метода PIV.

**АНЕМОМЕТРИЯ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ ЧАСТИЦ, ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА
ИЗОБРАЖЕНИЙ, СВЕРТОЧНЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ, АРХИТЕКТУРА U-NET**

ВВЕДЕНИЕ

Метод анемометрии по изображениям частиц (Particle Image Velocimetry, PIV) является одним из известных оптических методов исследования динамики жидкостей и газов [1-2]. Эффективность данного метода существенно зависит от качества изображений и оптимально подобранных параметров их обработки.

Современные исследования в области анализа потоков жидкости и газов оптическими методами с использованием цифровой обработки изображений [3-6] показывают значительный потенциал применения методов глубокого обучения для улучшения качества анализа PIV-данных. Тем не менее, наблюдается дефицит отечественных научных публикаций, посвященных данному вопросу, что создает значительные препятствия для теоретического освоения, алгоритмической разработки и практической реализации указанных методов.

Целью данной работы является разработка программы с целью внедрения в будущий оптико-электронный комплекс для автоматизированной обработки PIV-изображений с

использованием CNN архитектуры U-Net. Разработанное решение позволяет строить векторные поля скорости в режиме реального времени с высокой достоверностью при шумах на изображениях не более 10% от полезного сигнала: при таких шумах СКО скорости потока с заданной скоростью составило 0,0635 м/с, по сравнению с зарубежным промышленным ПО DaVis – СКО 0,0285 м/с соответственно. В перспективе планируется оптимизация архитектуры нейронной сети для повышения производительности без потери точности восстановления векторных полей и расширение её функционала для интеграции с различными модификациями метода PIV.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Разработанная программная реализация представляет собой комплексную структуру из алгоритмов для автоматизированной обработки PIV-изображений с использованием сверточной нейронной сети архитектуры U-Net. Основной принцип работы программы заключается в сквозной обработке пары последовательных PIV-изображений, результатам которой являются компоненты смещений частиц X и Y в каждом из пикселей, по которым можно строить векторное поле скорости потока.

Разработанная структура CNN архитектуры U-Net схематично представлена на рис. 1.

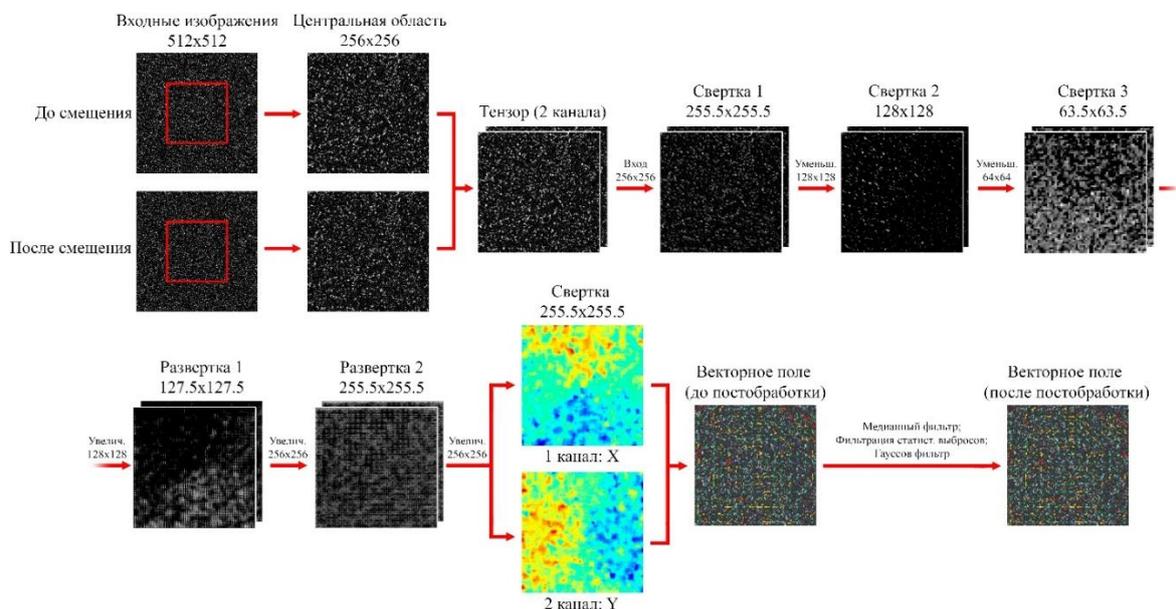


Рис. 1. Архитектура CNN U-Net для обработки PIV-изображений

Кодирующая часть сети состоит из последовательности сверточных слоев с линейной функцией активации ReLU и слоев пулинга данных, которые постепенно уменьшают пространственное разрешение изображения с увеличением количества каналов признаков. Декодирующая часть выполняет обратное преобразование с слоями «skip-connections» для оптимизации обучения, восстанавливая пространственное разрешение изображений и формируя на выходе двухканальное изображение, соответствующее компонентам векторного поля скорости по осям X и Y для каждого пикселя.

Для обучения разработанной сверточной нейронной сети были созданы четыре типа искусственно созданных эталонных потоков:

- вихревой поток;
- ламинарный поток с параболическим распределением скорости;
- разносторонний сдвиг по оси X ;
- разносторонний сдвиг по оси Y .

На рис. 2 представлены изображения графиков компонент X и Y смещения частиц и векторное поле смещений, построенное по ним для каждого из потоков.

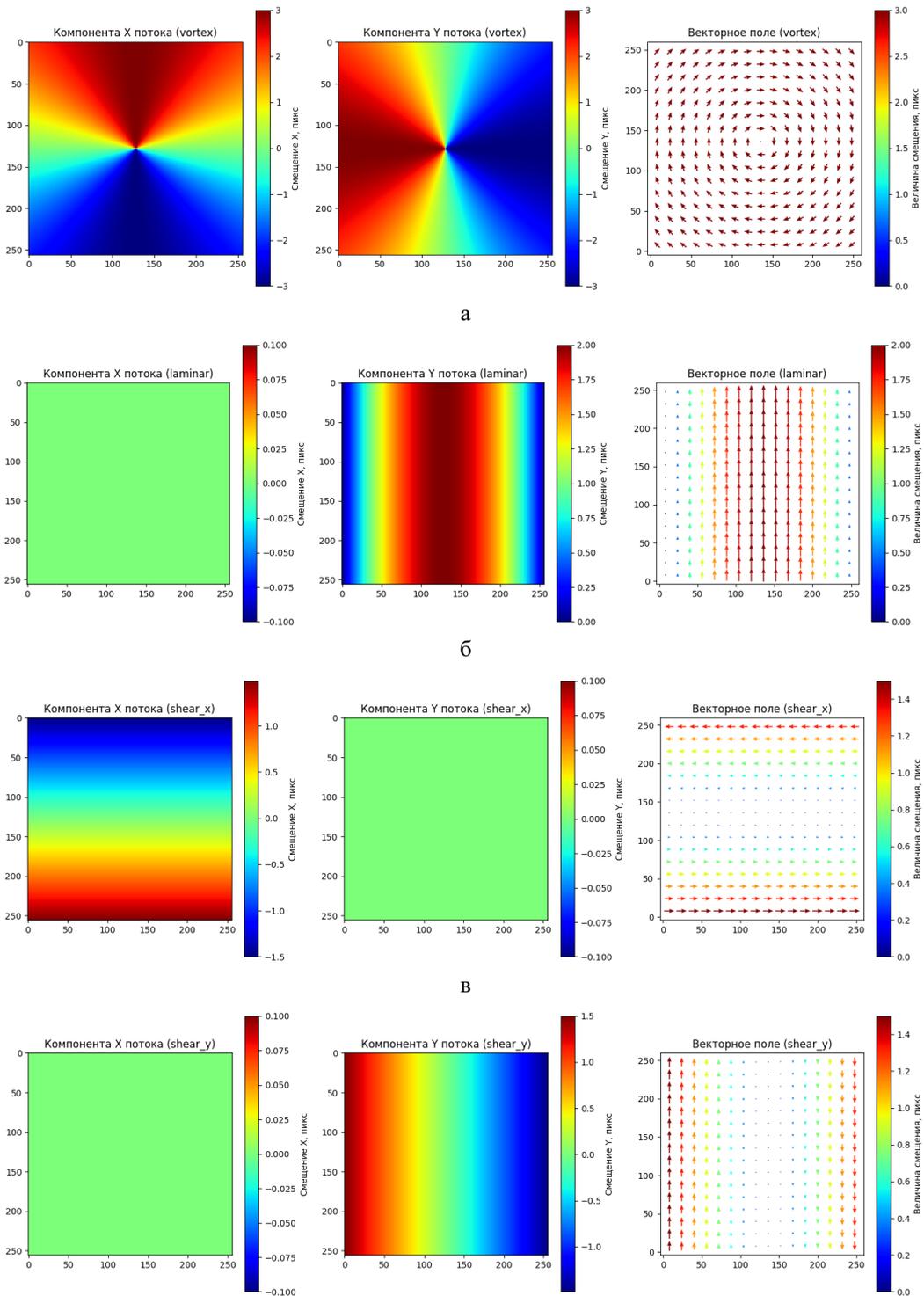


Рис. 2. Компоненты искусственных потоков и их векторные поля:
а – вихревой поток; б – ламинарный поток; в – разносторонний сдвиг по оси X;
г – разносторонний сдвиг по оси Y

На рис. 3 представлены результаты восстановления векторных полей разработанной сверточной нейросети по сравнению с эталонными смещениями.

Из результатов, представленных на рис. 3, следует, что восстановленные векторные поля разработанной программой сопоставимы с эталонными для каждого из использованных в обучении нейросети потоков.

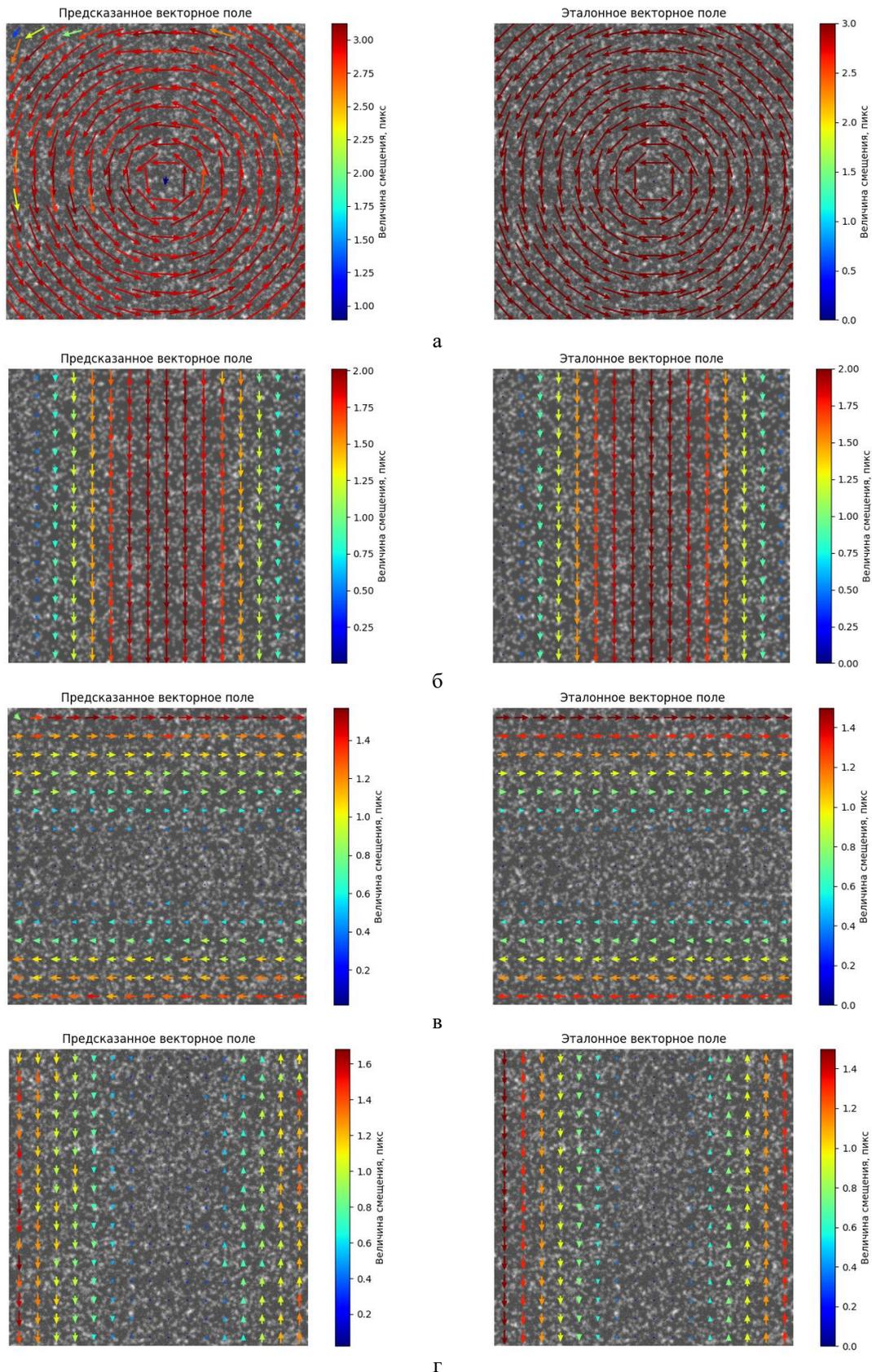


Рис. 3. Результаты тестирования обученной сверточной нейронной сети:
 а – вихревой поток; б – ламинарный поток; в – разносторонний сдвиг по оси X ;
 г – разносторонний сдвиг по оси Y

Для оценки эффективности разработанной программы в сравнении с имеющимся зарубежным промышленным ПО DaVis были использованы экспериментальные PIV-изображения трех типов потоков:

- ламинарный поток с постоянной скоростью вдоль поперечной оси;
- ламинарный поток с параболическим распределением скорости;
- вихревой, или же турбулентный, поток.

На рис. 4 показаны векторные поля, восстановленные двумя методами: с помощью PIV CNN архитектуры U-Net и DaVis, при условии, что на изображениях нет шумов.

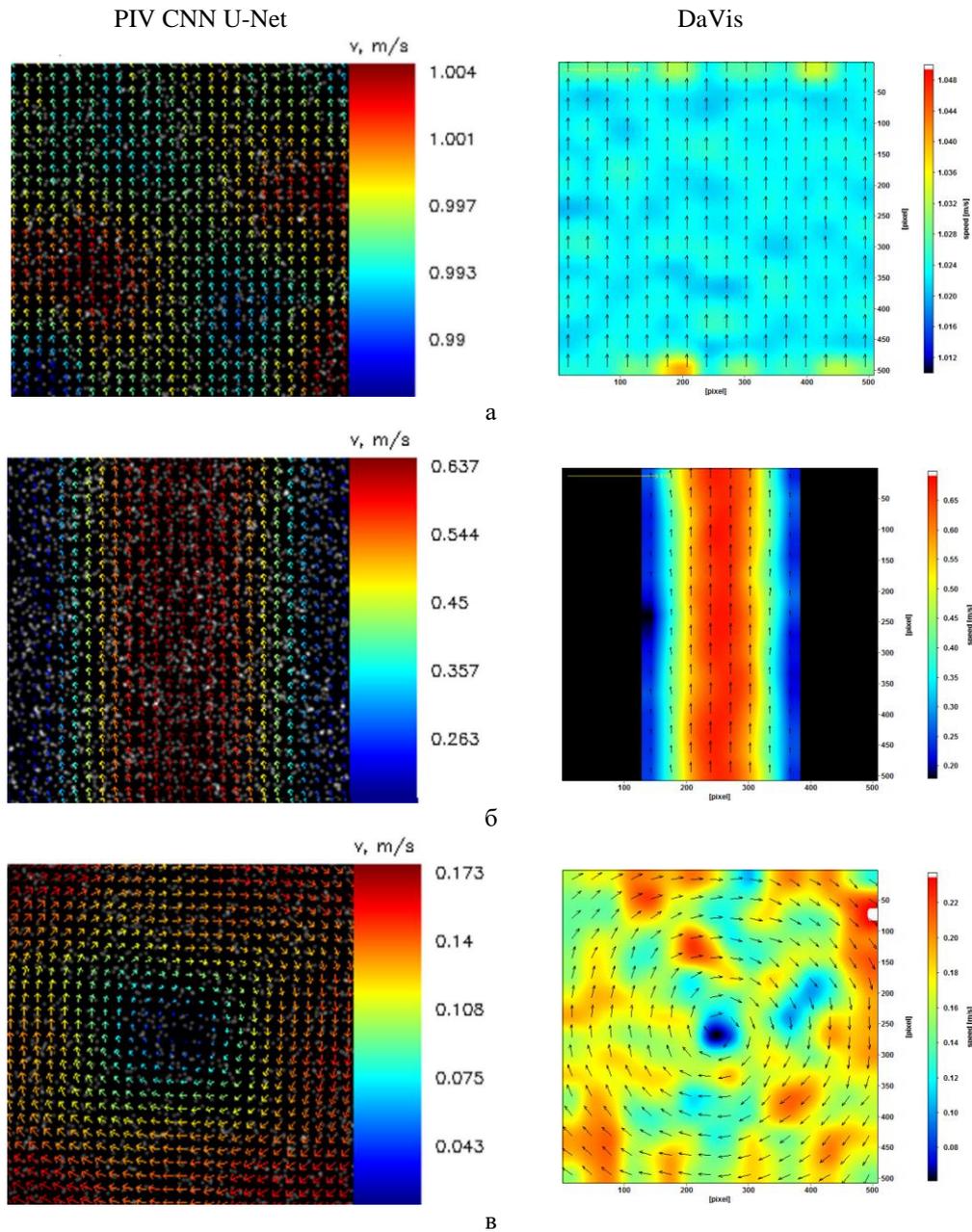


Рис. 4. Обработка экспериментальных PIV-изображений разновидных потоков:

а – ламинарный поток с постоянной скоростью; б – ламинарный поток с параболическим распределением скорости; в – вихревой поток

Также на рис. 5 представлены построенные векторные поля на основе ламинарного потока с постоянной скоростью 1 м/с при различных уровнях гауссова шума.

Из рис. 5 видно, что при увеличении уровня шума до 10% качество восстановления векторного поля снижается, так как в некоторых областях скорость потока имеет значение 0,9 м/с в отличие от эталонного 1 м/с, однако основные структуры потока сохраняются и могут быть корректно идентифицированы, но с увеличением шумов до 15% достоверность восстановленного векторного поля значительно падает: прогнозируемая скорость в различных точках потока лежит в диапазоне 0,7-0,8 м/с, что явно не соответствует эталонному значению

скорости. Тем не менее результаты обработки экспериментальных изображений показывают, что разработанная программа успешно справляется с построением векторных полей.

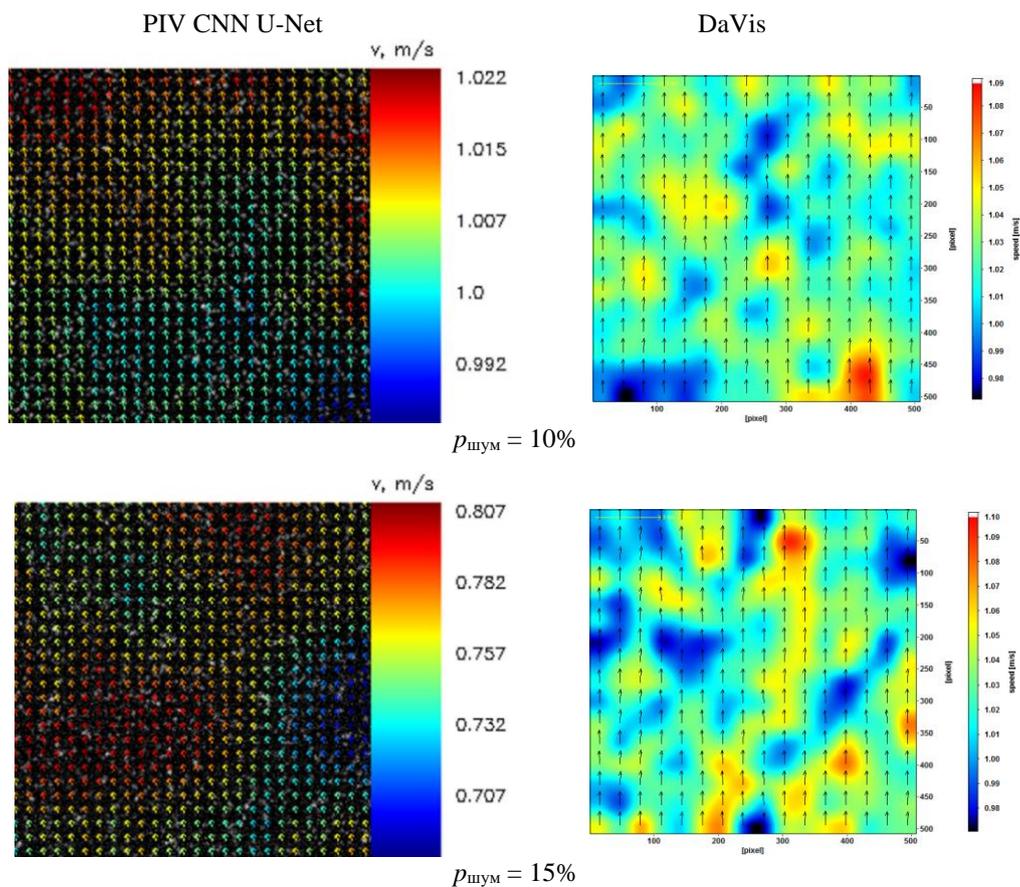


Рис. 5. Обработка экспериментальных PIV-изображений ламинарного потока с постоянной скоростью при разных уровнях гауссова шума

Для оценки качества работы разработанной программной реализации было проведено сравнение с DaVis (табл. 1). В качестве параметра сравнения использовалось среднеквадратичное отклонение (СКО) восстановленных векторных полей ламинарного потока с постоянной скоростью при различных уровнях шума.

Табл. 1. Сравнение максимального СКО при различных уровнях шума

Уровень гауссова шума	СКО, м/с	
	PIV CNN U-Net	DaVis
0%	0,0134	0,0237
5%	0,0277	0,0247
10%	0,0635	0,0285
15%	0,2159	0,0341

Как видно из табл. 1, DaVis демонстрирует более низкие значения СКО при наличии шума. Однако ключевым преимуществом разработанной программы является возможность разработки более бюджетного оптико-электронного комплекса, способного работать в режиме реального времени.

Одной из основных задач при разработке программной реализации для будущего оптико-электронного комплекса было обеспечение высокой скорости обработки данных для возможности работы в режиме реального времени. Максимальное значение временной

задержки при обработке одной пары изображений размером 256×256 пикселей составило, приблизительно, 110 мс на тестовой сборке, оснащенной GPU с следующими характеристиками: штатная частота 1720 МГц, видеопамять 16 Гб, пропускная способность 288 Гб/с – для сравнения у DaVis временная задержка составила 100 мс. Такая производительность позволяет обрабатывать до 10 кадров в секунду, что является достаточным для работы с потоками, достигающих максимальной скорости 50-75 мм/с, и дает возможность оперативно корректировать параметры экспериментальной установки в процессе исследования низкоскоростных потоков. Обработку изображений размером более 256×256 пикселей производить данным методом не представляется возможным в виду технических ограничений, связанных с обучением нейронной сети.

Программа предоставляет следующие функциональные возможности:

- загрузка и предварительная обработка PIV-изображений;
- автоматическое построение векторных полей скорости;
- визуализация результатов в различных форматах;
- экспорт данных для дальнейшего анализа;
- настройка параметров модели сверточной нейросети.

Существует альтернативное промышленное ПО под названием ActualFlow, разработанное отечественными разработчиками, однако получение доступа к нему крайне затруднительно. По этой причине дополнительной целью разработки программы для проведения измерений методом PIV, с настройкой различных параметров в режиме реального времени, является возможность дистрибуции и обеспечения свободного доступа к ней для среднестатистического пользователя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы было разработано программное обеспечение для автоматизированной обработки PIV-изображений с использованием сверточных нейронных сетей архитектуры U-Net. Проведенное тестирование на искусственных и экспериментальных данных подтвердило эффективность предложенного метода.

Сравнительный анализ с зарубежным промышленным ПО DaVis показал, что разработанный метод демонстрирует более высокие значения среднеквадратичного отклонения: при уровне шума 5% СКО составляет 0,0277 м/с по сравнению с 0,0247 м/с у DaVis, а при возрастании уровня шума до 15% – 0,2159 м/с против 0,0341 м/с соответственно. Тем не менее, ключевым преимуществом созданного решения является возможность реализации более бюджетного варианта, по сравнению с DaVis, оптико-электронного комплекса, функционирующего в режиме реального времени с временной задержкой 110 мс для пары изображений размером 256×256 пикселей. Данная производительность позволяет обрабатывать до 10 кадров в секунду, что является достаточным для оперативной корректировки параметров экспериментальной установки в процессе исследований потоков, достигающих скорости 50-75 мм/с.

Разработанный метод успешно справляется с построением достоверных векторных полей в режиме реального времени, аналогично DaVis, даже при наличии шумов на изображениях до 10% от полезного сигнала, что делает его применимым для широкого спектра практических задач, где требуется обработка PIV-данных с возможностью настройки параметров экспериментальной установки в режиме реального времени.

Дальнейшее развитие работы будет направлено на:

1. оптимизацию архитектуры нейронной сети для повышения точности восстановления векторных полей без существенного увеличения вычислительной сложности;
2. расширение функционала программы для работы с трехмерными модификациями PIV метода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Дегоян С.С., Софуев Д.В., Скорнякова Н.М.** Применение бесконтактного метода для исследования обтекания шероховатых поверхностей // Материалы V Отрасл. конф. по измерительной технике и метрологии для исследований летательных аппаратов, КИМИЛА 2023. Жуковский: Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского. 2023. С. 66-74.
2. **Павлов И.Н., Расковская И.Л., Юркевичюс С.П. и др.** Информационно-измерительные лазерные технологии диагностики оптически неоднородных жидких сред в условиях сильной рефракции // Инноватика и экспертиза: научные труды. 2023. № 1(35). С. 83-91.
3. **Pinchukov V.V., Poroykov A.Yu., Shmatko E.V. et. al.** Comparison of the neural networks with crosscorrelation algorithm for the displacements on images estimation // Wave Electronics and Its Application in Information and Telecommunication Systems. 2022. Vol. 5. № 1. Pp. 355-359.
4. **Тищенко В.А., Тищенко А.А., Грибин В.Г. и др.** Опыт применения систем лазерной диагностики при экспериментальном исследовании влажно-паровых потоков в проточной части турбомашин: основные результаты исследований, пути развития систем // Теплоэнергетика. 2024. № 5. С. 57-73.
5. **Lu W., Xiaoxian G.** Deep learning framework for velocity field reconstruction from low-cost particle image velocimetry measurements // Physics of Fluids. 2025. Vol. 37. № 1. P. 013629.
6. **Zhang W., Dong X., Sun Z., Xu S.** An unsupervised deep learning model for dense velocity field reconstruction in particle image velocimetry (PIV) measurements // Physics of Fluids. 2023. Vol. 35. № 7. P. 077108.

Netkachev V.V., Skorniyakova N.M.

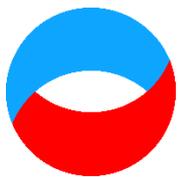
*National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: NetkachevVV@mpei.ru*

DEVELOPMENT OF A PROGRAM FOR AUTOMATION OF PIV IMAGE PROCESSING USING CNN U-NET ARCHITECTURE

ABSTRACT

This paper presents a developed program for automated processing of images obtained by Particle Image Velocimetry (PIV) using convolutional neural networks (CNN) of the U-Net architecture. The created technique provides effective construction of vector fields of flow velocity with the possibility of this operation in real time mode, the time delay of it was 100 ms, from which it was concluded in the ability of algorithms to process 10 frames per second, and in the possibility of promptly adjusting the parameters of the experimental setup in the process of research during operation. The deep learning capabilities used in the work were implemented, in order to preserve the accuracy and speed of PIV data analysis to develop a more budget-friendly version, compared to the international industrial DaVis software. The results of the work demonstrated the ability of the developed method based on the use of CNN of the U-Net architecture to plot reliable vector velocity fields at noise, which is less than 10% of the useful signal in the images. In the future, we plan to expand the functionality of the software to improve the quality of plotting the structure of the studied flows and for integration with other modifications of the PIV technique.

PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY, DIGITAL IMAGE PROCESSING, CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS, U-NET ARCHITECTURE



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 533.6.071.8, 536.2.

Карнозова Е.А.¹, Знаменская И.А.¹, Луцкий А.Е.², Сысоев Н.Н.¹

¹ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества «МГУ им. М.В. Ломоносова», Россия,*

119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, E-mail: znamen@phys.msu.ru

² *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, механико-математический факультет, кафедра вычислительной механики «МГУ им. М.В. Ломоносова», Россия,*

119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, E-mail: allutsky@yandex.ru

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ПРИ ИНИЦИИРОВАНИИ ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА

АННОТАЦИЯ

Целью данной работы является визуализация и исследование полей течения, возникающих при взаимодействии плазмы импульсного объемного разряда с высокоскоростным потоком в канале ударной трубы при наличии препятствия на стенке. Визуализация была выполнена с использованием методов инфракрасной термографии с высоким разрешением, высокоскоростной теневой съемки и интегральной регистрации плазменной конфигурации. Исследованы явления, связанные как с плазменными, так и с газодинамическими эффектами, реализующимися в специальном участке газодинамического канала с встроенной разрядной секцией. Были проанализированы пространственно-временные характеристики газодинамических, тепловых полей, а также диаграммы интенсивности инфракрасного излучения. Проведено моделирование нестационарного сложного течения и проведено сравнение с экспериментальными тепловизионными изображениями. Сравниваются два физических механизма визуализации полей, регистрируемых тепловизором в диапазоне 1,5-5,1 мкм. К таким механизмам относятся: излучение низкотемпературной плазмы из субмикросекундного локализованного объемного разряда и субмиллисекундное излучение от внутренних поверхностей стеклянных стенок, нагреваемых за счет теплопроводности на границе раздела с пограничным слоем газового потока.

УДАРНЫЕ ТРУБЫ, ИНФРАКРАСНАЯ ТЕРМОГРАФИЯ, НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ТЕПЛОВОЙ ПОТОК, ПЛАЗМА ИМПУЛЬСНОГО ОБЪЕМНОГО РАЗРЯДА

ВВЕДЕНИЕ

Исследование сложных нестационарных высокотемпературных течений возможно при комплексном использовании как панорамных, так и локальных методов диагностики с высоким временным и пространственным разрешением. Базовыми бесконтактными методами визуализации газодинамических процессов являлись методы, основанные на рефрактометрии (все разновидности теневых методов). В последние годы их возможности расширены за счет

высокоскоростной цифровой техники, а также доступности цифрового анализа больших массивов теневых изображений потоков [1].

Современные телевизоры, предназначенные для научных исследований, визуализируют тепловые поля на обтекаемых поверхностях, при этом регистрируются более медленные процессы: динамика нагрева и охлаждения инженерных устройств, элементов летательных аппаратов, теплообменников [2-4]. Ежегодно идет усовершенствование тепловизионной аппаратуры, расширение диапазона длин волн, сокращение времен интеграции, увеличение пространственного разрешения.

Для комплексного исследования трехмерных процессов взаимодействия сверхзвукового потока с импульсным объемным разрядом были использованы три панорамных метода: 1) регистрация свечения (разряд – видимый диапазон), 2) регистрация теплового излучения (разряд, газодинамический поток – инфракрасный диапазон) и 3) теневой метод с высокоскоростной регистрацией нестационарных процессов в быстропротекающем газодинамическом потоке.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Экспериментальное исследование взаимодействия ударно-волнового течения с импульсным объемным разрядом проводилось в канале разрядной камеры однодиафрагменной ударной трубы сечением 24×48 мм. В качестве рабочего газа, заполнявшего канал камеры низкого давления, использовался воздух при начальном давлении 20 ± 5 Торр, камера высокого давления заполнялась толкающим газом гелием. Разрыв диафрагмы приводил к формированию плоской ударной волны, движущейся по каналу того же прямоугольного сечения. Число Маха ударной волны варьировалось в диапазоне $M = 2-4$.

Комбинированный объемный разряд инициируется в два этапа. В начале в результате подачи рабочего напряжения (25 кВ) с конденсатора на медные электроды на верхней и нижней стенках рабочей камеры на расстоянии 24 мм друг от друга создаются два поверхностных разряда (плазменные листы), каждый из которых представляет собой набор параллельных плазменных каналов, достаточно равномерно распределенных по поверхности стенки. При инициировании в неподвижном воздухе размер каждого плазменного листа составляет 100×30 мм. Поверхностные разряды действуют как плазменные электроды для объемного разряда, предварительно ионизируя объем разрядного промежутка. Концентрация электронов, достаточная для формирования объемного разряда, достигается примерно через 50-70 нс после инициирования плазменных листов [5]. Полное время длительности тока разряда составляет порядка 300 нс.

Инициирование комбинированного объемного разряда в эксперименте синхронизировалось с сигналом пьезоэлектрического датчика давления в канале ударной трубы. Для инициирования разряда точно в момент, когда ударная волна достигает нужной в эксперименте точки в разрядном промежутке, на генераторе импульсов задается время задержки.

Боковые стенки рабочей камеры представляют собой оптические окна размером 170×24 мм, выполненные из кварцевого стекла толщиной 16 мм, прозрачного для видимого излучения и части инфракрасного спектра. Полоса пропускания оптических окон составляет 0,2-2,8 мкм, что дает возможность проводить регистрацию процессов, происходящих в потоке внутри рабочей камеры, с использованием высокоскоростной теневой и инфракрасной съемки, а также получать интегральные панорамные фотографии видимого свечения плазмы разряда. Хорошая повторяемость экспериментов позволяет установить соответствие между тепловыми полями на инфракрасных изображениях и структурами газодинамического потока, зарегистрированными методом теневой съемки. Каждая серия теневых и инфракрасных кадров включала опорный кадр (полученный до прихода ударной волны и до запуска разряда), который использовался в качестве фона для последующей обработки информативных экспериментальных изображений.

РЕГИСТРАЦИЯ СВЕЧЕНИЯ РАЗРЯДА (ВИДИМЫЙ ДИАПАЗОН)

Интегральное свечение плазмы объемного разряда при его инициировании в неподвижном воздухе при начальных давлениях, не превышающих 100-110 Торр, однородно во всем объеме разрядного промежутка. При инициировании разряда в момент прохождения ударной волны через разрядный промежуток картина свечения изменяется, наличие ударной волны в разрядном промежутке вызывает пространственное перераспределение плазмы разряда – наблюдается явление «самолокализации» плазмы (рис. 1). Объемный разряд локализуется в области с повышенной напряженностью приведенного электрического поля – в области с наименьшей плотностью газа, которая находится перед ударной волной. Таким образом, область свечения плазмы импульсного разряда ограничивается только областью низкого давления (и плотности), расположенной перед фронтом ударной волны и концом разрядного промежутка. Данное явление самолокализации разряда наблюдалось для всех положений ударной волны в разрядном промежутке в интервале $10 < x < 95$ мм.

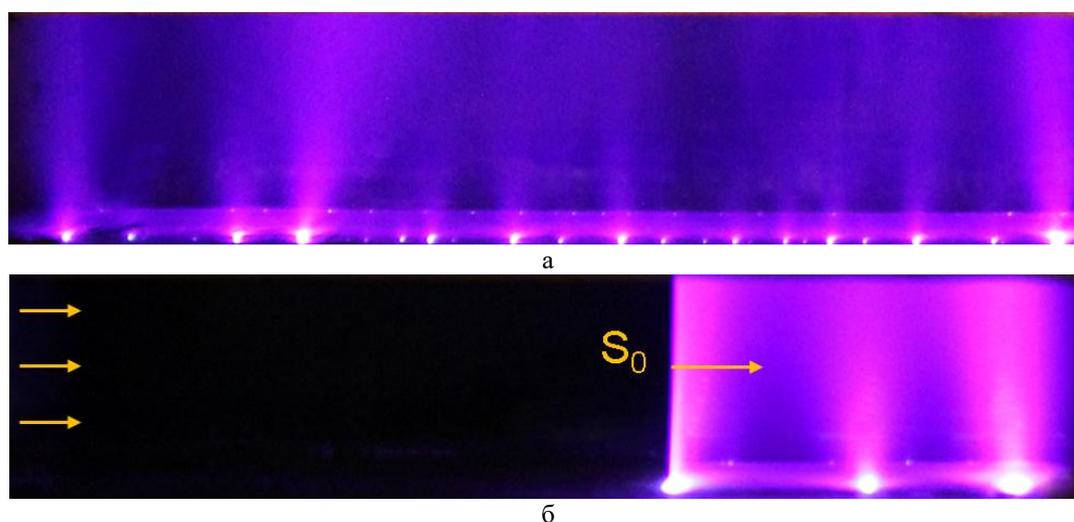


Рис. 1. Визуализация свечения плазмы в видимом диапазоне при инициировании разряда: а – в покоящемся воздухе, б – при наличие ударной волны S_0 в разрядном промежутке

ТЕНЕВАЯ ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Теневая съемка газодинамического потока ударно-волнового течения велась на основе лазерной теневой схемы в параллельных лучах высокоскоростной камерой Photron Fastcam SA5. Использовалась теневая схема со стационарным лазером в качестве источника (длина волны 532 нм). Оптический пучок теневого зондирования проходил перпендикулярно стеклам камеры в области ступенчатого препятствия. Оптимальная скорость съемки составляла 150 000 кадров в секунду с экспозицией 1 мкс. Для улучшения качества теневых изображений применялась программа обработки исходных изображений с вычитанием фонового кадра.

Численное моделирование рассматриваемого течения проводилось с использованием двумерных уравнений Навье-Стокса [6]. На стенках задавалось граничное условие отсутствия проскальзывания. На внешней границе задавалось условие нулевого градиента для всех функций. Основной целью данного моделирования был анализ движения и эволюции основных разрывов течения, а также влияния области энерговыделения. Все газодинамические процессы внутри ударной трубы моделировались с момента открытия диафрагмы. Начальные условия, включая значения давления и плотности, устанавливались в камере высокого давления ($-0,05 \text{ м} < x < 0,00 \text{ м}$), что способствовало формированию ударной волны, движущейся с числом Маха $M = 3,34$. В камере низкого давления ($0,00 \text{ м} < x < 0,34 \text{ м}$) плотность и давление задавались в соответствии с заданными экспериментальными условиями.

Теневая регистрация за 100 мкс фиксировала процесс взаимодействия ударной волны с вставкой, установление ее обтекания [7], проход дифрагировавшей волны по каналу и распад разрыва на ее фронте после инициирования разряда, локализованного перед ней. На рис. 2 представлены: результаты численного моделирования (градиент плотности, аналог теневого изображения) прохождения ударной волны с числом Маха $M = 3$ по каналу после дифракции на вставке в момент инициирования разряда; теневой снимок отражения ударной волны от препятствия, свечение локализованного разряда перед ударной волной. На рис. 2 также представлен результат трехмерного численного моделирования процесса (поле температур).

Эксперименты и расчеты показали, что нестационарное взаимодействие ударной волны со вставкой (и с пограничным слоем на стекле) занимает около 200 мкс.

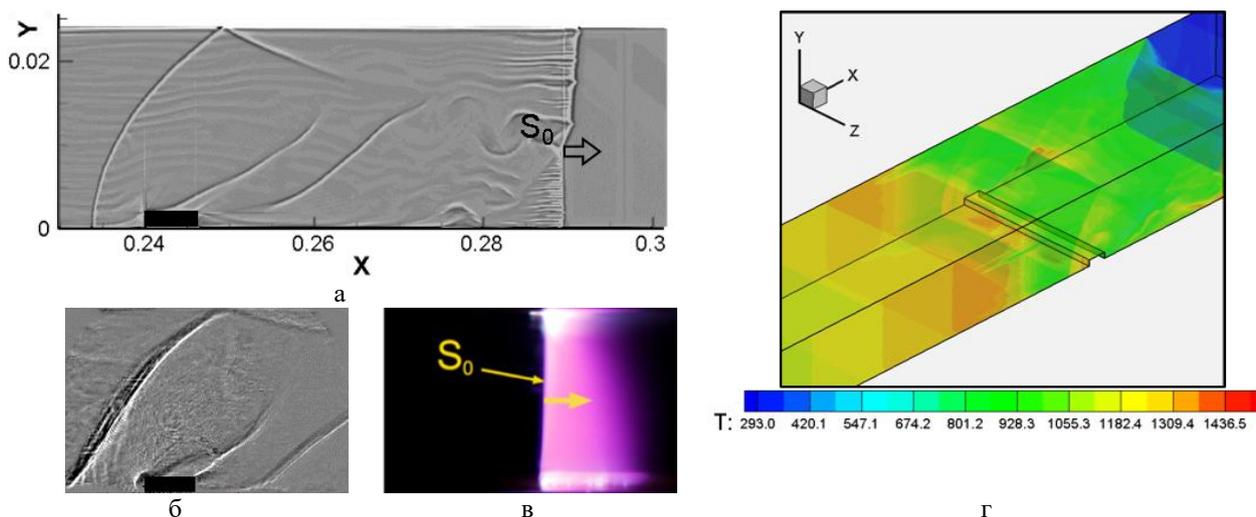


Рис. 2. Визуализация распространения падающей ударной волны S_0 в канале со вставкой:

а – численный расчет (поле второй производной плотности), б – теневая визуализация обтекания вставки, в – визуализация фронта ударной волны объемным разрядом, г – расчетное поле температур потока

На рис. 3 представлены последовательные кадры быстротекущего ударно-волнового процесса распада разрыва на фронте ударной волны после инициирования разряда.

На начальных кадрах теневой регистрации видно только падающую ударную волну S_0 , затем происходит инициирование разряда ($t = 0$ мкс), мгновенно реализуются условия для распада разрыва, в результате чего наблюдается изменение конфигурации течения – возникновение двух ударных волн S_1 и S_2 , контактной поверхности C , разделяющей газ и плазму разряда, а также взрывных волн от плазменных листов.

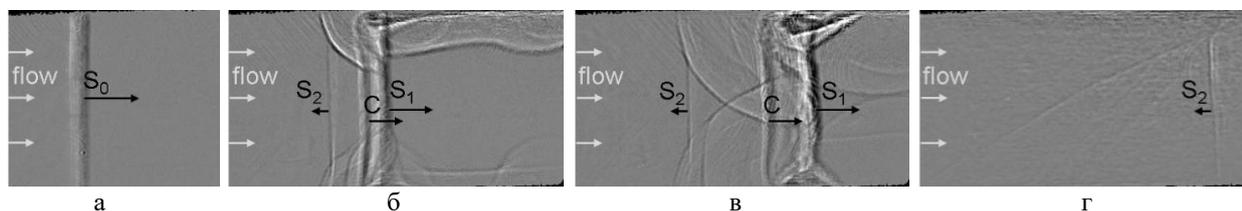


Рис. 3. Высокоскоростная теневая визуализация ударно-волнового течения:

а – падающая ударная волна, б – 5 мкс, в – 15 мкс, г – 145 мкс после инициирования разряда

ТЕПЛОВИЗИОННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ

Для панорамной регистрации тепловых полей, формирующихся в рабочей камере во время экспериментов, использовалась инфракрасная камера Telops FAST M200, работающая в диапазоне длин волн 1,5 – 5,1 мкм. Частота съемки изображений с разрешением 296×78 пикселей составляла 1000 Гц, времени экспозиции одного кадра – от 200 до 500 мкс. Тепловизор устанавливался напротив оптических окон рабочей камеры как перпендикулярно оси течения потока, так и под некоторыми углами, чтобы обеспечить съемку с нескольких

ракурсов. Расстояние между объективом тепловизора и передним оптическим окном составляло порядка 30 см. Таким образом, перед попаданием на детектор инфракрасное излучение, возникающее внутри рабочей камеры, проходило через боковое окно, атмосферу и систему линз тепловизора. При данной постановке эксперимента тепловое излучение, зафиксированное на инфракрасных изображениях, включает как излученные, так и отраженные тепловые потоки с учетом потери интенсивности при прохождении излучения через окна камеры и атмосферу [8]. Значения интенсивности инфракрасного излучения, приведенные ниже на обработанных термограммах, представлены в условных единицах.

На рис. 4 представлены два кадра инфракрасной съемки, фиксирующие тепловое излучение от плазменной области различной длины в первые 500 мкс (время экспозиции первого кадра). Разряд самолокализовался перед фронтом ударной волны с числом Маха $M = 2,4$ в момент ее нахождения в различных точках внутри разрядного промежутка.

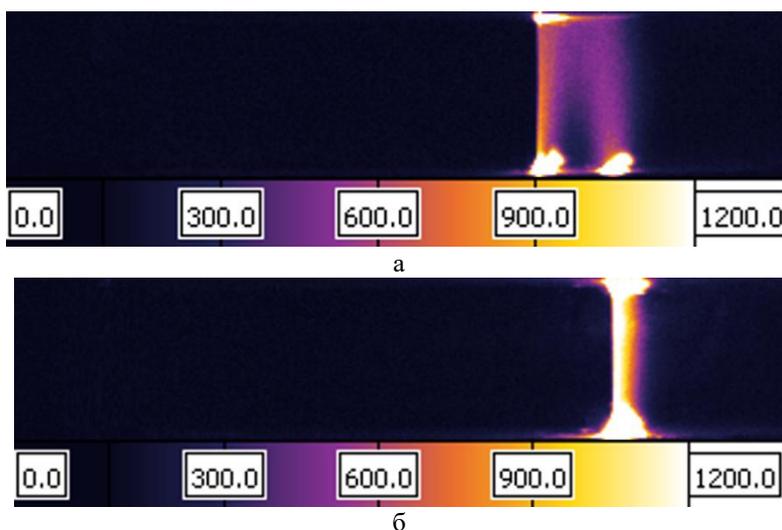


Рис. 4. Визуализация инфракрасного излучения при самолокализации плазмы разряда перед фронтом ударной волны, движущейся в плоском канале. Длина плазменной области составляет: а – 16 мм, б – 5 мм

В экспериментах, проведенных в канале с вставкой на нижней стенке, разряд инициировался после прохождения ударной волны S_0 через препятствие, когда ее фронт снова становился практически плоским. В этом случае, конфигурация распада разрыва оставалась такой же, что и в канале без вставки.

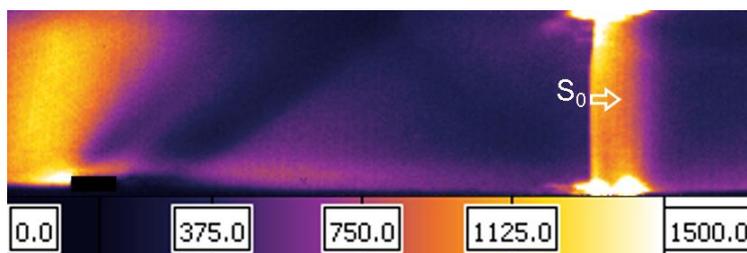


Рис. 5. Визуализация инфракрасного излучения при инициировании плазмы разряда перед фронтом движущейся по каналу со вставкой ударной волны S_0 с числом Маха $M = 3,3$

Наличие вставки изменяет термографическую картину течения в канале, фиксируются тепловые поля от двух источников с различными физическими механизмами преобразования энергии в инфракрасное излучение (рис. 5). К этим механизмам относятся: излучение низкотемпературной плазмы локализованного перед плоской ударной волной объемного разряда (субмикросекундной длительности) и излучение внутренних поверхностей боковых стенок (кварцевых окон) и препятствия, нагретых за счет теплопроводности при контакте с пограничным слоем газового потока [9]. При съемке тепловизором через кварцевые стенки во время разряда может быть обнаружено и зафиксировано излучение в диапазоне 1,5-2,8 мкм.

Поскольку в окружающем воздухе присутствует определенная концентрация молекул водяного пара (влажность в лаборатории зафиксирована на уровне 62%), углекислого газа и других примесей, тепловизор фиксирует излучение этих многоатомных молекул.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании комплекса данных панорамной съемки сложного быстропротекающего процесса, включающего взаимодействие плазмы импульсного объемного разряда с высокоскоростным потоком в канале ударной трубы при наличии препятствия, проведено сравнение различных механизмов формирования тепловых полей, одновременно зарегистрированных в течение первых 200-500 мкс. К таким механизмам относятся: излучение низкотемпературной плазмы из субмикросекундного локализованного объемного разряда и субмиллисекундное излучение от внутренних поверхностей стеклянных стенок, нагреваемых за счет теплопроводности на границе раздела с пограничным слоем газового потока.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 23-19-00096.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Popovich S.S., Zditovets A.G., Kiselev N.A., Vinogradov U.A.** Experimental study of aerodynamic heating in the region of an incident shock wave boundary layer interaction // *Acta Astronautica*. 2025. V. 229. Pp. 804-813.
2. **Вавилов В.П.** Инфракрасная термография и тепловой контроль. Изд. 2-е, испр. и доп. М.: Наука, 2013. 544 с.
3. **Петров О. Ф.** Диагностика жидкостных и кристаллических структур в сильнонеидеальной пылевой плазме // *Автометрия*. 2000. № 5. С. 74-83.
4. **Carlomagno G.M., Cardone G.** Infrared thermography for convective heat transfer measurements // *Experiments in Fluids*. 2010. Vol. 49. № 6. Pp. 1187-1218.
5. **Znamenskaya I.A., Koroteev D.A., Popov N.A.** A nanosecond high-current discharge in a supersonic gas flow // *High Temperature*. 2005. Vol. 43. № 6. Pp. 817-824.
6. **Lutsky A.E., Kudryashov I.Y., Khankhasaeva Y.V.** Numerical simulation of the influence of energy deposition on the base flow // *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2016. Vol. 8. Pp. 207-218.
7. **Знаменская И.А., Муратов М.И., Карнозова Е.А., Луцкий А.Е.** Термографическая визуализация в высокоскоростных газодинамических потоках // Труды 17 Международной научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков» (ОМИП 2023). 2023. С. 138-146.
8. **Znamenskaya I.A., Karnozova E.A., Kuli-zade T.A.** The discharge heated channel region visualization based on thermal imaging registration // *Scientific Visualization*. 2022. Vol. 14. № 4. Pp. 52-61.
9. **Karnozova E., Znamenskaya I., Doroshchenko I., Sysoev N., Lutsky A.** Energy conversions at shock wave interaction with pulse discharge in profiled channel // *Physics of Fluids*. 2024. Vol. 36. № 12. P. 126120.

Karnozova E.A.¹, Znamenskaya I.A.¹, Lutsky A.E.², Sysoev N.N.¹

¹ *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Russia, 119991, Moscow, 1-2 Leninskie Gory, E-mail: znamen@phys.msu.ru*

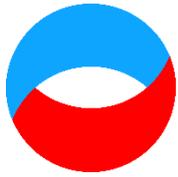
² *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Mechanics and Mathematics, Russia, 119991, Moscow, 1 Leninskie Gory, E-mail: allutsky@yandex.ru*

THERMOGRAPHIC VISUALISATION IN HIGH SPEED GAS FLOWS

ABSTRACT

The aim of this work is to visualize and study the flow fields arising from the interaction of pulsed volume discharge plasma with a high-speed flow in a shock tube channel in the presence of an obstacle on the wall. Visualization was performed using 1. high-resolution infrared thermography methods 2. high-speed shadow shooting, 3. integral registration of the plasma configuration. Phenomena associated with both plasma and gas-dynamic effects realized in a special section of a gas-dynamic channel with a built-in discharge section were investigated. The spatiotemporal characteristics of gas-dynamic and thermal fields, as well as infrared radiation intensity diagrams, were analyzed. A numerical simulation of an unsteady complex flow was carried out and a comparison was made with experimental thermal imaging images. Two physical mechanisms for visualizing fields recorded by a thermal imager in the range of 1,5 – 5,1 μm are compared. Such mechanisms include: low-temperature plasma radiation from a submicrosecond localized volume discharge and submillisecond radiation from the internal surfaces of glass walls heated by thermal conduction at the interface with the boundary layer of the gas flow.

SHOCK WAVES, INFRARED THERMOGRAPHY, UNSTEADY HEAT FLUXES



*Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.*

УДК 544.45

Козлов В.В.

*Институт теоретической и прикладной механики СО РАН им. С.А. Христиановича, Россия,
630090, Новосибирск, Институтская ул., 4/1, E-mail: kozlov@itam.nsc.ru*

**ЛАМИНАРНО ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПЕРЕХОД И РЕЖИМЫ ГОРЕНИЯ МИКРОСТРУЙ
ВОДОРОДА**

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты, выполненных в последние годы экспериментальных исследований диффузионного горения микроструй водорода. Изучены особенности структуры течения водорода и его горения в зависимости от формы сопла, скорости истечения струи и гравитации и влияние периодического воздействия на микроструи, в данном случае, внешними акустическими колебаниями.

ДИФФУЗИОННОЕ ГОРЕНИЕ, КРУГЛАЯ И ПЛОСКАЯ МИКРОСТРУЯ ВОДОРОДА, “ОБЛАСТЬ ПЕРЕТЯЖКИ ПЛАМЕНИ”, ПРОФИЛЬ СКОРОСТИ, НАЧАЛЬНЫЕ И ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при выработке энергии в основном используются ископаемые углеводороды. Поэтому представляет интерес исследование горения струйных течений водорода, возникающих при использовании различного рода форсунок, горелок и сопел. В настоящей работе рассматриваются результаты исследований горения микроструй водорода. В частности, результаты экспериментов показали, что разрушение круглой струи и ее переход в турбулентный режим существенно зависят от начального профиля скорости на срезе сопла. Результаты исследований струйного горения в различных условиях (форма сопла, начальное распределение скорости, внешние воздействия на горение струи) представлены в работах [1-3].

Также представляет интерес исследование перспективных методов управления струйными течениями. Одним из этих методов является периодическое возбуждение струи внешними акустическими колебаниями. Такой подход к модификации режима горения был использован, например, в работах [4, 5]. Указанные выше и другие экспериментальные данные о горении водорода в крупномасштабных струйных течениях являются основой для экспериментального изучения динамики, неустойчивости течения и горения водорода в малых масштабах (микроструй).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперименты проводились на струйной установке Института теоретической и прикладной механики (ИТПМ) СО РАН с использованием круглых или щелевых сопел различного поперечного сечения на срезе. На рис. 1 приведена общая экспериментальная схема, которая варьировалась в зависимости от цели исследования. Водород в установку

подавался из баллона через редуктор, расход газа контролировался с помощью расходомера. Минимальная неоднородность струйного течения и его фоновых возмущений достигалась с помощью хонейкомба и детурбулизирующих сеток, расположенных перед соплом (на рис. 1 представлена схема для щелевого сопла переменного сечения). Для изучения влияния внешнего периодического воздействия на развитие и горение микроструи она возбуждалась акустическими колебаниями, которые генерировались динамическим громкоговорителем, расположенным вблизи среза сопла.

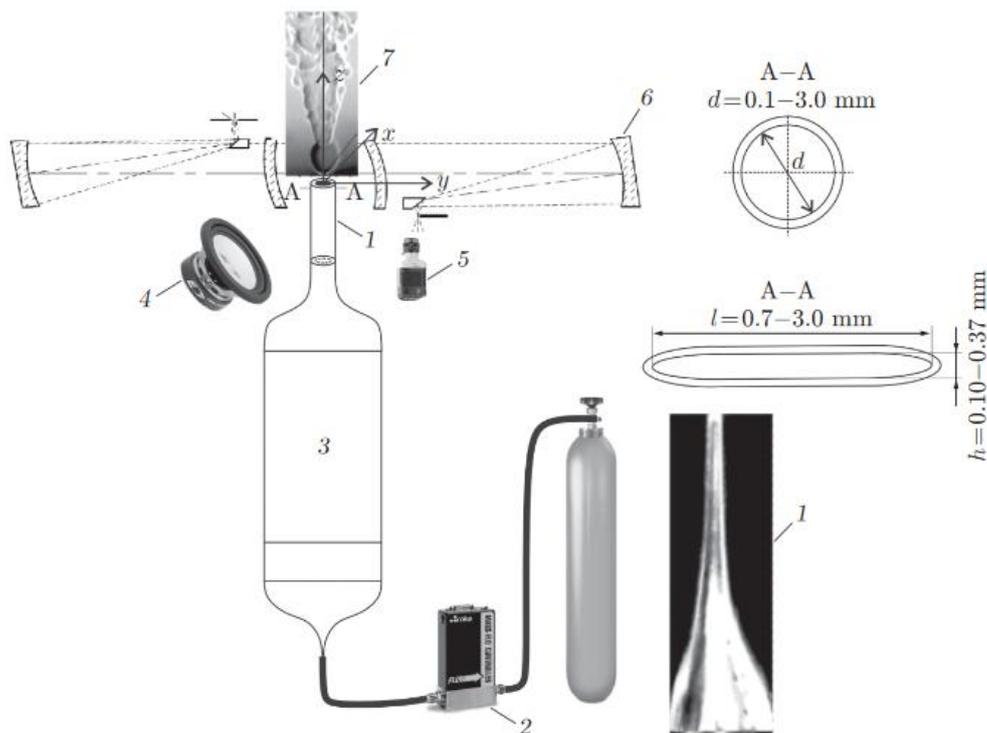


Рис. 1. Схема установки для исследования горения микроструи водорода: 1 – форма сопла, 2 – регулятор расхода, 3 – форкамера, 4 – громкоговоритель, 5 – камера, 6 – теневой прибор ИАБ-451, 7 – микроструя

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Представленные в настоящей работе экспериментальные данные о диффузионном горении микроструи водорода получены, как правило, с использованием метода Теллера (рис. 2) и путем регистрации теневой картины на видеокамеру.

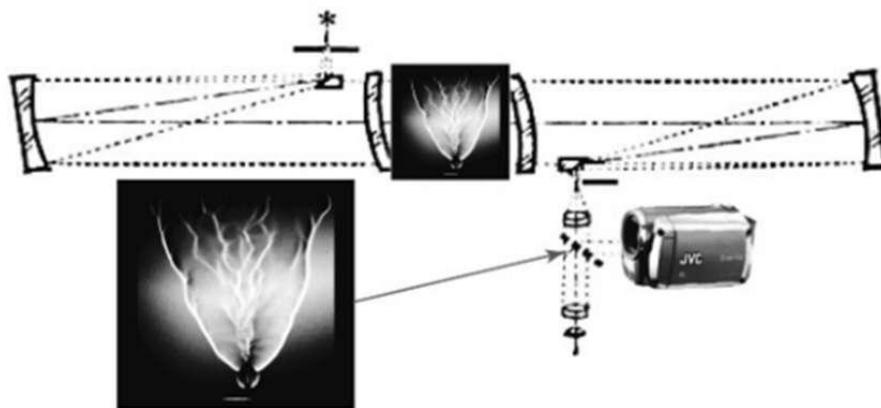


Рис. 2. Схематическое изображение теневого устройства Теллера ИАБ-451 и теневая картина горения водорода в плоской микроструе

В докладе приведены следующие результаты:

Структура пламени при диффузионном горении микроструй водорода

В результате экспериментальных исследований получены четыре сценария диффузионного горения плоской микроструи водорода, включая горение при наличии сверхзвуковых ячеек, как по воздуху, так и по водороду (рис. 3) и явление гистерезиса (рис. 4).

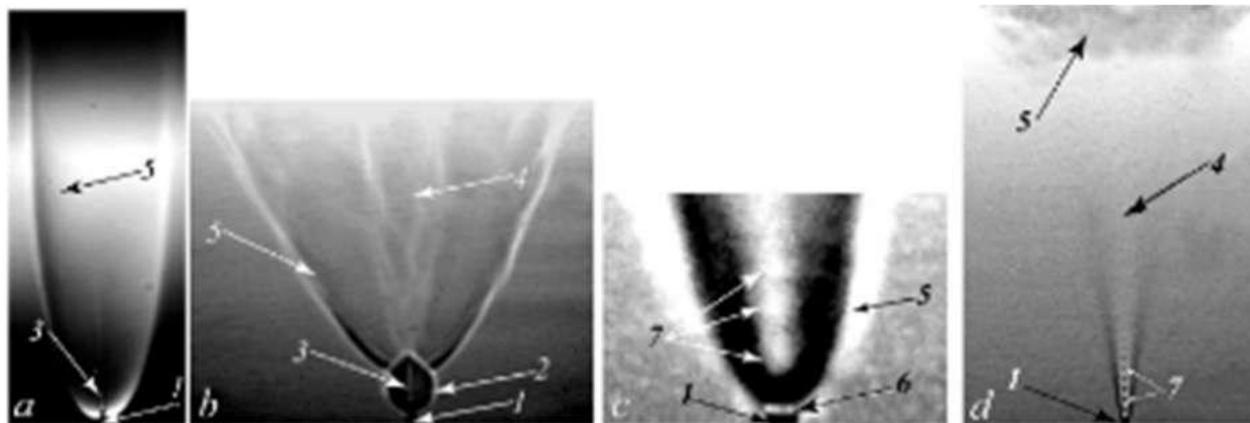


Рис. 3. Четыре сценария диффузионного горения плоской водородной микроструи при изменении ее скорости: $U_0 \leq 150$ м/с (а), $U_0 = 150$ м/с (б), $U_0 = 330$ м/с (с) и $U_0 = 1280$ м/с (д); 1 – микросопло, 2 – «узкая область пламени», 3 – ламинарная микроструя, 4 – турбулентная микроструя, 5 – пламя, 6 – поднятое пламя, 7 – сверхзвуковые ячейки

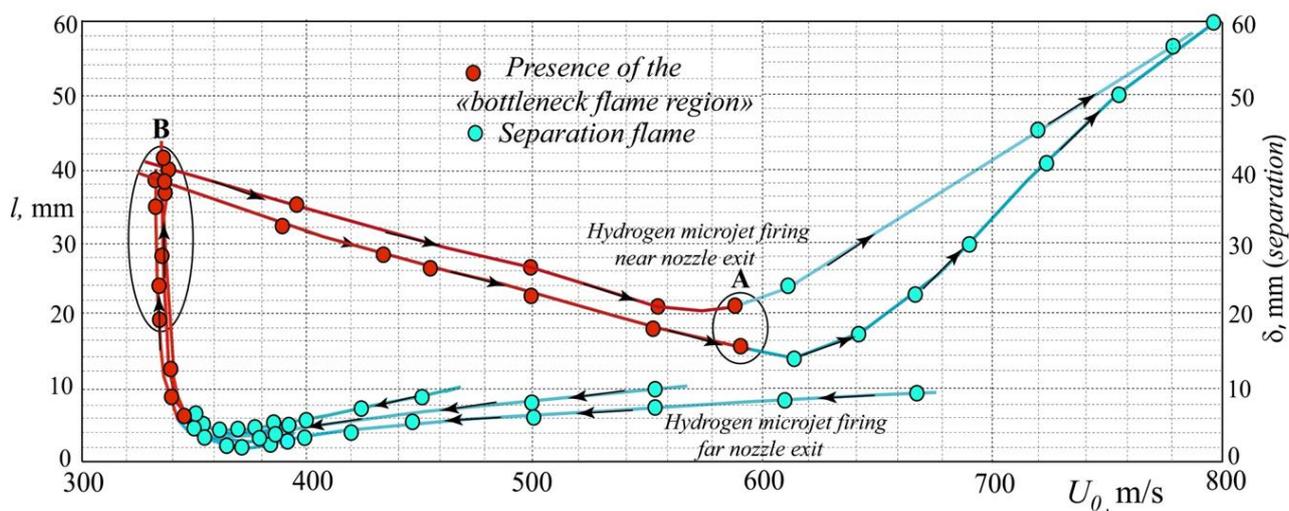


Рис. 4. График (гистерезис) зависимости пламени развитие водородной микроструи в зависимости от ее скорости истечения и способ воспламенения (вблизи/вдали от среза сопла, диапазон скоростей (А) исчезновения сужения пламени область и начало отделения пламени и внешний вид (Б) области сужения пламени. Стрелки указывают направление изменений в микроструе

Для (для этого размера сопла) при скоростях истечения водорода менее 150 м/с первого режима (сценария) истечения водорода было дополнительно найдено влияние акустического поля на структуру плоской струи. Измерения в этом случае были проведены с использованием тепловизора, показывающего топологию пламени. (рис. 5).

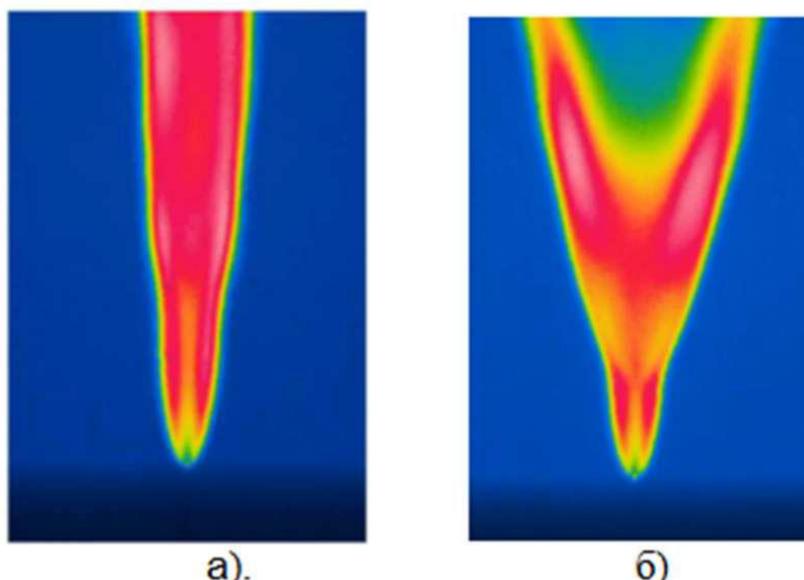


Рис. 5. Влияние акустического поля на форму пламени при скоростях истечения водорода менее 150 м/с (а) без акустического поля, (б) с наложенным акустическим полем (амплитуда 95 дБ, $f=5500$ Гц) (вид на узкую грань)

Для сравнения, в рамках этого исследования, был рассмотрен случай микросопла с размерами в шесть раз меньшими (0,400 на 0,07 мм²). На рис. 6 приведены снимки, полученные с использованием тепловизора, пламени такой струи (вид на узкую грань). Как показали исследования в диапазоне скоростей 320-390 м/с, также наблюдается гистерезис в зависимости от способа поджигания микроструи (вблизи или вдали от среза сопла) и направления изменения скорости ее истечения (роста или уменьшения). Отметим, что сценарии диффузионного горения для этого случая, были практически другими и повторяли сценарии для круглого микросопла диаметром $30 \cdot 10^{-6}$ м (см. работу [4]).

Констатируем, что при наложении акустического поля, эффект расщепления или влияния отсутствовал во всем диапазоне истечения (акустическое поле в диапазоне от 10 Гц до 20 КГц.). Результаты сравнения показывают с одной стороны на возможность применимости тепловизора (мы видим нагретое сопло и топологию пламени) с другой стороны на необходимость, в дальнейшем, подробных исследований этих случаев.

Влияние ориентации струи в гравитационном поле на ее диффузионное горение [7]

Цель работы заключалась в экспериментальном исследовании особенностей диффузионного горения круглой микроструи водорода в зависимости от пространственной ориентации выходного сопла. Обнаружено, (см. рис. 7) что при диффузионном горении водорода в круглой микроструе в условиях направленности вектора скорости истечения струи обратно и перпендикулярно вектору земной гравитации (g) основные характеристики развития пламени в зависимости от скорости истечения струи практически совпадают. К этим характеристикам относятся диапазоны наличия области «перетяжки» пламени, отрыва пламени при наличии области «перетяжки» пламени, наличия области «перетяжки» пламени, но отсутствия горения турбулентной струи и момент прекращения горения микроструи. Напротив, в ситуации диффузионного горения водорода в круглой микроструе при направлении вектора скорости истечения струи, совпадающего с направлением вектора земной гравитации (g), основные характеристики развития пламени в зависимости от скорости истечения струи резко отличаются от двух предыдущих случаев. Сокращается диапазон существования области «перетяжки» пламени, отрыв пламени происходит в отсутствие области «перетяжки» пламени и момент прекращения горения микроструи наступает при значительно большей скорости ее истечения.

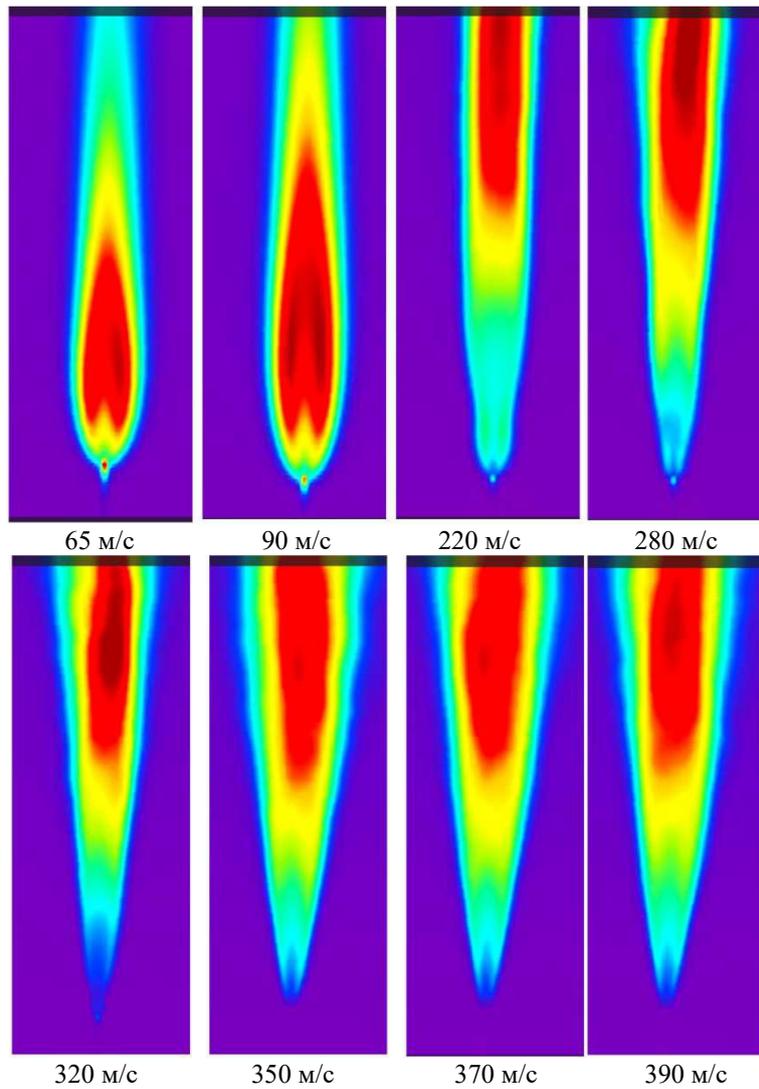


Рис. 6. Визуализация горения водорода с помощью тепловизора СЕМ DT-9897Н для различных скоростей потока водорода

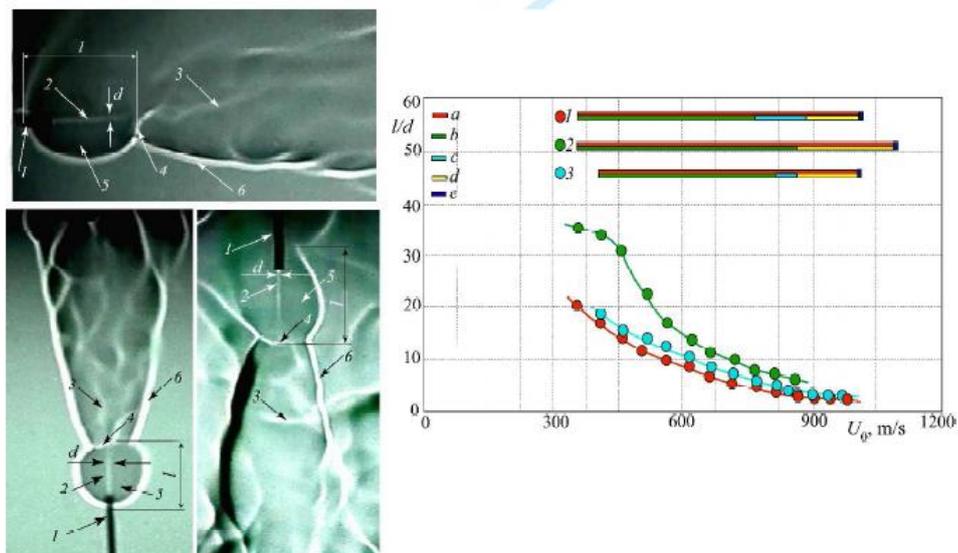


Рис. 7. Теневые картины области «перетяжки» пламени (слева): 1 – сопло; 2 – ламинарная струя водорода; 3 – турбулентная струя водорода; 4 – фронт горения водорода в сферической области с резким изменением плотности; 5 – сферическая область горения водорода в ближнем поле; 6 – пламя горения турбулентной струи водорода. Графики зависимостей размера области «перетяжки» пламени при диффузионном горении микроструи водорода (сопло: $d = 0,5$ мм) от направления и скорости ее истечения (справа)

Зависимость диффузионного горения микроструи водорода от способа ее воспламенения

В работе [8] представлен сценарий дозвукового диффузионного горения круглой микроструи водорода при ее зажигании вдали от среза сопла. Обнаружена стабилизация процесса диффузионного горения микроструи водорода при ее зажигании вдали от среза сопла по причине отсутствия связи между пламенем и выходным микросоплом, т.е. отсутствием нагрева последнего. Показано (см. рис. 8), что отсутствие нагрева микросопла по причине приподнятости пламени приводит к реализации механизма горения микроструи водорода, характеризуемого исчезновением «области перетяжки пламени», отрывом пламени.

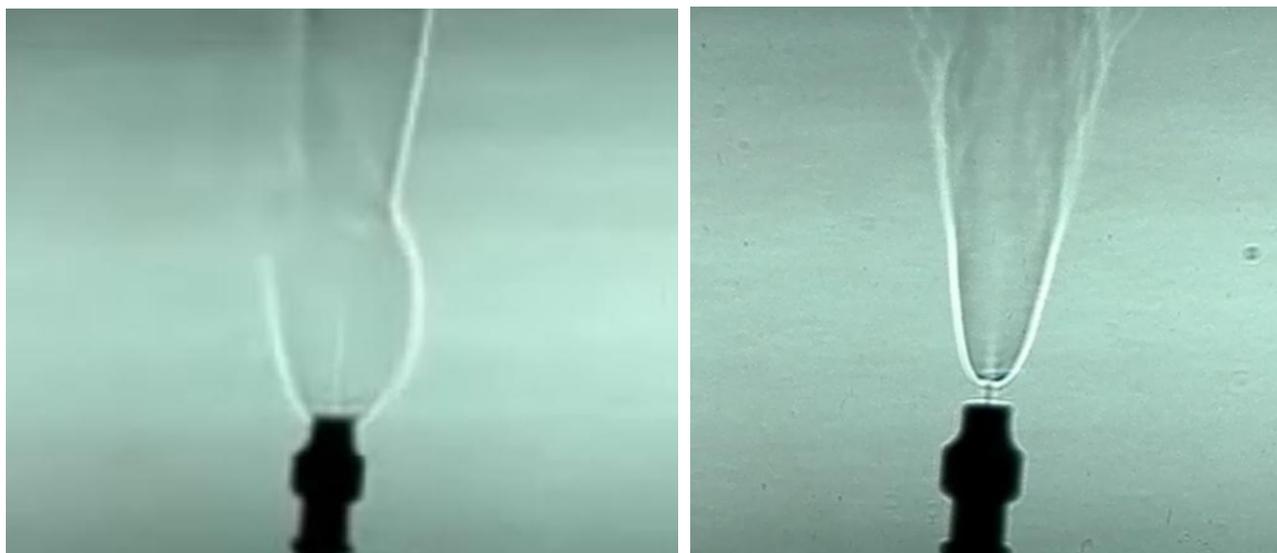


Рис. 8. а). Поджигание со стороны сопла б). Поджигание вдали от сопла.

Особенности горения водорода в спутной струе

В данной части работы экспериментально исследуется диффузионное горение микроструи водорода, истекающей из соплового аппарата, обеспечивающего одновременную подачу воздуха из соосно расположенного кольцевого сопла таким образом, что потоки смешиваются только на выходе из соплового аппарата (см. рис. 9). Приведено описание экспериментальной установки, изложены результаты проведенного экспериментального исследования.

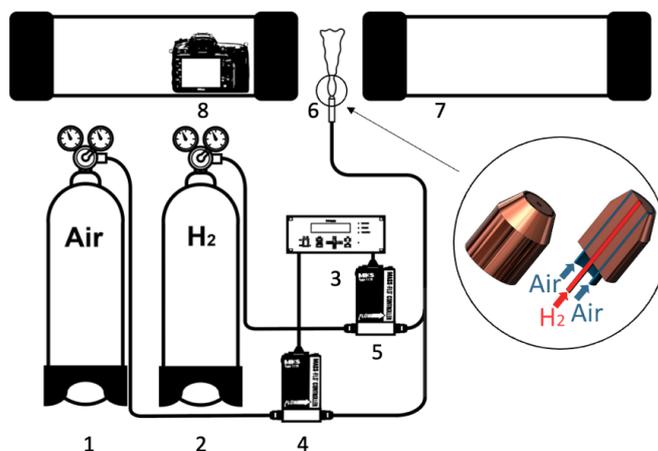


Рис. 9. Схема эксперимента: 1 – баллон со сжатым водородом, 2 – баллон со сжатым воздухом, 3 – контроллер расходомера, 4, 5 – клапаны расходомера, 6 – сопловое устройство, 7 – теневой прибор ИАБ – 451, 8 – цифровая камера

В зависимости от скорости истечения водорода (рис. 10) можно условно выделить следующие этапы горения спутной струи водорода при наличии в центре сверхзвуковой струи воздуха:

- 1) При малой скорости истечения водорода и поджигании вблизи сопла горение «запирается» в конусе. Наблюдается горение вблизи среза сопла, факел имеет конусовидную форму, при этом сверхзвуковая струя воздуха приниживает этот факел и выходит через вершину конуса, выбрасывая смесь воздуха и водорода, в которой горение отсутствует;
- 2) При увеличении скорости истечения водорода, происходит распространение пламени вниз по струе, образуются локальные области горения, генерирующие акустический шум, конусовидная область трансформируется в полусферу;
- 3) Происходит стабильное турбулентное горение с генерацией акустического шума. Вблизи среза сопла наблюдаются области ламинарного течения, окружающие сверхзвуковую струю воздуха;
- 4) При дальнейшем увеличении скорости истечения область турбулентного горения смещается ближе к срезу сопла, ламинарный факел исчезает.

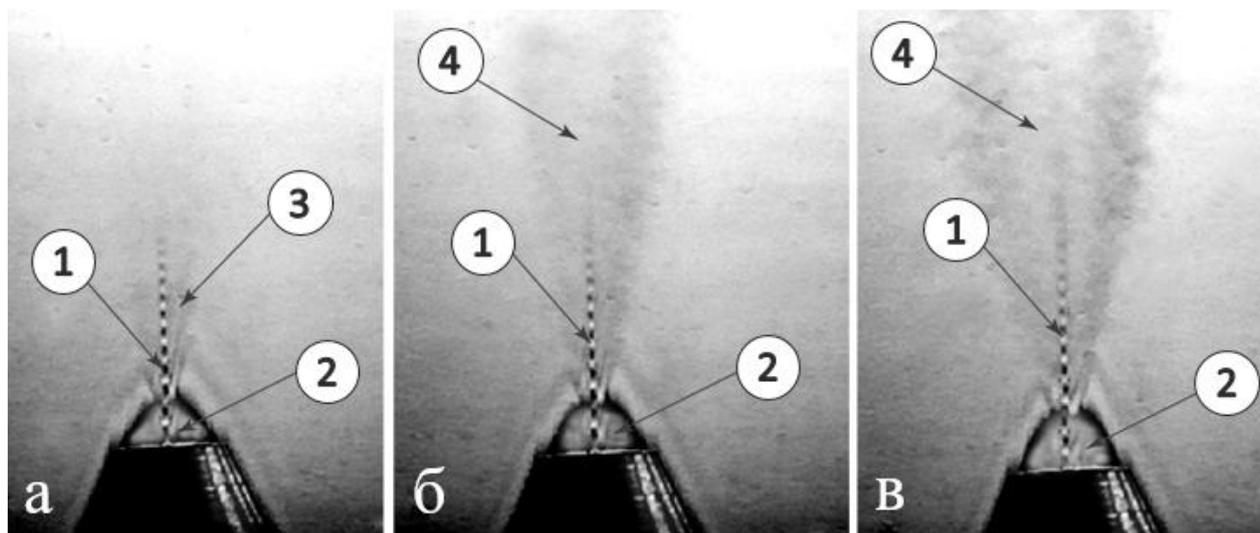


Рис. 10. Теневые картины горячей струи водорода, истекающей из кольцевой щели при различных скоростях, при наличии центральной сверхзвуковой струи воздуха $U_1=398\text{ м/с}$: а) $U_2=7,5\text{ м/с}$, б) $U_2=14\text{ м/с}$, в) $U=17\text{ м/с}$; 1 – сверхзвуковые ячейки на круглой микроструе воздуха, 2 – область «запертого» пламени, 3 – выход водорода из области 2 без горения, 4 – локальное воспламенение, неустойчивое горение

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог, этой части проведенных исследований, необходимо констатировать тот факт, что экспериментально обнаружено новое физическое явление микроструйного диффузионного горения водорода с нагревом сопла, обеспечивающие стабилизацию горения вплоть до трансзвуковых скоростей истечения водорода. Обнаруженный режим, может быть использован, для различных технологических целей, таких как организация эффективного перемешивания различных потоков и их подогрев. В таком режиме сгорает только небольшая часть водорода, а остальная смешивается с продуктами горения и воздухом, в результате чего температура такой смеси может варьироваться (путем подбора скорости потока и диаметра сопла) от близкой к начальной до температуры самовоспламенения водорода. Кроме того, такая система может служить своеобразным реактором для осуществления, например, в мягких и контролируемых условиях различных термолитических реакций, таких как синтез наночастиц металлов и оксидов металлов из летучих металлсодержащих прекурсоров, обработка углеводородного сырья и др. Также такие системы могут быть использованы для организации эффективного смешения топлива с воздухом и подогрева такой смеси для летательных аппаратов и др. горелочных устройств.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТПМ СО РАН (№ гос. регистрации: 124021400038-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шмаков А.Г., Грек Г.Р., Козлов В.В., Коробейничев О.П., Литвиненко Ю.А.** Различные режимы диффузионного горения круглой струи водорода в воздухе // Вестн. НГУ. Серия: Физика. 2015. Т. 10. № 2. С. 27-41.
2. **Литвиненко Ю.А., Грек Г.Р., Козлов В.В., Коробейничев О.П., Шмаков А.Г.** Структура присоединенного диффузионного пламени микроструи водорода, истекающей из щелевого сопла // Вестн. НГУ. Серия: Физика. 2015. Т. 10. № 2. С. 52-66.
3. **Грек Г.Р., Катасонов М.М., Козлов Г.В., Литвиненко М.В.** Диффузионное горение водорода (круглое скошенное сопло) // Вестн. НГУ. Серия: Физика. 2015. Т. 10. № 2. С. 42-51.
4. **Kozlov V.V., Grek G.R., Korobeinichev O.P., Litvinenko Yu.A., Shmakov A.G.** Combustion of a high-velocity hydrogen microjet effluxing in air // Doklady Physics. 2016. Vol. 61. № 9. Pp. 457-462.
5. **Шмаков А.Г., Грек Г.Р., Козлов В.В., Козлов Г.В., Литвиненко Ю.А.** Экспериментальное исследование диффузионного горения высокоскоростной круглой микроструи водорода. Часть 1. Присоединенное пламя, дозвуковое течение // Сибирский физический журнал. 2017. Т. 12. № 2. С. 28-45.
6. **Kozlov V.V., Grek G.R., Kozlov G.V., Litvinenko Yu.A., Shmakov A.G.** Experimental study on diffusion combustion of high-speed hydrogen round microjets // International Journal of Hydrogen Energy. 2019. Vol. 44. № 1. Pp. 457-468.
7. **Грек Г.Р., Козлов В.В., Коробейничев О.П., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г.** Особенности диффузионного горения микроструи водорода при различной пространственной ориентации отверстия выходного сопла // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2015. Т. 10. № 4. С. 60-76.
8. **Козлов В.В., Грек Г.Р., Козлов Г.В., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г.** Экспериментальное исследование диффузионного горения круглой микроструи водорода при ее зажигании вдали от среза сопла // Сибирский физический журнал. 2017. Т. 12. № 3. С. 60-71.

Kozlov V.V.

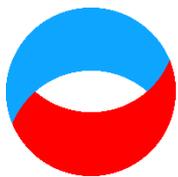
*Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Russia,
630090, Novosibirsk, Institutskaya st., 4/1, E-mail: kozlov@itam.nsc.ru*

LAMINAR-TURBULENT TRANSITION AND REGIMES OF COMBUSTION OF HYDROGEN MICROJETS

ABSTRACT

Results of experimental studies of diffusion combustion of hydrogen microjets performed in recent years are presented. Specific features of the hydrogen flow structure and hydrogen combustion are studied for various shapes of the nozzle, jet exhaustion velocity, and gravitation. Hydrogen combustion in mixtures with other gases and periodic actions on microjets (in the case considered, by external acoustic disturbances, is also considered

DIFFUSION COMBUSTION, ROUND AND PLANE HYDROGEN MICROJET, BOTTLENECK-FLAME REGION, MEAN VELOCITY PROFILE, INITIAL AND BOUNDARY CONDITIONS



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 621.039.516: 532.574.7

Вдовин М.И., Краев И.М., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И.

*Институт прикладной физики РАН, Россия,
603950, Нижний Новгород, Ульянова ул. 46, E-mail: sergeev4758@gmail.com*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ ВЛИЯНИЯ ПЕННОГО ПОКРОВА
НА ПРОЦЕССЫ ОБМЕНА В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ
ВОЗДУШНОГО ПОТОКА НАД ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ**

АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты экспериментального исследования влияния пенного покрова на обмен импульсом и теплом в пограничном слое атмосферы над взволнованной морской поверхностью. Данные были получены с использованием специальной системы искусственной пеногенерации и теневого метода для контроля характеристик пенного покрова в рамках лабораторного моделирования на Ветроволновом Термостратифицированном бассейне (ВВТСБ) ИПФ РАН. Теневой метод визуализации был реализован при съемке поверхности сверху с подсветкой из-под воды и последующей специальной обработкой изображений. Сопоставление зависимостей коэффициентов обмена от скорости ветра и аналогичной зависимости площади покрытия продемонстрировало, что увеличение пенного покрова при фиксированной скорости ветра приводит к интенсификации обменных процессов в рассматриваемом диапазоне скоростей.

**ПЕНА, ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ВИЗУАЛИЗАЦИЯ, ТЕНЕВОЙ МЕТОД,
ОБМЕН ИМПУЛЬСОМ, ТЕПЛООБМЕН**

ВВЕДЕНИЕ

Пена практически всегда присутствует на морской поверхности, за исключением только очень слабого волнения и ветра. По своим характеристикам она сильно отличается как от воды, так и воздуха, что обуславливает ее особую роль в процессах обмена между атмосферой и морской поверхностью. Неслучайно именно характеристики пенного покрова используются для оценки интенсивности ветро-волновой обстановки по знаменитой шкале Бофорта. Основным механизмом образования пены являются сильные обрушения волн (англоязычный термин *macrobreaking*). Они приводят к интенсивному вовлечению воздуха, образованию подводных пузырьков и их взбиванию в пену. Также пена образуется за счет крупномасштабных приповерхностных течений, например циркуляции Ленгмюра. За счет комбинирования различных факторов относительная площадь покрытия пены резко возрастает при ураганных ветрах (более 30 м/с), и превышает 70% (см. результаты натурных измерений в работе [1]). Результаты [1] позволили в [2] выдвинуть гипотезу о том, что увеличение пенного покрова может быть основным фактором, определяющим эффект снижения аэродинамического сопротивления взволнованной поверхности при ураганных ветрах. Не менее важным, и в тоже время мало изученным, является вопрос о влиянии пены на теплообмен. Если с потоками брызг вопрос более-менее ясен, т.е. они способствуют интенсификации теплообмена, то с пеной не все так просто. С одной стороны пена

существенно увеличивает площадь межфазного контакта, а с другой может выступать своего рода теплоизолятором в пограничном слое между водой и воздухом. Также пена обладает важнейшим влиянием на альбедо морской поверхности. Обладая существенно более сильной отражающей способностью, подобно ледовому покрову она может препятствовать нагреву водной толщи.

В работе [2] на основе результатов [1] была предложена количественная модель описания вклада пены в обмен импульсом, в которой параметр аэродинамической шероховатости покрытой пеной определялся через распределение по размерам пузырьков. Однако подобные данные, полученные в натуральных условиях, характеризуются большим разбросом, что затрудняет их использование при разработке теоретических моделей. В работе [3] исследование влияния пены на обмен импульсом впервые выполнялось в рамках лабораторного моделирования на ветро-волновом канале. В этой работе была использована специальная система искусственного пенообразования. Поэтому наряду с уже имевшимися возможностями измерения характеристик воздушного потока и волнения появилась необходимость контроля характеристик пены (относительной площади покрытия и распределения по размерам пузырьков). Настоящая работа посвящена решению нескольких проблем. Во-первых, разработке оптических методов для количественной оценки характеристик пенного покрова, основанных на визуализации теньевым методом. Во-вторых, проведение с использованием разработанных методов лабораторных экспериментов, нацеленных на исследование влияния пены на обмен импульсом теплом.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты по изучению влияния пены на обменные процессы в рамках лабораторного моделирования проводились на ВВТСБ ИПФ РАН. Общая схема проведения экспериментов представлена на рис. 1а. Для создания устойчивого пенного покрова на поверхности воды использовалось специально разработанное устройство (пеногенератор). Устройство состоит из двух диффузоров (трубок длиной 35 см диаметра 1 см с боковыми отверстиями диаметром 2 мм с шагом 7 мм), соединенных боковыми поверхностями друг с другом, обернутых в поролон. Устройство располагалось горизонтально, перпендикулярно каналу, с заглублением верхней части на 2,5 см. Расстояние от начала канала (входа воздушного потока) – 1,2 м. Через один из диффузоров под давлением высоты уровня 1,5 м поступает раствор пенообразующего вещества (основной компонент лаурилсульфат натрия), через второй диффузор подается сжатый воздух (1,5 атм) для продавливания раствора пенообразующего вещества через слой поролона. В результате на поверхности воды образуется мелкодисперсная пена. В ходе экспериментов уровень раствора вещества и давления сжатого воздуха поддерживались постоянными, что обеспечивало постоянный расход пены. Специальная серия измерений, направленных на оценку влияния пеногенератора на поверхностное волнение в случае, когда в систему подается только сжатый воздух, показала, что изменения параметров поверхностного волнения по сравнению с полностью отключенной системой пеногенерации незначительны.

Измерения были выполнены при шести разных значениях расхода воздушного потока, которые определялись частотой вращения вентилятора с увеличением скорости на оси канала от 8,6 до 21,3 м/с.

Для изучения процессов теплообмена между средами необходимо было проводить исследования в условиях разницы температур между ними. В естественных условиях лабораторного помещения лаборатории разница температур не превышала 3-4 градусов. При такой незначительной разнице температур измерения характеристик теплообмена характеризуются большими погрешностями. В связи с этим было принято решение дополнительно нагревать воздух, поступающий в вентилятор, поддерживая разность с водой порядка 15 °С (по аналогии с работой [4]).

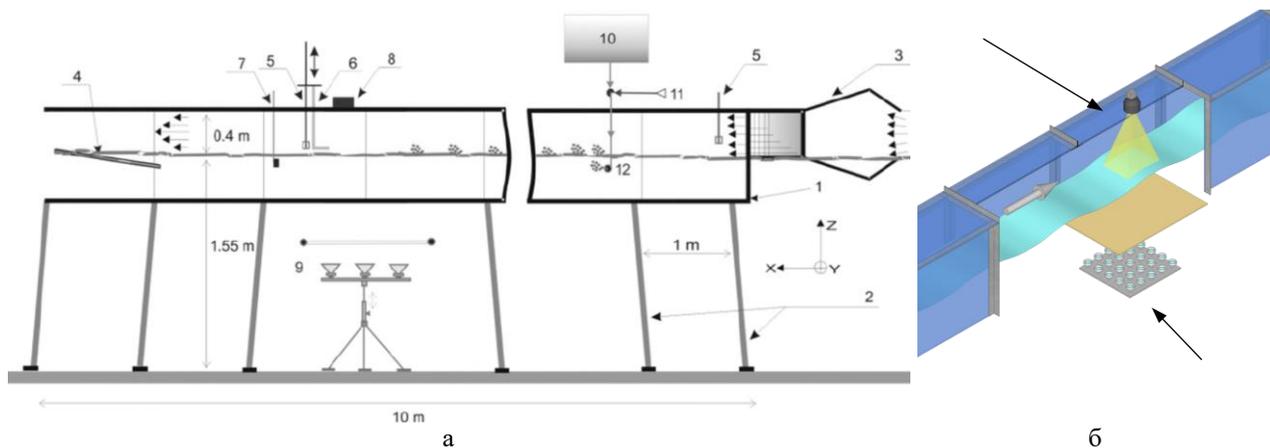


Рис. 1. а – общая схема экспериментов, б – 3D схема применения теневого метода. Обозначения: 1 – корпус канала ВВТСБ, 2 – стойки канала, 3 – расширяюще – сужающая секция, 4 – волногаситель, 5 – термоанемометр, 6 – трубка Пито на сканирующем устройстве, 7 – датчик температуры, 8 – камера Cygnet для съемки вида сверху, 9 – подводный светильник с рассеивающим экраном, 10 – бак с пенным раствором, 11 – подача сжатого воздуха, 12 – устройство пеногенерации

Измерения характеристик воздушного потока параметров волнения и пены выполнялись на расстоянии 6,5 м от входа в канал (см. рис 1а). Средние профили скорости и температуры воздушного потока измеряются трубками Пито и термоанемометрами, на сканирующих устройствах. Параметры волнения контролировались с помощью системы струнных волнографов. Также измерялась температура воды в непосредственной близости к поверхности. Для измерения характеристик пенного покрова использовалась специальная оптическая система, подробное описание которой приведено в следующем пункте.

ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕНЕВОГО МЕТОДА

Для визуализации пены на поверхности воды использовался теневой метод, общая схема применения показана на рис. 1б. Под рабочей секцией канала на глубине 37 см установлен матовый экран, который подсвечивается снизу массивом из 25 (5×5) белых светодиодных светильников мощностью 10 Вт каждый. Вид сверху на водную поверхность с пенным покрытием снимался светочувствительной камерой Raptor Photonics Cygnet, с выдержкой 50 мкс, чтобы получить не смазанное изображение. Размер области съемки 23×12, масштаб 113 мкм/пиксель, средняя частота кадров 12 к/с, 3000 кадров в каждой записи для каждого режима ветра.

Полученные цифровые изображения проходили обработку с помощью специально разработанных алгоритмов, реализованных в виде программных кодов для автоматизации процессов обработки.

Обработка включала в себя несколько этапов. Вычитание фона, в качестве которого использовалось изображение без ветра и пеногенерации; бинаризация с фиксированным порогом; морфологическое открытие структурным элементом "диск" размером 1 px; морфологическое закрытие "диск" размером 21 пиксель; проводилась заполнение замкнутых регионов на изображении, не пересекавшихся с границами изображений. При обработке были использованы алгоритмы с использованием результатов, представленных в [5]. Результаты последовательной обработки изображений представлены на рис. 2.

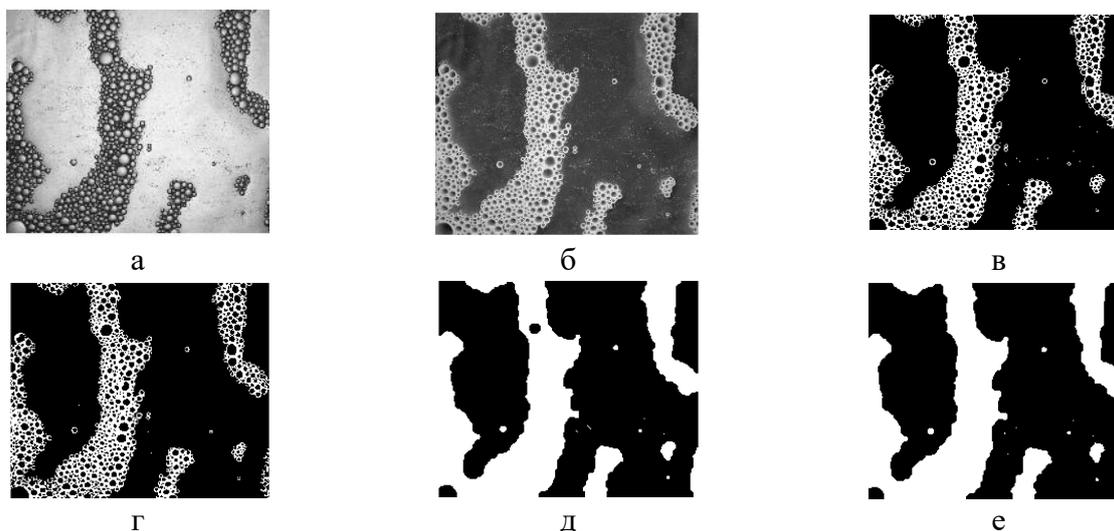


Рис. 2. а – исходное изображение, б – после вычитания фона, в – после бинаризации с фиксированным порогом, г – результат морфологического открытия структурным элементом "диск" размером 1 пиксель, д – результат морфологического закрытия "диск" размером 21 пиксель, е – после заполнения замкнутых регионов на изображении пены

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

С использованием метода профилирования, по аналогии с работой [6], по измеренным профилям скорости были восстановлены значения эквивалентной скорости ветра U_{10} при пересчете на высоту 10 м, коэффициент аэродинамического сопротивления C_D , и коэффициент обмена теплом C_H . Полученные значения коэффициентов обмена импульсом и теплом хорошо согласуются с ранее полученными результатами в исследованиях, как обмена импульсом (см. [3, 7]) так и теплом (см. [7, 8]), для аналогичного диапазона скоростей ветра. На построенных зависимостях коэффициентов обмена (см. рис. 3а-б) видно, что до скоростей U_{10} порядка 25 м/с добавление пены приводит к интенсификации обмена как импульсом, так и теплом. При более высоких скоростях ветра отличие коэффициентов обмена в случае чистой воды и при добавлении пены находится в пределах доверительных интервалов. Эти результаты были сопоставлены с зависимостью относительной площади поверхности занятой пенным покрытием от U_{10} , показанной на рис. 3в, которая была получена по данным оптических измерений. Видно, что при дополнительном использовании пеногенератора, несмотря на достаточно сильные осцилляции, можно сказать, что площадь покрова меняется слабо. В свою очередь для чистой воды, поведение аналогичной зависимости можно объяснить тем, что при ветрах около 25 м/с начинается интенсивное обрушение волн с вовлечением воздуха и образованием подводных пузырьков, которые всплывая создают естественный пенный покров. Этот покров быстро увеличивается с ростом скорости ветра и становится сопоставимым (учитывая доверительный интервал) значений при дополнительном использовании пеногенератора.

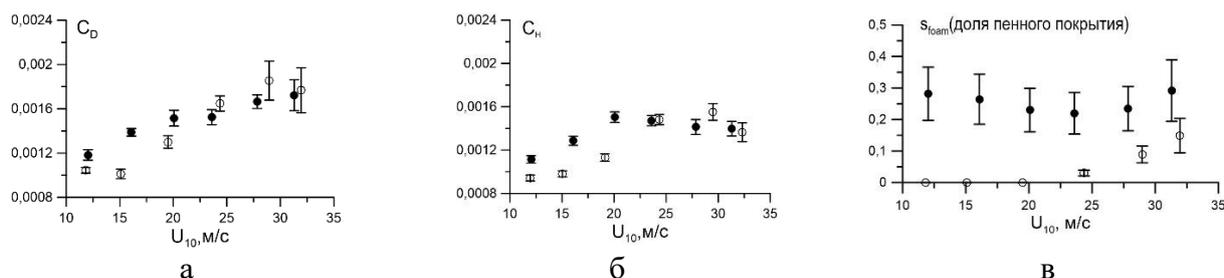


Рис. 3. Зависимости от скорости ветра U_{10} , а – коэффициента обмена импульсом, б – коэффициента обмена теплом, в – относительной площади поверхности занятой пенным покрытием (открытые символы – чистая вода, сплошные – с дополнительной пеной)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках лабораторного моделирования взаимодействия атмосферы и океана на ВВТСБ ИПФ РАН выполнено исследование влияния пенного покрова на характеристики турбулентного пограничного слоя воздушного потока над взволнованной поверхностью воды с использованием теневого метода визуализации. Наряду с изменением скорости воздушного потока, параметры покрова можно было варьировать с помощью системой искусственной пеногенерации. Полученные зависимости коэффициентов обмена импульсом и теплом от скорости ветра были сопоставлены с аналогичной зависимостью относительной площади покрова. Анализ позволяет утверждать, что увеличение пенного покрова, за счет искусственного пеногенератора, приводит к усилению обмена импульсом и теплом, при условии, что уровень пенного покрова превышает естественный, за счет обрушения волн.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-77-10060, <https://rscf.ru/project/23-77-10060/>. Эксперименты выполнены с использованием оборудования Уникальной научной установки «Комплекс крупномасштабных геофизических стендов» ИПФ РАН (<http://www.ckp-rf.ru/usu/77738/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Holthuijsen L.H., Powell M.D., Pietrzak J.D.** Wind and waves in extreme hurricanes // J. Geophys. Res. 2012. Vol. 117. P. C09003.
2. **Golbraikh E., Shtemler Y.M.** Foam input into the drag coefficient in hurricane conditions // Dyn. Atmos. Oceans. 2019. Vol. 73. Pp. 1-9.
3. **Troitskaya Yu, Sergeev D., Kandaurov A., Vdovin M., Zilitinkevich S.** The effect of foam on waves and the aerodynamic roughness of the water surface at high winds // J. Physical. Ocean. 2019. Vol. 49. Pp. 959-981.
4. **Troitskaya Y. Sergeev D., Vdovin M., Kandaurov A., Ermakova O., Takagaki N.** A laboratory study of the effect of surface waves on heat and momentum transfer at high wind speeds. // J. Geophys. Res. Oceans. 2020. Vol. 125. P. e2020JC016276.
5. **Davies E.R.** Machine vision: theory, algorithms, practicalities. Chapter 10. 3rd Edition. Morgan Kauffman Publishers, 2005. 968 p.
6. **Troitskaya Yu.I., Ezhova E.V., Sergeev D.A., Kandaurov A. A., Baidakov G. A., Vdovin M. I., Zilitinkevich S.S.** Momentum and buoyancy exchange in turbulent boundary layer over wavy water surface. Part 2. Wind-wave spectra // Nonlin. Proc. in Geoph. 2013. Vol. 20. Pp. 841-856.
7. **Komori S., Iwano K., Takagaki N., Onishi R., Kurose R., Takahashi K., Suzuki N.** Laboratory measurements of heat transfer and drag coefficients at extremely high wind speeds // J. Phys. Ocean. 2018. Vol. 48. № 4. Pp. 959-974.
8. **Jeong D., Haus B. K., & Donelan M. A.** Enthalpy transfer across the air-water interface in high winds including spray // J. Atmosph. Scien. 2012. Vol. 69. № 9. Pp. 2733-2748.

Vdovin M.I., Kraev I.M., Sergeev D.A., Troitskaya Yu.I.

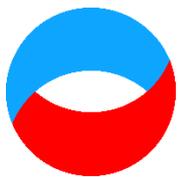
*Institute of applied physics RAS, Russia,
603950, Nizhny Novgorod, Uliyanova st, 46, E-mail: sergeev4758@gmail.com*

**STUDY OF THE INFLUENCE OF FOAM COVER ON EXCHANGE PROCESSES IN THE
TURBULENT BOUNDARY LAYER OF AIR FLOW OVER A WATER SURFACE USING
OPTICAL METHODS**

ABSTRACT

The paper presents the results of an experimental study of the effect of foam cover on the momentum and heat transfer in the atmospheric boundary layer above a rough surface. The data were obtained using a special artificial foam generation system and an optical method for monitoring the characteristics of the cover within the framework of laboratory modeling at the Thermostratified Wind-Wave Tank (TSWiWaT) of the IAP RAS. The method is based on filming the water surface from above and visualizing it using a shadow method with illumination from under the water, followed by special image processing. Comparison of the dependences of exchange coefficients on wind speed and a similar dependence of the coverage area demonstrated that an increase in foam cover at a fixed wind speed rate to an intensification of exchange processes in the range of low and moderate speeds.

**FOAM, LABORATORY MODELING, VISUALIZATION, SHADOW METHOD, MOMENTUM
AND HEAT TRANSFER**



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 532.525.2

Литвиненко Ю.А., Козлов В.В., Литвиненко М.В.

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Россия,
630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1, E-mail: litur@itam.nsc.ru*

СТАЛКИВАЮЩИЕСЯ ЛАМИНАРНЫЕ МИКРОСТРУИ

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты исследований процесса формирования струи при взаимодействии двух соударяющихся осесимметричных ламинарных воздушных микроструй. Оси симметрии трубок лежат в одной плоскости и пересекаются под углом 60° . Расстояние между ближними концами трубок 4 мм. Истечение осуществлялось с равными скоростями. В результате эксперимента выявлены особенности формирования вторичной струи при естественных условиях и при воздействии внешнего периодического возмущения. Установлено, что результирующая струя формируется в ортогональной к трубкам плоскости. При естественных условиях вторичная струя формируется с большим более 115° углом раствора и представляет собой уплощенную струю. В случае внешнего воздействия периодическим акустическим сигналом после взаимодействия микроструй возникает незначительное уплощение с развитием вторичных колебаний в ортогональной плоскости с последующим поворотом к плоскости расположения трубок.

ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие струй различных масштабов и скоростей широко используется в производственных процессах, технике и технологиях. В частности, струи используются для управления теплообменом и смешиванием реагентов, подводом горючих газов в горелки и реакторы, снижения шума сопел и т.д. Развитие методов исследований и технологий производства приводит к активному освоению наукоемких процессов связанных с микромасштабами. Микротечения нашли свое применение в различных областях от производства микроэлектроники до теплообменных процессов. Например, жидкостные микрореакторы используют сталкивающиеся микроструи для формирования пелены, в которой происходит быстрое смешение и контакт компонентов с образованием продуктов реакции [1]. Столкновение газовых микроструй при определенных условиях также протекает с образованием области уплощения (пелены), которая в значительной мере определяет характер развития течения. Использование таких струй в процессах смешения и горения представляет большой интерес в связи с интенсификацией и стабилизацией процессов диффузионного горения, как было показано в [2]. Вышеупомянутая область представляет собой квазиплоскую вторичную струю большого удлинения. Создание такой струи напрямую из плоского сопла значительно увеличивает размеры генерирующей установки, а также снижает возможности по управлению структурой струи. Активное манипулирование струями имеет потенциал для достижения более гибких и значительных модификаций потока. Это большое преимущество перед пассивными, хотя зачастую и эффективными методами.

В качестве управляющего воздействия в данных исследованиях использовались внешние периодические акустические колебания. Механизм акустического управления развитием

струйного течения достаточно широко использовался и ранее. Было предложено и исследовано множество активных методов, включая акустическое возбуждение [3-5], синтетические струйные приводы [6], сочетание осевого и окружного возбуждения на выходе из сопла для создания раздвоенных и расширяющихся струй [7]. В данных же исследованиях акустическое воздействие осуществляется на сами сталкивающиеся микроструи. Предполагается, что воздействие на частоте собственных колебаний приведет к трансформации структуры течения в области взаимодействия струй.

Развитие струйных течений связано с возникновением различных типов гидродинамической неустойчивости. Струи, сформированные в каналах малого удлинения, способствуют развитию в них неустойчивости Кельвина-Гельмгольца варикозного или синусоидального типа с ранней турбулизацией. Для струй, сформированных каналами с большим удлинением, такая неустойчивость не реализуется, и струя имеет протяженный ламинарный участок [8]. Данные особенности проявляются и при реализации соударяющихся струй.

Целью данной работы являлось определение основных характеристик течения в области взаимодействия двух сталкивающихся ламинарных микроструй, истекающих в затопленное воздушное пространство при естественных условиях и при воздействии внешнего периодического акустического сигнала.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА

Все экспериментальные исследования проводились в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН на струйной установке. Установка состояла из двух идентичных цилиндрических трубок длиной 40 мм и внутренним диаметром 0,6 мм, расположенных под углом 60° между осями симметрии сопел. Расстояние между срезами сопел 4 мм. Схема установки представлена на рис. 1.

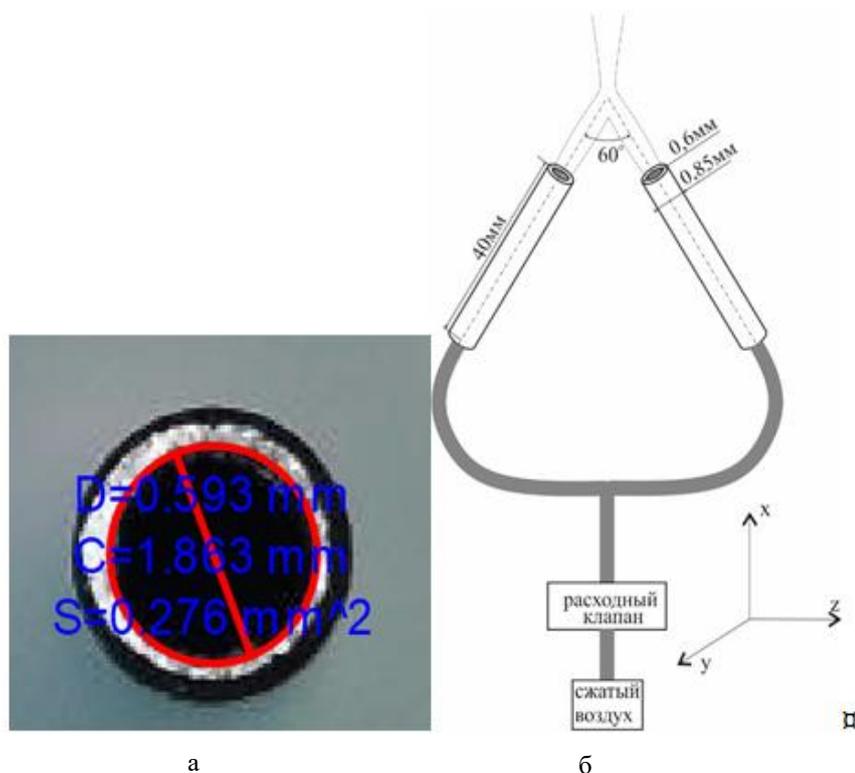


Рис. 1. Струйная установка: а – фото торца трубки, б – схема струйной установки; диаметр трубки: внешний 0,85 мм, внутренний 0,6 мм, длина трубок 40 мм

Сжатый воздух подавался из баллона на регулятор массового расхода MKS MASS FLOW, после чего разделялся тройником на две трассы, подводящие газ к микросоплам. Управление регулятором массового расхода осуществлялось через двухканальный модуль MKS PR4000B. Расход воздуха контролировался с точностью $\pm 0,7\%$. Перед регулятором массового расхода создавалось избыточное давление 6 атм. Истечение осуществлялось в воздушное пространство при 20 °С и атмосферном давлении. Расход воздуха через каждое сопло соответствовал $\frac{1}{2}$ устанавливаемого расхода на регуляторе и был равен $5,2 \times 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$.

Учитывая диаметр сопла 600 мкм, расчетная скорость газа, истекающего через каждое сопло, $U_1 = U_2 = 10 \text{ м/с}$, что соответствовало числу $Re = 400$ вычисленному по диаметру сопла. Измерения выполнялись с использованием термоанемометрического метода. В ходе измерений регистрировалась продольная к плоскости симметрии двух струй компонента скорости – $U(t)$ с частотой дискретизации 10 кГц. По полученным данным вычислялось стандартное отклонение пульсаций скорости $u' = \sqrt{\sum(U_i - \bar{U})^2 / i}$. Волластоновая нить датчика с диаметром проволоки 5 мкм и длиной 0,4 мм использовалась при коэффициенте перегрева 1:8. Калибровка датчика для всех экспериментальных исследований производилась в потенциальном течении круглой струи, для чего была изготовлена отдельная установка. Непосредственно перед измерением датчик перемещался координатным устройством к соплу установки, после тарировки возвращался на место измерений. Погрешность тарировочной кривой составляла менее 0,5% для всех точек в измерительном диапазоне. Автоматизированное координатное устройство для перемещения датчика термоанемометра управлялось компьютером и позволяло проводить длительные экспериментальные сетки по заранее заданной трехмерной геометрической сетке точек измерения. В данных экспериментах измерялась область размерами $(x \times y \times z) = 20 \times 20 \times 10 \text{ мм}$ соответственно, время считывания данных в каждой из точек 0,5 с, частота 10000 точек/с. Для повышения точности позиционирования на каждом из трех линейных модулей перемещения устанавливались магнитные линейки, поддерживающие точность до 5 мкм в абсолютной системе координат. Сигнал с термоанемометра подавался на 12ти разрядный аналого-цифровой преобразователь National Instruments NI-6023E, установленный на материнской плате компьютера. Коммутация термоанемометра и АЦП осуществлялась через вспомогательный соединительный модуль BNC-2120. Данные эксперимента сохранялись на жестком диске компьютера и обрабатывались в программной среде MatLab.

Для детального изучения процесса взаимодействия и возможности управления развитием двух сталкивающихся микроструйных течений использовались преимущества контролируемого эксперимента с введением контролируемых возмущений. Периодические во времени возмущения возбуждались динамиком, расположенным в плоскости трубок на расстоянии порядка 300 мм от области пересечения струй. Диффузор динамика был ориентирован также на область пересечения струй. Сигнал для динамика контролируемой частоты и амплитуды генерировался платой аналогового выхода компьютера и внешним усилителем. Частота искусственных возмущений составляла 1500 Гц с интенсивностью до 97 дБ на оси симметрии динамика, и была выбрана по результатам предварительных измерений естественного спектра течения. Измерения проводились с синхронизацией фазы акустического сигнала по выбранному фронту возмущения и момента начала записи осциллограммы скорости. После проведения процедуры тарировки, в программу сбора данных вносились указания по каждой из трех координатных осей, величине шага и количестве шагов, длительности сбора данных и т.д., после чего процесс измерения происходил в автоматическом режиме. Как уже упоминалось целью исследований являлась именно область взаимодействия двух микроструй, но не начальный участок вблизи среза сопел, тем более что исследование этой области вызывает определенные сложности, вызванные малым диаметром микротрубок и положением нити датчика относительно направления струйного течения. Но поскольку начальные условия в виде профиля скорости, несомненно, играют важную роль, были выполнены расчеты течения в ANSYS Fluent в трехмерной постановке для микротрубки с таких же как в эксперименте геометрическими

размерами. Расчеты выполнены с использованием модели ламинарного течения. На входе в трубку задавалась равная по всему сечению трубки скорость $U_{нач} = 6$ м/с, на стенке трубки ставилось условие прилипания, на выходе – outflow.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 2 представлен рассчитанный профиль скорости, реализующийся на срезе сопла. На выходе из микротрубки длиной 40 мм профиль скорости трансформировался к параболическому с максимальным значением скорости на выходе из трубки $U_{макс} = 10,8$ м/с, отношение $U_{макс}/U_{нач} = 1,8$ соответствует практически развитому ламинарному течению Пуазейля при $Re = (U_{нач} * d)/\nu = 430$. Учитывая полученные расчетные данные в экспериментальных исследованиях, устанавливалась та же скорость на выходе из каждого микроканала.

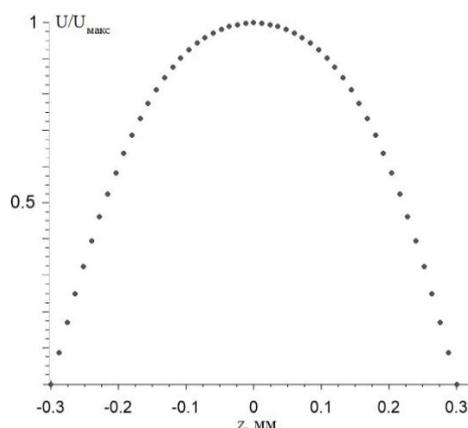


Рис. 2. Рассчитанный в AnsysFluent профиль скорости на выходе из микротрубки

Как упоминалось выше, измерения производились в границах трехмерной области, по продольной координате x и вертикальной y – 41 точка, по поперечной z – 21 точка, всего 35301 точек измерений с равным для всех направлений шагом 0,5 мм. Отсчет продольной координаты x проводился с отступом порядка 1,5 мм от средней линии среза сопел. Изменения максимальных значений продольной компоненты скорости $U/U_{макс}$, полученных в каждом поперечном сечении yz в зависимости от продольной координаты обезразмеренной на диаметр выходного отверстия микротрубки x/d представлен на рис. 3. Данные свидетельствуют о незначительном отличии продольной скорости для случая естественного истечения и при воздействии внешних акустических колебаний. Начиная с $x/d = 5$, наблюдается область значительного линейного падения продольной скорости, показанная пунктирной линией, далее с $x/d = 12$ происходит излом, и дальнейшее снижение скорости замедляется также близко к линейному закону. Область значительного падения скорости соответствует области взаимодействия двух микроструй и развитию вторичной (результатирующей) струи. На рис. 4. представлены максимальные значения пульсаций скорости от безразмерного расстояния x/d . Для естественных условий флуктуации скорости возрастают незначительно с $0,5\% U_{макс}$ до $3\% U_{макс}$. При воздействии внешнего акустического возмущения отмечается резкий рост пульсаций с $1\% U_{макс}$ до $17\% U_{макс}$. Следует отметить, что области роста флуктуаций для микроструй сталкивающихся при естественных условиях и при воздействии возмущения локализованы в разных областях. В случае акустического воздействия, максимальный рост пульсаций приходится на начало области столкновения микроструй, а в естественном случае на центральную область образовавшейся квазиплоской струи. Необходимо отметить, что результирующие струи для двух случаев значительно отличаются, как по структуре течения, так и по характерным размерам.

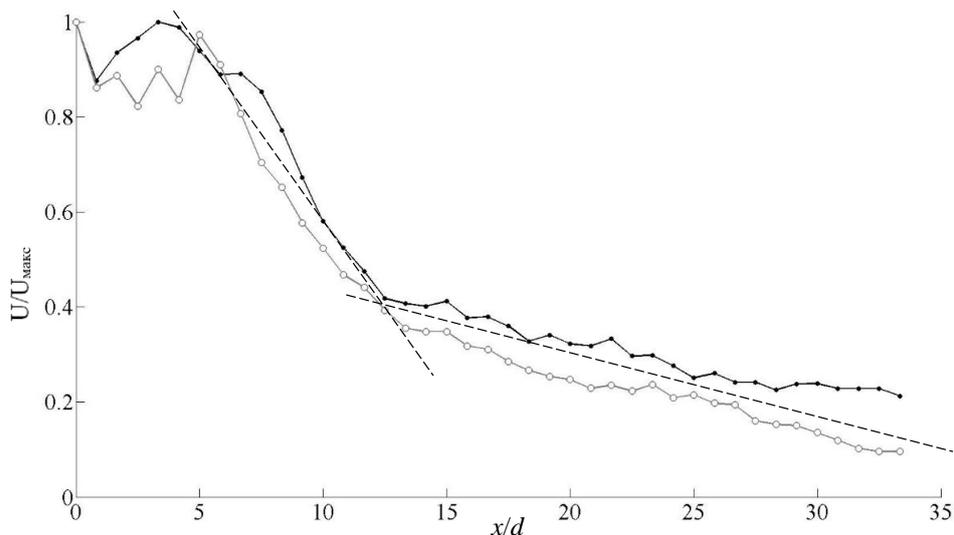


Рис. 3. Изменение максимальной скорости по продольной координате: \circ – естественный случай, \bullet – 1500 Гц

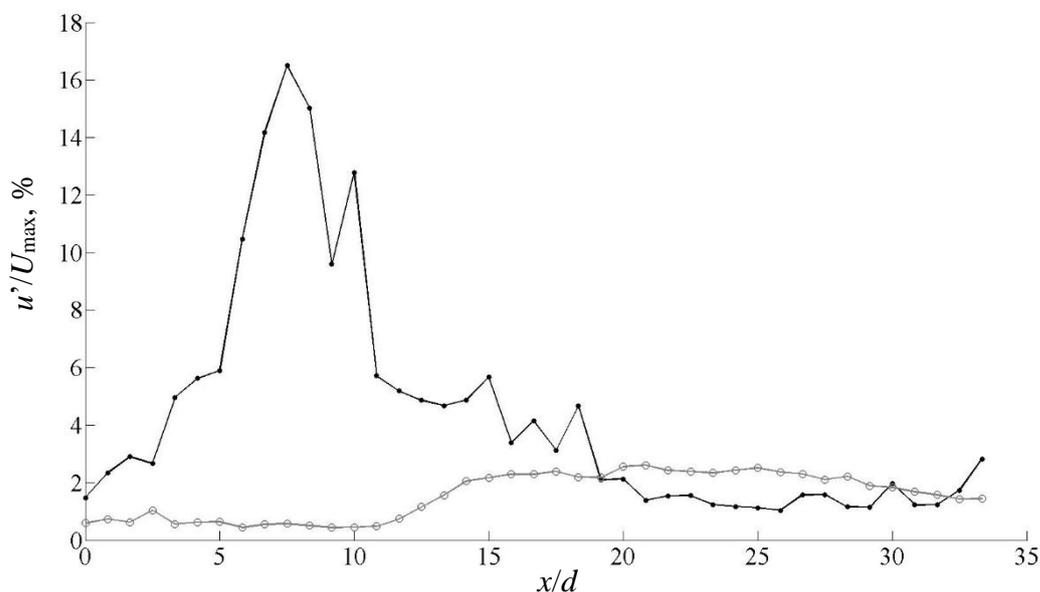


Рис. 4. Распределение максимальных значений среднеквадратичных пульсаций по продольной координате: \circ – естественный случай, \bullet – 1500 Гц

На рис. 5. представлены изоповерхности отклонения мгновенной скорости от осредненной по времени скорости для сталкивающихся микроструй при естественных условиях – 1, при внешнем акустическом воздействии с частотой 1500 Гц – 2. Амплитуда изоповерхностей составляла (а-г) $1\%U_{\max}$, $2\%U_{\max}$, $3\%U_{\max}$ и $4\%U_{\max}$. Превышение средней скорости показано светлым полутоном, дефект средней скорости показан темным полутоном. В естественном случае после точки столкновения микроструй формируется область превышения скорости в виде квазиплоской структуры большого поперечного размера, при этом структура расположена ортогонально по отношению к плоскости расположения микротрубок. Более скоростные отклонения концентрируются по оси симметрии микротрубок. Ниже по течению продольная составляющая скорости значительно снижается, течение турбулизует. В случае акустического воздействия с частотой 1500 Гц, развитие неустойчивости протекает по другому сценарию. Ниже области столкновения при всех амплитудах отклонения от средней скорости в ортогональной плоскости образуется незначительная область уплощения, превышающая осредненные по времени значения скорости. При столкновении микроструй при естественных условиях поперечный размер результирующей струи по меньшей мере в 2 раза больше чем в случае с акустическим

воздействием. При этом, в случае с акустическим воздействием, высокоскоростная область с ортогональным уплощением перестраивается второй раз, возвращаясь к начальной плоскости истечения микроструй, как показано светлыми полутонами.

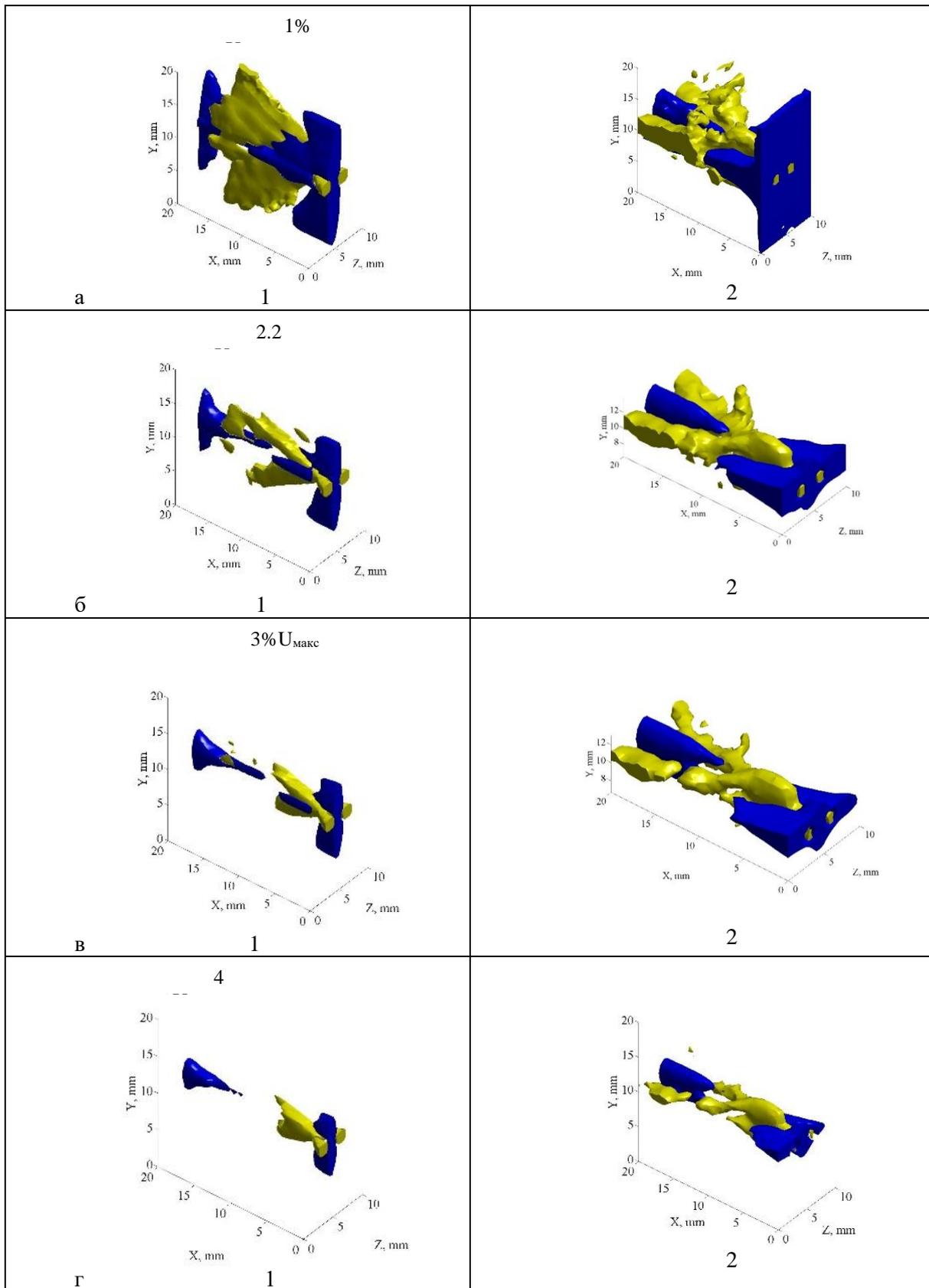


Рис. 5. Исоповерхности отклонения мгновенной скорости от средней скорости: а – $1\% U_{\text{макс}}$; б – $2,2\% U_{\text{макс}}$; в – $3\% U_{\text{макс}}$; г – $4\% U_{\text{макс}}$; 1 – естественный случай, 2 – 1500 Гц; светлое – превышение средней скорости, темное – дефект средней скорости

На рис. 6 представлены изоповерхности стандартного отклонения пульсаций скорости для уровней пульсаций $1\%U_{\text{макс}}$, $2,2\%U_{\text{макс}}$, $3\%U_{\text{макс}}$ для естественного случая, и $0,4\%U_{\text{макс}}$, $0,89\%U_{\text{макс}}$, $2,7\%U_{\text{макс}}$ при акустическом воздействии. Анализ полученных данных показал, что пространственное положение повышенного уровня флуктуаций скорости совпадает с локализацией областей превышения скорости, представленных на рис. 5. В целом изоповерхности пульсаций скорости также демонстрируют отличия в развитии естественного случая столкновения двух микроструй и случая с акустическим воздействием. Для первого характерна большая поперечная область сосредоточения пульсаций, для второго пульсации локализованы в гораздо меньшей области, отличия в объеме областей для сопоставимых амплитуд возмущений более чем в 2 раза. В случае с акустическим возмущением рис. 6 б имеет место развитие вторичного колебания, развивающегося с ортогональной области уплощения (в плоскости xy) и переходящего далее в плоскость zx . Данный факт подтверждается гармоническим колебанием областей равной скорости на рис. 7а, где представлены три графика с шагом 1×10^{-4} с по времени. Частота вторичных колебаний соответствует частоте акустического воздействия. На рис. 7б–г представлены амплитудные спектры пульсаций скорости при воздействии акустического возмущения $f = 1500$ Гц, б – точка находится в струе

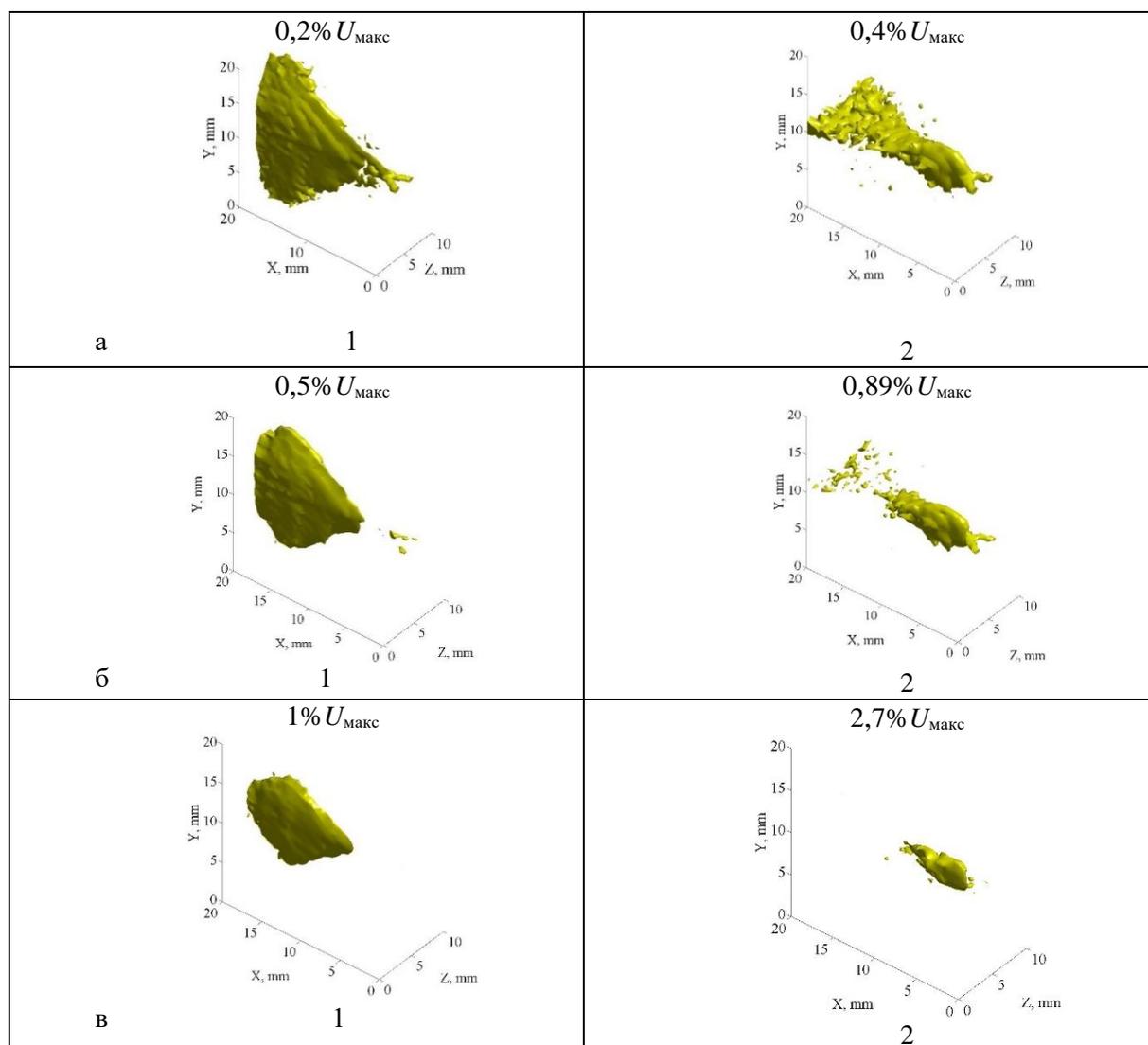


Рис. 6. Изоповерхность стандартного отклонения пульсаций продольной компоненты скорости: 1 – естественный случай: а – $0,2\%U_{\text{макс}}$; б – $0,5\%U_{\text{макс}}$; в – $1\%U_{\text{макс}}$, 2 – 1500 Гц: а – $0,4\%U_{\text{макс}}$; б – $0,89\%U_{\text{макс}}$; в – $2,7\%U_{\text{макс}}$

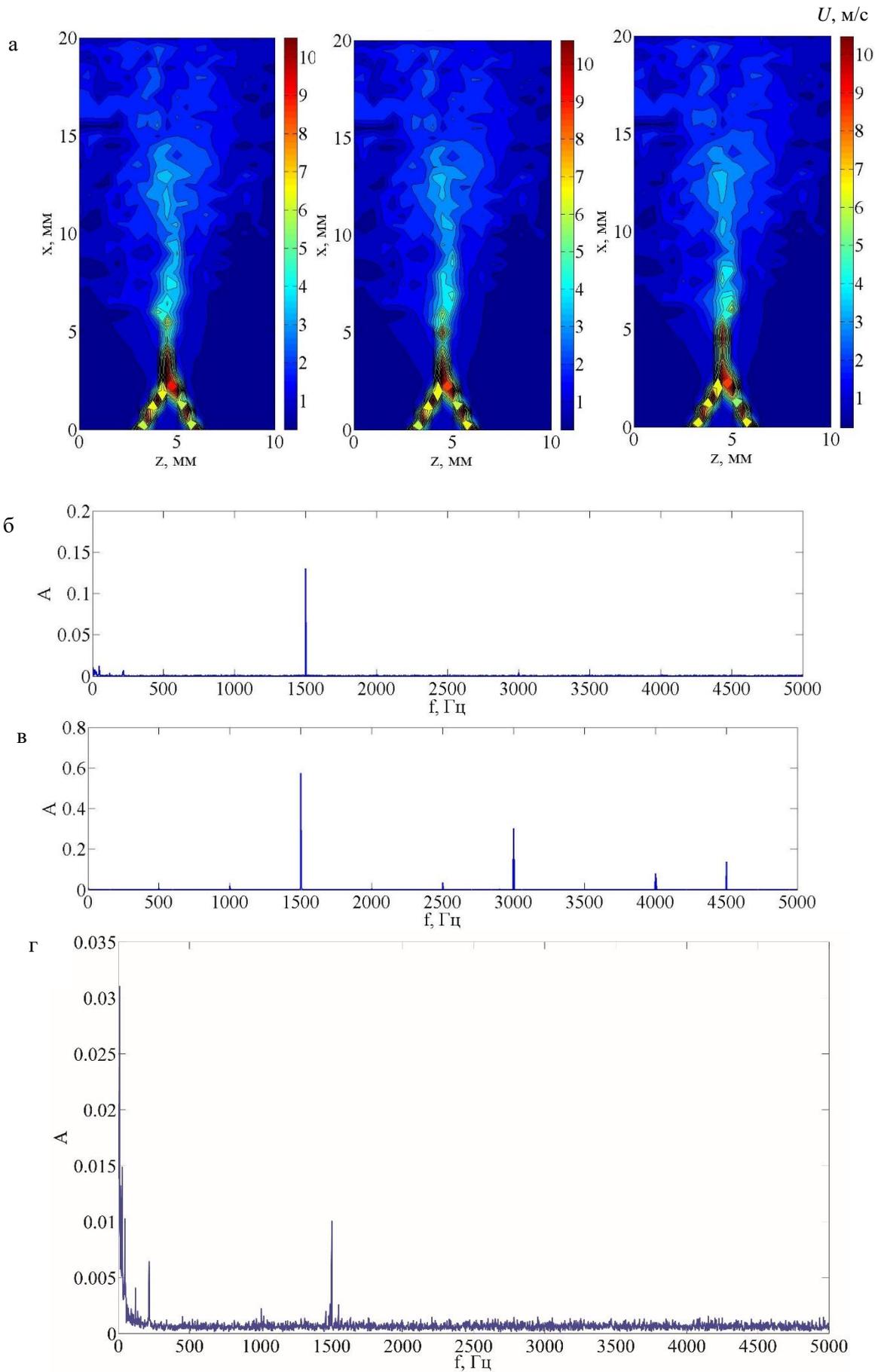


Рис. 7. а – распределение изолиний равной скорости в плоскости xz , $y = 10,5$ мм; шаг по времени 1×10^{-4} с; амплитудные спектры пульсаций скорости в точке: б – $x = 0,5$, $z = 6$ мм, в – $x = 6$, $z = 4,5$ мм – при акустическом воздействии $f = 1500$ Гц; г – область столкновения – естественный случай

вблизи среза микрострубки, в – точка находится в области столкновения микроструй, г – область столкновения микроструй без воздействия. Установлено, что в амплитудном спектре пульсаций скорости при естественном истечении сталкивающихся микроструй как обычно заполнена низкочастотная часть спектра, а также существует локальный максимум амплитуды на частоте 1500 Гц рис. 6 в, данная частота является собственной частотой естественного возмущения. При воздействии акустического возмущения с частотой 1500 Гц в области до взаимодействия микроструй (рис. 7б) в спектре выделяется одна несущая частота, соответствующая частоте акустического воздействия, в спектре полученном в области взаимодействия микроструй (рис. 7в), отмечается значительный рост амплитуды пульсаций с появлением двух гармоник.

Сравнивая два исследованных случая развития сталкивающихся микроструй, можно утверждать, что влияние акустического возмущения существенно меняет структуру струйного течения. Использование таких струй при контролируемых возмущениях в процессах диффузионного струйного горения, может способствовать более качественному смешению компонентов или формированию определенного вида факела. Кроме того, учитывая значительное увеличение площади квазиплоской струи в естественном случае, такая структура может использоваться как преграда для разрушения более масштабных структур, например, располагаясь на срезе сопла разрушать осесимметричные вихри.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований взаимодействия воздушных микроструй при внешнем акустическом воздействии, были получены следующие результаты.

Получены сценарии развития результирующей струи при столкновении двух воздушных микроструй в естественных условиях и в условиях внешнего акустического воздействия. Установлена возможность управления развитием струйного течения акустическим воздействием.

В результате взаимодействия двух микроструй, в естественном случае, реализуется квазиплоская результирующая струя большой относительной ширины. При акустическом воздействии ширина значительно уменьшается. Также меняется структура течения, происходит повторный разворот уплощенной области (превышение средней скорости) к плоскости расположения микротрубок.

Акустическое воздействие способствует развитию вторичного колебания развивающегося в области уплощения с частотой акустического возбуждения.

Работа была выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2024-2026 гг. (номер гос. регистрации 124021400038-1). Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Механика».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абиев Р.Ш., Альмяшева О.В., Гусаров В.В., Изотова С.Г.** Способ получения нанопорошков феррита кобальта и микрореактор для его реализации // Патент на изобретение. № RU 2625981. 2017. С1. 20.07.2017.
2. **Kozlov V.V., Litvinenko Y.A., Katasonov M.M. et al** Distinctive features of plume formation on collision of two laminar gas jets // *Fluid. Dyn.* 2023. Vol. 58. № 4. Pp. 634-639.
3. **Cohen J., Wygnanski I.** The evolution of instabilities in the axisymmetric jet // *J. Fluid. Mech.* 1987. Vol. 176. Pp. 191-219.
4. **Ginevsky A.S., Vlasov Y.V., Karavosov R.K.** Acoustic control of turbulent jets. Springer. 2004. 235 p.

5. **Kozlov V.V., Grek G.R., Litvinenko Yu.A.** Visualization of conventional and combusting subsonic jet instabilities // Dordrecht: Springer International Publishing. 2016. 126 p.
6. **Smith B.L., Glezer A.** Jet vectoring using synthetic jets // J. Fluid. Mech. 2002. Vol. 458. Pp. 1-34.
7. **Reynolds W.C., Parekh D.E., Juvet P.J.D., Lee M.J.D.** Bifurcating and blooming jets // Annu. Rev. Fluid Mech. 2003. Vol. 35. Pp. 295-315.
8. **Грек Г.Р., Козлов В.В., Литвиненко Ю.А.** Устойчивость дозвуковых струйных течений и горение. Учеб. Пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Новосиб. Гос. Ун-т. Новосибирск, 2013. 240 с.

Litvinenko Yu.A., Kozlov V.V., Litvinenko M.V.

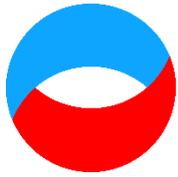
*Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics
of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Russia,
630090, Novosibirsk, InstitUtskaya st., 4/1, E-mail: litur@itam.nsc.ru*

COLLIDING LAMINAR MICROJETS

ABSTRACT

The results of studies of the jet formation process during the interaction of two colliding axisymmetric laminar air microjets. The axes of symmetry of the tubes lie in the same plane and intersect at an angle of 60° . The distance between the near ends of the tubes is equal to 4 mm. The outflow with identical velocities was implemented. As a result of the experiment, the distinctive features of the secondary jet formation Under natural conditions and under the impact of an external periodic disturbance were revealed. It was found that the resulting jet is formed in the plane orthogonal to the tubes. Under natural conditions, a secondary jet with a beam angle greater than 115° is formed and represents a flattened jet. In the case of the external impact by a periodic acoustic signal, after the interaction of the microjets, a slight flattening appears with the development of secondary oscillations in the orthogonal plane and subsequent rotation with respect to the plane of the tubes.

AIR MICROJETS COLLISION, JET FLOW CONTROL, ACOUSTIC IMPACT, LAMINAR MICROJETS



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 532.5

Чашечкин Ю.Д.

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Россия,
119526, Москва, проспект Вернадского 101/1, E-mail: yulidch@gmail.com*

**РАСЧЕТ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ ПЕРИОДИЧЕСКИХ
ТЕЧЕНИЙ В ГЕТЕРОГЕННЫХ СЖИМАЕМЫХ СРЕДАХ**

АННОТАЦИЯ

Новая универсальная классификация компонентов течений гетерогенных сред – жидкостей, газов, плазмы, включает традиционные волны и семейства лигаментов, описывающих тонкую структуру распределений наблюдаемых физических величин. Математической основой классификации служат наборы полных решений системы фундаментальных уравнений механики жидкостей, построенные с учетом макро- и микромеханизмов передачи и конверсии компонентов энергии. Текущая среда характеризуется уравнениями состояния для потенциала Гиббса и его производных. При погружении задач в алгебру комплексных чисел сохраняется вещественность и положительная определенность частоты – меры энергии, а волновое число выбирается комплексным. Полные решения линеаризованных и слабо нелинейных уравнений отыскиваются методами теории сингулярных возмущений. Пространственно-временные параметры решений, описывающих волны и лигаменты, определяют требования к методикам эксперимента в части выбора наблюдаемых физических величин, допускающих оценку погрешности; размеров области наблюдения; порога чувствительности, пространственного и временного разрешения инструментов. Приводятся полные дисперсионные соотношения бегущих периодических поверхностных и внутренних гравитационных, а также акустических волн в стратифицированных средах. Пучки периодических внутренних волн и лигаментов в толще непрерывно стратифицированной жидкости визуализированы теневыми методами.

**ГЕТЕРОГЕННЫЕ ЖИДКОСТИ, ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ТЕЧЕНИЯ, ПОЛНЫЕ РЕШЕНИЯ,
ВОЛНЫ, ЛИГАМЕНТЫ, СТРУКТУРА, ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ**

ВВЕДЕНИЕ

Тонкие структуры взволнованной поверхности океана, картин течений в атмосфере, замеченные выдающимися художниками XIX века, активизировали поиск научных методов их наблюдений, расчетов и лабораторного моделирования. Высокоразрешающие измерения показали, что все природные системы – литосфера, гидросфера, атмосфера характеризуются тонкой структурой распределений физических величин, включающей более однородные слои, разделенные высокоградиентными прослойками [1, 2]. Для описания процессов образования и поддержания резких прослоек, сохраняющихся при сглаживающем действии диссипативных факторов, используются все модели – фундаментальные, эвристические (конститутивные), редуцированные в приближении постоянной плотности. Среди них выделены системы фундаментальных уравнений механики гетерогенных жидкостей –

дифференциальные аналоги законов сохранения вещества, импульса и энергии [3]. Они включают наблюдаемые величины, допускающие оценку погрешности в ходе опытов.

Развитие измерительной техники позволило установить существование тонкой супрамолекулярной структуры жидкостей или газов, определить размеры отдельных ячеек. Анизотропия строения атомов и молекул, выраженность которой усиливается на контактных границах сред, предопределяет возможность объединения атомов и молекул в ассоциаты физической и химической природы (кластеры, клатраты, бонды, войды). Ассоциаты обладают потенциальной поверхностной энергией (ППЭ) – компонентом внутренней энергии, обеспечивающим существование границ отдельных элементов и контактной поверхности, разделяющей жидкости, газы и твердые тела. При формировании ассоциатов в ППЭ медленно переходит часть кинетической энергии течения и распределенной внутренней энергии среды [4]. При распаде ячеек накопленная энергия быстро передается в наиболее тонкие компоненты течений, обеспечивающие текучесть сплошных сред – нулевое трение покоя жидкостей, газов и плазмы. Оптическим образом структуры поверхностей текучих сред служат изображения фотосферы Солнца.

Выбор потенциал Гиббса, производные которого определяют плотность, температуру и другие термодинамические параметры структурированной гетерогенной среды в качестве основного параметра состояния [5], позволяет учитывать в расчетах действие всех механизмов переноса энергии – и макроскопических с течениями, вихрями, волнами, и микроскопических – диссипативно-диффузионных и конверсионных [4].

Включение в систему фундаментальных уравнений механики гетерогенных жидкостей уравнений состояния для потенциала Гиббса и его производных, неоднородно распределенных в пространстве, позволяет находить полные решения, описывающие и динамику, и тонкую структуру среды. Аналитические решения линеаризованной системы фундаментальных уравнений в алгебре комплексных чисел находятся с учетом условия совместности спектральными методами теории сингулярных уравнений [6] при сохранении вещественности и положительной определенности частоты [4, 7]. Подход обеспечивает построение полных решений и линеаризованных, и слабо нелинейных систем, удовлетворяющих физически обоснованным начальным и граничным условиям [8].

В докладе приводятся результаты анализа дисперсионных соотношений гравитационных поверхностных и внутренних волн в различных моделях среды, а также теневые фотографии пучков периодических внутренних волн с сопутствующими лигаменгами. Прослеживается влияние нелинейных эффектов при увеличении амплитуды колебаний источника волн.

ТЕОРИЯ БЕГУЩИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН И СЕМЕЙСТВ СОПУТСТВУЮЩИХ ЛИГАМЕНТОВ

Для сокращения формул при описании периодических течений в стратифицированной сжимаемой среде система фундаментальных уравнений [3, 4] существенно редуцируется. Рассмотрение проводится в двумерной декартовой системе координат Oxz , вертикальная ось которой направлена противоположно вектору ускорения свободного падения \mathbf{g} . В уравнении состояния [2] учитывается сжимаемость и температурная стратификация. Флуктуации плотности ρ , температуры T и давления P считаются малыми по сравнению с равновесными значениями, уравнение состояния, связывающее плотность с другими термодинамическими величинами, линеаризуется

$$\rho = \rho(P, T) = \rho_0(z) \left[1 + \alpha_P (P(x, z, t) - P_0(z)) - \alpha_T (T(x, z, t) - T_0(z)) \right], (1)$$

$$\alpha_P = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_s = \frac{1}{\rho c_s^2}, \quad \alpha_T = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_s.$$

Здесь $\rho_0(z)$, $P_0(z)$, $T_0(z)$ – равновесное распределение плотности, давления и температуры, соответственно, α_p – коэффициент сжимаемости, c_s – адиабатическая скорость звука, α_T – коэффициент температурного расширения. Стратификацию среды характеризует частота $N = \sqrt{|gd \ln \rho/dz|^{-1}}$ и период $T_b = 2\pi/N$ плавучести величиной порядка нескольких минут в стратифицированном океане и атмосфере.

В сделанных упрощениях система фундаментальных уравнений [3, 4] в которой сохраняются уравнения Навье-Стокса, Фурье и неразрывности, принимает вид

$$\begin{cases} \partial_t \rho + \mathbf{u} \cdot \nabla \rho + \rho \operatorname{div} \mathbf{u} = 0 \\ \rho (\partial_t \mathbf{u} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u}) = -\nabla P + \nu \rho \Delta \mathbf{u} + \frac{\nu \rho}{3} \nabla \cdot \operatorname{div} \mathbf{u} + \rho \mathbf{g}, \\ \partial_t T + \mathbf{u} \cdot \nabla T = \kappa_T \Delta T \end{cases} \quad (2)$$

где \mathbf{u} – скорость среды, ν – кинематическая вязкость, κ_T – коэффициент температуропроводности. Для упрощения уравнений используются дополнительные упрощения уравнения состояния и системы (2), в которой сохраняется только сам факт стратификации плотности, влиянием переноса тепла пренебрегается.

Анализ свойств периодических течений, распространяющихся в безграничном пространстве, проводится спектральным методом с введением базисных функций вида плоских волн $f \sim \exp(i\mathbf{k}\mathbf{x} - i\omega t)$. В предложенной технике вычислений при погружении задачи в алгебру комплексных чисел частота ω , как мера энергии течения, сохраняется вещественной и положительно определенной. Волновое число выбирается комплексным $\mathbf{k} = \mathbf{k}_1 + i\mathbf{k}_2$ [9]. Знак мнимой части выделяет физически реализуемые решения, в которых волны затухают по мере распространения. Развиваемый подход позволяет рассчитывать и общую динамику, и тонкую структуру периодических течений.

Введение комплексной частоты ω преобразует исходную систему в задачу исследования устойчивости течений, изучению которой посвящено большое число оригинальных работ, монографий и учебников. Теория устойчивости широко используется при анализе течений жидкости однородной плотности в качестве основы классификации типа течений. Интерес к изучению структур течений объясняется общеизвестным фактом – реальные жидкости гетерогенны вследствие неоднородности состава, температуры и сжимаемости, диссипативны и стратифицируются в гравитационном поле.

Влияние эффектов стратификации и вязкой диссипации иллюстрируют дисперсионные соотношения, возникающие при подстановке решений в виде плоских волн в систему (2). В общем случае соотношение определяет два вида связи между компонентами волнового числа. Регулярная часть соотношения (два решения) характеризует волны. Сингулярная часть описывает семейство лигаментов в вязкой стратифицированной среде.

$$\begin{cases} -N^2 k_x^2 + e^{z/\Lambda} (k_x^2 - k_{z,l}^2) \omega (ik_x^2 \nu - ik_{z,l}^2 \nu + \omega) = 0 \\ gk_x^2 - 3ik_x^2 k_{z,l} \nu \omega + k_{z,l} (ik_{z,l}^2 \nu - \omega) \omega + k_x^4 \gamma = 0, \quad \gamma = \sigma/\rho_{00} \end{cases} \quad (3)$$

Дисперсионное соотношение для гармонических волн в вязкой однородной жидкости также определяет связь между компонентами волнового вектора, но уже в рамках одного выражения полиномиального вида в отличие от системы уравнений (3)

$$k_x [2k_x (k_l \omega^2 - gk_x^2 - \gamma k_x^4 + i\omega \nu k_l (3k_x^2 - k_l^2)) - (k_x^2 + k_l^2) (\omega^2 - gk_x - \gamma k_x^3 + 2i\omega \nu k_x^2)] = 0 \quad (4)$$

Дисперсионное соотношение для волн на поверхности глубокой жидкости с нормированным на плотность ρ коэффициентом поверхностного натяжения $\gamma = \sigma / \rho$ определяет связь волнового вектора (или длины волны $\lambda = 2\pi / k$) с частотой

$$\omega^2 = gk + \gamma k^3 \quad (5)$$

Дисперсионное соотношение для периодических течений в толще вязкой стратифицированной жидкости

$$D_v(k) \left(\omega^2 D_v^2(k) - \omega N^2 D_v(k) + c^2 k_{\perp}^2 N_c^2 - c^2 \omega k^2 D_v(k) \right) = 0, \quad D_v(k) = \omega + ivk^2, \quad (6)$$

$$k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2, \quad k_{\perp}^2 = k_x^2 + k_y^2, \quad N^2 = g/\Lambda, \quad N_c^2 = N^2 - (g^2/c^2)$$

содержит оператор погранслоного типа $D_v(k)$ в качестве общего множителя и в отдельных слагаемых формулы (6). Выбор величин $\tau_b = N^{-1}$ и $\delta_N^{gv} = (gv)^{1/3} N^{-1}$ в качестве масштабов времени и длины позволяет перевести (6) к безразмерному виду

$$\left(ik_*^2 \varepsilon + \omega_* \right) \left(k_{\perp*}^2 \left(\frac{\varepsilon}{\eta} - \frac{1}{\varepsilon^2} \right) + \omega_*^2 (ik_*^2 \varepsilon + \omega_*)^2 - \omega_* (ik_*^2 \varepsilon + \omega_*) - k_*^2 \omega_* \frac{\varepsilon}{\eta} (ik_*^2 \varepsilon + \omega_*) \right) = 0, \quad (7)$$

$$\varepsilon = \frac{\delta_g^v}{\delta_N^{gv}} = \frac{\sqrt{v/N}}{(gv)^{1/3} N^{-1}} = \frac{Nv^{1/3}}{g^{2/3}}, \quad \eta = \frac{\tau_c^v}{\tau_b} = \frac{Nv}{c^2}$$

В случае высокочастотных колебаний $\omega \gg N$ дисперсионное соотношение для акустических волн принимает вид

$$D_v(k) \left(D_v(k) \omega (D_v(k) \omega - c^2 k^2) - g^2 k_{\perp}^2 \right) = 0, \quad (8)$$

и в изотропной однородной идеальной среде существенно упрощается

$$\omega^2 = k^2 c_s^2. \quad (9)$$

Решения уравнения (8) для акустических волн и лигаментов находятся в явной форме

$$k_z = \pm \sqrt{-k_x^2 - \frac{c^2 \omega - 2iv\omega^2 + \sqrt{c^4 \omega^2 - \frac{4g^2 v k_x^2}{\omega} (ic^2 + v\omega)}}{2v(ic^2 + v\omega)}}; \quad (10)$$

$$k_z = \pm \sqrt{-k_x^2 - \frac{c^2 \omega - 2iv\omega^2 - \sqrt{c^4 \omega^2 - \frac{4g^2 v k_x^2}{\omega} (ic^2 + v\omega)}}{2v(ic^2 + v\omega)}}.$$

В толще стратифицированной жидкости распространение поперечных низкочастотных $\omega \ll N$ внутренних волн описывает следующее дисперсионное соотношение

$$D_v(k) \left(c^2 \omega i k^4 v - c^2 N^2 k_{\perp}^2 + c^2 k^2 \omega^2 + N^2 \omega D_v(k) + g^2 k_{\perp}^2 \right) = 0. \quad (11)$$

Его решения также определяют внутренние волны и сопутствующие лигаменты

$$k_z = \pm \sqrt{-k_x^2 - \frac{c^2\omega - 2iv\omega^2 + \sqrt{c^4\omega^2 - \frac{4g^2vk_x^2}{\omega}}(ic^2 + v\omega)}{2v(ic^2 + v\omega)}}; \quad (12)$$

$$k_z = \pm \sqrt{-k_x^2 - \frac{c^2\omega - 2iv\omega^2 - \sqrt{c^4\omega^2 - \frac{4g^2vk_x^2}{\omega}}(ic^2 + v\omega)}{2v(ic^2 + v\omega)}} .$$

В пределе невязкой жидкости дисперсионное соотношение (11) упрощается

$$c^2k^2\omega^2 - c^2k_{\perp}^2N^2 + N^2\omega^2 + g^2k_{\perp}^2 = 0, \quad (13)$$

Его решение теперь описывает только бегущие внутренние волны:

$$k_z = \pm \sqrt{-k_{\perp}^2 + k_{\perp}^2 \frac{N^2c^2 - g^2}{c^2\omega^2} - \frac{N^2}{c^2}} . \quad (14)$$

В пренебрежении сжимаемостью среды дисперсионное соотношение (13) переходит в хорошо известное выражение для внутренних волн в невязкой экспоненциально стратифицированной жидкости [10]

$$\omega^2 = \sin^2 \theta \cdot N^2, \quad (15)$$

определяющее угловое положение пучка плоских волн в форме «андреевского креста», угол наклона лучей которого к горизонту θ монотонно растет с увеличением отношения частоты ω к частоте плавучести N – предельной частоте бегущих волн, когда волновые пучки направлены вертикально.

Пространственно-временные параметры решений, описывающих волны и лигаменты, определяют требования к методикам эксперимента в части выбора наблюдаемых физических величин, допускающих оценку погрешности; размеров области наблюдения; чувствительности, пространственного и временного разрешения инструментов.

Теневая картина пучков периодических внутренних волн в среде с постоянным значением частоты плавучести в нижней части рисунка и быстро уменьшающимся в верхней части, приведена на рис. 1. Волны отражаются от критического слоя, на котором $\omega = N$ и частично проникают в «запрещенную зону», в которой $\omega > N$ в форме стоячих колебаний.



Рис.1. Теневая картина пучков периодических внутренних волн в среде с переменным профилем плавучести (модель отражения волн от критического уровня $\omega = N(z)$).

Теневые изображения картин полей периодических внутренних волн в среде с постоянной частотой плавучести с ростом амплитуды колебаний источника (в данных опытах вертикально осциллирующей сферы) приведены на рис. 2. Горизонты предельного положения верхнего и нижнего полюсов шара отмечены пунктирными линиями [11].

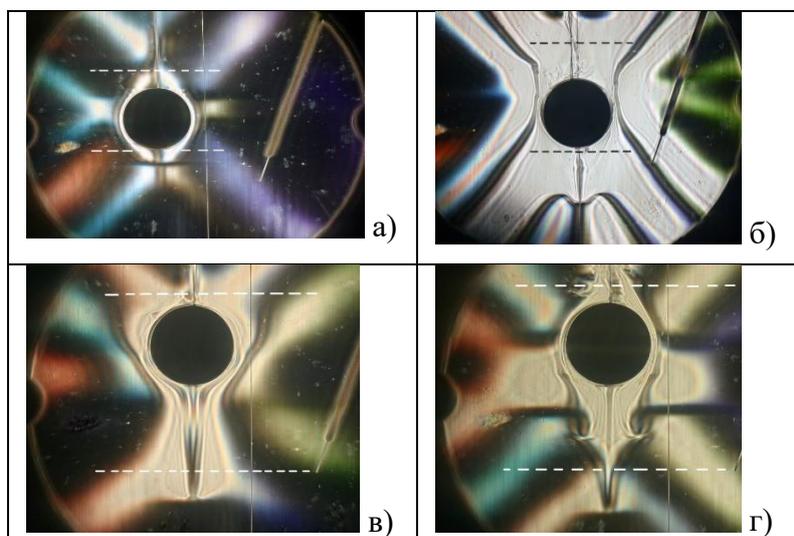


Рис.2. Трансформация структуры пучков внутренних волн при увеличении амплитуды вертикальных колебаний сферы: $T_b = 11,2$ с, $D = 4,5$ см, $A_{max} = 2,7$ см, $\frac{\omega}{N} = 0,68$.

При малых амплитудах колебаний формируются наклонные пучки внутренних волн, ширина которых определяется диаметром сферы и амплитудой колебаний (рис. 2а). С увеличением амплитуды на краях пучков появляются темные полосы – оптические образы лигаментов (рис. 2б). При дальнейшем увеличении амплитуды колебаний источника в поле градиента плотности появляются разрывы – резкие прослойки (рис. 2в). С увеличением амплитуды волн нелинейные взаимодействия между всеми компонентами течения – и волнами, и лигаментами [8], усложняют картины течений (рис. 2г).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируются дисперсионные соотношения гравитационных волн на поверхности, акустических и внутренних волн в толще вязкой непрерывно стратифицированной жидкости – части полного набора волн, существующих в сжимаемых диссипативных гетерогенных средах – инерциальных, гравитационных (поверхностных и внутренних), капиллярных, акустических, гибридных. На основе редуцированной системы фундаментальных уравнений методами теории сингулярных возмущений выделены волны и лигаменты – два неразделимых компонента периодических течений. Параметры мгновенной пространственной структуры течений – длина волны, волновой вектор, толщина лигамента, связаны с величиной локальной временной изменчивости (частотой) функциональным (дисперсионным) соотношением. Волны описываются регулярными асимптотическими решениями дисперсионного соотношения, лигаменты – сингулярными. При упрощении систем меняется смысл дисперсионных соотношений, теряется ряд собственных компонентов течений. В эксперименте визуализированы пучки периодических внутренних волн, прослежен рост амплитуд лигаментов при увеличении амплитуды колебаний источника.

Эксперименты по теневой визуализации внутренних волн проведены на стендах УИУ «ГФК ИПМех РАН». Работа выполнена по госзаданию, номер госрегистрации: 124012500442-3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Федоров К. Н.** Тонкая термохалинная структура вод океана. Л.: Гимиз, 1976. 184 с.
2. ГОСТ 4401-81. Межгосударственный стандарт: Атмосфера стандартная. Параметры.
3. **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** Гидродинамика. М.: Наука, 1986.
4. **Chashechkin Yu.D.** Foundations of engineering mathematics applied for fluid flows // Axioms. 2021. Vol. 10. № 4. P. 286.
5. **Harvey A.H., Hrubý J., Meier K.** Improved and always improving: reference formulations for thermophysical properties of water // J. of Phys. and Chem. Ref. Data. 2023. Vol. 52. P. 011501.
6. **Найфэ А.Х.** Введение в методы возмущений М.: Мир, Москва, 1984. 535 с.
7. **Chashechkin Yu. D., Ochirov A. A.** Periodic waves and ligaments on the surface of a viscous exponentially stratified fluid in a uniform gravity field // Axioms. 2022. Vol. 11. № 8. P. 402.
8. **Chashechkin Yuli D.** Conventional partial and new complete solutions of the fundamental equations of fluid mechanics in the problem of periodic internal waves with accompanying ligaments generation // Mathematics. 2021. Vol. 9(6). №. 586.
9. **Chashechkin Y.D., Ochirov A.A.** Periodic flows in a viscous stratified fluid in a homogeneous gravitational field // Mathematics. 2023. Vol. 11. P. 4443.
10. **Лайтхилл Дж.** Волны в жидкостях. М.: Мир. 1981. 603 с.
11. **Chashechkin Yu.D.** Singularly perturbed components of flows – linear precursors of shock waves // Math. Model. Nat. Phenom. 2018. Vol. 13. № 2. Pp. 1-29.

Chashechkin Yu.D.

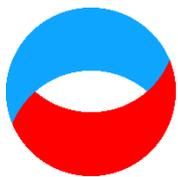
*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Russia,
119526, Moscow, Prospekt Vernadskogo 101/1, E-mail: yulidch@gmail.com*

CALCULATION AND VISUALIZATION OF THE FINE STRUCTURE OF PERIODIC FLOWS IN HETEROGENEOUS COMPRESSIBLE MEDIA

ABSTRACT

A new universal classification of components of flows in heterogeneous media that are liquids, gases, plasma includes traditional waves and families of ligaments describing the fine structure of observed physical quantities. The mathematical basis of the classification is sets of complete solutions of the fundamental equations of fluid mechanics system constructed taking into account macro- and micromechanisms of energy components transfer and conversion. The fluid medium is characterized by equations of state for the Gibbs potential and its derivatives. When immersing problems in the algebra of complex numbers, the frequency that is a measure of energy – is retained as real and positive definite, and the wave number is chosen to be complex. Complete solutions of linearized and weakly nonlinear equations are found using singular perturbation theory. The spatio-temporal parameters of the solutions describing waves and ligaments determine the requirements for experimental techniques in terms of choosing observable physical quantities that allow error estimation; dimensions of the observation area; sensitivity, spatial and temporal resolution of instruments. The paper presents complete dispersion relations of propagating periodic surface and internal gravity waves in stratified media, schlieren images of periodic internal wave beams and ligaments in the thickness of a continuously stratified fluid.

**HETEROGENEOUS FLUIDS, PERIODIC FLOWS, COMPLETE SOLUTIONS, WAVES,
LIGAMENTS, STRUCTURE, HIGH-RESOLUTION VISUALIZATION**



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 532.5

Чашечкин Ю.Д.

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Россия,
119526, Москва, проспект Вернадского 101/1, E-mail: yulidch@gmail.com*

**КАРТИНЫ СЛИЯНИЯ ОДНОРОДНЫХ КАПЕЛЬ РАСТВОРОВ И СУСПЕНЗИЙ
ХИМИЧЕСКИ НЕЙТРАЛЬНЫХ И РЕАГИРУЮЩИХ СРЕД**

АННОТАЦИЯ

В опытах, научную основу методики которых составила система фундаментальных уравнений механики гетерогенных жидкостей и газов, включающая уравнения состояния для потенциала Гиббса и плотности, прослежена эволюция тонкой структуры картины переноса импульса, вещества и энергии при слиянии свободно падающей капли чистой жидкости, однородного раствора и суспензий наночастиц с покоящейся принимающей жидкостью. Высокоскоростная видеосъемка с многоточечным освещением позволила выделить несколько режимов течений, структура которых определяется отношением компонентов полной энергии капли. При медленной контактной скорости, когда кинетическая энергия капли меньше потенциальной поверхностной энергии (ППЭ), в интрузивном режиме капля плавно втекает в толщу жидкости и трансформируется в вихревое кольцо. В промежуточном режиме капля задерживается на поверхности и частично сливается, выбрасывая остаток в воздушную среду. В импактном режиме капля теряет сплошность и распадается на отдельные струйки, текущие по контактной поверхности и пронзающие дно каверны. Струйки оставляют окрашенные волокна, образующие линейчатые и ретикулярные структуры. Обсуждается слияние химически реагирующих жидкостей и суспензий наночастиц.

**ЖИДКОСТЬ, КАПЛЯ, ЭНЕРГИЯ, СТРУКТУРА, ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩАЯ
ВИЗУАЛИЗАЦИЯ, ЛИГАМЕНТЫ, ВОЛНЫ**

ВВЕДЕНИЕ

Развитие исследований процессов слияния свободно падающей капли с глубокой принимающей жидкостью в конце XX века активизировал прогресс микроэлектроники, вычислительной техники и нанотехнологий, способствовавший созданию новых осветительных инструментов, высокоразрешающих видеокамер со скоростью съемки превышающей миллионы кадров в секунду и систем регистрации больших объемов данных. Одновременно повышается востребованность научных результатов для создания новых массовых аддитивных технологий, объективизации описания статуса и динамики окружающей среды – атмосферы и гидросферы. Капельные процессы играют важную роль в широком диапазоне масштабов, характеризующих локальные взаимодействия на атомно-молекулярном уровне и глобальные климатические процессы образования и переноса облачных систем.

В методиках опытов учитываются достижения теоретической гидродинамики гетерогенных жидкостей, основу которой составляют дифференциальные уравнения – аналоги

законов сохранения вещества, импульса и энергии [1]. Анализ систем уравнений проводится с учетом требований современной логики научных исследований [2], включающей выбор наблюдаемых физических величин и контроль выполнения условия совместности уравнений, обеспечивающего полноту построенных решений.

В качестве основной физической величины, характеризующей состояние текучей среды – жидкости, газа или плазмы, выбран термодинамический потенциал Гиббса, производные которого – плотность, давление, температура, концентрация растворенных веществ или/и взвешенных частиц [3]. Дополнительные параметры среды – кинетические коэффициенты и другие физические константы (в частности, скорость звука, коэффициент преломления, теплоемкость, электропроводность).

Экспериментально установлено, что атомы и молекулы в реальных жидкостях и газах образуют объединения (ассоциаты) физической и химической природы: кластеры, комплексы, клатраты, кластраты, войды с отдельными атомами, полосы с водородными связями и другие [4, 5]. Размеры ассоциатов δ_a лежат в диапазоне от 10^{-8} до 10^{-6} см, времена существования – от 10^{-12} с до десятков секунд. Ассоциаты наблюдаются и в толще, и на свободной поверхности жидкости. Каждый из компонентов структуры среды обладает собственной ППЭ, которая накапливается при его формировании и теряется при разрушении, обеспечивая свойство текучести жидкостей и газов.

Сложность пространственно неоднородной зернистой структуры распределения термодинамических потенциалов в жидкостях, визуальным образом которой служат изображения фотосферы Солнца, объясняется существованием нескольких механизмов переноса энергии в течениях жидкостей. Макроскопический перенос энергии с течением со скоростью потока, вихря, групповой скоростью волн дополняет микроскопический перенос – диссипативно-диффузионный и конверсионный (радиационный перенос здесь не рассматривается). При уничтожении свободной поверхности сливающихся жидкостей или перестройке структуры ППЭ ассоциатов трансформируется в возмущения температуры, давления, концентрации веществ, а также в механическую энергию наиболее тонких компонентов течений.

При формировании новой свободной поверхности и оболочек кластеров энергия движения и распределенных компонентов внутренней энергии трансформируются в ППЭ, сосредоточенную в слое толщиной порядка размера молекулярного кластера $\delta_c \sim 10^{-6}$ см. Освобождение поверхностной энергии происходит быстро, за времена порядка $\tau \sim 10^{-8} \dots 10^{-9}$ с, а ее накопление при формировании свободной поверхности и оболочек кластеров – медленно, $\tau \sim 10^{-2} \dots 10^{-3}$ с.

Конверсия внутренней энергии при уничтожении структурных компонентов обеспечивает формирование быстрых тонких струек (ручейков, триклов) во всех видах течений. Она проявляется в формировании тонкой структуры течений импакта капли в области контакта жидкостей, где наблюдаются тонкие радиальные струйки, и на ее границе, где они ускоряются [6]. Тонкая структура распределения вещества наблюдается при слиянии окрашенных однородных [7] и составных капель, в которых ядро окрашенной жидкости окружено масляной оболочкой [8].

Полные решения системы фундаментальных уравнений находятся спектральными методами, в которых частота сохраняется вещественной, а волновое число принимается комплексным. Решения системы получены методами теории сингулярных возмущений с учетом условия совместности в линейном [9] и в слабо нелинейном приближениях [10]. При этом регулярная часть полных решений, в которых мнимая часть показателей волновых функций существенно меньше действительной части, описывают волны, вихри, струи или следы. Сингулярные решения, в которых действительная и мнимая части показателей одного порядка, характеризуют семейства лигаментов, которым соответствуют тонкие протяженные волокна и прослойки в течениях вязких гетерогенных жидкостей. В нелинейной постановке все компоненты течений активно взаимодействуют и порождают новые элементы,

усложняющие картину течений [10]. В пределе больших времен, когда механические движения затухают под действием диссипации, в гетерогенной жидкости сохраняются тонкие нестационарные течения, индуцированные процессами диффузии на топографии и реструктуризацией ассоциатов.

Лигаменты, протяженные компоненты течений, поперечные масштабы которых определяются диссипативными кинетическими коэффициентами и главными параметрами процессов, такими, как частота волны, скорость потока или время его формирования, наблюдаются в форме тонкой волокнистой структуры распределения вещества на всех этапах эволюции течения, возникающего при слиянии свободно падающих капель в импактном режиме [11]. Здесь процессы конверсии доступной ППЭ, химической и других видов энергии, протекающие на атомно-молекулярных и супра-молекулярных масштабах порядка δ_a , формируют выраженную тонкую структуру быстро эволюционирующих течений.

Многомасштабность тонкой структуры капельных течений учитывалась при разработке методики эксперимента. Размер области наблюдения, временное и пространственное разрешение инструментов выбирались с учетом условия регистрации и крупных компонентов течений (каверны, венца, всплеска), и тонких лигаментов. Выбор системы фундаментальных уравнений механики неоднородных жидкостей в качестве методической основы работы позволяет проводить прямое сравнение данных расчетов и наблюдений без привлечения дополнительных гипотез, физических величин и констант.

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ТЕЧЕНИЙ ИМПАКТА СВОБОДНО ПАДАЮЩЕЙ КАПЛИ

Жидкость или газ определяются как сплошная текущая среда с нулевым трением покоя, которая, при наличии свободной поверхности площадью S_b , характеризуется внутренней энергией, для описания которой выбран дифференциал потенциала Гиббса $dG = -s_e dT + VdP + S_b d\sigma + \mu_i dS_i$ [2]. Производные потенциала Гиббса G определяют удельный объем $V = 1/\rho$ и плотность ρ , энтропию s_e , давление P , температуру T , концентрацию S_i i -го растворенного вещества (или взвешенных частиц), химический потенциал μ_i i -ой компоненты раствора, коэффициент поверхностного натяжения σ .

Давление, как и плотность, имеет термодинамический и прямой механический смысл, определяемый фундаментальными уравнениями механики гетерогенных жидкостей. Молекулярный перенос импульса, температуры и вещества характеризуют коэффициенты кинематической ν или динамической μ_i вязкости, температуропроводности κ_T и диффузии κ_S . Среде также отмечают скорости распространения волн (звуковых c_s , электромагнитных c_{em}), параметр переноса зарядов – удельная электропроводность η и коэффициент преломления света n .

Описание процессов отрыва капли, падения в воздушной среде и слияния с покоящейся принимающей жидкостью проводится на основе полной системы уравнений и физически обоснованных граничных условий [1, 2]. В число основных размерных параметров изучаемых течений входят потенциалы Гиббса капли G_d , воздушной среды G_a и принимающей жидкости G_t (индексы обозначают принадлежность параметра), плотности сред $\rho_{d,a,t}$, кинематическая $\nu_{d,a,t}$ и динамическая $\mu_{d,a,t}$ вязкости контактирующих сред; полные σ_d^a , σ_t^a и нормированные на плотность соответствующей жидкости коэффициенты поверхностного натяжения $\gamma_d^a = \sigma_d^a/\rho_d$, $\gamma_t^a = \sigma_t^a/\rho_t$ см³/с²; коэффициент диффузии окрашивающего каплю пигмента в принимающей жидкости κ_d ; эквивалентный диаметр D , площадь поверхности S_σ , объем V , масса M , контактная скорость капли U ; ППЭ $En_\sigma = \sigma S_\sigma$, кинетическая энергия

$En_k = MU^2/2$, мера потенциальной энергии $En_p = MgD$ на масштабе D в гравитационном поле с ускорением свободного падения g .

Полная энергия падающей капли $En_{td} = En_p + En_k + En_\sigma$ складывается из потенциальной энергии En_p , экстенсивной кинетической энергии с дифференциалом $dEn_k = 0,5\rho U^2 dV$, а также ППЭ, распределенной в приповерхностном шаровом слое толщиной порядка размера молекулярного кластера $\delta_\sigma \sim 10^{-6}$ см и массой M_σ . Большая теплоемкость жидкостей позволяет в ряде задач пренебречь температурными эффектами.

Время передачи кинетической энергии En_k и импульса $\mathbf{P}_k = M\mathbf{v}$ капли $\Delta t = D/U$, которое определяется ее диаметром D и контактной скоростью U , составляет несколько миллисекунд и на много порядков превышает время уничтожения свободной поверхности при слиянии жидкостей $\Delta\tau = \delta_\sigma/U \sim 10^{-8}$ с.

Отношения физических величин образуют наборы собственных временных и пространственных масштабов, определяющих требования к методике измерений в части выбора размера области наблюдения течений, пространственного и временного разрешения инструментов. Отношения собственных масштабов задают безразмерные отношения, используемые при описании капельных течений. Традиционный, неполный набор безразмерных параметров включает числа Рейнольдса $Re_d = UD/\nu_d$, Фруда $Fr_d = U^2/gD$, Вебера $We_d = U^2D/\gamma_d^a$, Бонда $Bo = gD^2/\gamma_d^a$, Онезорге $Oh_d = \nu_d/\sqrt{\gamma_d^a D}$, Шмидта $Sc = \nu/\kappa_d$.

Степень выраженности действия быстрых атомно-молекулярных процессов преобразования ППЭ En_σ и передачи кинетической энергии En_k капли характеризуют отношения компонентов энергии $R_{En} = \frac{En_k}{En_\sigma}$ и их плотностей $R_w = \frac{En_k M_\sigma}{En_\sigma M}$ (M_σ – объем приповерхностного шарового слоя толщиной порядка размера молекулярного кластера $\delta_\sigma \sim 10^{-6}$ см). Доля поверхностной энергии в условиях данных опытов меняется в широких пределах. В то же время, плотность поверхностной энергии всегда много больше плотности кинетической энергии в силу малости толщины слоя ее сосредоточения. Влияние инерционных эффектов описывает плотностное отношение $R_\rho = \frac{\rho_t - \rho_d}{\rho_t + \rho_d}$.

Большое число безразмерных параметров задачи отражает сложность пространственно-временной картины течений, эволюционирующей под действием нескольких одновременно протекающих процессов.

Методика экспериментов и обработки данных разрабатывалась с учетом критерия регистрации крупномасштабных компонентов капельных течений – интрузий, каверны, венца, всплеска, капиллярных волн и разрешения тонких компонентов – первичных брызг, шипов и волокон.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для получения более полной информации о динамике и структуре капельных течений, формировании газовых полостей сложной формы, процессах отрыва пузырей и излучения звука, в экспериментах, которые проводятся на стендах Лаборатории механики жидкостей ИПМех РАН [12], проводится высокоскоростная цветная и черно-белая регистрация течений при различных положениях источников света и линии визирования. Фотография стенда представлена на рис. 1.

Капли падают в прозрачный лабораторный бассейн с принимающей жидкостью 1. Блок управления 2 устанавливает задержку запуска регистрации. Оптоволоконный источник света 3 подсвечивает область падения капли. Данные регистрируются фото- или видеокамерой 4.

Матричный LED осветитель 5 создает световой фон. Монитор и компьютер 6 используются для управления экспериментом и сбора данных. Клапан поступления воды 7 управляет работой устройства генерации капель с капилляром 8. Фотодетектор 9 регистрирует пролет капли при пересечении светового луча. Белыми штриховыми линиями отмечены траектория капли и наклонная линия наблюдения регистрирующей аппаратуры.

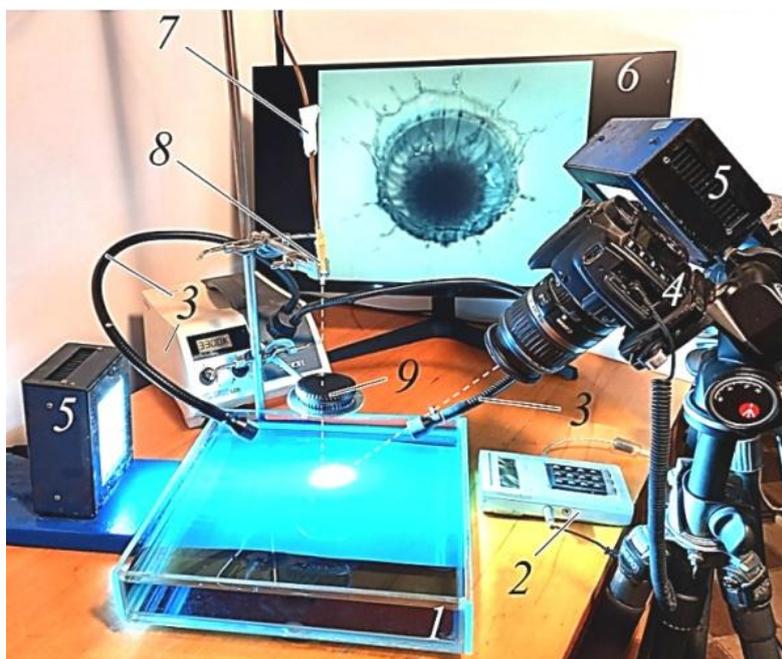


Рис. 1. Фотография экспериментальной установки: 1 – бассейн с принимающей жидкостью, 2 – блок временной задержки, 3 – оптоволоконный источник света с волоконными световодами, 4 – фото- или видеокамера, 5 – матричные светодиодные источники, 6 – монитор и компьютер, 7 – клапан, 8 – дозатор капель, 9 – фотодетектор

Капля, падающая под действием собственного веса из дозатора 8 со сменным капилляром диаметром $0,8 < d_o < 4$ мм с плоским поперечным срезом, падает в лабораторный бассейн 1 размером $10 \times 10 \times 7$ или $30 \times 30 \times 5$ см³, заполненный частично дегазированной водопроводной водой. Изучались картины слияния капель воды; водных растворов ализариновых чернил; растворов электролитов – перманганата калия KMnO_4 , медного CuSO_4 и железного FeSO_4 купороса, а также суспензий наночастиц. Принимающая жидкость, которая подкрашивается пигментом капли, заменялась после каждого опыта.

Область слияния жидкостей освещалась матричными источниками постоянного света Optronis MultiLED со световым потоком 7700 лм, а также оптоволоконными источниками Schott KL2500LCD (мощность 250 Вт, световой поток 1300 лм). Особое внимание уделялось организации освещения, позволяющей исключить затенение исследуемых компонентов или избежать эффектов полного внутреннего отражения, убирающих часть изображения.

В систему регистрации входила видеокамера Optronics CR 300×2 или камера Canon EOS 350D, положение линии визирования которых выбиралось с учетом обеспечения четкости границ регистрируемых тонких компонентов картины течения. В основном реализовывались два направления линии визирования: под нулевым углом к горизонту $\vartheta = 0^\circ$ при регистрации картины течения в вертикальной плоскости или с $\vartheta = 65^\circ - 70^\circ$ при наблюдении свободной поверхности (расстояние от линзы до центра потоков составляло от 12 до 40 см, размеры пикселей в экспериментах варьировались от 10 до 50 мкм). Выдержка выбиралась минимальной для данного уровня пространственного разрешения, размера записываемой области и доступной освещенности.

Сигнал фотодетектора при прохождении капли запускал систему регистрации с выбранной длительностью задержки. Скорость капли оценивалась по ее смещениям на

последних кадрах перед контактом с принимающей жидкостью и длительности задержки сигнала с фотодетектора. Изображение масштабировалось по фотографиям маркера размером от 0,5 до 5,0 мм.

ГРАВИТАЦИОННЫЙ ОТРЫВ КАПЛИ ОТ СРЕЗА КАПИЛЛЯРА

В опытах по изучению динамики и структуры капельных течений используются различные дозирующие устройства, в которых реализуется отрыв капли от наконечника иглы, на которую медленно натекает жидкость, или среза капилляра. Выборки из видеofilьма, иллюстрирующие гравитационный отрыв капли воды от перпендикулярного среза капилляра, представлены на рис. 2.

Натекающая жидкость постепенно формирует утолщенную часть отделяющего объема, связанного с маточной жидкостью, сохраняющейся на срезе капилляра, тонкой стружкой – перетяжкой. На начальной стадии поверхность жидкости всюду гладкая, переходы между маточной жидкостью, перетяжкой и каплей – плавные.

Постепенно форма капли начинает скругляться, а нижняя часть сформированной перемычки, принимающей коническую форму – заостряться, ее окончание утончается. Одновременно начинает нарушаться гладкость поверхности области перехода от перемычки к основной капле – на ней появляются складки. Через $\Delta t = 1$ мс в области контакта утончающегося основания перемычки и отрывающейся капли наблюдается группа сбегających капиллярных волн (рис. 2а). Непосредственно перед отрывом конец перемычки истончается и оказывается связанным с опускающейся каплей тонкой короткой нитью (различимой при большом увеличении изображения).

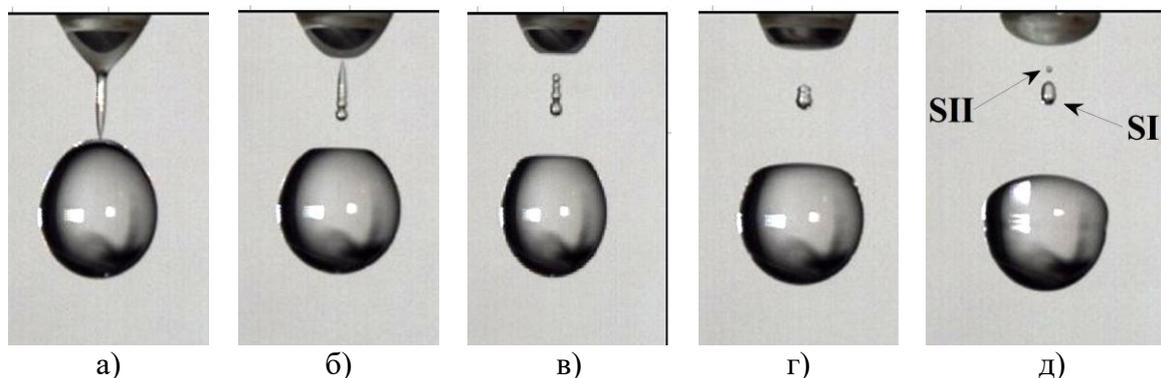


Рис. 2. Отрыв капли воды: а) – отделение от тонкой стружки – перетяжки, б) – отделение перетяжки от маточной жидкости, в) – стягивание перетяжки в четки капелек, г) – формирование первичного и вторичного сателлитов, д) – осцилляции капли и разделение сателлитов (SI – первичный сателлит, SII – мелкий вторичный сателлит)

После отрыва капли нить быстро стягивается в скругляющееся основание перемычки, верх капли уплощается (рис. 2б). Освобожденный от веса капли остаток жидкости скругляется, его нижняя кромка поддегивается вверх. Верхний конец перемычки при этом заостряется, ее боковая поверхность становится волнистой, а нижняя часть стягивается в сферический оголовок. Перед разделением верхняя часть перемычки также истончается в тонкую нить диаметром $d_n = 0,06$ мм и длиной $l_n = 0,1$ мм.

После полного отделения перемычки нижняя кромка маточной жидкости уплощается. На отделившейся перемычке возникает последовательность варикозных возмущений (периодических утолщений с шагом $\Delta h = 0,35$ мм, рис. 2в), которые превращаются в четки из четырех, а через $\Delta t = 0,2$ мс – из двух капелек (рис. 2г). Далее перемычка продолжает стягиваться и превращается в одиночную микрокаплю, сложная форма которой быстро изменяется (рис. 2д).

В динамике отрыва капли воды выделяют две стадии, временные границы которых определяются моментами первого разрыва перемычки и отделения основной капли ($t = 0$), отрыва верхнего конца перемычки от стягивающейся маточной жидкости ($t = 0,6$ мс).

В процессе отрыва капли воды прослеживаются смены плавных процессов быстрыми, в частности – при отделении концов перемычки. Нерегулярные осцилляции размеров свидетельствуют о сложной внутренней динамике всех структурных компонентов течений, формирующихся в маточной жидкости, оторвавшейся капле и сателлите. В ряде случаев интенсивно осциллирующий сателлит SI выбрасывает вверх микросателлит SII (рис. 2д), который долетает до маточной жидкости и сложным образом взаимодействует с ней.

Оторвавшаяся капля и сателлит SI продолжают интенсивно осциллировать в полете. Появляющиеся плоские границы контура капли свидетельствуют о смене выпуклой поверхности на вогнутую. По поверхности капли бегут короткие высокочастотные капиллярные волны малой амплитуды. Переменность формы капли проявляется в изменчивости картины распределения шипов и быстрых вылетающих капелек (брызг) в начальной фазе слияния.

РЕЖИМЫ СЛИЯНИЯ СВОБОДНО ПАДАЮЩЕЙ КАПЛИ С ПОКОЯЩЕЙСЯ ПРИНИМАЮЩЕЙ ЖИДКОСТЬЮ

Использование в опытах капель окрашенной смешивающейся жидкости, увеличение числа независимых осветителей области течения, применение высокоразрешающей цветной фото- и видеорегистрации расширяет информативность получаемых данных и позволяет более полно описывать тонкую структуру течения. Как показали проведенные опыты, структура течения зависит и от традиционных безразмерных параметров – чисел Рейнольдса, Фруда, Вебера, Бонда, Онезорге, и от отношений энергетических и термодинамических параметров, компонентов энергии капли $R_{En}^{k,\sigma}$ и плотностей контактирующих жидкостей числа R_p .

Значение отношения компонентов энергии $R_{En}^{k,\sigma}$ определяет режим течения при слиянии свободно падающей капли с покоящейся принимающей жидкостью [7]. При малых скоростях контакта капли в интрузивном режиме, когда $R_{En}^{k,\sigma} < 1$, при первичном соприкосновении с принимающей жидкостью капля растекается и образует на поверхности круглое пятно. Быстрые радиальные течения выносят из области контакта энергонасыщенные остатки слившихся свободных поверхностей и покрывают контактирующие жидкости общей свободной поверхностью сложной формы. По всей площади пятна контакта сред вещество капли поступает в толщу принимающей жидкости и образует чечевицеобразное вторжение. Вторгшийся объем более плотной жидкости, чем принимающая среда $R_p < 0$, медленно тонет и постепенно преобразуется в погружающееся тороидальное вихревое кольцо [13]. Постепенно погружающееся вихревое кольцо деформируется, из него вытягиваются удлиняющиеся петли, на вершинах которых образуются новые вихревые кольца.

Если плотность капли меньше плотности принимающей жидкости, картина течения существенно меняется. Всплывающая интрузия сдавливает каверну в коническую, с центра основания которой выбрасывается мелкое колечко, содержащее легкую жидкость капли. Колечко, после остановки на уровне нейтральной плавучести, образует выплывающий объем, который постепенно преобразуется в растущее вихревое кольцо [14].

В промежуточном режиме капля может отскочить от свободной поверхности принимающей жидкости, зависнуть на воздушной прослойке, отделяющей каплю от продавленной поверхности, частично слиться с потерей внешней части объема и выбросом остатка в воздушную среду, причем процесс частичного слияния может последовательно повторяться [15].

Быстро падающая капля при $R_{En}^{k,\sigma} > 1$ в импактном режиме формирует каверну, окруженную венцом, и всплеск, визуализированные еще в конце XIX века. Динамика переноса вещества в этом режиме прослежена в [16].

ПЛАВНОЕ ВТЕКАНИЕ ЖИДКОСТИ И ЗАПАЗДЫВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ КАВЕРНЫ В ИНТРУЗИВНОМ РЕЖИМЕ СЛИЯНИЯ ОДИНОЧНОЙ КАПЛИ

В экспериментах по изучению процессов формирования и дальнейшего погружения вихря при слиянии сравнительно медленно падающей капли обычно плотность жидкости капли сравнима, незначительно или существенно превышает плотность принимающей жидкости. При отрицательном значении плотностного отношения $R_p < 0$ однонаправленные действия эффектов инерции и плавучести последовательно ускоряют тонущий объем жидкости, которая преобразуется в вихрь. Кадры из видеофильма картины течения, формирующегося при слиянии капли разбавленного раствора чернил с покоящейся частично дегазированной водопроводной водой при $R_{En}^{k,\sigma} < 1$ в боковой проекции, приведены на рис. 3.

При малой высоте свободного падения (в данном опыте $H = 1$ см) форма оторвавшейся активно меняется. От линии контакта к вершине остатка капли бегут кольцевые капиллярные волны длиной $\lambda_d = 0,7 \dots 0,8$ мм и размахом (удвоенной амплитудой) $2A_d = 0,1 \dots 0,17$ мм, гребням которых на рис. 3а соответствуют тонкие темные полоски.

В интрузивном режиме, быстрые тонкие радиальные течения выносят приповерхностные слои жидкости из области слияния. Контактирующие среды объединяются. Общая свободная поверхность капли и принимающей жидкости, форма которой быстро меняется (рис. 3а-в), длительное время остается выпуклой. Под действием гравитации и стягивающего поверхностного натяжения жидкость капли плавно втекает в принимающую прозрачную среду по всей площади соприкосновения и образует окрашенную интрузию чечевицеобразной формы со скругленным основанием и конической верхней частью.

Капиллярные волны и сопутствующие лигаменты искажают форму остатка капли. В ее верхней части появляется конический выступ высотой $h_d^u = 0,5$ мм и диаметром $d_d^u = 0,7$ мм (рис. 3б). Диаметр и высота окрашенной интрузии постепенно увеличиваются и при $t = 11$ мс составляют $d_{in} = 6$ мм и $h_{in} = 1,9$ мм. Далее быстро растущая каверна продвигается в толщу жидкости и отодвигает интрузию от свободной поверхности окрашенной жидкостью капли. На поверхности остается окрашенный круглый диск переменной толщины. В толще жидкости в теле интрузии начинает формироваться вихревое кольцо с внешним диаметром $d_r = 6,28$ мм (рис. 3в). Тонкая структура формирующегося вихревого течения неоднократно визуализировалась на просвет с использованием подсвечивающих электромагнитных волн в оптическом или рентгеновском диапазоне, а также лазерного «светового ножа». Вследствие разбавления капли вовлекаемой в вихревое течение принимающей жидкости плотность окраски вокруг каверны падает.

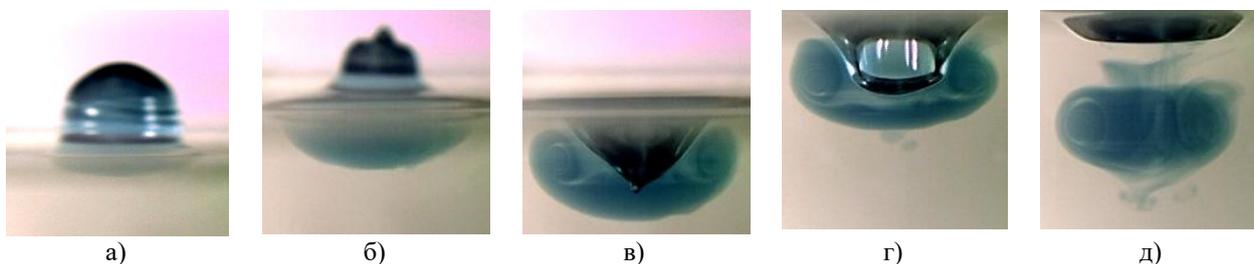


Рис. 3. Видеокадры картины втекания в воду капли водного раствора чернил в боковой проекции (разбавление 1:200, $D = 4,3$ мм, $U = 0,34$ м/с, $E_\sigma = 4$ мкДж, $E_k = 2,24$ мкДж, $Re = 1460$, $R_{En} = 0,56$, $R_p = -0,001$)

Образующаяся с запаздыванием около $\Delta t \sim 10$ мс каверна продвигается в толщу жидкости и отодвигает интрузию от свободной поверхности, на которой остается часть жидкости капли (рис. 3г). В толще жидкости капля формирует вихревое кольцо, которое продолжает погружаться под действием плавучести (рис. 3д).

Наряду с анализом традиционной картины течения в вертикальной плоскости, и научный, и практический интерес представляет изучение картины капельных течений в горизонтальной плоскости. Обычно регистрируется только форма свободной поверхности, однако в прозрачных средах можно проследить структуру течений и на поверхности, и в толще жидкости. При анализе данных наблюдений учитываются эффекты образования каустик, рефракции и дисперсии световых лучей, появление областей полного внутреннего отражения, в которых не наблюдаются некоторые элементы течений в толще жидкости. Выборки из видеогаммы картины слияния капли при наблюдении свободной поверхности под углом 30° к вертикали представлены на рис. 4 (условия опытов такие же, как на рис. 3).

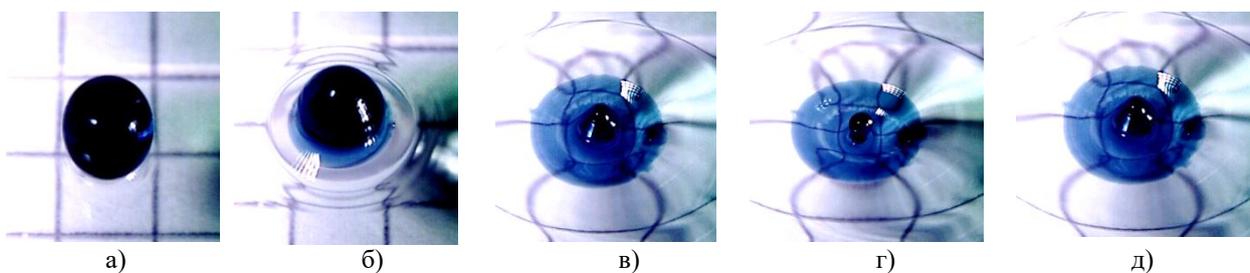


Рис. 4. Видеокдры картины слияния капли водного раствора чернил (разбавление 1:1000, условия опыта приведены на рис. 3) при наблюдении сверху под углом 30° к вертикали

Область слияния на свободной поверхности окружает расширяющийся валик – аналог венца, порождающий кольца расходящихся капиллярных волн. В толще жидкости формируется компактная интрузия, на свободной поверхности образуется тонкое окрашенное кольцо (рис. 4а). Внешняя кромка кольца порождает капиллярные волны (рис. 4б). Под действием сходящихся капиллярных волн и сопутствующих течений вершина остатка капли теряет округлую форму, в ее центральной части появляется конический выступ (рис. 4в). Центр дна каверны начинает быстро проседать.

Вершина остатка капли над быстро движущейся центральной частью поверхности жидкости стягивается в шар, располагающийся над коротким цилиндром на рис. 4г. В центре течения развивается растущий аналог стримера (рис. 4д).

Проведенные опыты показывают, что при малых скоростях контакта, когда кинетическая энергия капли меньше ее поверхностной энергии $En_k < En_\sigma$, вещество капли поступает в толщу жидкости с момента первичного контакта при сохранении выпуклой формы общей свободной поверхности. Каверна – вогнутый участок жидкости с отрицательной кривизной, начинает формироваться с запаздыванием после погружения основной части капли и трансформации ее сферической донной скругленной части в цилиндрический столбик. Пакеты расходящихся капиллярных волн генерируются движущейся кромкой области слияния. Группы сходящихся капиллярных волн вызывают выраженную деформацию вершины остатка втекающей капли, дна каверны и способствуют образованию узкой центральной струйки – скрытого в каверне аналога всплеска.

Чечевицеобразные формы интрузии довольно стабильны, а формы каверны изменчивы и включают традиционные плоские и сферические участки, а также центральные участки цилиндрической формы, которые движутся с различной скоростью.

ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ РЕЖИМ ОТСКОКА И ЗАВИСАНИЯ КАПЛИ НА ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ

Особенности формы головной части падающей капли, которая в момент контакта с принимающей жидкостью может быть выпуклой, вогнутой или ребристой, влияют на скорость вытеснения газовой прослойки в процессе слияния и обосновывают возможность отскока и зависания капли на поверхности принимающей жидкости.

Цветные фотографии и выборки из видеофильмов процессов слияния, зависания и отскока капли позволили выделить три формы взаимодействия: быстрое слияние, полный отскок и частичное слияние с выбросом уменьшенной капли. Режим течения зависит от скорости капли, которая задавалась изменением высоты свободного падения. Немонотонное поведение процесса слияния капли при малых и промежуточных значениях отношения компонентов энергии падающей капли $R_{En}^{k,\sigma}$ обусловлено сложностью многовариантных процессов преобразования ППЭ уничтожаемых свободных поверхностей, которая может переходить в тепло, изменять распределение веществ или формировать тонкие течения [7].

В большинстве опытов регистрируется однотонная картина течения в технике «на просвет». Приводимые на рис. 5 цветные видеокadres позволяют рассмотреть тонкие детали пространственной картины контакта и отскока капли. Форма подлетающей капли со скругленным оголовком и заостренным хвостовиком показана на рис. 5а.

Погружающаяся капля растекается по свободной поверхности и образует тонкое плоское круглое кольцо, которое формируется вокруг границы пятна контакта сливающихся жидкостей (рис. 5б). На поверхности остатка капли наблюдаются короткие капиллярные волны. Втекающая капля образует над поверхностью коническую окрашенную область с шейкой; капиллярные волны длиной $\lambda \sim 0,5$ мм распространяются от перемычки к вершине капли (рис. 5в). По мере погружения капли уменьшается диаметр шейки, и стягивающаяся перемычка (рис. 5г) отсекает часть капли (рис. 5д), которая вылетает в воздух (рис. 5е). Здесь диаметр первой вылетающей капли $D_{1s} = 0,2$ см заметно меньше диаметра первичной капли $D = 0,43$ см. Она поднимается в воздухе на высоту $H_1 = 0,8$ см и затем падает на возмущенную поверхность жидкости под действием тяготения.

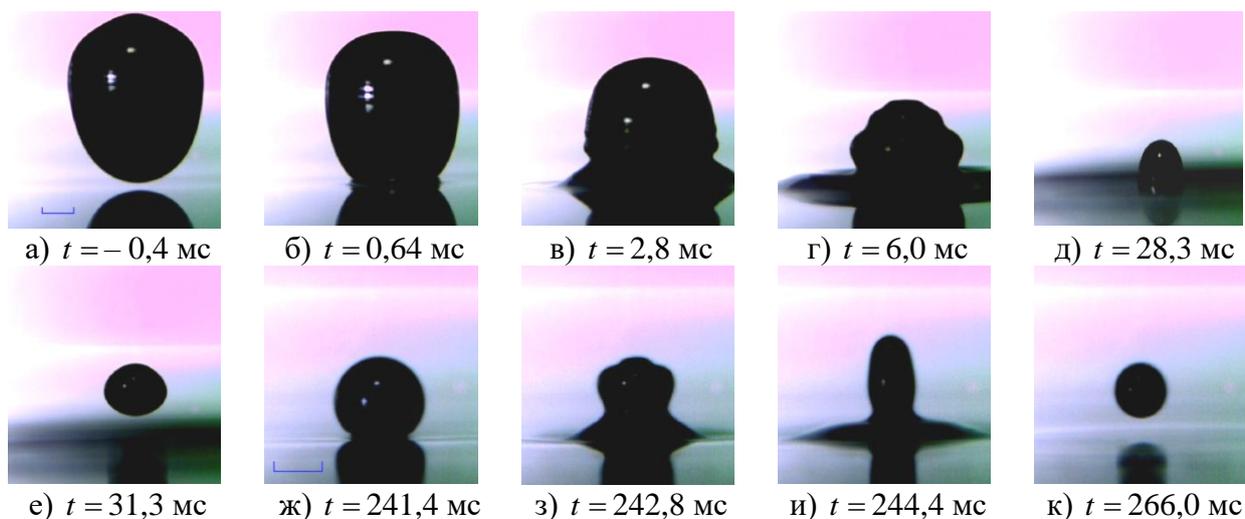


Рис. 5. Первичное слияние и вылет первой выброшенной капли ($D = 0,43$ см, $U = 36$ см/с, длина маркера 1 мм)

Вторая часть рисунка 5ж-к иллюстрирует процесс слияния первой вылетающей капли, за возвращением которой следует образование новой капли меньшего диаметра. «Зависшая» над деформированной поверхностью капля, отделенная от принимающей жидкости тонкой воздушной прослойкой, имеет почти правильную сферическую форму. Капля колеблется и нерегулярно перемещается в горизонтальном направлении («танец капли» на вогнутой поверхности жидкости, рис. 5ж). Как только воздух выдавливается из зазора и жидкости соприкасаются, капля становится частью принимающей среды. Она начинает активно вливаться и растекается с образованием очередного конического постамента (рис. 5з), как и в случае падения первичной капли (рис. 5в).

Со временем высота постамента начинает уменьшаться, диаметр продолжает увеличиваться, остаток капли сжимается и принимает форму вертикально вытянутого цилиндра с закругленной вершиной (рис. 5и). По мере погружения конического постамента

сжимающийся кольцевой перешеек полностью отделяет каплю от целевой жидкости. Выброшенная при $t = 266$ мс капля диаметром $D_2 = 1,1$ мм имеет правильную сферическую форму (рис. 5к). Далее наблюдались как упругий отскок с сохранением размера возвращающейся капельки, так и частичное слияние капли, упавшей на возмущенную поверхность принимающей жидкости, которое сопровождается вылетом новой капельки меньшего размера. Всего в экспериментах наблюдалось до 8 циклов упругого отскока и частичного слияния капли с вылетом уменьшенного остатка.

Периодограмма течения с образованием вторичных капель представлена на рис. 6 (фотографии картины слияния первых двух капель показаны на рис. 5). Соприкосновение быстро падающей колеблющейся капли с принимающей жидкостью сопровождается частичным слиянием. Вылетающая со скоростью $u_1 = 28$ см/с вытянутая вторичная капелька меньшего диаметра совершает затухающие объемные колебания с периодом $T_{s1} = 8$ мс. Достигнув предельной высоты $h_1 = 8$ мм, капелька начинает свободно падать и при $t = 109$ мс возвращается на поверхность принимающей жидкости в центре первичного пятна контакта. Теряющая часть своего объема капелька вновь выбрасывается на высоту $h_2 = 2,4$ мм, с которой она падает на свободную поверхность через $\Delta t = 23$ мс. Капля, «зависающая» на поверхности, совершает небольшие колебания.

Вытеснение газа из разделяющего жидкости промежутка заканчивается при $t = 240$ мс. Капля вновь касается поверхности принимающей жидкости и образует небольшой столбик (вставка II), опирающийся на выпуклую коническую поверхность принимающей жидкости. Охватывающая столбик более узкая перемычка резко стягивается и разрывает его. Остаток капельки вылетает в воздух, а поверхность жидкости прогибается. Далее цикл повторяется: после 20 мс полета капелька возвращается и зависает на поверхности в течение $\Delta t = 47$ мс, затем касается и трансформируется в новый «столбик» III.

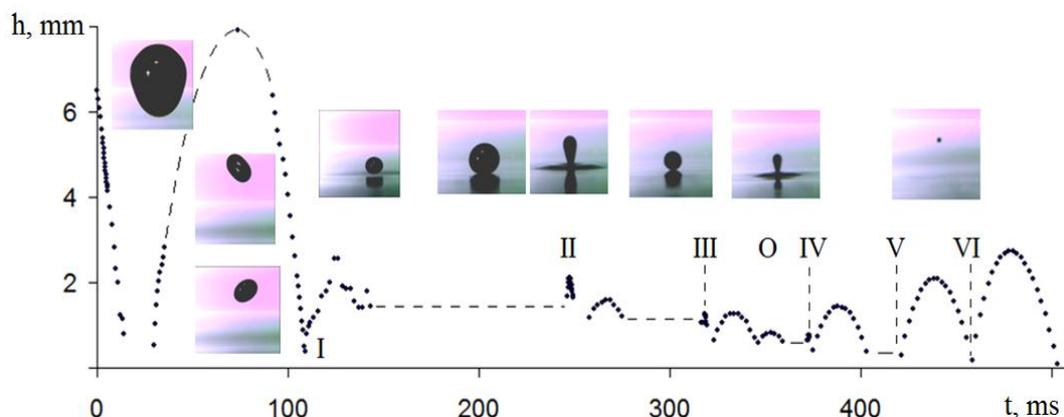


Рис. 6. Периодограмма движения первичной капли и последующих выброшенных капелек с указанием длительности фазы слияния, зависания на принимающей жидкости и полета вторичных капелек: продолжительность участков I – VI – 8,5, 3, 2, 1, 0,5 мс

Здесь на врезке приведены иллюстрирующие увеличенные изображения подлетающей капли и частично трансформировавшейся в «столбик», отделенной от вершины конуса деформированной поверхности стягивающейся перемычкой. После короткого полета капелька возвращается и выбрасывается вновь на меньшую высоту, возвращается, на короткое время «зависает» и вновь повторяет цикл «слияние–разрыв перемычки – вылет» IV. Возвратившаяся капелька снова зависает перед наступлением фазы вылета V. Далее стадия зависания практически исчезает, капелька все меньшего объема передает все большую часть вещества принимающей жидкости за все более короткое время и вылетает на все большую высоту. Уменьшение высоты отрыва капельки отражает деформацию положения свободной поверхности в области наблюдения.

Длительность процесса слияния (интервала передачи вещества – уменьшения объема

капли) и выбрасывания остатка капли последовательно составляет $\Delta t_{co} = 8, 5, 3, 2, 1$ и $0,5$ мс и значительно меньше времени пребывания на поверхности жидкости или в свободном полете, которое составляет $\Delta t_{so} = 100, 40, 12$ и 17 мс.

Траектория вторичных капель вертикальная или наклонная. Наклон траектории случайным образом менялся от номера к номеру цикла и от эксперимента к эксперименту. При каждом контакте первичной и вторичной капель с поверхностью жидкости генерировалась группа кольцевых капиллярных волн.

ИМПАКТНЫЙ РЕЖИМ СЛИЯНИЯ – ФОРМИРОВАНИЕ ПЕЛЕНЫ, ШИПОВ, БРЫЗГ, КАВЕРНЫ, ВЕНЦА И КАПИЛЛЯРНЫХ ВОЛН

Применение цветной высокоскоростной видеорегистрации картины растекания окрашенной капли в чистой воде показывает, что с увеличением контактной скорости, когда кинетическая энергия сливающейся капли начинает заметно превосходить ППЭ $R_{En}^{k,\sigma} \gg 1$, картина течения радикально перестраивается. Капля не втекает в толщу принимающей жидкости как связанный объем, а распадается на отдельные волокна [16]. Волокнистая картина распределения вещества капли в принимающей жидкости наблюдается на всех дальнейших этапах эволюции течения. Математическим аналогом наблюдаемых волокон и высокоградиентных прослоек служат лигаменты [7]. Они описываются сингулярными компонентами полного решения задачи распространения периодических течений на основе линеаризованной и слабо нелинейных версий системы фундаментальных уравнений механики вязкой стратифицированной жидкости. В качестве иллюстрации общих свойств картины течения в импактном режиме на рис. 7 приводятся кадры видеопленки слияния капли разбавленного раствора перманганата калия с водой (здесь наклон линии визирования к горизонту составлял $\vartheta = 65^\circ$, скорость съемки 4000 к/с).

В момент первичного контакта на границе области контакта сливающихся жидкостей происходит уничтожение свободной поверхности, и ППЭ конвертируется в активные формы – возмущения температуры, давления, распределения вещества и тонкие течения. Как следствие, скорость тонких струек (шипов, spikes) и мелких капелек (брызг, sprays), вылетающих с их вершин, которые получили доступную часть ППЭ, преобразовавшейся в кинетическую энергию тонких течений жидкости – ДППЭ – превосходит контактную скорость капли U . Тонкие радиальные шипы – окончания струек толщиной $\delta_s \sim 0,1$ мм и длиной $l_s < 2$ мм, содержащих жидкость, окрашенную пигментом капли, образуют внешнее кольцо течения при $t = 0,25$ мс на рис. 7а.

Шипы контактируют с кромкой тонкой, слабо окрашенной светлой кольцевой пелены, в которой прослеживаются ярко окрашенные струйки толщиной $\delta_l \sim 0,1$ мм. Они образуют регулярную линейчатую структуру, которая неоднократно наблюдалась в опытах с другими веществами [16]. Крупные блики позволяют считать поверхность пелены сплошной сравнительно гладкой поверхностью. Пелена примыкает к более темному кольцу шириной $\delta_{cr} = 0,2$ мм, визуализирующему растущий венец. Ярко окрашенная полоска шириной $\delta_{ca} = 0,18$ мм – растущая каверна, контактирующая с остатком капли диаметром $d_r = 4,5$ мм.

Рассмотрение увеличенного изображения показывает, что выступающие из-под капли окрашенные волокна имеют преимущественно радиальное направление. Они непрерывно продолжаются в каверне, венце и пелене, где составляют ядро тонкой струйки – шипа, выступающего с кромки венца.

Структура течения сохраняется и на следующем кадре (рис. 7б). Размеры выше обозначенных структурных компонентов увеличились и составляют $\delta_s \approx 0,15$ мм и $0,5 < l_s < 2,5$ мм для толщины и длины шипов, $\delta_v = 0,74$ мм для пелены, $\delta_{cr} = 0,4$ мм у венца

и $\delta_{ca} = 0,36$ мм для каверны. Диаметр остатка капли – темной области с неровным краем, к выступам которого примыкают окрашенные волокна, составляет $d_r = 4,26$ мм. Наружная кромка пелены становится более изрезанной, число шипов увеличивается (на первом кадре можно насчитать 17, на втором – 19 зубцов в верхней полуокружности).

Со временем все элементы течения пропорционально увеличиваются. При этом сохраняется четкость картины волокон на дне каверны, которая становится все более плотно окрашенной (рис. 7в). Сохранение непрерывности окрашенных волокон подтверждается неизменностью их углового положения в движущейся области контакта сливающихся жидкостей.

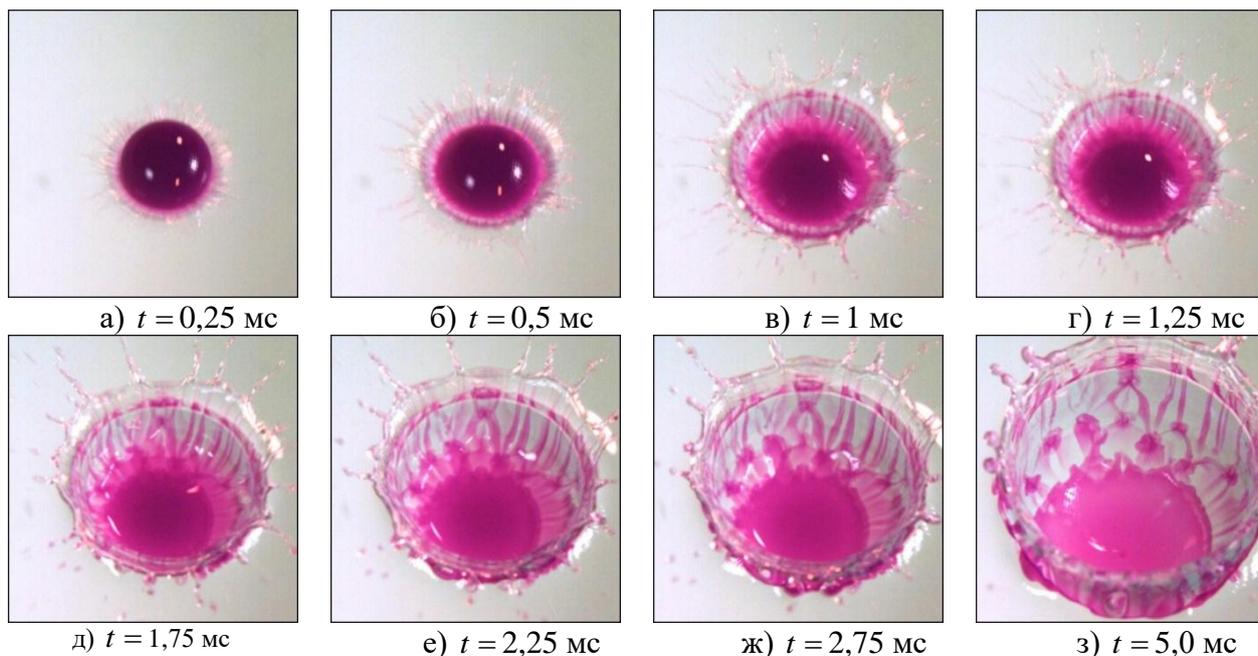


Рис. 7. Эволюция картины распределения вещества сливающейся с водой капли разбавленного водного перманганата калия по поверхности каверны и венца ($\rho_d = 1,001$ г/см³, $\sigma_d^a = 74$ г · с⁻², $\nu_d = 0,01$ см²/с, $D = 4,3$ мм, $U = 3,1$ м/с, $En_c = 4,2$ мкДж, $En_k = 200$ мкДж, $Re = 13300$, $Fr = 230$, $We = 570$, $Bo = 2,5$, $Oh = 0,0018$, $R_p = - 0,0005$, $R_{En}^{k,\sigma} = 48$)

Линейчатая структура распределения окрашенных волокон на боковых поверхностях каверны и венца становится более выраженной по мере увеличения их размеров (рис. 7г). При этом углубляются провалы в контуре кромки венца, уменьшается скорость окрашенных струек, шипы распадаются на последовательности отдельных капелек, размеры которых растут со временем (рис. 7е). Под окрашенным остатком капли на дне каверны просматривается сетка, состоящая из отдельных волокон. Неровная граница центрального пятна $d_r = 4,6$ мм несколько сдвигается к центру течения вследствие изменения формы дна каверны. Постепенно волокна начинают утолщаться и терять свою линейчатую форму в результате непропорционального изменения размеров отдельных компонентов течения – высоты венца, глубины и формы каверны (рис. 7ж).

С углублением каверны и расширением венца падает контрастность волокон, ширина которых также увеличивается (рис. 7з). Излом в угловом положении волокон указывает на резкое изменение наклона стенок каверны, на дне которой в диффузно окрашенном слое прослеживаются контуры формирующейся сетчатой структуры волокон. В остатке капли выделен плотно окрашенный центр и диффузная внешняя часть, к выступам границы которой подходят волокна, продолжения которых прослеживаются на стенках каверны, венца, остатках пелены, шипах и вылетающих брызгах. Внешняя часть боковой стенки каверны, видимая в нижней части рисунка, теряет свою гладкость. На ней начинают выпучиваться

окончания струек, искажающих форму дна каверны под узлами сетки волокон. В целом картина распределения волокон перестраивается, ее элементы укрупняются.

Далее происходят качественные изменения в структуре распределения вещества капли. На дне каверны вещество капли продолжает перетекать вдоль волокон и собираться под узлами сетки в отдельных пятнах, распределение которых имеет выраженную зональную структуру. Собравшаяся в узлах решетки жидкость капли продавливает дно и стенки каверны и внедряется в толщу принимающей жидкости в форме вихорьков на коротких ножках, которые постепенно преобразуются в волокнистые петли при схлопывании каверны.

Особенности процесса переноса вещества капли в толщу жидкости в импактном режиме слияния поясняют выборки из видеограммы картины течения в вертикальной плоскости, приведенные на рис. 8. На начальной стадии слияния капли плоское дно каверны пронизывают тонкие волокна, разделенные прослойками принимающей жидкости.

Каверна быстро углубляется, и при $t = 0,5$ мс сквозь окрашенную стенку начинает просматриваться газовая полость шириной $d_a = 3,3$ мм и глубиной $h_a = 0,25$ мм на рис. 8а. Полная глубина каверны составляет $h_c = 0,55$ мм. Рост размеров примыкающей ко дну каверны волокнистой структуры – основы промежуточного слоя, замедляется. При $t = 0,5$ мс его ширина равна $d_m = 4$ мм и высота $\delta_m = 0,42$ мм. Размеры всех структурных компонентов быстро увеличиваются: диаметр растущей каверны $d_c = 6,4$ мм, глубина $h_c = 0,52$ мм, размеры газовой части каверны $d_a = 6$ мм и высота $h_a = 0,25$ мм. Размеры волокнистого слоя $d_m = 4,15$ мм и высота $\delta_m = 0,6$ мм.

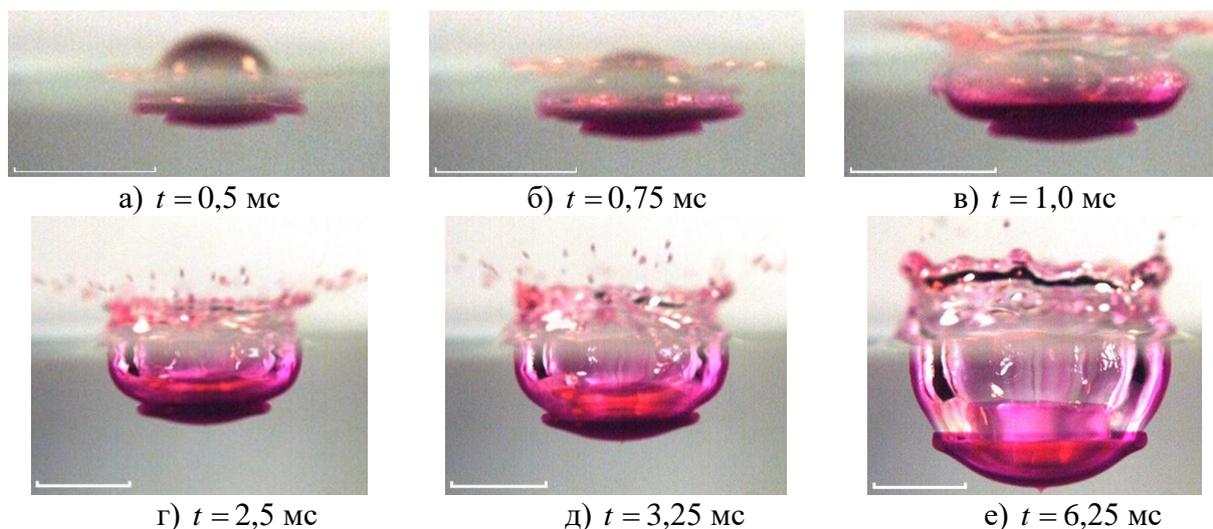


Рис. 8. Вид сбоку на картину течения при слиянии капли водного раствора $KMnO_4$ с водой (длина метки 5 мм, параметры опытов указаны на рис. 7)

Все традиционные компоненты течения – каверна, растущий венец с шипами и облаком брызг, представлены на рис. 8в. Вся окрашенная жидкостью капли область шириной $d_s = 7,83$ мм приподнимается над поверхностью жидкости на высоту $\Delta h_s = 0,3$ мм (рис. 8в). Диаметр растущей каверны $d_c = 6,65$ мм, глубина $h_c = 0,52$ мм, размеры газовой части каверны $d_a = 6,1$ мм и высота $h_a = 0,25$ мм. Волокнистый слой структурно отделяется от каверны, здесь его диаметр $d_m = 4,57$ мм и высота $\delta_m = 0,75$ мм.

На боковых стенках каверны диаметром $d_c = 10,9$ мм и глубиной $h_c = 3,53$ мм, дно которой из плоского постепенно деформируется в выпуклое, появляются элементы вертикальных волокон при $t = 2,5$ мс на рис. 8г. Однородный промежуточный слой диаметром $d_m = 11,2$ мм

и высотой $\delta_m = 0,5$ мм образует структурно выделенный выпуклый диск со скругленными кромками под дном каверны. Стенки растущего венца начинают покрываться капиллярными волнами. Брызги вылетают под все большими углами к горизонту.

Дно быстро углубляющейся каверны диаметром $d_c = 9,6$ мм и глубиной $h_c = 2,9$ мм покрывает окрашенный слой высотой $h_l = 1,4$ мм (рис. 8д). Растущая каверна начинает перемещать, растягивать и истончать все еще выделенный промежуточный слой диаметром $d_m = 6,9$ мм и высотой $h_m = 0,77$ мм. Вся морщинистая поверхность венца покрыта спадающими капиллярными волнами. Число брызг, вылетающих преимущественно в вертикальном направлении, резко падает.

В раскраске каверны диаметром $d_c = 13,1$ мм и глубиной $h_c = 7,36$ мм остается выраженным слой на внутренней поверхности высотой $h_l = 2,68$ мм при $t = 6,25$ мс с ровным внешним краем. Остаток промежуточного слоя диаметром $d_m = 11,2$ мм и высотой $\delta_m = 0,5$ мм покрывает ровным слоем все дно каверны. Верхний край спадающего венца начинает утолщаться. Над ним наблюдаются редкие относительно крупные капельки. На боковой поверхности каверны сохраняется система вертикальных волокон – следы тонких быстрых струек, формировавших шипы на кромке пелены, а после ее стягивания – на зубцах венца.

Сложное течение в области контакта сливающихся жидкостей включает тонкие плоские струйки, бегущие по дну каверны к шипам на кромке венца, и еще более тонкие игольчатые волокна, пронизывающие дно каверны, которые формируют промежуточный слой. На начальном этапе поверхность раздела жидкостей попеременно проходит то по вершинам волокон с пигментом капли, то «перепрыгивает» на вершины прослойки принимающей жидкости, разделяющих окрашенные волокна. Т.е. на одних участках она проходит по внешней границе волокнистого промежуточного слоя, а на соседних – по внутренней. Качественно можно считать, что в нижней части растущей каверны граница области слияния имеет сложную трехмерную кусочно-гладкую форму.

Эволюция формы дна каверны при слиянии более легкой капли воды с 20% раствором роданида аммония ($R_p = 0,03 > 0$) представлена на рис. 9.

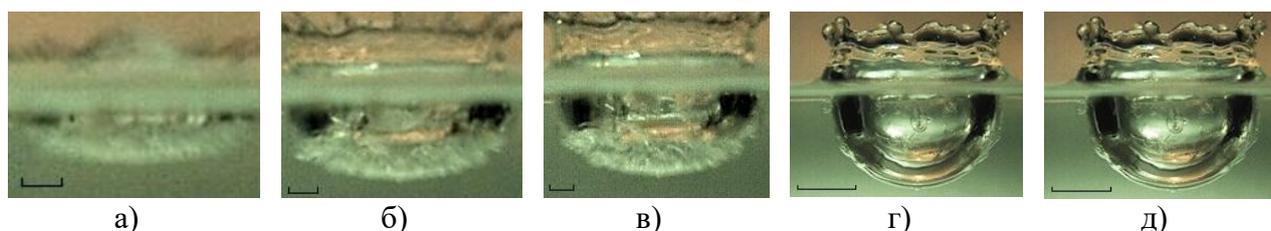


Рис. 9. Эволюция волокнистой структуры промежуточного слоя в начале процесса слияния капли воды с 20% раствором роданида аммония ($D = 0,43$ см, $U = 3,1$ м/с, $E_k = 200$ мкДж, $E_\sigma = 4,2$ мкДж, $Re = 13300$, $We = 570$, $Fr = 228$, $Bo = 2,5$, $Oh = 0,0018$, $Re_n = 48$, $W_R = 1,7 \cdot 10^{-3}$, $R_p = 0,03$, скорость съемки 4000 к/с)

Первичный контакт капли сопровождается образованием выпуклой неоднородной полоски длиной $d_w = 4,58$ мм и высотой $h_w = 0,58$ мм – размытого изображения области вторжения вещества капли в принимающую жидкость (рис. 9а). Шероховатости границы полоски образованы отдельными волокнами и их группами. Контрастность полоски объясняется большими градиентами коэффициента преломления сред на границах волокон и всей области вторжения жидкости капли в принимающем растворе роданида аммония.

Выборки из видеофильма, иллюстрирующие картину переноса окрашенной жидкости с поверхности каверны в толщу принимающей жидкости, приведены на рис. 10. В процессе роста каверны волокна, образовавшиеся на ее поверхности, начинают стягиваться в компактные пятна. При этом стенка каверны теряет гладкость, на отдельных окрашенных

участках образуются выступы и мелкие вихри диаметром $0,6 < d_r < 1,7$ мм (рис. 10а, $t = 8$ мс). Остаток венца покрыт короткими капиллярными волнами длиной $\lambda = 0,76$ мм. С заостренных вершин зубцов вылетают отдельные капельки, размер которых со временем растет.

По мере роста каверны краска перераспределяется, на стенках каверны появляются вихорьки – кольца в центре изображения и полные образования на краях каверны (рис. 10б, $t = 20$ мс).

С началом фазы стягивания (коллапса), когда поверхность каверны покрывается большими капиллярными волнами, приграничные течения вытягивают неоднородности стенки в наклонные петли 1, 2 (наиболее длинные 1 – в приповерхностном слое). Одновременно вниз растет центральная струйка 3 – след первичного контакта капли с принимающей жидкостью – области с максимальной эффективностью конверсии ППЭ (рис. 10в, $t = 37,5$ мс). Картина теней и каустик визуализирует кольцевые волны с острыми гребнями и глубокими впадинам.

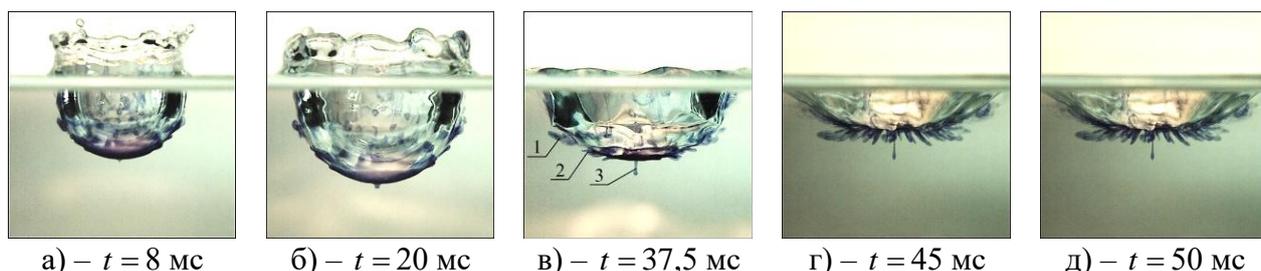


Рис. 10. Эволюция вихревых петель импакта капли разбавленных ализариновых чернил (разведение 1:200) в воде: $D = 0,43$ см, $U = 3,1$ м/с, $Re = 13300$, $We = 570$, $Fr = 228$, $Bo = 2,5$, $Oh = 0,0018$, $E_k = 200$ мкДж, $E_\sigma = 4,2$ мкДж

С уменьшением глубины каверны плоскости петель медленно отклоняются к центру течения. Число петель растет (рис. 10г, $t = 45$ мс), их концы движутся по сложным траекториям. Длины петель достигают максимальных значений к началу формирования всплеска (рис. 10д, $t = 50$ мс). В каверне выражены вертикальные деформации с острыми гребнями и плавными впадинами, сменившие горизонтальные кольцевые волны при $t = 37,5$ мс (рис. 10в). При этом центральный оголовок отрывается от поддерживающей струйки и образует колечко ($d_r = 1,6$ мм) с ярко окрашенным контуром.

Для проверки структурной устойчивости процесса образования петель в течениях импакта капли визуализирована картина падения капли более легкой жидкости – чистой воды, в раствор роданида аммония ($R_p = 0,023$). Выборки из видеogramмы картины течения приведены на рис. 11. Начальные кадры процесса слияния здесь не приводятся, поскольку картина течения практически не отличается приведенной на рис. 10.

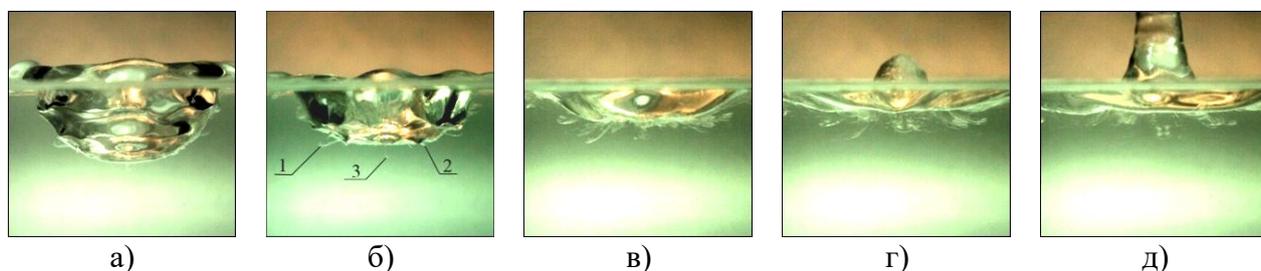


Рис. 11. Формирование и эволюция наклонных петель при слиянии капли воды с раствором роданида аммония: а – д) – $t = 36, 41, 47, 53, 65$ мс

В фазе оседания зубцы на кромке венца сглаживаются, по стенкам на дно каверны сбегает капиллярные волны (рис. 11а). Различие деталей геометрии внутренней стенки свидетельствует об отсутствии аксиальной симметрии в структуре трехмерных волновых полей. Усложнение поля капиллярных волн с гладкими впадинами и острыми гребнями

проявляется при $t = 41$ мс (рис. 11б). По мере развития коллапса впадины трехмерных капиллярных волн на стенке каверны растягиваются, а гребни сжимаются вплоть до образования заострений (рис. 11б). При этом все дно каверны покрывается короткими волокнами, длина и число которых растут по мере сжатия каверны.

Наиболее длинные петли наблюдаются в фазе роста всплеска, вершина которого покрыта тонкими впадинами с заостренными стенками (рис. 11д). Сходящееся течение частично вытягивает сокращающиеся волокна в поверхностный слой к основанию растущего всплеска. Факт образования петель при падении капли и большей (рис. 10д), и меньшей (рис. 11) плотности, чем у принимающей жидкости, указывает на определяющее влияние конверсии ППЭ на формирование тонких течений.

Эволюция картины течения с химическими реакциями при слиянии растворов с высокой концентрацией реагирующих веществ (хлорного железа 16%, роданида аммония 20%) показана на рис. 12. В фазе роста каверны все компоненты течения: венец, вылетающие капли, каверна и мелкие вихорьки у ее стенки ярко и неравномерно окрашены (рис. 12а).

На фоне диффузной окраски всей области реакции выделяются ярко окрашенные волокна и расположенные ярусами вихорьки (связанные по вертикали тонкими волокнами, образующие ячейки с шагом $1,2 < \Delta l_c < 2,2$ мм). Центральный выступ на дне каверны – след первичного контакта капли с принимающей жидкостью – области с максимальным значением величины преобразованной ППЭ.

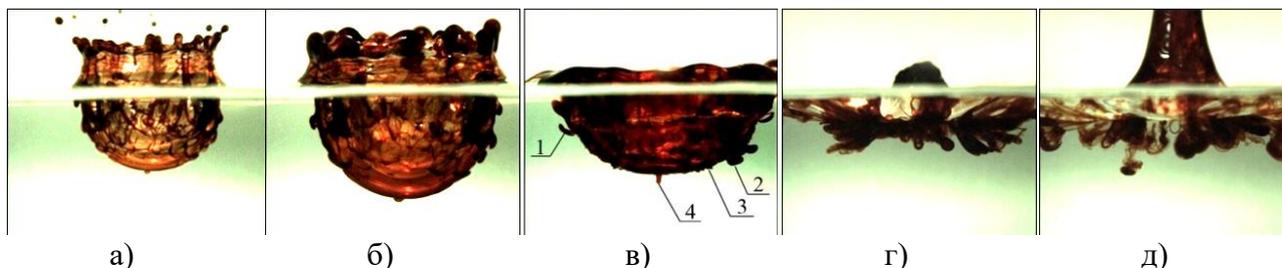


Рис. 12. Эволюция картины течения при слиянии капли 16% раствора хлорного железа с 20% раствором роданида аммония: а – д) – $t = 7,0, 18, 36, 52, 80$ мс

По мере увеличения толщины слоя прореагировавших веществ плотность окраски повышается (рис. 12б) с сохранением сетки с вертикальными и наклонными волокнами. В фазе коллапса дно каверны покрывается семейством локальных выступов. Яркие волокна визуализируют аксиальные капиллярные волны на стенке венца. Неравномерная окраска венца указывает на сложную структуру распределения продуктов реакции (рис. 12в).

В остатке каверны на рис. 12г продукты реакции образуют плотные окрашенные участки шириной $1,3 < \Delta l_\phi < 3,6$ мм, разделенные просветами. Ко дну каверны примыкает система плотно окрашенных полос. Оголовок растущего всплеска покрыт мелкими ямками с острыми стенками. Прозрачное основание всплеска при $t = 52$ мс над поверхностью жидкости сменяется ярко окрашенным оголовком (рис. 12д). Со временем равномерно окрашенные ленты под каверной распадаются на отдельные тонкие волокна, образующие вытянутые и круговые петли. Выступы на стенке каверны (при $t = 36$ мс) трансформируются в мелкие кольцевые вихри, движущиеся вглубь жидкости ($t = 80$ мс). Прореагировавшее вещество в вихрях также распределено в форме тонких окрашенных волокон.

Общая структура течения сохраняется при слиянии капли угольной суспензии с водопроводной водой (выборки из видеограммы приведены на рис. 13). Сливающаяся в импактном режиме капля распадается на отдельные волокна, захватывающие частицы угля.

Волокна образуют ретикулярную формацию, в основном состоящую из треугольных и четырехугольных ячеек. Частицы угля практически отсутствуют между волокнами. Размеры ячеек увеличиваются по мере развития каверны и венца, однако общая структура течения сохраняется (рис. 13 а-г). Во время формирования всплеска ячейки трансформируются в вытянутые петли (рис. 13 д). В распределении частиц выделены и радиальные, и зональные границы.

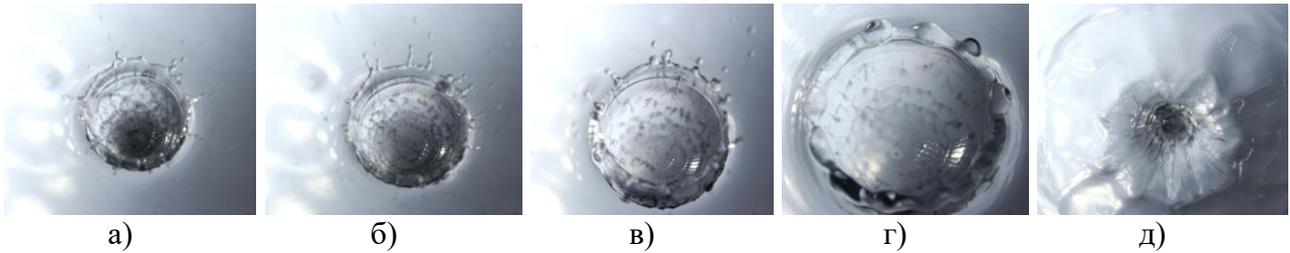


Рис. 13. Эволюция распределения вещества капли суспензии угольной пыли в воде, падающей в бассейн с водой

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В отсутствие полного математического описания капельных течений, интерес представляет обсуждение физической природы наблюдаемых структур распределения вещества на основе анализа общих свойств системы фундаментальных уравнений с физически обоснованными граничными условиями [7]. Течение определяется как перенос независимых физических величин – вещества, импульса и энергии с учетом всех механизмов переноса и трансформации энергии.

Анизотропия атомно-молекулярных взаимодействий вблизи контактной поверхности сред создает избыток энергии, включающий доступную потенциальную поверхностную энергию, химическую и другие виды внутренней энергии. ППЭ может трансформироваться в механическую энергию тонких течений жидкости – лигаментов, а также работу по созданию новой свободной поверхности. Изменение внутренней энергии также приводит к перераспределению и разделению веществ, обеспечивает протекание химических реакций, меняющих состав жидкостей.

Наибольшие изменения атомно-молекулярного строения вещества зарегистрированы непосредственно на границе жидкость – газ, где молекулы могут распадаться на ионные кластеры с формированием поверхностного заряда. Плотность, диэлектрическая проницаемость, дипольный момент в толще жидкости и в структурно выделенном поверхностном слое толщиной в несколько молекулярных размеров $\delta_s \sim 10^{-7}$ заметно отличаются.

Анизотропия атомно-молекулярного строения вещества в приповерхностном слое толщиной в несколько молекулярных размеров $\delta_s \sim 10^{-6}$ [2], примыкающем к контактной поверхности капельных жидкостей, характеризуется поверхностным давлением и дополнительной внутренней энергией.

При слиянии подлетающей капли с принимающей жидкостью со скоростью $U \sim 1$ м/с границы уничтожаются за время порядка $\tau_s \sim 10^{-10}$ с, а приповерхностные слои сливаются за время порядка $\tau_\sigma \sim 10^{-8}$ с. При уничтожении свободной поверхности ППЭ преобразуется в возмущения температуры, давления и энергию механического движения. Одновременно в жидкость передается и часть кинетической энергии капли, величина которой заметно меньше ППЭ в приповерхностном слое.

Освободившая при слиянии жидкостей энергия остается в тонком двойном энергонасыщенном слое (ДЭНС) толщиной порядка δ_σ см, который образуется за время τ_σ по мере продвижения внешней границы области слияния приповерхностных слоев жидкостей вдоль свободной поверхности принимающей жидкости. При этом часть ППЭ расходуется на формирование быстрого тонкого течения объединенного слоя начальной толщиной порядка δ_σ , содержащего уничтоженные части свободной поверхности слившейся капли и принимающей жидкости.

При первичном контакте вершины капли вылетающий двойной слой формирует тонкую плену IV, которая экспериментально зарегистрирована в ряде опытов. По мере погружения

все большая часть капли вливается в принимающую жидкость и передает все большую часть кинетической энергии, пропорционально перешедшей массе. Сценарий дальнейшего развития течения зависит от скорости капли.

При малых скоростях в момент первичного контакта жидкости в процессе слияния тонкий поверхностный слой отщепляется. Радиально растекающийся лигамент образует кольцо окрашенной жидкости, внутри которого капля перетекает в толщу принимающей жидкости, где формирует интрузию.

При большой скорости капли отщепляется более толстый слой жидкости, при этом стенка каверны утолщается. Дальнейшее погружение капли инициирует процессы формирования тонкой пелены, на внешней кромке которой появляются тонкие шипы. С вершин шипов вылетают мелкие капельки (брызги). Здесь остаток капли и принимающую жидкость разделяет тонкий быстро движущийся энергонасыщенный слой, сменивший поверхность контакта сред. Жидкость внутри него распадается на отдельные относительно медленно и быстро движущиеся струйки, покрывающие дно и стенки каверны. Струйки деформируют поверхность жидкости и формируют восходящий кольцевой венец, который на начальном этапе слияния переходит в тонкую пелену. Более быстрые окрашенные струйки, формирующие полосчатые структуры на стенках венца, создают на его верхней кромке зубцы с тонкими шипами на вершине. С кончиков зубцов вылетают капельки (брызги). Структура течения в импактном режиме сохраняется при протекании химических реакций и при слиянии суспензий с твердыми частицами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Усовершенствованная методика цветного наблюдения течений прозрачных сред позволяет одновременно регистрировать форму свободной поверхности и тонкую структуру картины переноса вещества свободно падающей капли в покоящейся жидкости. Эволюция картин капельных течений прослежена в широком диапазоне определяющих размерных и безразмерных параметров.

При малых скоростях капли, когда ППЭ превышает кинетическую энергию капли, в жидкости образуется поверхностный лигамент и интрузия в толще, трансформирующаяся в кольцевой вихрь.

Когда значения компонентов энергии капли сравнимы, капля может отскочить, зависнуть или частично слиться с принимающей жидкостью с выбросом остатка в воздушную среду.

При больших контактных скоростях, когда кинетическая энергия капли много больше ППЭ, каверна начинает формироваться с момента первичного контакта. В области контакта сред возникают семейства лигаментов – быстрые струйки. Часть лигаментов растекается в тонком слое на дне каверны при слиянии чистых жидкостей, растворов, суспензий химически нейтральных и реагирующих сред. Другая группа лигаментов пронизывает дно каверны. Волокнистые следы струек образуют линейчатые и сетчатые структуры на поверхности жидкости. Непрерывно перестраивающаяся волокнистая картина распределения вещества длительное время сохраняется в толще принимающей жидкости и постепенно сглаживается процессами молекулярной диффузии.

Система фундаментальных уравнений механики гетерогенных жидкостей с уравнениями состояния для потенциала Гиббса и плотности, учитывающая основные макроскопические и микроскопические (диссипативный и конверсионный) механизмы переноса энергии, является надежной научной основой методики эксперимента и анализа его результатов.

Эксперименты выполнены на стендах УИУ “ТФК ИПМех РАН”. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Госзадания, номер госрегистрации: 124012500442-3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986.
2. Chashechkin Y.D. Foundations of engineering mathematics applied for fluid flows // Axioms. 2021. V. 10. Iss.4. 286.
3. Harvey A.H., Hrubý J., Meier K. Improved and always improving: reference formulations for thermophysical properties of water // J. of Phys. and Chem. Ref. Data. 2023. V.52. P. 011501.
4. Эйзенберг Д., Кауцман В. Структура и свойства воды. Л-д: Гидрометеиздат. 1975. 280 с.
5. Маленков Г.Г. Структура и динамика жидкой воды // Журнал структурной химии. 2006. Т. 47. Приложение. с. S5-S35.
6. Li E. Q., Thoraval M.-J., Marston J. O., Thoroddsen S. T. Early azimuthal instability during drop impact // J. Fluid Mech. 2018. Vol. 848. p. 821-835.
7. Чашечкин Ю.Д. Закономерности распределения вещества свободно падающей окрашенной капли в прозрачной принимающей жидкости (обзор) // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2025. №1. С. 34–76.
8. Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю., Хайирбеков Ш. Начальный этап слияния составной капли в импактном режиме // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2024. № 2. С.35-51.
9. Chashechkin Yu.D. Singularly perturbed components of flows – linear precursors of shock waves // Math. Model. Nat. Phenom. 2018. Vol. 13. No. 2. P. 1-29.
10. Chashechkin Yuli D. Conventional partial and new complete solutions of the fundamental equations of fluid mechanics in the problem of periodic internal waves with accompanying ligaments generation // Mathematics. 2021. V. 9(6). No. 586.
11. Чашечкин Ю.Д. Эволюция тонкоструктурного распределение вещества свободно падающей капли в смешивающихся жидкостях // Изв. РАН. Физ. атм. океана. 2019. Т. 55. № 3. С. 67-77.
12. УИУ “ГФК ИПМех РАН”: Гидрофизический комплекс для моделирования гидродинамических процессов в окружающей среде и их воздействия на подводные технические объекты. Сайт: <http://www.ipmnet.ru/uniquequip/gfk/#equip>.
13. Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю. Задержка формирования каверны в интрузивном режиме слияния свободно падающей капли с принимающей жидкостью // Доклады РАН. 2021. том 496, с. 34–39.
14. Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю. Погружающийся и всплывающий вихрь в картине плавного втекания свободно падающей капли этанола в воду // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2024. № 6. С. 62-81.
15. Chashechkin Yu. D., Pinykh A.Yu. Complete Coalescence, Partial Bounce and Rebound: Different Regimes Resulting from the Interaction of a Free Falling Drop with a Target Fluid // Fluid Dynamics & Material Processing (FDMP). 2020. V. 16, No. 4, pp. 801-811.
16. Chashechkin Yuli D., Pinykh Andrey Yu. Fine Flow Structure at the Miscible Fluids Contact Domain Boundary in the Impact Mode of Free-Falling Drop Coalescence // Fluids. 2023. V. 8(10). P. 269.
17. Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю. Формирование системы наклонных петель в течениях импакта капли // Доклады. Физика, технические науки. 2021. Т. 499. С. 39-48.
18. Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю. Визуализация областей контакта сред в течениях импакта капли с химическими реакциями // Доклады РАН. Физика, технические науки. 2021. Т. 500. С. 39–47.
19. Pinykh A.Y. Spreading of a Multicomponent Drop in Water: Solutions and Suspensions // Fluid Dynamics & Materials Processing. 2020. V. 16(4), P. 723-735.

Chashechkin Yu.D.

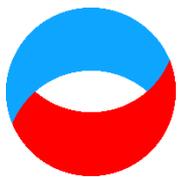
*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Russia,
119526, Moscow, Prospekt Vernadskogo 101/1, E-mail:yulidch@gmail.com*

COALESCENCE PATTERNS OF HOMOGENEOUS DROPS OF SOLUTIONS AND SUSPENSIONS OF CHEMICALLY NEUTRAL AND REACTING MEDIA

ABSTRACT

The evolution of the fine structure of the momentum, substance and energy transfer pattern at a freely falling drop of pure liquid, a homogeneous solution and suspensions of nanoparticles coalescence with a stationary target liquid was traced. A system of fundamental equations of heterogeneous liquids and gases mechanics, including the equations of state for the Gibbs potential and density was selected as the experiments methodology scientific basis. High-speed video filming with multi-point illumination allowed identifying several flow regimes, the structure of which is determined by the ratio of the components of the drop total energy. At a slow contact velocity, when the drop kinetic energy is less than the potential surface energy (PSE), in the intrusive regime, the drop smoothly inflows into the thickness of the liquid and transforms into a vortex ring. In the intermediate regime, the drop hangs on the surface and partially coalesces, throwing the remainder into the air. In the impact regime, the drop loses continuity and disintegrates into separate jets flowing along the contact surface and piercing the bottom of the cavity. The jets leave behind colored fibers that form linear and reticular structures. The coalescence of chemically reacting fluids liquids and nanoparticle suspensions is discussed as well.

**LIQUID, DROP, ENERGY, STRUCTURE, HIGH-RESOLUTION VISUALIZATION,
LIGAMENTS, WAVES**



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 551.468

Сергеев Д.А., Вдовин М.И., Краев И.М., Зотова А.Н., Ермакова О.С., Троицкая Ю.И.

*ИПФ РАН, Россия,
603950, Нижний Новгород, Ульянова ул. 46, E-mail: sergeev4758@gmail.com*

**ДЕТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ
СОБЫТИЙ ФРАГМЕНТАЦИЙ ТИПА ПАРАШЮТ ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ
ПРИ ЛАБОРАТОРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ
МОРСКОГО АЭРОЗОЛЯ**

АННОТАЦИЯ

В настоящей работе представлены результаты детальных исследований процесса фрагментации по типу парашют на взволнованной водной поверхности, обдуваемой воздушным потоком, в рамках моделирования взаимодействия атмосферы и океана. Выполнялась скоростная съёмка взволнованной поверхности в широком диапазоне условий в том числе при обрушении волн и сильных ветрах. Предложена уточненная классификация источников возникновения парашютов. Продемонстрировано, что парашюты могут раздуваться непосредственно из крупных капель в воздушном потоке. Вклад парашютов, образующихся подобным образом, мал при слабых ветрах, однако существенен при высоких скоростях ветра. Также растёт эффективность и механизма генерации брызг за счет обратного падения капель. В свою очередь вклад от возмущений, вызванных всплывающими пузырьками, наоборот уменьшается с усилением ветра. Это может быть связано с тем, что размеры пузырьков уменьшаются с увеличением скорости ветра, и из них не образуются парашюты. Продемонстрировано, что суммарный вклад всех трех перечисленных источников практически совпадает, с вкладом ранее изученного классического источника возникновения парашютов - нелинейно развивающегося мелкомасштабного возмущения на поверхности. В связи с этим их также следует учитывать при разработке функции генерации брызг за счет явления фрагментации по типу парашют.

**КАПЛИ, ФРАГМЕНТАЦИИ ТИПА ПАРАШЮТ, ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ,
ТЕНЕВОЙ МЕТОД, ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ ВИДЕОСЪЕМКА**

ВВЕДЕНИЕ

Режим дробления и фрагментации небольших объемов жидкости на мелкие капли в газовых потоках типа bag-breakup был известен и описан в ряде экспериментальных исследований уже достаточно давно (см. обзор [1]). Так в [2, 3] были приведены результаты исследований дробления крупных капель, в которых наблюдался bag breakup режим, в том числе съемки с высоким пространственным и временным разрешением (см. рис. 1а). А в работе [4] было показано, что аналогичный режим может при определенных условиях наблюдаться при фрагментации импактной жидкой струи в поперечном потоке газа (см. рис. 1б).

Недавние исследования показали, что режимы фрагментации типа bag breakup также реализуются в условиях обдува планарной свободной поверхности слоя жидкости в широком

диапазоне условий для многофазных процессов из весьма разных областей. Так, фрагментации bag breakup служат источником выноса дисперсной фазы с поверхности тонких слоев жидкости, обдуваемых потоками газа в трубах [5]. Затравками для их образования зачастую служат волны быстрой ряби на поверхности жидкости [6]. В свою очередь, как было показано в [7], в лабораторных экспериментах на ветро-волновых каналах по моделированию взаимодействия атмосферы и океана, эти явления, возникающие на обрушающихся гребнях длинных волн, являются доминирующим источником образования капель морского аэрозоля (см. рис. 1в). В этих работах был впервые предложен русскоязычный аналог названия фрагментации bag breakup – типа парашют, который мы будем использовать далее.

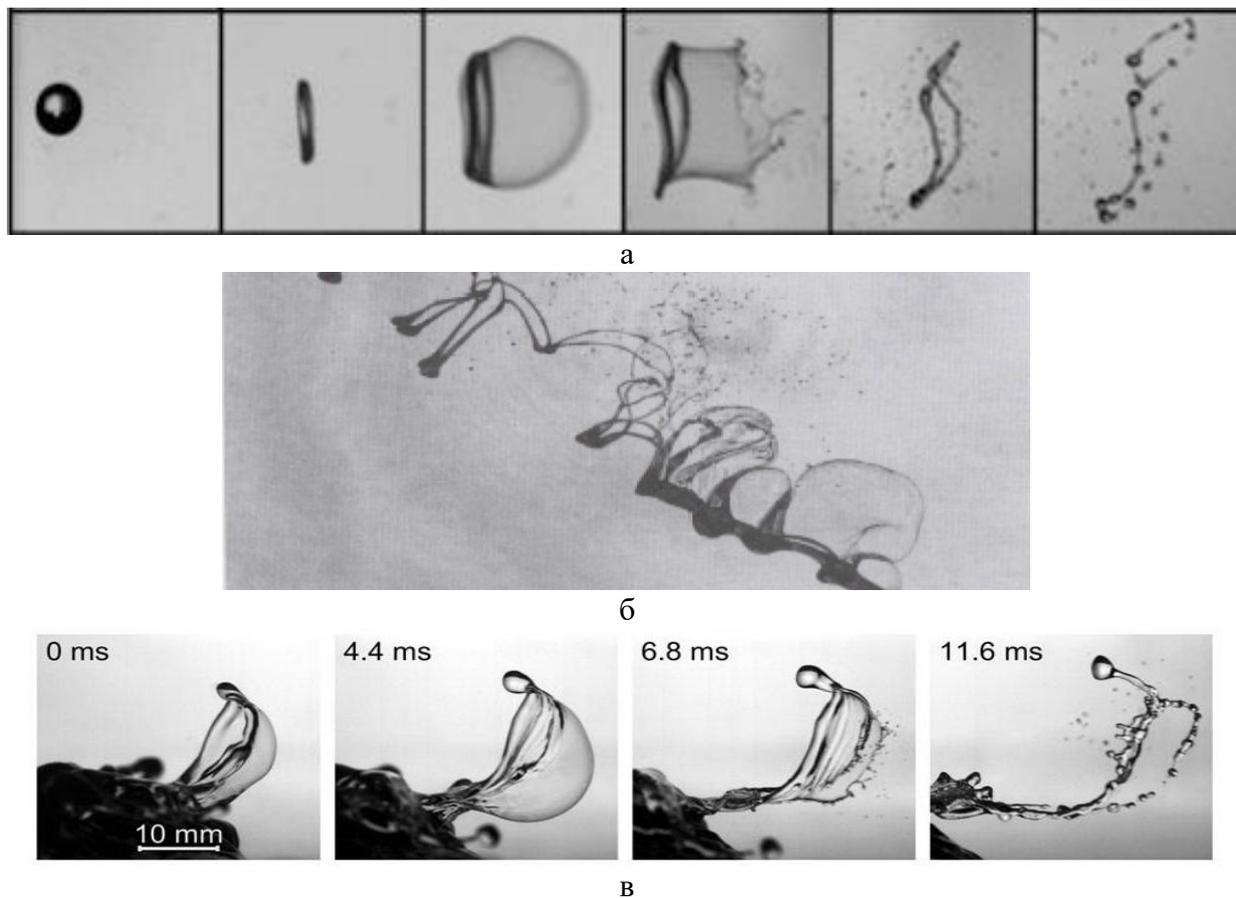


Рис. 1. Результаты скоростной съемки:

а – фрагментации жидкой капли диаметром в поперечном воздушном потоке по типу парашют из [3], б – фрагментации импактной жидкой струи в поперечном воздушном потоке из [4], в – фрагментации по типу парашют на обрушающемся гребне из работы [7]

В работе [8] было показано, что несмотря на огромное различие характерных интегральных масштабов упомянутых выше задач (толщины слоя жидкости, масштабов волн на поверхности и т.д.), зависимости пространственно-временных характеристик этих явлений от параметров воздушных потоков носят универсальный характер. В работе [9], учитывая, что количественно явлений фрагментации типа парашют значительно (более чем на порядок) превосходят все другие процессы, ответственные за образование брызг, была предложена новая функция генерации брызг. Она была построена на основе комбинации (свертки) статистики явлений типа парашют (количества событий на единицу площади в единицу времени) и статистики (распределений по размерам) капель, образующихся при одиночном явлении этого типа. При этом, последние данные были получены в рамках специальных лабораторных экспериментов при искусственном возбуждении парашютов из генерируемых небольших возмущений (возвышений) на поверхности жидкости на малой площади (чтобы избежать возбуждения волн). Описание системы искусственной генерации для этих исследований приведена в [10]. Однако как показал более детальный качественный анализ

процессов фрагментации [11] на взволнованной поверхности, парашюты могли образовываться (раздуваться) не только из мелкомасштабных возвышений, при обрушении волн, но также и из-за других возмущений поверхности (например, за счет всплывающих пузырей, или за счет падающих обратно крупных капель). Также при высоких скоростях ветра возможно формирование парашюта непосредственно из крупных капель, сорванных с поверхности. Статистика подобных «нетипичных» сценариев возникновения явлений фрагментаций по типу парашютов не исследовалась и поэтому не сопоставлялась со статистикой обычных парашютов, возникающих из мелкомасштабных возвышений, для которых были исследованы распределения образующихся брызг. Цель настоящей работы было восполнить этот пробел.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для уточнения типов сценариев возникновения и развития фрагментаций по типу парашютов на взволнованной поверхности воды под действием ветра была выполнена широкая серия лабораторных экспериментов на Высокоскоростном ветроволновом канале (ВВК) ИПФ РАН, где моделируется взаимодействие атмосферы и океана в широком диапазоне условий в том числе экстремальные (регулярное интенсивное обрушение, волн при сильных ветрах). Общая схема эксперимента (см. рис. 2а) была аналогична экспериментам, выполненным в [7, 9]. Использовалась высокоскоростная съемка камерой НАС НХ-3 вида сверху на взволнованную поверхность с теневой визуализацией при подсветке горизонтальной светодиодной панелью через диффузионный экран из-под воды. По сравнению с предыдущими измерениями было увеличено пространственное разрешение до 160 мкм/пикс для более детального исследования и селекции парашютов по типу возникновения. Увеличение пространственного разрешения было достигнуто, за счет уменьшения области наблюдения за поверхностью (31×17 см) при сохранении скорости съемки 4490 кадров/сек. Чтобы получить необходимый ансамбль реализаций парашютов, уменьшение размеров изображений необходимо было компенсировать увеличением их количества. Всего для семи режимов с разной скоростью воздушного потока (от 17 до 33 м/с) было выполнено 62 съемки по 35000 кадров каждая. При малых скоростях из-за малого количества событий для получения необходимого ансамбля проводилось больше записей.

Чтобы получить сопоставимые ансамбли явлений во всем диапазоне условий, при умеренных ветрах и слабом обрушении волн выполнялось больше записей чем при сильных ветрах. Весь массив составил более двух миллионов кадров, что в 6 раз больше, чем было в [7]. Полученные видеозаписи обрабатывались полуавтоматически с использованием специально разработанного программного обеспечения. Выполнялся подсчет парашютов и классифицировались типы возмущений, которые приводили к его инициации.

В рабочей секции, где выполнялась съемка, дополнительно проводились измерения профилей скорости сканирующей рубкой Пито, для восстановления значений динамической скорости u^* и эквивалентной скорости U_{10} .

В ходе выполнения исследований все события были классифицированы следующие типы сценарии инициации парашютов:

- 1) спонтанно возникающие из возвышения на поверхности (можно считать классическим вариантом);
- 2) возникающие из лопнувшего подводного пузыря;
- 3) возникшие в результате падения крупной капли на поверхность;
- 4) возникшие из отдельной крупной капли.

Для количественного сопоставления полное число событий по всем кадрам записей было переведено на единицу площади поверхности в единицу времени. Данные были получены для семи разных режимов воздушного потока, включая сильные ветра, при которых наблюдается интенсивное обрушение волн и унос дисперсной фазы (диапазон изменения динамической

скорости u^* составил от 0,9 до 2,4 м/с, а соответствующий диапазон эквивалентной скорости ветра U_{10} от 23 до 46 м/с).

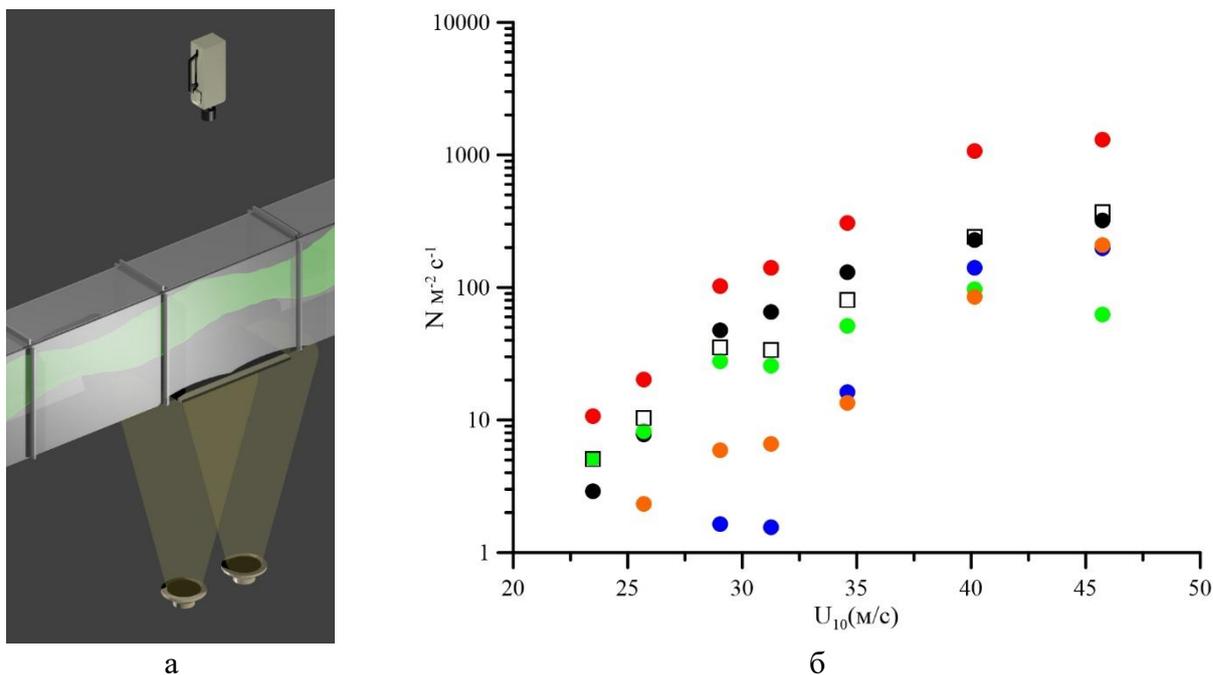


Рис. 2. а – схема эксперимента на ВВК ИПФ РАН с системой видеосъемки, б – количество образующихся событий фрагментаций по типу парашют в единицу времени от на единицу площади взволнованной водной поверхности от эквивалентной скорости ветра U_{10} . Круги красные – общее количество всех парашют, черные – возникающие из возвышений на поверхности, зеленые – из всплывающих пузырей, синий – при падении капель на поверхность, оранжевые – из крупных капель, движущихся в воздушном потоке, черные квадраты – общее количество всех парашютов, за исключением образующихся из возвышений

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя полученные результаты (см. рис. 2б), можно сделать следующие выводы. Классический сценарий инициации парашюта из нелинейно развивающегося мелкомасштабного возмущения на свободной поверхности является доминирующим над всеми остальными во всем диапазоне скоростей ветра. Для остальных механизмов было продемонстрировано следующее. Всплывающие пузырьки играют значимую роль в образовании парашютов только при малых скоростях, а затем при усилении ветра их относительный вклад уменьшается. Это вполне логично, т.к. пузырьки при обрушении волн начинают появляться даже раньше парашютов, при еще достаточно малых скоростях ветра (см. [11]). При этом с усилением ветра при интенсификации обрушений несмотря на рост количества средний размер пузырька начинает уменьшаться (см. результаты [12]), что приводит к стабилизации количества образующихся за счет них парашютов. В свою очередь с ростом ветра растет вклад от событий от крупных капель, как от падающих обратно на свободную поверхность, так и от фрагментирующих непосредственно в воздушном потоке. Причин здесь может быть несколько. Во-первых, при увеличении скорости ветра увеличивается число особо крупных капель (порядка 1 мм) за счет механизма генерации брызг типа дроблений жидких нитей (liquid ligaments). Количество явлений этого типа хоть и значительно уступает парашютам, однако все равно увеличивается с ростом скорости ветра капель (см. [7]). Крупные капли могут при падении создать возмущение на поверхности, из которого потом может сформироваться парашют, а с другой сами фрагментироваться в парашют при движении в воздушном потоке. Увеличению количества парашютов за счет этих механизмов также способствует увеличение скорости воздушного потока, т.к. в этом случае увеличивается вероятность раздува парашютов как из самих крупных капель, так и от

возмущений на поверхности, от их падения нее. Следует отметить, что общее количество событий по типу парашют образующихся классическим способом практически эквивалентно суммарно взятому количеству парашютов от всех остальных типов возмущений, рассмотренных в настоящем исследовании. Следовательно, необходимо детальнее исследовать процессы образования брызг в этих случаях и учитывать их при построении функции генерации брызг.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-77-10059, <https://rscf.ru/project/24-77-10059/>. Эксперименты выполнены с использованием оборудования Уникальной научной установки «Комплекс крупномасштабных геофизических стендов» ИПФ РАН (<http://www.ckp-rf.ru/usu/77738/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Pilch M., Erdman C.A.** Use of breakup time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration-induced breakup of a liquid drop // *Int. J. Multiphase Flow*. 1987. Vol. 13. № 6. Pp. 741-757.
2. **Gelfand B.E.** Droplet breakup phenomena in flows with velocity lag // *Prog. Energy Combust Sci.* 1996. Vol. 22. Pp. 201-265.
3. **Kulkarni V., Sojk P.E.** Bag breakup of low viscosity drops in the presence of a continuous air jet // *Physics of Fluids*. 2014. Vol. 26 № 7. P. 072103.
4. **Ashgriz N.** Atomization of a liquid jet in a crossflow // *AIP Conf. Proc.* 2012. Vol. 1440. № 1. Pp. 33-46.
5. **Badie S., Lawrence C.J., Hewitt G.F.** Axial viewing studies of horizontal gas-liquid flows with low liquid loading // *International Journal of Multiphase Flow*. 2001. Vol. 27. Pp. 1259-1269.
6. **Cherdantsev A.V., Sinha A., Hann D.B.** Studying the impacts of droplets depositing from the gas core onto a gas-sheared liquid film with stereoscopic BBLIF technique // *International Journal of Multiphase Flow*. 2022. Vol. 150. P. 104033.
7. **Троицкая Ю.И., Ермакова О.С., Кандауров А.А., Козлов Д.С., Сергеев Д.А., Зилитинкевич С.С.** Дробление типа "парашют" - механизм генерации морских брызг при сильных и ураганных ветрах // *Доклады академии наук. Геофизика*. 2017. Т. 477. № 2. С. 226-232.
8. **Sergeev D.A., Troitskaya Y.I., Cherdantsev A.V.** Investigation of the spray generation due to bag breakup fragmentation phenomena with optical methods in environmental and technical systems // *Scientific visualization*. 2023. Vol. 15. № 6. Pp. 83-91.
9. **Троицкая Ю.И., Ермакова О.С., Кандауров А.А., Козлов Д.С., Сергеев Д.А., Зилитинкевич С.С.** Немонотонная зависимость коэффициента сопротивления поверхности океана от скорости ураганного ветра // *Доклады академии наук. Геофизика*. 2017. Т. 477. № 2. С. 357-362.
10. **Sergeev D.A., Kandaurov A.A.** A system of artificial initiation of the bagbreakup fragmentation for investigation of the spray generation processes during wind-wave interaction in laboratory experiments // *Atomization and Sprays*. 2021. Vol. 31. № 12. Pp. 21-33.
11. **Troitskaya Y., Kandaurov A., Zotova A., Korsukova E., Sergeev D.** Statistical characteristics of droplets formed due to the "bag-breakup" fragmentation event at the interface between water and high-speed air flow // *Journal of Physical Oceanography*. 2023. Vol. 53. № 10. Pp. 2331-2352.
12. **Troitskaya Y., Sergeev D., Kandaurov A., Vdovin M., Zilitinkevich S.** The effect of foam on waves and the aerodynamic roughness of the water surface at high winds // *Journal of Physical Oceanography*. 2019. Vol. 49. Pp. 959-981.

Sergeev D.A., Vdovin M.I., Kraev I.M., Zotova A.N., Ermakova O.S., Troitskaya Yu.I.

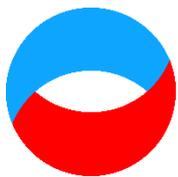
*IAP RAS, Russia,
603950, Nizhny Novgorod, Uliyanova st., 46, E-mail: daniil@ipfran.ru*

**DETAILED STUDY OF THE MAIN SOURCES OF BAG-BREAKUP TYPE
FRAGMENTATION EVENTS BY OPTICAL METHODS IN LABORATORY MODELING
OF MARINE AEROSOL GENERATION PROCESSES**

ABSTRACT

This paper presents the results of a detailed study of the bag-breakup type fragmentation process on a rough water surface blown by an air flow within the atmosphere-ocean interaction modeling. High-speed filming of the rough surface was performed in a wide range of conditions, including wave breaking and strong winds. A refined classification of bags sources is proposed. It is demonstrated that bags can inflate directly from large droplets in the air flow. The contribution of bags formed in this way is small at low winds, but significant at high wind speeds. The efficiency of the droplet generation mechanism due to the falling of droplets also increases. In turn, the contribution from disturbances caused by emerging bubbles, on the contrary, decreases with increasing wind. This may be due to the fact that the bubble sizes decrease with increasing wind speed, and bags are not formed from them. It is demonstrated that the total contribution of all three listed sources practically coincides with the contribution of the previously studied classical source of bags origin - a nonlinearly developing small-scale elevation on the surface. In this regard, they should also be taken into account when developing the function of splash generation due to the phenomenon of fragmentation of the bag-breakup type.

DROPLETS, BAG BREAKUP FRAGMENTATION, LABORATORY MODELING, SHADOW METHOD, HIGH SPEED FILMING



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 532.517.3

Родин И.Р.¹, Павлов И.Н.¹, Янина Г.М.¹, Знаменская И.А.²

¹ *Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: RodinIR@tpri.ru*

² *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества «МГУ им. М.В. Ломоносова», Россия,
119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, E-mail: znamen@phys.msu.ru*

РАЗРАБОТКА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРИСТЕНОЧНЫХ СЛОЯХ ЖИДКОСТИ

АННОТАЦИЯ

В работе предлагается исследовать пограничный слой жидкости, созданный затопленной импактной струей, с помощью инфракрасной термографии и метода нарушенного полного внутреннего отражения. Оба метода являются бесконтактными и неразрушающими. Применяемый метод инфракрасной термографии заключается в регистрации кадров с высокой частотой кадров с помощью ИК-камеры. Нагретая затопленная струя воды, вытекающая из сопла в кювету с водой более низкой температуры, падает нормально на прозрачное в ИК-диапазоне окно. Динамика теплового потока регистрируется путем регистрации движения тепловых кластеров. Эти кластеры образуются при турбулентном перемешивании потоков разной температуры. Смещение тепловых кластеров за время, прошедшее между двумя кадрами, характеризует параметры потока. Для обработки данных, полученных этим методом, используются алгоритмы кросскорреляции, аналогичные алгоритмам в методе PIV (Particle Image Velocimetry). Для регистрации динамики процесса использовался тепловизор TELOPS FAST-M200 (спектральный диапазон: 1,5–5,1 мкм). Была проведена оценка влияния спектрального диапазона тепловизора на измеряемые данные параметров потока и толщину исследуемого пристеночного слоя. Предложена схема установки для изучения затопленных импактных струй жидкости методом нарушенного полного внутреннего отражения.

НАРУШЕННОЕ ПОЛНОЕ ВНУТРЕННЕЕ ОТРАЖЕНИЕ, ИНФРАКРАСНАЯ ТЕРМОГРАФИЯ, ЗАТОПЛЕННАЯ ИМПАКТНАЯ СТРУЯ, ПРИСТЕНОЧНЫЙ СЛОЙ ЖИДКОСТИ, ТУРБУЛЕНТНЫЕ ПОТОКИ

ВВЕДЕНИЕ

Исследование пристеночных слоёв жидкости представляет собой важную задачу в контексте изучения тепломассопереноса, что актуально для таких областей, как микрофлюидика, энергетика и химическая промышленность. Существующие методы визуализации этих слоёв часто ограничены низким временным разрешением, необходимостью введения трассеров или сложностями работы с турбулентными потоками. Данная работа направлена на преодоление этих ограничений путём разработки оптико-электронного комплекса, сочетающего инфракрасную термографию и метод нарушенного полного

внутреннего отражения (НПВО). Основная цель исследования – анализ физических процессов в пристеночных слоях жидкости с использованием бесконтактных и неразрушающих технологий.

Разработка подобного комплекса поможет решить задачи, включающие оценку возможностей высокоскоростной ИК-термографии для регистрации турбулентных тепловых кластеров, исследование влияния спектрального диапазона тепловизоров на точность измерений, а также определение минимальной разницы температур, сохраняющей контрастность структур. Применение метода НПВО позволит визуализировать потоки с более высоким разрешением по глубине пристеночного слоя. Научная новизна заключается в применении двух методов для изучения процессов затопленных имактных струй, что позволяет изучать как макромасштабные турбулентные процессы, так и тонкие пристеночные структуры. Экспериментальные изображения потоков были получены с помощью тепловизора TELOPS FAST-M200, а затем обработаны с помощью алгоритмов кросскорреляции, аналогичных используемым в методе PIV.

Возможности методов ИК-термографии и НПВО

Для изучения характеристик пристеночных жидкостных потоков активно применяется метод инфракрасной термографии. Данный метод основан на регистрации инфракрасного излучения, что позволяет визуализировать распределение температур в изучаемом объекте. Использование метода открывает возможности для анализа энергетических характеристик, изучения процессов, связанных с тепломассопереносом, а также позволяет визуализировать потоки жидкостей и газов.

Одним из направлений изучения потоков методом ИК термографии является визуализация пристеночных потоков жидкостей. Сочетание этой технологии с алгоритмами обработки изображений методом кросс-корреляции (PIV) [1] открывает перспективы для анализа поверхностных течений и пристеночных структур. Так, например, в исследовании [2] применялись серебряные трассерные частицы, обеспечивающие четкую визуализацию на термограммах для последующего расчета скоростных полей.

Анализ литературы показывает преобладание работ по низкоскоростным течениям с малыми числами Рейнольдса в системах «жидкость-газ» и тонких жидких пленках. Методика получения усредненных температурных полей через металлические подложки основана на анализе теплопереноса между потоком и твердой поверхностью. Ключевое значение в этом процессе имеет пристеночная область, чьи параметры определяют механизмы теплопереноса и характеристики пограничного слоя [3].

Прогресс в термографических технологиях, включая создание высокочастотных тепловизоров (до нескольких кГц), позволил применять ИК-термографию для анализа быстропотекающих турбулентных процессов [4-5]. Это дает возможность изучать динамику пристеночного слоя в реальном времени без использования трассеров, используя температурный контраст вихревых структур в качестве индикатора течения. Данное преимущество особенно значимо при диагностике нестационарных неизотермических потоков у ИК-прозрачных стенок. В неизотермических условиях теплоперенос определяется совокупностью процессов теплопроводности, конвекции и излучения с различными временными масштабами. Высокоскоростная термография позволяет изолировать быстропотекающие компоненты теплового излучения пограничного слоя, минимизируя влияние более медленных процессов теплопроводности и конвекции, характерные времена которых превышают длительность исследуемых явлений.

В работе [6] проводилась оценка толщины пристеночного слоя жидкости. Из-за сильной зависимости коэффициента поглощения жидкой воды от длины волны возможна лишь интегральная оценка. В холодную воду быстро погружался нагретый диск $T_{disk} = 20-60$ °С, прижатый к ИК-прозрачной стенке сосуда ребром. Таким образом, измерения динамики излучения центральной части движущегося затопляемого объекта, видимого тепловизором в

пограничном слое воды, позволили количественно оценить регистрируемую толщину слоя воды. Для рабочего диапазона, используемого в работе тепловизора (3,7-4,8 мкм), глубина проникновения инфракрасного излучения составила не более 0,2 мм.

Метод нарушенного полного внутреннего отражения используется, например, для измерения плёнок, толщина которых составляет порядка десятков нанометров. При взаимодействии эванесцентной волны с тонкой плёнкой воздуха происходит изменение параметров отражённого излучения. Таким образом, на основе параметров отражённого излучения возможно изучение параметров тонких плёнок. В работе [7] описан метод измерения толщины воздушной прослойки, образованной между плоской поверхностью призмы и выпуклой линзой. В качестве источника излучения лазер с длиной волны 643 нм. Минимальный измеренный размер зазора между призмой и линзой составил 19 нм.

Эванесцентные волны, создающиеся вследствие эффекта полного внутреннего отражения, используются для визуализации потоков пристеночных слоёв жидкости. Для этого жидкость засеивают флюоресцирующими на длине волны падающего излучения частицами. Так как такие волны экспоненциально затухают по мере удаления от границы раздела сред, то засеивающие частицы флюоресцируют под воздействием такого излучения на расстоянии, сравнимом с длиной волны падающего излучения. Благодаря этому эффекту возможна визуализация пристеночных потоков жидкости. Так, например, в работе [8] были получены поля скоростей наночастиц полистирола и кремния в процессе химико-механической планаризации на расстоянии 300 нм от просмотрового окна. Поля скоростей были получены методом PIV. Также в работе [9], данная методика была дополнена тем, что, в процессе измерения положения относительно границы раздела и скорости, постоянно отслеживался уровень излучения, регистрируемый от отдельной частицы, позволяя получать как глобальную, так и локальную информацию о структуре потока. Метод впервые демонстрирует способность измерять проскальзывание с высокой точностью, предоставляя локальную информацию о структуре потока с нанометровым разрешением. В работе [10] описывается разработка датчика дождя, работа которого основана на явлении НПВО. Такой датчик отличается высоким быстродействием, высокой энергоэффективностью и точностью.

Описание установки и методики проведения экспериментов методом ИК-термографии

Измерения проводились на установке, изображённой на рис. 1.

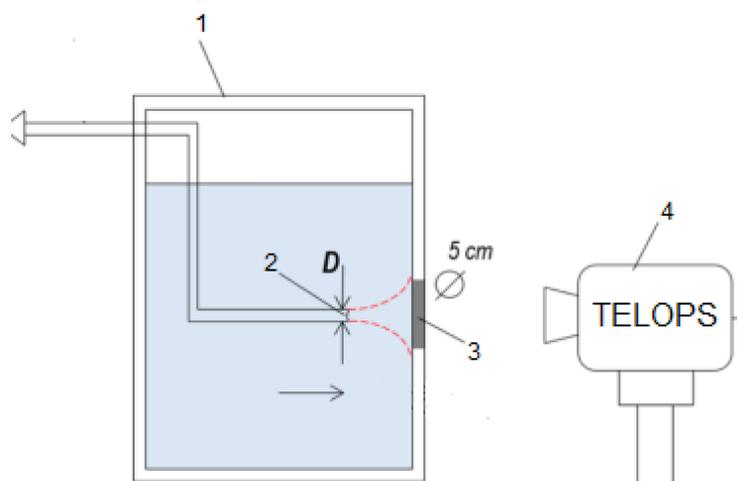


Рис. 1. Схема установки визуализации потока затопленной импактной струи:
1 – кювета, 2 – сопло, 3 – просмотровое окно, 4 – тепловизор

В кювету 1, наполненную водой с температурой t_1 , погружена трубка 2 с соплом диаметром D . Вытекающая из сопла вода с температурой $t_2 > t_1$ попадает на просмотровое окно 3. Просмотровое окно 3 из фторида кальция (CaF_2) имеет коэффициент пропускания 95% в диапазоне чувствительности используемого тепловизора. Данное окно является также поверхностью импакта струи. Изображения потока регистрируется через просмотровое окно высокоскоростным тепловизором 4. Так как между водой в кювете и водой выходящей из сопла есть разница по температуре, то при взаимодействии струи с поверхностью импакта, поток воды на поверхности просмотрового окна переходит из ламинарного в турбулентный. Турбулентный неизотермический поток имеет вихревую структуру, в котором вихри образуют кластеры одинаковой температуры. Образующиеся кластеры могут рассматриваться как пассивная примесь, не влияющая на динамику течения. Данное условие обеспечивается высокой интенсивностью турбулентного перемешивания и высокой частотой съёмки. Таким образом, регистрируя последовательность кадров данных кластеров можно определить скорость потока в пристеночной области затопленной импактной струи. На рис. 2 приведён пример получаемых экспериментальных изображений и усреднённое поле скоростей потоков по серии кадров. Изображения были записаны тепловизором TELOPS FAST-M200 со спектральным диапазоном: 1,5–5,1 мкм.

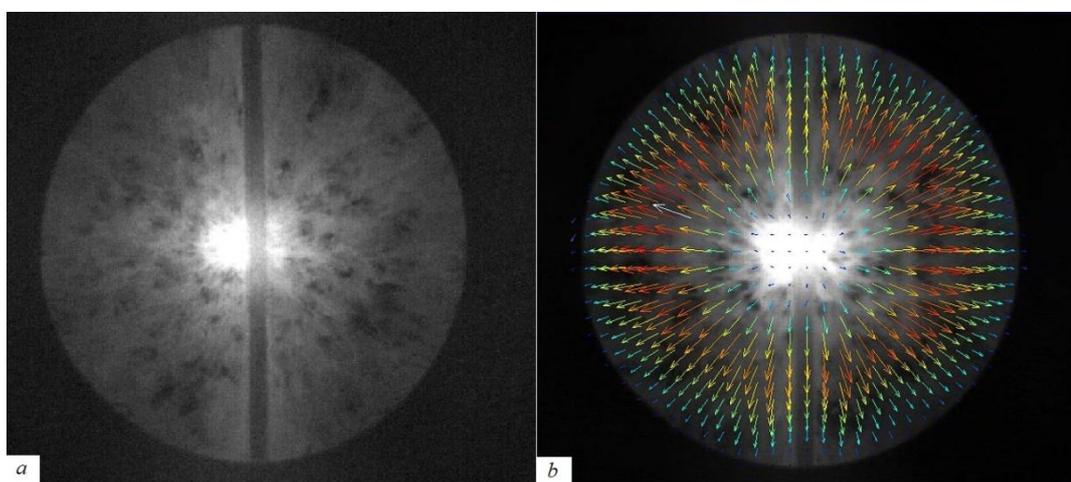


Рис. 2. Пример экспериментальных изображений и результата их обработки:
a – экспериментальное изображение потока, *b* – поле скоростей, усреднённое по серии изображений

Для определения минимальной разницы между температурой воды в кювете и температурой струи были записаны 14 серий экспериментальных последовательностей. В каждой последовательности записывалось 600 изображений с частотой съёмки 381,44 Гц, размером кадра 400×350 пкс, экспозицией 500 мкс. Для первой серии изображений температура воды в кювете составила $t_1 = 14,5$ °С, температура воды на выходе из сопла $t_2 = 24,4$ °С. После записи одной серии вода в кювете нагревалась при перемешивании с водой, вышедшей из сопла, таким образом, разница температур Δt для каждой последующей серии уменьшалась. Последняя серия была записана при $\Delta t = 1,4$ °С, однако, как будет видно далее, температурные кластеры перестают быть различимы на фоне потока при большей разнице.

На рис. 3 приведены кадры для каждого экспериментального значения разности температур между жидкостями. Как видно из данного рисунка, при уменьшении разницы температур потоков, кластеры одинаковой температуры становятся трудно различимыми на фоне остального потока. Начальная разность температур между водой в кювете и выходящей из сопла струи $\Delta t = 9,9$ °С, конечная $\Delta t = 1,4$ °С.

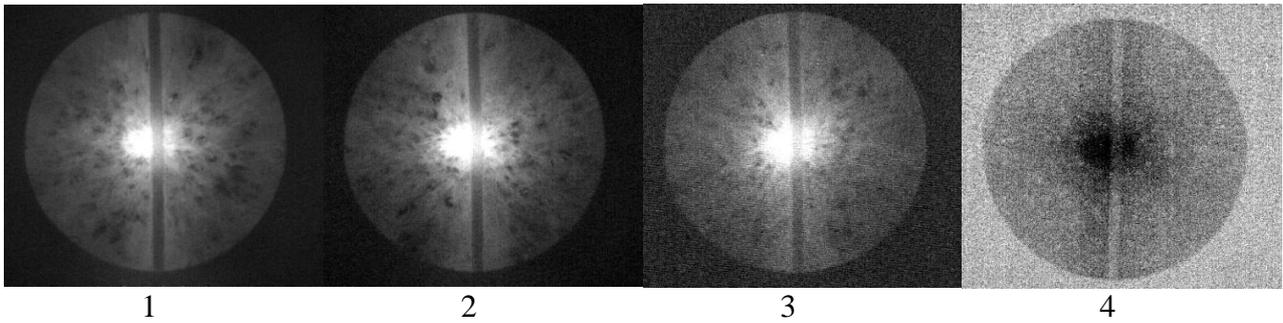


Рис. 3. Кадры экспериментальных изображений в порядке уменьшения разности температур между жидкостями: 1 – $\Delta t = 9,9$ °C, 2 – $\Delta t = 7,2$ °C, 3 – $\Delta t = 2,6$ °C, 4 – $\Delta t = 1,4$ °C

Таким образом при разнице температур $\Delta t = 2,6$ °C кластеры становятся слабо различимы на фоне остального потока, а при разнице температур $\Delta t = 1,4$ °C поток на изображениях с тепловизора выглядит однородным, что препятствует их дальнейшей обработке.

Описание установки и методики проведения экспериментов методом НПВО

Метод нарушенного полного внутреннего отражения основан на регистрации излучения, отражённого от границы раздела двух сред под углом выше или равном критическому углу полного внутреннего отражения (ПВО). ПВО наблюдается в случае, когда свет из более оптически плотной среды попадает в оптически менее плотную. Критический угол ПВО рассчитывается по формуле (1), полученной из закона Снеллиуса при условии, что угол преломления $\theta_t = \frac{\pi}{2}$.

$$\sin \theta_i = \frac{n_2}{n_1}, \quad (1)$$

где θ_i – угол падения излучения на границу раздела, n_1 – показатель преломления первой среды, n_2 – показатель преломления второй среды, $n_1 > n_2$.

Однако поле всё же проникает в оптически менее плотную среду, при этом поле в этой среде экспоненциально затухает в направлении, перпендикулярном границе раздела сред. Амплитуда напряжённости такой волны записывается выражением (2)

$$E = E_0 \exp(-kz) \exp(-i(\omega t + k_x x) + \varphi_0), \quad (2)$$

Такая волна называется эванесцентной. Расстояние проникновения эванесцентной волны вглубь менее оптически плотной среды порядка длины волны падающего излучения.

Данный метод позволяет осуществить визуализацию процессов в тонком приповерхностном слое жидкостей. Так, например, в работе [11] описывается процесс визуализации испарения капли жидкости методом НПВО. Пример полученных изображений испарения капли приведён на рис. 4

Обработка таких изображений позволяет изучить процесс испарения капли, оценить площадь контакта капли с поверхностью при испарении, оценить распределение показателя преломления по поверхности контакта капли с поверхностью.

В работе [12] был описана система визуализации пристеночного слоя смешивания оптически неоднородных жидкостей. В экспериментах с микроканалом с помощью шприца меньшего объема создавалась капля жидкости, она помещалась сверху канала, далее ее движение происходило под действием капиллярных сил и силы тяжести, а также диффузии. Базовой жидкостью служила чистая вода при комнатной температуре ($T = 23$ °C, $n_2 = 1,3318$). В качестве вводимой жидкости использовались водные растворы сахара и поваренной соли

различных концентраций, глицерин, а также смеси глицерина с водой в различных пропорциях. Созданная лазерная система визуализации неоднородных пристеночных слоев жидкости позволяет определять пространственные координаты оптической неоднородности и значение ее показателя преломления. Система применена для визуализации во времени процесса смешения капли глицерина в воде.

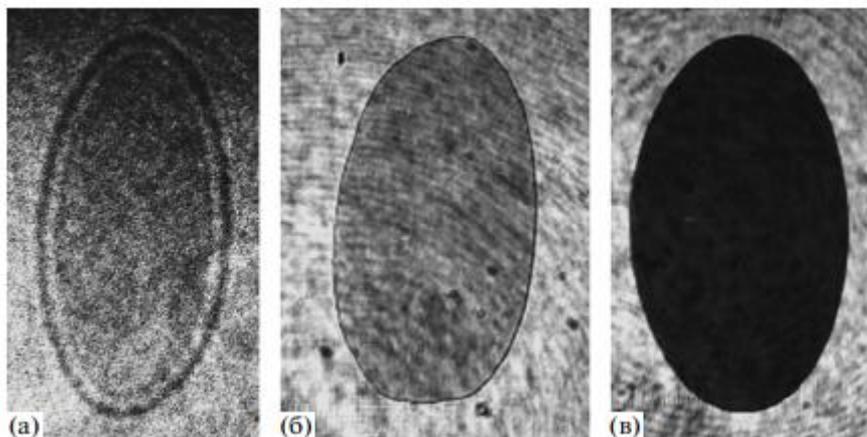


Рис. 4. Изображения капли воды:

а – при угле падения пучка, близком к критическому углу ПВО при съёмке с экрана, б – при угле падения пучка, близком к критическому углу ПВО при съёмке с поверхности призмы, в – при НПВО и съёмке с поверхности призмы [11]

Таким образом, для исследования импактных затопленных струй методом НПВО предложена схема установки, аналогичная описанной в методике исследования методом ИК термографии. Однако в методе НПВО поверхностью импакта является грань призмы. На рис. 5 показана схема установки.

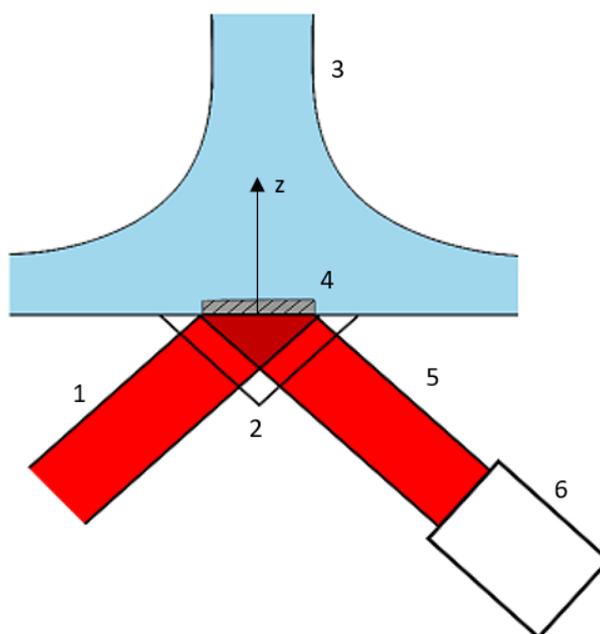


Рис. 5. Схема метода исследования импактных затопленных струй на основе вления НПВО: 1 – падающее излучение, 2 – призма, 3 – импактная струя, 4 – пристеночная область потока, 5 – отражённое излучение, 6 – приёмник отражённого излучения

Широкий пучок лазерного излучения 1 проходит через призму 2, грань которой также является поверхностью импакта струи 3, отражаясь от этой грани под углом выше критического угла ПВО. Эванесцентная волна будет проникать в струю на расстояние около длины волны

падающего излучения, тем самым подсвечивая пристеночную область струи 4. Так как в этой области импактная струя обладает неоднородностью по температуре, показатель преломления также будет неоднороден. Вследствие этого, регистрируя отражённое излучение 5, можно визуализировать эти неоднородности аналогично методу ИК-термографии.

Как и в методе ИК-термографии в кювету с жидкостью с температурой t_1 помещают трубку с соплом диаметра D . Вытекающая из сопла вода с температурой t_2 попадает на грань призмы, которая также является поверхностью импакта. С обратной стороны на грань призмы падает излучение под углом выше критического угла ПВО, далее отражённое излучение записывается с помощью высокоскоростной камеры 6. Обработка изображений с помощью алгоритма PIV. Данный метод позволит исследовать потоки тех же импактных струй, что и в методе ИК-термографии, однако с большим разрешением по координате z , так как метод НПВО позволяет визуализировать пристеночный слой толщиной порядка сотен нанометров, в то время как в методе ИК-термографии толщина слоя составляет 0,2 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разрабатываемый оптико-электронный комплекс позволит исследовать одинаковые объекты (затопленные импактные струи) двумя методами НПВО и ИК-термографии, позволяя получить разнообразные параметры данных потоков. ИК-термография позволяет визуализировать процессы тепломассопереноса в пристеночной области с субмиллиметровым разрешением, в то время как с помощью метода НПВО можно визуализировать распределение показателя преломления с субмикронным разрешением. Комбинация этих двух методов в едином оптико-электронном комплексе открывает путь к многоуровневому анализу процессов тепломассопереноса от макроскопической турбулентности до нанометровых пристеночных эффектов. Перспективным направлением дальнейших исследований является экспериментальная реализация и совместное использование предложенной установки НПВО.

Использование тепловизора TELOPS FAST-M200 и обработка последовательности термограмм алгоритмами кросс-корреляции, аналогичными PIV, позволила определить минимальную разность температур необходимой для надежного различения тепловых кластеров на фоне потока, которая составила $\Delta t = 1,4$ °С.

Исследование выполнено в рамках проекта «Оптические датчики дождя и тумана» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2024-2026 годах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Дегоян С.С., Софуюев Д.В., Скорнякова Н.М.** Применение метода анемометрии по изображению частиц к исследованию обтекания шероховатых поверхностей // Оптические методы исследования потоков: Труды XVII Международной научно-технической конференции. М: Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН. 2023. С. 779-786.
2. **Charogiannis A., Zadrazil I., Markides C.N.** Thermographic particle velocimetry (TPV) for simultaneous interfacial temperature and velocity measurements // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 97. Pp. 589-595
3. **Коротеева Е.Ю., Знаменская И.А., Рязанов П.А.** Измерения полей скорости в пограничном слое жидкости на основе высокоскоростной термографии // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2020. Т. 491. № 1. С. 48-51.
4. **Госсорг Ж.** Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. М.: Мир, 1988. 416 с.
5. **Вавилов В.П.** Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: ИД Спектр, 2009. 544 с.

6. Шагиянова А.М., Коротеева Е.Ю., Знаменская И.А. и др. Анализ области визуализации пристеночного слоя жидкости при регистрации методами высокоскоростной термографии // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. 2020. № 2. С. 31-35.
7. Shirota M., van Limbeek M.A.J., Lohse D., Sun C. Measuring thin films using quantitative frustrated total internal reflection (FTIR) // The European Physical Journal E. 2017. Vol. 40(5). A. 54.
8. Zettner C., Yoda M. Particle velocity field measurements in a near-wall flow using evanescent wave illumination // Experiments in Fluids. 2003. Vol. 34. Pp. 115-121.
9. Li Z., D'eramo L., Lee C. et al. Near-wall nanovelocimetry based on Total Internal Reflection Fluorescence with continuous tracking // Journal of Fluid Mechanics. 2014. Vol. 766. Pp. 147-171.
10. Rodin I.R., Korolkova O.V., Pavlov I.N. Rain and fog sensors based on frustrated total internal reflection // 2025 7th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, 2025. Pp. 1-7.
11. Павлов И.Н., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В. Установка для визуализации испарения капли жидкости методом нарушенного полного внутреннего отражения лазерного пучка // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 2. С. 130.
12. Павлов И.Н., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В. Лазерный визуализатор неоднородности пристеночных слоев жидкости // Измерительная техника. 2010. № 10. С. 33-35.

Rodin I.R.¹, Pavlov I.N.¹, Yanina G.M.¹, Znamenskaya I.A.²

¹ National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russia, 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: RodinIR@mpei.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Russia, 119991, Moscow, 1 Leninskie Gory, E-mail: znamen@phys.msu.ru

DEVELOPMENT OF AN OPTOELECTRONIC COMPLEX FOR THE STUDY OF PHYSICAL PROCESSES IN THE NEAR-WALL LAYERS OF LIQUID

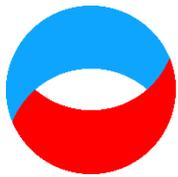
ABSTRACT

This paper proposes to investigate the fluid boundary layer created by a submerged impinging jet using infrared thermography and the frustrated total internal reflection method. Both methods are non-contact and non-destructive. The infrared thermography method used is to record frames at a high frame rate using an IR camera. A submerged jet of water flowing from a nozzle into a cuvette with lower temperature water falls normally onto an IR transparent window. The heat flux dynamics is recorded by recording the motion of heat clusters. These clusters are formed by turbulent mixing of streams with different temperatures. The displacement of thermal clusters for the time elapsed between two frames characterizes the flow parameters. Cross correlation algorithms similar to those in the Particle Image Velocimetry (PIV) method are used to process the data obtained by this method. A TELOPS FAST-M200 thermal imager (spectral range: 1.5-5.1 μm) was used to record the process dynamics. The influence of the spectral range of the thermal imager on the measured data of flow parameters and the thickness of the investigated wall layer was evaluated. The scheme of the experimental setup for studying submerged impinging liquid jets by the method of frustrated total internal reflection was proposed.

FRUSTRATED TOTAL INTERNAL REFLECTION, INFRARED THERMOGRAPHY, SUBMERGED IMPINGING JET, NEAR-WALL LAYER OF LIQUID, TURBULENT FLOWS

Секция 4

Оптико-электронное приборостроение



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 535-92

Павлов И.Н., Королькова О.В., Федоров Е.К., Родин И.Р.

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: KorolkovaOV@mpei.ru*

**РАЗРАБОТКА ОПТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ДАТЧИКА НА
ОСНОВЕ НПВО**

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена разработке купольного оптического датчика дождя, принцип работы которого основан на явлении нарушенного полного внутреннего отражения. Использование этого эффекта повышает чувствительность датчика и обеспечивает быстрый отклик на изменение погодных условий, что выгодно отличает данный тип устройств от альтернативных методов обнаружения осадков.

Разработка учитывает ряд важных критериев, включая стабильную работу в широком диапазоне температур, высокую помехоустойчивость, малое энергопотребление и надёжность в течение длительной эксплуатации. Для удовлетворения этим требованиям произведён подбор материалов и компонентов: определены оптимальные параметры источника и приёмника излучения, выбраны материалы для корпуса, разработана форма линзы с учётом минимизации сферической аберрации, а также подобраны покрытия, повышающие точность и надёжность измерений.

НАРУШЕННОЕ ПОЛНОЕ ВНУТРЕННЕЕ ОТРАЖЕНИЕ, ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ДОЖДЯ И ТУМАНА, ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ, РАЗРАБОТКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДАТЧИКОВ

ВВЕДЕНИЕ

Применение оптических методов для измерения влажности демонстрирует значительный потенциал благодаря высокой точности и быстрому отклику.

Так, например, нанопроволочные сенсоры с быстрым преобразованием Фурье [1] изготавливаются методом flame-brushing для получения тонкого волокна, где эванесцентное поле взаимодействует с водяными молекулами. Анализ фазовых сдвигов позволяет достигать чувствительности до 0,14 рад/% влажности, хотя при высоких значениях наблюдается эффект гистерезиса, требующий дальнейшей оптимизации. Полимерные оптоволоконные датчики [2] демонстрируют быстрый отклик (1,5 с) и линейное снижение интенсивности света с увеличением влажности, что делает их пригодными для интеграции в текстильные и медицинские перевязочные материалы. Устройства на основе SnO₂ [3] используют высокопористый слой, нанесенный методом капельного осаждения, что обеспечивает эффективную адсорбцию воды. Эксперименты показали, что при увеличении влажности в диапазоне 56–90% потери возрастают на 2 дБ/%, а время отклика составляет около 2,5 с, что свидетельствует о высокой чувствительности и стабильности измерений. Микроволоконные узлы-резонаторы [4] характеризуются быстрым временем реакции (0,8-1,55 с) и стабильностью даже при изменениях температуры, обеспечивая точное измерение влажности за счет усиленного взаимодействия эванесцентного поля с окружающей средой.

Таким образом, оптические датчики влажности на основе явления НПВО демонстрируют высокую чувствительность, надежность и долговечность, что подчеркивает актуальность дальнейших исследований в этой области.

Предложенная конструкция широко используется во многих областях науки и техники. Оптические датчики дождя активно задействованы для автоматизации работы стеклоочистителей, особенно в автомобильной отрасли, где они интегрированы в интеллектуальные системы управления для повышения безопасности и комфорта вождения [5]. В научных исследованиях и моделировании осадков данные устройства применяются для точного измерения интенсивности дождевых осадков, что играет значительную роль в метеорологии и прогнозировании погоды [6]. Кроме того, оптические сенсоры используются для измерения и оценки дождевых накоплений, являясь экономичной альтернативой для определения объёма осадков в полевых условиях [7]. Некоторые исследования сосредоточены на использовании оптических микросистем, таких как микрокольцевые резонаторы, для обнаружения кислотного дождя, что особенно актуально для экологического мониторинга [8]. Также оптические сенсоры интегрируются в многофункциональные автомобильные системы, например, в зеркала заднего вида, где они работают в сочетании с датчиками дождя, света и солнечной энергии [9].

ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ДАТЧИКА

Исследование направлено на разработку оптической системы оптико-электронного датчика дождя и тумана, использующего явление НПВО, реализованной по широко известной купольной конструкции [10] с использованием специальной светопропускающей линзы с двумя оптическими поверхностями.

На рис. 1 представлена схема разрабатываемого оптического датчика дождя и тумана.

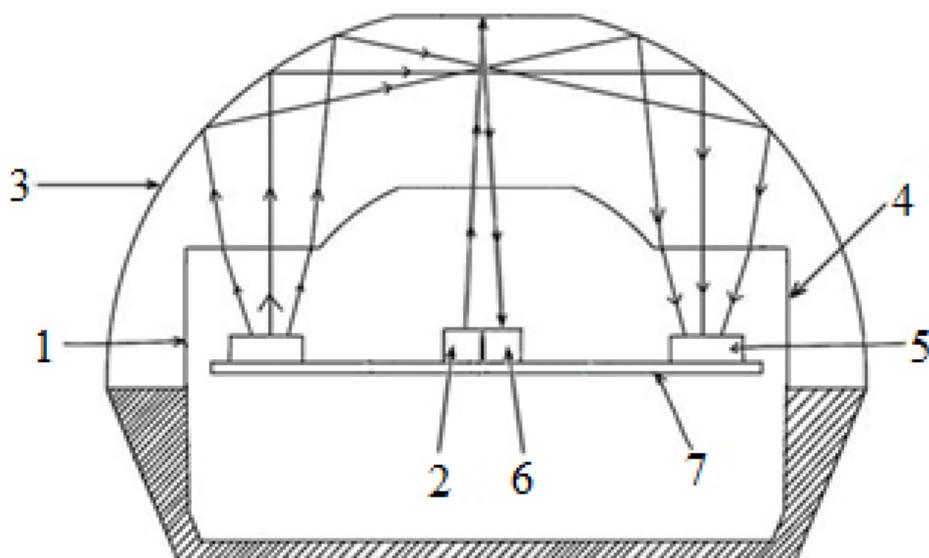


Рис. 1. Схема оптического купольного датчика:

1 – первичный источник света, 2 – вторичный источник света, 3 – прозрачный купол, 4 – собирающая линза, 5 – приемник отраженного света, 6 – приемник рассеянного света, 7 – печатная плата

Принцип работы датчика основан на мониторинге изменений оптического сигнала от основного источника света (1). Излучение распространяется внутри прозрачного купола (3) под углами, превышающими или близкими к критическому углу полного внутреннего отражения, благодаря чему оно полностью отражается от границы «стекло–воздух» и не покидает купол. Сфокусированное линзой (4) излучение поступает в приёмник (5). При попадании капель воды на внешнюю поверхность купола условия полного внутреннего

отражения нарушаются, так как показатель преломления воды выше, чем у воздуха, что приводит к изменению уровня сигнала, регистрируемого приёмником. Электронная схема на печатной плате (7) анализирует эти изменения и определяет уровень влажности.

Ключевым усовершенствованием конструкции является добавление вторичного источника света (2) и приёмника рассеянного света (6). Излучение от вторичного источника попадает на плоскую часть купола, который, взаимодействуя с водяными частицами в воздухе, рассеивается и возвращается через ту же поверхность, где его фиксирует приёмник (6). Анализ интенсивности обратного рассеянного излучения позволяет датчику определять наличие и концентрацию тумана, что существенно расширяет его функциональность в условиях плохой видимости.

ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ И КОМПОНЕНТОВ

При выборе материала для купола проведён сравнительный анализ, в рамках которого оценивались светопропускание, устойчивость к УФ-излучению, температурная стабильность и технологичность обработки. Все результаты сведены в табл. 1.

Табл. 1. Сравнение материалов для купола

Материал	T, %	n	KTR, 10^{-6} К ⁻¹	$\frac{dn}{dT}$, 10^{-6} К ⁻¹	Устойчивость к УФ	Устойчивость к перепадам температур
ПММА	92	1,49	70	-110	Не вызывает пожелтения и деградации механических свойств	Легко деформируется при температуре выше 100 °С
Поликарбонат	88	1,59	65	-110	УФ вызывает пожелтение, мутность и снижение прочности и пропускания	Рабочий диапазон ~-50...+150 °С
СОР (циклоолефиновый сополимер)	90	1,53	50	-100	Умеренно устойчив к УФ-излучению, уступая акрилу, и может слегка пожелтеть.	Этот материал сохраняет свои свойства при высоких температурах, превышающих 150 °С.
Сапфир	85	1,75	5,3	13,7	Устойчив к воздействию ультрафиолета	Сохраняет свои свойства в агрессивных средах и при температурах как минимум до 1600°С.
Стекло ВК7	94	1,51	8	2,3	Подходит для длительного воздействия УФ-излучения	ВК7 стабилен при температуре от -40 °С до +120 °С.
Полисульфон (PSU)	85	1,63	55	-110	Длительное воздействие снижает прочность и прозрачность	Обеспечивает устойчивость к перегрузкам и перепадам температур; рабочий диапазон — от -100 °С до +150 °С.
Полистирол	90	1,59	80	-120	Незащищённый полистирол быстро стареет: УФ вызывает пожелтение и потерю прочности.	Устойчив до 80 °С, при повышении температуры размягчается
Стекло К8	92	1,51	7,1	12	Глубокий УФ ($\lambda < 350$ нм) вызывает поглощение, снижая спектральные характеристики	Типичный рабочий диапазон для оптического стекла К8 составляет примерно от -40 °С до +120 °С

Продолжение табл. 1

Материал	Средняя стоимость, руб/кг	Обрабатываемость	Механическая прочность
ПММА	700	Механическая обработка выполняется так же легко, как обработка дерева.	Средняя— оргстекло примерно в 5 раз ударопрочнее силикатного стекла
Поликарбонат	400	Поликарбонат легко поддаётся обработке, но требует мер предосторожности против перегрева и оплавления от трения.	Поликарбонат не раскалывается и в 10 раз прочнее обычных пластмасс.
СОР (циклоолефиновый сополимер)	1500	Материал довольно мягкий, поэтому обработка проще, чем обработка стекла	Ударная вязкость выше, чем у акрила, но ниже, чем у поликарбоната (при сильном ударе может треснуть)
Сапфир	12000	Чрезвычайная твердость, сапфир крайне трудно резать и полировать	Исключительная твердость, устойчив к механическим повреждениям и царапинам
Стекло BK7	3000	BK7 легко шлифуется и полируется, обеспечивая высокую точность оптических поверхностей.	BK7 достаточно прочен для оптики, но остаётся хрупким по сравнению с полимерами.
Полисульфон (PSU)	1400	PSU легко поддаётся обработке: фрезерованию, сверлению, а инжекционное литьё обеспечивает точность.	Полисульфон прочный и ударостойкий, что обеспечивает надежность при нагрузках, ударах и вибрациях.
Полистирол	140	Легко поддается обработке (резка, сверление, шлифовка, полировка)	Полистирол имеет низкую прочность и слабую устойчивость: он хрупок, особенно на холоде, и трескается при ударе или изгибе.
Стекло K8	3000	Легко обрабатывается: резка, шлифовка и полировка дают оптические поверхности с малой шероховатостью.	Достаточно прочен для оптики, но хрупок при ударах.

При анализе светодиодов осуществлён сравнительный обзор по следующим параметрам: мощность, пиковая длина волны, угол обзора и стоимость. Все данные сведены в табл. 2.

Табл. 2. Сравнение светодиодов

Производитель	Модель	Пиковая длина волны, нм	Мощность, мВт	Угол обзора, °	Стоимость, руб
Vishay	VSMY2850RG	850	55	20	190
Vishay	VSMY2853SL	850	55	56	200
Würth Elektronik	15412085BA400	850		140	220
Würth Elektronik	15435385A9040	850	450	90	490
Würth Elektronik	15437385AA540	850	700	150	420
Lite-on Electronics	LTE-R38386A-S-U	850	800	90	510
AMS OSRAM GROUP	LZ1-00R602-0000	850	1350	100	1260
REFOND	RE30A6-IRT-FS	850	350	40	140
REFOND	RF-P28A3-IRN-FT	850	65	17	140
OSRAM	SFH 4059S	860	50	15	310

Для выбора модели фотодиодов проведено сравнение по чувствительности, пиковой длине волны и величине активной области. Все данные представлены в табл. 3.

Табл. 3. Сравнение фотодиодов

Производитель	Модель	Размер активной области, мм ²	Время нарастания и спада фототока, нс	Чувствительность, А/Вт	Стоимость, руб
AMS OSRAM GROUP	BPW 34 S-Z	2,65x2,65	20	0,62	380
OSRAM	SFH 2400	1x1	5	0,65	270
OSRAM	BPW 34 S	2,65x2,65	20	0,62	87
Nisshinbo	NJL6193R-3-TE1	0,7x0,7	10	0,48	530
AMS OSRAM	BP104S	2,2x2,2	20	0,62	278

При выборе оптического материала для купола ключевыми факторами стали высокий коэффициент пропускания, устойчивость к ультрафиолетовому излучению, достаточная температурная стабильность и простота механической обработки при разумной стоимости. Акрил (PMMA) обладает прозрачностью порядка 92% в видимом диапазоне и сохраняет эти характеристики под воздействием УФ-лучей, что полностью соответствует условиям эксплуатации, где температура вряд ли превысит 100 °С. Благодаря относительной мягкости PMMA легко поддается фрезеровке и полировке, что упрощает изготовление сложных элементов, а невысокая цена делает его экономически оправданным выбором. Альтернативные полимеры, такие как поликарбонат или полистирол, уступают PMMA по УФ-стабильности и механической прочности соответственно, а сапфир, несмотря на превосходные оптические свойства и термостойкость, исключается из-за высокой стоимости и трудоёмкой обработки. Стекло марки BK7 хотя и предлагает более высокое пропускание, но слишком хрупко и дорого в шлифовке по сравнению с полимером.

Для формирования светового пучка с минимальным углом расходимости оптимальным оказался светодиод RF-P28A3-IRN-FT. Его узкий телесный угол позволяет получить более коллимированный пучок без сложного дополнительного оптического трассирования, а умеренная электрическая мощность исключает перегрев и не требует массивных систем охлаждения. При этом стоимость RF-P28A3-IRN-FT заметно ниже, чем у мощных светодиодов-конкурентов, что важно для соблюдения бюджетных ограничений. Более мощные модели из представленной таблицы предполагают избыточную яркость и большие углы расходимости, что усложняет оптическую схему и не приносит практической выгоды в рамках данной задачи.

В качестве приёмного элемента системы выбран фотодиод BPW 34 S. Он характеризуется очень малыми временами нарастания и спада сигнала, что особенно важно для автомобильных датчиков дождя: высокая скорость реакции позволяет мгновенно обнаруживать микрокапли, и своевременно активировать систему очистки лобового стекла. Дополнительным плюсом служит высокая чувствительность, обеспечивающая надёжное детектирование малейшего изменения интенсивности, а активная область размером 2,65×2,65 мм позволяет захватить больше излучения, увеличивая интенсивность и улучшая соотношение сигнал/шум.

СОЗДАНИЕ 3D-МОДЕЛИ

На рис. 2 и 3 представлены 3D-модели выбранных свето- и фотодиодов, построенных в программе Коспас-3Д.

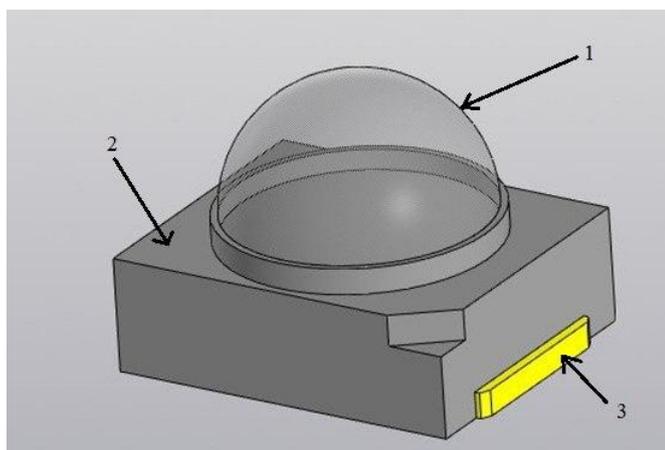


Рис. 2. 3D-модель светодиода RF-P28A3-IRN-FT:
1 – линза, 2 – корпус, 3 – контакты

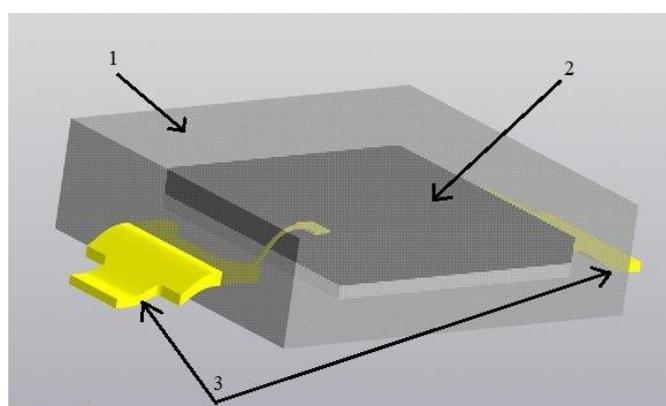


Рис. 3. 3D-модель фотодиода BPW 34 S:
1 – корпус, 2 – активная область, 3 – контакты

Эти модели использовались для построения 3D-модели оптического купольного датчика дождя и тумана, представленной на рис. 4.

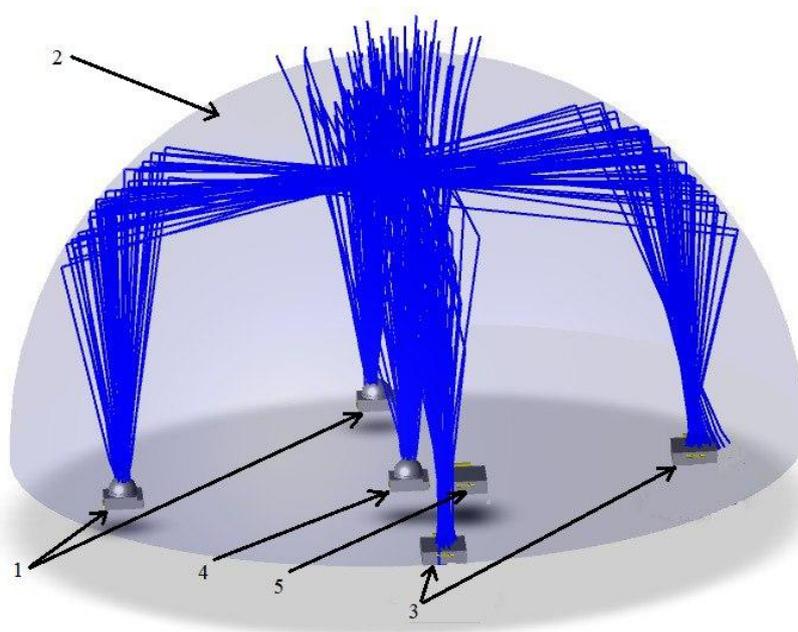


Рис. 4. 3D-модель оптического купольного датчика дождя и тумана:
1 – первичные источники света, 2 – прозрачный купол, 3 – приемники отраженного света, 4 – вторичный источник света, 5 – приемник рассеянного света

В ходе тестирования 3D-модели датчика были зафиксированы минимальные потери: мощность на приемнике излучения составила примерно 50 мВт, что свидетельствует о низком уровне потерь и эффективности работы датчика. Распределение интенсивности на выходе из купола представлено на рис. 5.

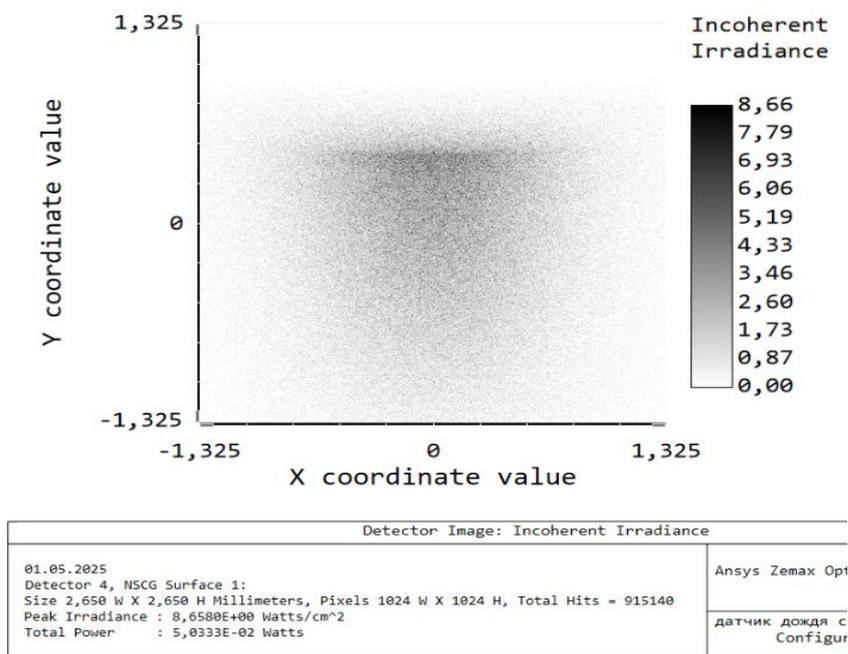


Рис. 5. Распределение интенсивности на выходе из купола

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение оптических методов для измерения влажности характеризуется высокой чувствительностью и быстрым откликом, что открывает возможности для создания высокоточных датчиков. Разработанная система, основанная на явлении НПВО в куполообразной конструкции, эффективно регистрирует изменения оптического сигнала при воздействии влаги. Дополнительный источник света и приёмник рассеянного излучения расширяют функциональные возможности устройства, позволяя определять наличие тумана даже при плохой видимости. Были подобраны материалы и компоненты, обеспечивающие стабильную и долговечную работу системы в различных условиях эксплуатации. Также были созданы трёхмерные модели выбранных светодиодов и фотодиодов для построения 3D-модели оптического купольного датчика; зарегистрированные минимальные потери подтверждают эффективность работы устройства.

Данная работа выполнена в рамках проекта «Оптические датчики дождя и тумана» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» для реализации программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в период 2024–2026 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Rota-Rodrigo S., Pérez-Herrera R., et al.** Nanowire humidity optical sensor system based on fast Fourier transform technique // Proc. of SPIE. Vol. 9634, 24th International Conference on Optical Fibre Sensors. 2015. P. 96342H-1.
2. **Gomez D., Morgan S.P., et al.** Polymeric optical fibre sensor coated by SiO₂ nanoparticles for humidity sensing in the skin microenvironment // Sensors and Actuators B: Chemical. 2018. Vol. 254. Pp. 887-895.

3. **Siddiq N.A., Chong W.Y., et al.** All-optical humidity sensor using SnO₂ nanoparticle drop coated on straight channel optical waveguide // *Photonic Sensors*. 2020. Vol. 10. Pp. 123-133.
4. **Xu K., Li H., Liu Y., et al.** Optical fiber humidity sensor based on water absorption peak near 2- μ m waveband // *IEEE Photonics J.* 2019. Vol. 11. Pp. 1-8.
5. **Chen H.** Design of Rain Sensor based on Optical Principle // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vols. 668-669. Pp. 977-980.
6. **Montero-Martínez G., Torres-Pérez E. F., et al.** A comparison of two optical precipitation sensors with different operating principles: The PWS100 and the OAP-2DP // *Atmospheric Research*. 2016. Vol. 178. Pp. 550-558.
7. **Steele D. D., Scherer T. F., et al.** Evaluation of a low-cost optical rain sensor // 2014 ASABE and CSBE/SCGAB Intersectional Meeting. 2014. Vol. SD14-063. Pp. 1-10.
8. **Mulyanti B., Ramza H., et al.** Micro-ring resonator with variety of gap width for acid rain sensing application: preliminary study // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. Vol. 852. Pp. 1-10.
9. **Gormer S., Kummert A., Park S.B Gormer S., Kummert A., et al.** Vision-based rain sensing with an in-vehicle camera // *Proceedings of the 2009 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. 2009. Pp. 279-284.
10. **Патент США №8271198B2. Teder, R.S.** Optical moisture sensor. Дата публикации: 18.09.2012. URL: <https://patents.google.com/patent/US8271198B2/en> (дата обращения: 06.03.2025).

Pavlov I.N., Korolkova O.V., Fedorov E.K., Rodin I.R

*National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: KorolkovaOV@mpei.ru*

DEVELOPMENT OF OPTICAL PART OF OPTOELECTRONIC SENSOR ON THE BASIS OF FTIR

ABSTRACT

The work is devoted to the development of a dome optical rain sensor, the principle of operation of which is based on the phenomenon of disturbed total internal reflection. The use of this effect increases the sensitivity of the sensor and provides a fast response to changes in weather conditions, which favorably distinguishes this type of devices from alternative methods of precipitation detection.

The design addresses a number of important criteria, including stable operation over a wide temperature range, high noise immunity, low power consumption, and long-term reliability. To meet these requirements, materials and components have been selected: the optimal parameters of the radiation source and receiver have been determined, materials for the housing have been selected, the lens shape has been designed to minimize spherical aberration, and coatings have been selected to increase the accuracy and reliability of measurements.

FRUSTRATED TOTAL INTERNAL REFLECTION, OPTICAL RAIN AND FOG SENSOR, SENSITIVITY, SENSOR DEVELOPMENT AND DESIGN



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 620.1; 616-072.1; 535.375.5

Белых А.Ю., Сударев А.А., Хохлов Д.Д.

*Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Россия,
117342, Москва, Бутлерова ул., 15, E-mail: belykh.ay@ntcup.ru*

**ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА НА СПЕКТР
КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ ОБРАЗЦА В ИССЛЕДОВАНИЯХ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗОНДОВЫХ СИСТЕМ**

АННОТАЦИЯ

Оптические зондовые системы широко используются для получения информации о состоянии и свойствах труднодоступных объектов, благодаря чему получили распространение в медицине и неразрушающем контроле. Ввиду недостаточности информации, получаемой при помощи видеоканала, развитие оптических зондовых систем сопряжено с внедрением спектральных методов. Регистрируемые с их помощью данные о спектральных свойствах труднодоступных объектов используются в качестве дополнительных диагностических критериев. Одним из перспективных типов зондовых спектральных методов является спектроскопия комбинационного рассеяния, которая позволяет с высокой точностью определять химический состав и структуру материала образцов. Существует ряд факторов, препятствующих корректному измерению спектров комбинационного рассеяния, среди которых: низкая интенсивность излучения комбинационного рассеяния, сильное влияние люминесценции исследуемого образца, возникновение “паразитных” линий спектра в оптических элементах системы. Существует много работ, посвящённых усилению интенсивности комбинационного рассеяния и развитию методов борьбы с люминесценцией. Однако, вклад спектральных линий комбинационного рассеяния материалов, из которых изготавливаются оптические элементы, описан в меньшей степени. Для практической реализации зондовой спектроскопии комбинационного рассеяния часто используют оптоволоконные жгуты. В настоящей работе представлены результаты измерения спектров комбинационного рассеяния серийных образцов оптоволоконных жгутов для зондовых систем и оценён их вклад в измеряемый спектр. Описаны методы, позволяющие снизить вклад собственного комбинационного рассеяния волокна в измеряемый спектр.

**НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ, ЭНДОСКОПИЯ, СПЕКТРОСКОПИЯ,
КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ, ЗОНДОВЫЕ СИСТЕМЫ, ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО.**

ВВЕДЕНИЕ

Зондовые системы получили широкое распространение благодаря возможности проводить визуальный контроль и регистрировать изображения труднодоступных объектов. Эндоскопия все чаще применяется в различных областях науки и техники: неразрушающем контроле, медицине и машиностроении [1-3]. Зондовые системы позволяют проводить наблюдение труднодоступных объектов с помощью широкополосного видеоканала, при этом можно получить только часть сведений об исследуемом объекте. Развитием эндоскопических

методов являются зондовые системы, совмещённые со спектральными методами. Одним из наиболее распространённых и точных спектральных методов с использованием зондовых систем является спектроскопия комбинационного рассеяния (СКР) [1-3]. СКР позволяет исследовать химический состав и структуру исследуемого объекта. Данный метод обладает высокой точностью и чувствительностью и позволяет существенно увеличить объем данных о характерных свойствах труднодоступных объектов, получаемых с использованием зондовых систем. Однако, существует ряд недостатков в сочетании СКР и зондовых систем: низкий уровень интенсивности излучения комбинационного рассеяния (КР), малые габариты дистального конца зондовых систем, влияние люминесценции объекта и оптических элементов зонда. В данной работе описано влияние характеристик оптического волокна на спектр комбинационного рассеяния, полученный с использованием зондовых систем.

ОПИСАНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Явление комбинационного рассеяния возникает при взаимодействии фотонов возбуждающего излучения с молекулами, атомами или кристаллической решёткой вещества исследуемого образца. В результате такого взаимодействия фотон поглощается, переводя молекулы вещества из начального состояния в возбуждённое, при этом энергия колебаний в молекуле повышается на энергию поглощённого фотона. После происходит испускание фотона, и, если при рассеянии Рэля энергия испускаемого фотона равна энергии падающего фотона, то в случае комбинационного рассеяния энергия испускаемого фотона будет либо меньше (стоксовый сдвиг) или больше (антистоксовый сдвиг) энергии падающего фотона [2]. Вероятность КР невелика, что является причиной низкой интенсивности КР. Многие исследуемые вещества при взаимодействии с возбуждающим излучением могут демонстрировать не только явление КР, но и явление люминесценции. Как правило, люминесценция имеет более высокую интенсивность по сравнению с комбинационным рассеянием. Поэтому регистрируемый спектр люминесценции зачастую перекрывает спектр КР или затрудняет детектирование пиков КР [1].

Возбуждающее излучение может вызывать проявление люминесценции при взаимодействии не только с исследуемым объектом, но и с элементами оптической схемы зонда. Часто оптоволоконные жгуты защищены от механических воздействий при помощи резиновой или полимерной оплётки, которая может люминесцировать при взаимодействии с возбуждающим лазерным излучением [2]. Помимо люминесценции оболочки негативно сказывается на информативности спектра КР при измерениях с использованием зондовых систем собственный спектр КР оптического волокна. Явление КР не возникает в веществах, имеющих центральную симметрию молекул [3]. В этой связи в плавленом кварце может возникать КР, но коэффициент поглощения в видимом диапазоне у плавленного кварца низкий, следовательно, вероятность взаимодействия возбуждающего излучения с веществом мала. Однако, чем длиннее оптическое волокно, тем больше КР в нем возникает и в измеряемом спектре могут появляться пики, не относящиеся к исследуемому веществу.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для исследования негативных эффектов, возникающих в оптическом волокне при СКР с зондовыми системами, была разработана и реализована экспериментальная установка (рис. 1.). В составе экспериментальной установки были поочерёдно использованы два однотипных линзовых эндоскопа с системой подсветки на основе оптоволоконного жгута. Различия между ними заключаются в материале оплётки жгута подсветки и в световых диаметрах линзового изображающих каналов. В роли источника возбуждающего излучения выступает непрерывный лазер с длиной волны 532 нм и мощностью до 100 мВт. Регистрация спектров излучения производится с использованием дифракционного спектрометра Optosky5020P.

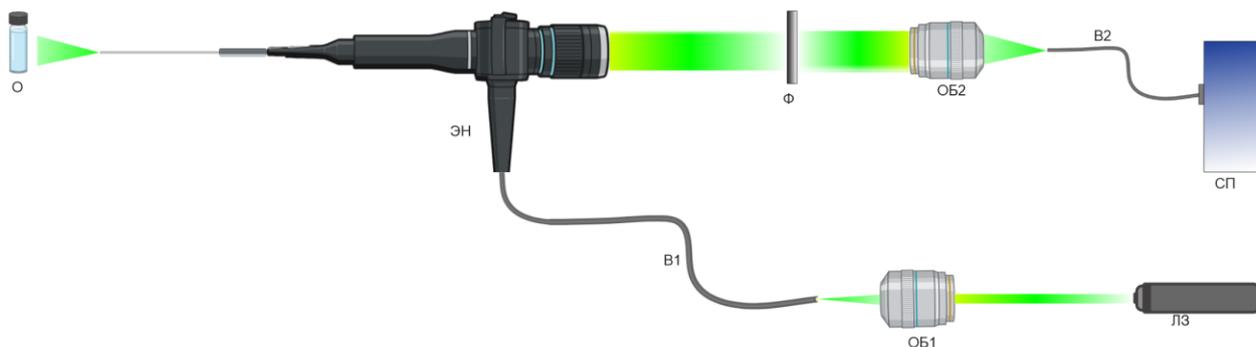


Рис. 1. Экспериментальная установка:

О – исследуемый объект, ЭН – линзовый эндоскоп с волоконной подсветкой, Ф – спектральный фильтр, ОБ – объектив, СП – дифракционный спектрометр, В – оптическое волокно, ЛЗ – источник лазерного излучения

Излучение лазера вводится в оптоволоконный жгут эндоскопа при помощи объектива ОБ1, а затем направляется к объекту, расположенного перед дистальным концом зонда. Линзовый изображающий канал эндоскопа передаёт излучение от объекта к окуляру на проксимальный конец зонда. Установленный за окуляром спектральный фильтр Ф исключает прохождение отражённого от объекта лазерного излучения к спектрометру СП. Объектив ОБ2 осуществляет сопряжение окуляра эндоскопа и оптического волокна спектрометра.

В качестве исследуемого образца использовался ацетон, так как данное вещество имеет высокую интенсивность пиков КР и в нем не возникает люминесценция при возбуждении лазерным излучением в видимом диапазоне. Спектр КР ацетона, полученный при использовании элементов экспериментальной установки (лазер, объективы и спектрометр) без эндоскопов представлен на рис. 2.

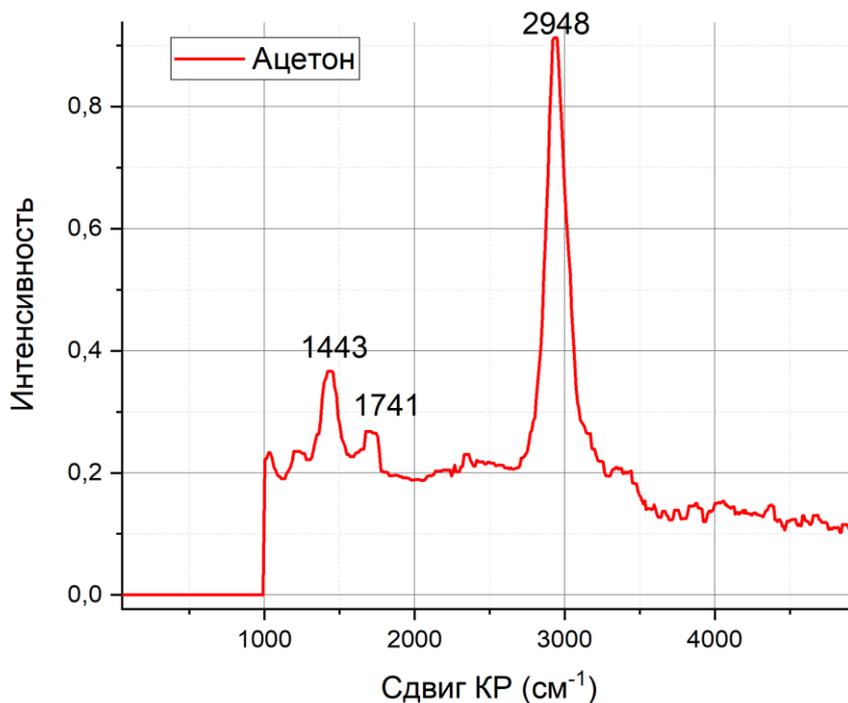


Рис. 2. Спектр комбинационного рассеяния ацетона

Ацетон обладает несколькими характерными пиками в спектре КР: 656, 919, 1450, 1720, 2949 см^{-1} . В спектре, представленном на рис. 2, присутствуют только 3 характерных пика, что объясняется характерным спектром пропускания спектрального фильтра, который блокирует излучение до 560 нм, что эквивалентно 940 см^{-1} при возбуждении лазером с длиной волны 532 нм.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для исследования влияния КР и люминесценции оптического волокна на вид измеряемого спектра КР объекта были проведены измерения КР образца ацетона с использованием линзовых эндоскопов. Измерения проводились при мощности лазера 100 мВт и времени экспозиции спектрометра 65 секунд. Для снижения влияния шума спектры усреднялись по результатам 20 измерений. Вид спектра КР ацетона для двух эндоскопов показан на рис. 3.

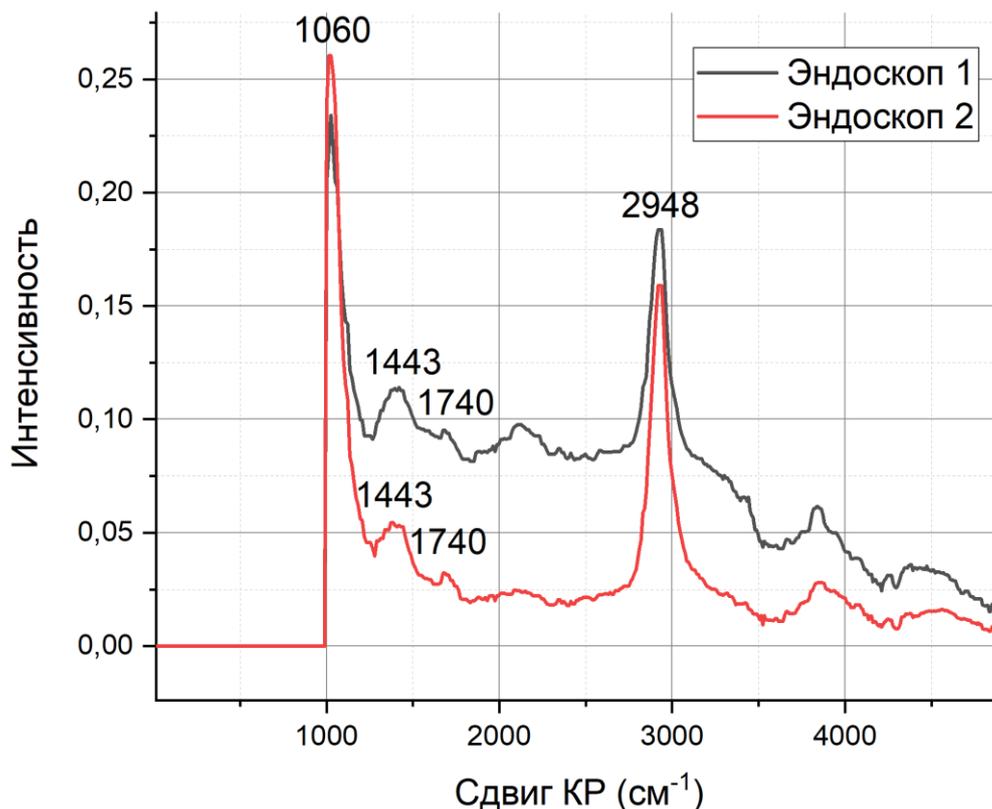


Рис. 3. Спектры комбинационного рассеяния ацетона с использованием эндоскопов

В отличие от спектра ацетона, полученного без использования эндоскопов, на данном спектре присутствует выраженный пик КР на 1060 см⁻¹. Данный пик соответствует колебаниям, характерным для плавленого кварца [4, 5]. В случае использования эндоскопа 1 можно увидеть вклад люминесценции оплётки оптического волокна, поскольку базовая линия данного спектра выше, чем у ацетона, снятого без эндоскопа. Для оценки вклада пика КР от оптического волокна были проведены дополнительные измерения, при которых вместо образца устанавливалось зеркало таким образом, чтобы в приёмном канале оказалось только собственное КР и люминесценция оптического волокна. Помимо двух эндоскопов измерения проводились для трех образцов оптоволоконных жгутов с жилами различной толщины в оплётке. По результатам измерений были получены собственные спектры КР и люминесценции оптического волокна (рис. 4).

Необходимо отметить, что снижения вклада собственного КР и люминесценции волокна можно достичь за счёт использования комбинации спектральных фильтров: узкополосного фильтра с центральной длиной волны пропускания, соответствующей длине волны возбуждающего излучения, на выходе осветительного канала, и отрезающего фильтра, блокирующего лазерное излучение, на входе канала регистрации спектров.

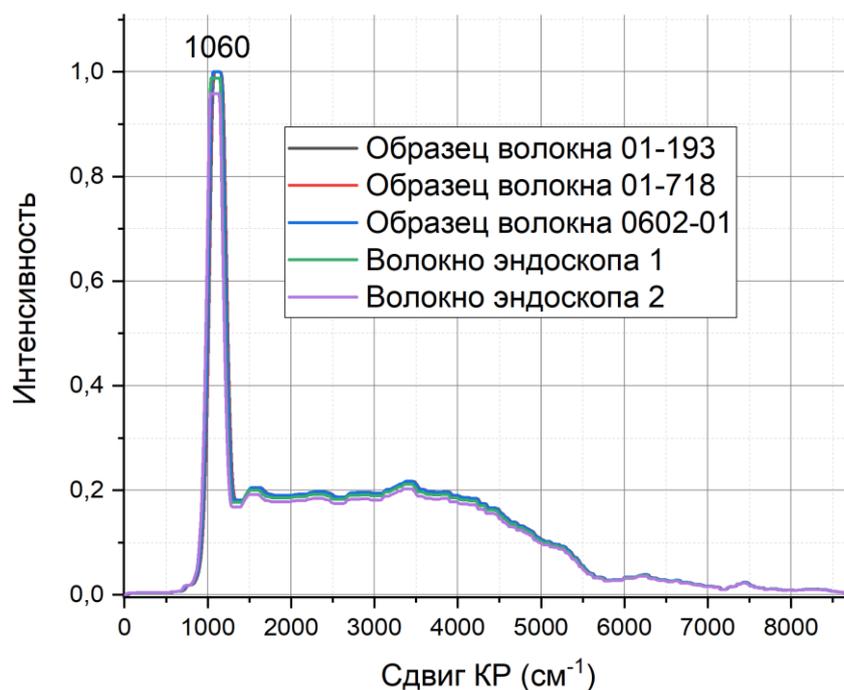


Рис. 4. Спектры комбинационного рассеяния оптических волокон

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продемонстрированы результаты измерения спектров КР образца с использованием линзовых эндоскопов с системой подсветки на основе оптоволоконного жгута. Экспериментально подтверждено наличие вклада собственного КР и люминесценции оптического волокна. Для нивелирования негативного вклада предложено использование комбинации спектральных фильтров, исключающих попадание излучения КР к объекту и прохождение лазерного излучения по каналу регистрации. Помимо этого, полученные данные могут быть использованы для программной коррекции спектров при последующей обработке спектров.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках исследовательской тематики молодёжной лаборатории «Оптические зондовые приборы и методы технической и биомедицинской диагностики» (FFNS-2024-0002).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Wei D., Chen S., Liu Q.** Review of fluorescence suppression techniques in Raman spectroscopy // *Applied Spectroscopy Reviews*. 2015. Vol. 50(5). Pp. 387-406.
2. **Shipp D.W., Sinjab F., Notingher I.** Raman spectroscopy: techniques and applications in the life sciences // *Adv. Opt. Photon.* 2017. Vol. 9. Pp. 315-428.
3. **Motz J.T., Hunter M., Galindo L.H., Gardecki J.A., Kramer J.R., Dasari R.R., Feld M.S.** Optical fiber probe for biomedical Raman spectroscopy // *Appl. Opt.* 2004. Vol. 43(3). Pp. 542-54.
4. **Shibata N., Horigudhi M., Edahiro T.** Raman spectra of binary high-silica glasses and fibers containing GeO₂, P₂O₅ and B₂O₃ // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1981. Vol. 45(1). Pp. 115-126.
5. **Walrafen G.E., Stone J.** Raman spectral characterization of pure and doped fused silica optical fibers // *Appl. Spectrosc.* 1975. Vol. 29. Pp. 337-344.

Belykh A.Yu., Sudarev A.A., Khokhlov D.D.

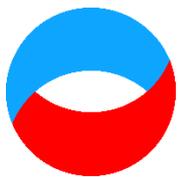
*The Scientific and Technological Center for Unique Instrument Engineering of the Russian Academy of Sciences, Russia,
117342, Moscow, 15 Butlerova str., E-mail: belykh.ay@ntcup.ru*

INFLUENCE OF OPTICAL FIBER CHARACTERISTICS ON THE RAMAN SPECTRUM OF A SAMPLE IN STUDIES USING PROBE SYSTEMS

ABSTRACT

Optical endoscopic probe systems are widely used to obtain information about the state and properties of hard-to-reach objects and have become widespread in medicine and non-destructive testing. Due to the insufficiency of information obtained using a video channel, the development of optical probe systems is associated with the introduction of spectral methods. The data on the spectral properties of hard-to-reach objects acquired with spectral probes are used as additional diagnostic criteria. One of the promising types of probe spectral methods is Raman spectroscopy, which allows one to determine the chemical composition and structure of the sample material with high accuracy. The factors that prevent the correct measurement of Raman spectra include: low intensity of Raman scattering, strong influence of luminescence of the sample under study, the occurrence of parasitic spectrum lines in the optical elements of the system. There are many works devoted to enhancing the intensity of Raman scattering and developing methods for combating luminescence. However, the contribution of the spectral lines of Raman scattering of the materials from which the optical elements are made is poorly described. For practical implementation of probe Raman spectroscopy, optical fiber bundles are often used. This paper presents the results of measuring the Raman spectra of optical fiber bundles for probe systems and estimates their contribution to the measured spectrum. Methods allowing the reduction of contribution of the fiber's own Raman scattering to the measured spectrum are described.

NON-DESTRUCTIVE TESTING, ENDOSCOPY, SPECTROSCOPY, RAMAN SCATTERING, PROBE SYSTEMS, OPTICAL FIBER.



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 535.8

Хохлов Д.Д.^{1,2}, Быков А.А.^{1,2}, Поляков М.П.¹, Золотухина А.А.^{1,2}, Белых А.Ю.¹,
Шишкин Д.В.^{1,2}, Асютин Р.Д.¹

¹Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Россия,
117342, Москва, ул. Бутлерова, 15, E-mail: bykov@ntcip.ru

²Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: bykova@mei.ru

РАЗРАБОТКА ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В АДДИТИВНЫХ ПРОЦЕССАХ СПЛАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

АННОТАЦИЯ

Важной характеристикой процесса аддитивного производства изделий из металла является распределение температуры в зоне сплавления. Отклонение от заданного режима работы технологической установки может свидетельствовать о возникновении дефектов в детали. Причиной дефектов могут служить различные факторы вплоть до использования некачественного расходного материала, что в результате может оказать значительное влияние на образование скрытых дефектов и выход детали из строя. Регистрация пространственного распределения температуры в процессе выращивания детали и последующий анализ данных позволят установить связь между отклонениями от расчётного режима и возникновением дефектов. В настоящей работе приведено обоснование выбора метода измерения и оптической схемы. Описан экспериментальный четырехканальный макет для спектральной термографии области расплава материала на основе монохроматического матричного приемника излучения.

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, СПЕКТРАЛЬНАЯ ТЕРМОГРАФИЯ, НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

ВВЕДЕНИЕ

Современные аддитивные технологические процессы [1] позволяют создавать детали с уникальными свойствами, недоступными при использовании субтрактивных и традиционных формообразующих производственных технологий [2-5]. Необходимым условием высокого качества деталей, изготавливаемых при аддитивном производстве, является соблюдение технологических требований и минимизация отклонений от проектного рабочего режима установки аддитивного синтеза. Для выполнения этого условия требуются методические и аппаратные средства мониторинга аддитивного производства в режиме реального времени, которые позволят регистрировать данные о состоянии детали и материала и корректировать параметры установки.

Одним из наиболее значимых показателей аддитивного синтеза изделий из металла является температура ванны расплава. Инфракрасная (ИК) пирометрия с усреднением значения температуры по области конечных размеров [6, 7] является наиболее быстродействующим методом, но не позволяет оценить характер пространственного распределения температуры без дополнительного сканирования. Существующие решения на

основе изображающих яркостных пирометров и тепловизионных ИК-камер обеспечивают регистрацию двумерных пространственных распределений температуры при мониторинге аддитивных процессов [8, 9], однако отсутствие возможности учесть зависимость излучательной способности от длины волны регистрации и температуры объекта увеличивает погрешность измерения [10]. К тому же работа в длинноволновой ИК-области приводит к заметному снижению пространственного разрешения [11]. Методы спектральной термографии, реализуемые на основе изображающих спектральных систем видимого и ближнего ИК-диапазона, свободны от вышеназванных ограничений. К числу таких методов относятся двухволновая пирометрия [12], а также мультиспектральная [13] и гиперспектральная съёмка [14]. Двухволновые пирометры видимого и ближнего ИК-диапазона являются технически простым и доступным решением, однако погрешность измерения таких приборов значительно возрастает при температуре объекта менее 2000 °С. Наименьшую погрешность измерения в широком диапазоне температур обеспечивают гиперспектральные системы. Однако, вне зависимости от принципа действия, такие системы формируют полный массив данных посредством пространственного или спектрального сканирования, что снижает их временное разрешение и затрудняет применение для термографии нестационарных объектов и процессов.

Мультиспектральные камеры являются компромиссным решением, способным обеспечить низкую погрешность определения температуры за счет наличия нескольких спектральных каналов, высокое временное разрешение за счет отсутствия сканирования и удовлетворительное пространственное разрешение. Схема мультиспектральной камеры с пространственным разделением спектральных каналов [15] является подходящей основой для экспериментального макета, допуская вариативность оптических схем отдельных спектральных каналов и расположения спектральных фильтров. В настоящей работе описан экспериментальный макет мультиспектральной камеры с пространственным разделением спектральных каналов, предназначенный для отработки алгоритмов и методики спектральной термографии ванны расплава в ходе аддитивных производственных процессов. Оригинальная конструкция макета позволяет использовать для формирования спектральных изображений коммерчески доступные объективы для машинного зрения и узкополосные спектральные фильтры.

Конструкция экспериментального макета оптической системы

Схема разработанного макета и его внешний вид представлены на рис. 1. В сравнении с типом конструктивного исполнения мультиспектральной камеры, получившим распространение в качестве портативного устройства для размещения на подвижных платформах при съемке различных объектов в задачах агрофотоники [16], в предлагаемой конструкции изображающие линзовые компоненты разнесены в пространстве относительно оси наблюдения камеры, а не сгруппированы непосредственно перед светочувствительной площадкой матричного приемника излучения. При этом сведение спектральных изображений на одном приемнике излучения в разработанной схеме обеспечивается системой зеркал (см. рис. 1) [17].

Система для контроля распределения температуры может использоваться как инструмент диагностики в различных типах аддитивных процессов сплавления металлов. При этом наиболее универсальной будет конфигурация, размещаемая непосредственно в технологической камере установки аддитивного синтеза. Ванна расплава должна укладываться в поле зрения системы. На основании данных допущений были сформулированы требования к рабочему расстоянию и линейному полю зрения системы в пространстве предметов: 300 мм и 10 мм, соответственно.

Для получения высокого пространственного разрешения, обеспечения удобства компоновки и одновременного повышения количества спектральных каналов в сравнении с двухволновыми изображающими пирометрами и цветными RGB-камерами макет системы

включает в себя четыре идентичных по конструкции спектральных канала с разными спектральными фильтрами. В качестве приемника излучения была выбрана монохромная КМОП-матрица (The Imaging Source DMK 33GX264, типоразмер матрицы 2/3 дюйма, разрешение 2448×2048 пикселей, размер пикселя $3,45 \text{ мкм}$), относительная спектральная чувствительность которой составляет не ниже 40% в диапазоне длин волн $400\text{--}850 \text{ нм}$. С учетом размеров линейного поля зрения в пространстве предметов и пространстве был выбран объектив с фокусным расстоянием 75 мм , относительным отверстием $1:2,8$ и возможностью подстройки рабочего расстояния (ZLKC VM7528MP5). Интерференционные спектральные фильтры диаметром $25,4 \text{ мм}$ с центральными длинами волн пропускания $620, 660, 780$ и 840 нм размещены по ходу лучей перед первой преломляющей поверхностью объективов. Выбор центральных длин волн был произведен исходя из номенклатуры коммерчески доступных фильтров для двух пар близкорасположенных каналов.

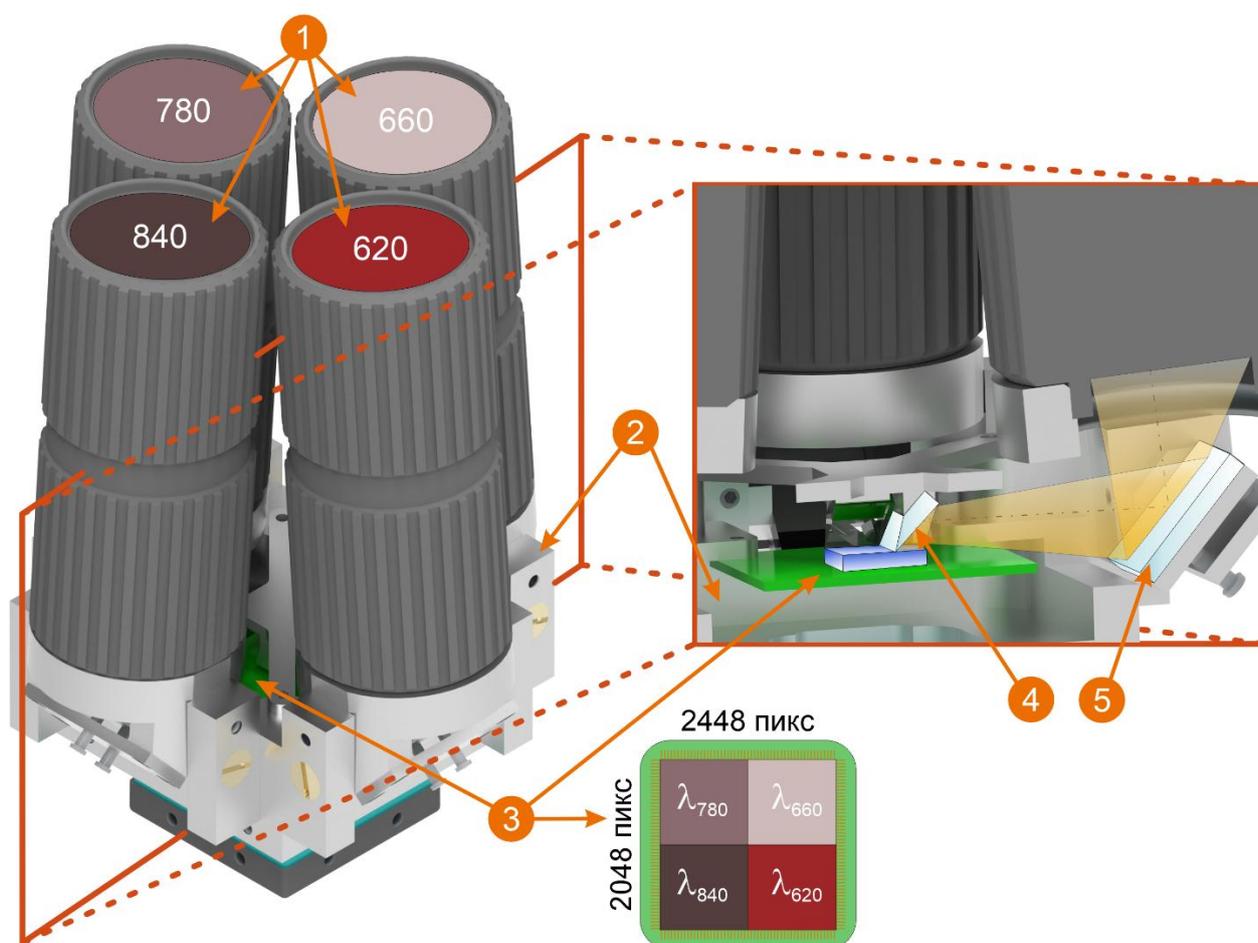


Рис. 1. Схема разработанного макета оптической системы для контроля распределения температуры: 1 – объективы со спектральными фильтрами; 2 – несущая рама с поворотными оправами; 3 – матричный приёмник излучения; 4 – неподвижные зеркала; 5 – юстируемые зеркала

Конструкция несущих элементов макета обеспечивает вынос изображающих компонентов за габариты приемника излучения, что обуславливает возможность применения взаимозаменяемых стандартных коммерчески доступных объективов, оснащенных крепежной резьбой $1\text{-}32 \text{ UN } 2\text{A}$ (C-mount). Это, в свою очередь, позволяет адаптировать масштаб изображения и рабочее расстояние в зависимости от конкретной задачи путем замены объективов. В то же время это становится причиной необходимости сведения осей спектральных каналов для совмещения их полей зрения. Для реализации совмещения каналов в конструкции несущей рамы предусмотрены поворотные оправы для объективов. Угол между нормалью к плоскости предмета и осью объектива каждого из спектральных каналов составляет 6° .

Излом оси каждого из спектральных каналов осуществляется дважды при помощи пары зеркал: малого неподвижного зеркала, установленного перед светочувствительной площадкой приёмника излучения, и большого юстируемого зеркала, установленного на поворотной оправе. Регулировка наклона юстируемого зеркала относительно оси объектива позволяет дополнительно скорректировать положение спектрального изображения на приемнике излучения для компенсации неточностей изготовления механических деталей. Окончательная коррекция изображений производилась с учетом свойств составных элементов макета, определяемых в ходе предварительной калибровки.

Предварительная калибровка макета оптической системы

Одним из условий обеспечения повторяемости измерений является коррекция искажений регистрируемых данных, обусловленных свойствами составных элементов макета. Для этого была разработана процедура предварительной калибровки системы, которая состоит из нескольких этапов (см. рис. 2).

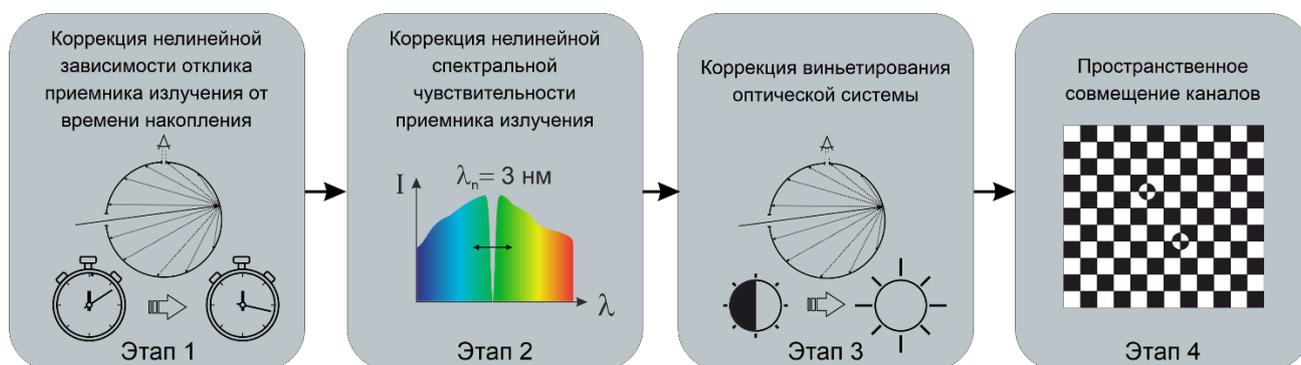


Рис. 2. Основные этапы процедуры предварительной калибровки

На первом этапе регистрируется набор изображений интегрирующей сферы с широкополосным источником излучения. Интенсивность излучения сферы подстраивается таким образом, чтобы максимальные значения на гистограмме изображения не превышали уровня 80% от всей ширины динамического диапазона приемника излучения при времени накопления $1/25 \text{ с}$, что соответствует частоте кадров 25 к/с . Затем время накопления с равномерным шагом уменьшается до таких значений, при которых полезный сигнал не будет различим на уровне шума, и на каждом промежуточном шаге регистрируются изображения. На основе полученной серии изображений формируются зависимости величины отклика приемника от времени накопления для каждого спектрального канала. Наличие сведений о виде таких зависимостей позволяет исключить влияние нелинейности отклика при изменении времени накопления сигнала, вызванном изменением температуры объекта.

На втором этапе регистрируется набор изображений светового пятна, формируемого монохроматическим излучением. Световое пятно на поверхности образца диффузно отражающего материала со спектрально равномерным коэффициентом отражения формируется при помощи эталонного широкополосного источника излучения, сопряженного с перестраиваемым монохроматором. Монохроматор перестраивается с шагом 10 нм в пределах диапазона $550\text{-}900 \text{ нм}$, на каждом шаге регистрируется изображение. Обработка полученной серии с учетом известной спектральной светимости источника излучения позволяет получить поправочные коэффициенты, используемые для выравнивания кривых спектральной чувствительности отдельных каналов.

На третьем этапе производится вычисление набора поправочных коэффициентов, используемых для коррекции виньетирования в каждом спектральном канале. Поскольку выходное окно интегрирующей сферы является равномерным источником света конечных

размеров, занимающим всё поле зрения системы, её изображения, полученные на этапе 1, могут быть также использованы для коррекции виньетирования.

На последнем этапе регистрируется изображение равномерно освещенной высококонтрастной шахматной миры, позволяющее определить вид преобразований изображения, необходимых для окончательного совмещения спектральных изображений, формируемых спектральными каналами. Набор этих преобразований позволяет устранить влияние параллакса, возникающее вследствие пространственного разнесения каналов, и устранить остаточные смещения, некомпенсированные при юстировке зеркал.

Вычисление пространственного распределения температуры

Наличие информации о спектральном распределении излучения, регистрируемого для каждой точки объекта в пределах поля зрения, скорректированной с учетом свойств элементов системы, дает возможность вычислять соответствующую температуру путем аппроксимации ближайшей кривой Планка в соответствии с соотношением

$$\sum_{i=1}^4 (I(\lambda_i) - \varepsilon \cdot I'(\lambda_i, t))^2 \rightarrow \min,$$

где $I(\lambda_i)$ – зарегистрированный набор спектральных интенсивностей излучения; $I(\lambda_i, t)$ – набор спектральных интенсивностей, соответствующий теоретической кривой Планка; λ_i – длина волны излучения; t – температура объекта в градусах Цельсия; ε – излучательная способность объекта. Оптимизация осуществляется при помощи алгоритма [18] в среде MATLAB. Начальное значение для оптимизации определяется по соотношению значений интенсивности в спектральных каналах 780 и 840 нм. Значение излучательной способности также оптимизируется в пределах от 0 до 1 по умолчанию. Для ускорения оптимизации диапазон излучательной способности может быть задан на основании табличных значений. Таким образом, поточечное вычисление температуры по 4 значениям спектральной интенсивности и подгонка излучательной способности позволяют построить пространственное распределение температуры.

Экспериментальная апробация макета

Для апробации описанного макета и алгоритмов оценки погрешности была выполнена съемка выходной апертуры образцового излучателя – абсолютно черного тела (АЧТ) (Метропир Гелиос ОИ АЧТ). Регулировка температуры проводилась в диапазоне $\Delta t = 900-1400$ °С с шагом 50 °С. При смене температуры съемка осуществлялась только после стабилизации АЧТ, на которую указывал соответствующий индикатор на блоке управления. Время накопления сигнала на при каждой температуре изменялось для поддержания максимального уровня сигнала примерно на уровне 70% динамического диапазона приемника излучения. Примеры исходных и скорректированных спектральных изображений, а также получаемой карты температур показаны на рис. 3а-в.

Для каждой полученной карты температуры были получены значения отклонений температуры от истинного значения для всех точек выходной апертуры АЧТ. На рис. 3г показаны диаграммы размаха отклонений значения температур. Черной чертой обозначены медианные значения, синими сплошными линиями – границы первого и третьего квантилей, синими пунктирными линиями – минимальные и максимальные значения. Медианные значения отклонения температуры от истинного не превышают 31 °С, а средняя погрешность во всем диапазоне температур АЧТ составляет 8 °С.

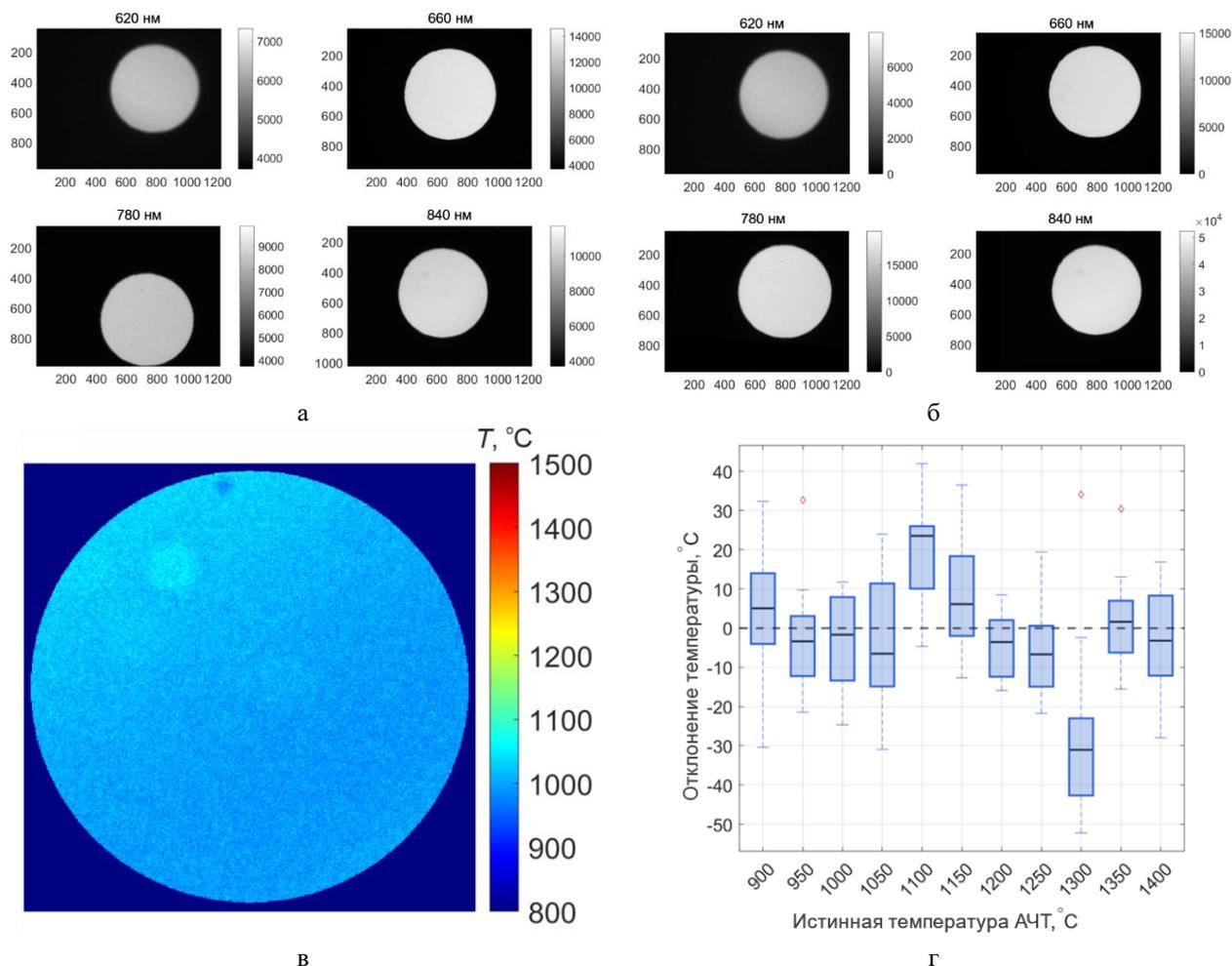


Рис. 3. Примеры исходных (а) и скорректированных (б) спектральных изображений; пример карты температур выходной апертуры АЧТ при истинной температуре 1000°C (в); диаграмма размаха отклонений измеренных значений температуры (г).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан экспериментальный макет оптической системы для контроля распределения температуры в аддитивных процессах сплавления металлов, позволяющий использовать взаимозаменяемые и коммерчески доступные изображающие и спектральные оптические компоненты. Описан алгоритм его предварительной калибровки и вычисления температуры по регистрируемым спектральным изображениям. Экспериментальная апробация макета показала его работоспособность и подтвердила возможность использования четырёхканальной мультиспектральной камеры с пространственным разделением каналов для контроля распределения температуры в аддитивных процессах сплавления металлов. Дальнейшие исследования будут направлены на определение обоснования оптимального выбора центральных длин волн и ширины полос пропускания фильтров спектральных каналов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-10239 (<https://rscf.ru/project/24-79-10239/>). Результаты работы получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН (НТЦ УП РАН) (НТИРФ ID: 456451, <https://ckp.ntcup.ru/>).

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

АЧТ – абсолютно черное тело;

ИК – инфракрасный;

$I(\lambda_i)$ – зарегистрированный набор спектральных интенсивностей излучения;

$I(\lambda_i, t)$ – набор спектральных интенсивностей, соответствующий теоретической кривой Планка;

λ_i – длина волны излучения;

t – температура, °С;

ε – излучательная способность объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ Р 57558-2017.** Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. М.: Стандартинформ, 2020. 12 с.
2. **Patterson T., Hohanadel J., Sutton S., Pantan B., Lippold J.** A review of high energy density beam processes for welding and additive manufacturing applications // *Welding in the World*. 2021. Vol. 65. № 7. Pp. 1235-1306.
3. **Das M., Dixit U.S.** *Advanced Machining Processes // Introduction to Mechanical Engineering*. Cham: Springer International Publishing, 2018.
4. **Osipovich K., Kalashnikov K., Chumaevskii A., Gurianov D., Kalashnikova T., Vorontsov A., Zykova A., Utyaganova V., Panfilov A., Nikolaeva A., Dobrovolskii A., Rubtsov V., Kolubaev E.** Wire-feed electron beam additive manufacturing: a review // *Metals*. 2023. Vol. 13. № 2. P. 279.
5. **Vafadar A., Guzzomi F., Rassau A., Hayward K.** Advances in metal additive manufacturing: a review of common processes, industrial applications, and current challenges // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. № 3. P. 1213.
6. **Belikov R., Merges D., Varentsov D., Major Z., Neumayer P., Hesselbach P., Schanz M., Winkler B.** Fast multi-wavelength pyrometer for dynamic temperature measurements // *International Journal of Thermophysics*. 2024. Vol. 45. № 2. P. 29.
7. **Mamuschkin V., Haeusler A., Engelmann C., Olowinsky A., Aehling H.** Enabling pyrometry in absorber-free laser transmission welding through pulsed irradiation // *Journal of Laser Applications*. 2017. Vol. 29. № 2. P. 022409.
8. **Vuelban E. M., Girard F., Battuello M., Nemeček P., Maniur M., Pavlásek P., Paans T.** Radiometric techniques for emissivity and temperature measurements for industrial applications // *International Journal of Thermophysics*. 2015. Vol. 36. № 7. Pp. 1545-1568.
9. **Everton S.K., Hirsch M., Stravroulakis P., Leach R.K., Clare A.T.** Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing // *Materials & Design*. 2016. Vol. 95. Pp. 431-445.
10. **Mazzarisi M., Angelastro A., Latte M., Colucci T., Palano F., Campanelli S.L.** Thermal monitoring of laser metal deposition strategies using infrared thermography // *Journal of Manufacturing Processes*. 2023. Vol. 85. Pp. 594-611.
11. **Grujić K.A.** Review of thermal spectral imaging methods for monitoring high-temperature molten material streams // *Sensors*. 2023. Vol. 23. № 3. P. 1130.
12. **Myers A.J., Quirarte G., Ogoke F., Lane B.M., Uddin S.Z., Farimani A.B., Beuth J.L., Malen J.A.** High-resolution melt pool thermal imaging for metals additive manufacturing using the two-color method with a color camera // *Additive Manufacturing*. 2023. Vol. 73. P. 103663.
13. **Poissenot-Arrigoni C., Marcon B., Rossi F., Fromentin G.** In-situ pixel-wise emissivity measurement using a multispectral infrared camera // *Journal of Imaging*. 2023. Vol. 9. № 10. P. 198.

14. **Staudt T., Eschner E., Schmidt M.** Temperature determination in laser welding based upon a hyperspectral imaging technique // *CIRP Annals*. 2019. Vol. 68. № 1. Pp. 225-228.
15. **Shogenji R., Kitamura Y., Yamada K., Miyatake S., Tanida J.** Multispectral imaging using compact compound optics // *Optics Express*. 2004. Vol. 12. № 8. P. 1643.
16. **Batshev V.I., Krioukov A.V., Machikhin A.S., Zolotukhina A.A.** Multispectral video camera optical system // *Journal of Optical Technology*. 2023. Vol. 90. № 11. Pp. 706-712.
17. **Bykov A., Zolotukhina A., Poliakov M., Belykh A., Asyutin R., Korneeva A., Batshev V., Khokhlov D.** Four-wavelength thermal imaging for high-energy-density industrial processes // *J. Imaging*. 2025. Vol. 11. № 6. P. 176.
18. **Lagarias J.C., Reeds J.A., Wright M.H., Wright P.E.** Convergence properties of the Nelder-Mead simplex method in low dimensions // *SIAM Journal on Optimization*. 1998. Vol. 9. № 1. Pp. 112-147.

Khokhlov D.D.^{1,2}, Bykov A.A.^{1,2}, Poliakov M.P.¹, Zolotukhina A.A.^{1,2}, Belykh A.Yu.¹,
Shishkin D.V.^{1,2}, Asyutin R.D.¹

¹*Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Russia,
117342, Moscow, Butlerova st., 15*

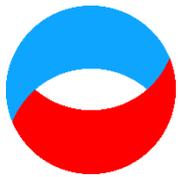
²*National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: bykovala@mpei.ru*

DEVELOPMENT OF AN OPTICAL SYSTEM FOR MONITORING TEMPERATURE DISTRIBUTION IN ADDITIVE METAL FUSION PROCESSES

ABSTRACT

An important characteristic of the additive manufacturing process of metal products is the temperature distribution in the fusion zone. Deviation from the specified operating mode of the process unit may indicate the occurrence of defects in the part. Defects can be caused by various factors, including the use of low-quality consumables, which can ultimately have a significant impact on the formation of hidden defects and failure of the part. Acquisition of the spatial temperature distribution during the growth of the part and subsequent data analysis will allow one to establish a relationship between deviations from the calculated mode and the occurrence of defects. This paper provides a rationale for choosing the measurement method and optical scheme. An experimental four-channel setup for spectral thermography of the melt pool of the material based on a monochromatic image sensor is described.

ADDITIVE TECHNOLOGIES, SPECTRAL THERMOGRAPHY, NON-DESTRUCTIVE TESTING



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 681.723.22

Марченков А.Ю., Печинская О.В., Свиридов Г.Б.

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: zhukovaov@mpei.ru*

**МОДЕРНИЗАЦИЯ МИКРОСКОПА-ТВЕРДОМЕРА
ИЗ СОСТАВА ПРИБОРА МЭИ Т-7**

АННОТАЦИЯ

Безобразцовый контроль механических свойств металлов непосредственно в изделиях машиностроения является одним из основных направлений работы научно-исследовательских лабораторий по технологическим испытаниям. С увеличением доли устаревающего промышленного оборудования работы по безобразцовому контролю свойств металлов становятся все более востребованными. Прибор МЭИ Т-7 был разработан в МЭИ на основе микроскопа-твердомера МПВ-1 во второй половине XX века и нуждается в некоторой модернизации. В рамках совместных инициативных исследований сотрудниками кафедры технологии металлов и кафедры физики им. В.А. Фабриканта была создана модель микроскопа-твердомера с уменьшением габаритов головки призмы и заменой осветителя на более автономный, по сравнению с лампой накаливания, светодиодный. В статье приведен расчет оптической системы микроскопа с заменой штатной отражательной призмы на полупентапризму. Представлена 3D-модель микроскопа-твердомера. Показано, что заявленные поля зрения и цена деления микроскопа обеспечиваются заложенными в конструкции решениями. Представлены результаты макетирования микроскопа-твердомера, в том числе, результаты измерений цены деления отсчетного микроскопа со штатными объективами.

РАСЧЕТ МИКРОСКОПА, ТВЕРДОМЕР, ПОЛУПЕНТАПРИЗМА, ПРОТОТИП, ЦЕНА ДЕЛЕНИЯ

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на то, что существует большое количество современных методов изучения прочностных свойств материалов [1-6], методы индентирования не теряют своей актуальности [7-12]. Более того, периодический мониторинг механических свойств металлов непосредственно в изделиях машиностроения в процессе эксплуатации с использованием индентирования позволяет получать ценную информацию о фактических механических свойствах металла, необходимую для оценки оставшегося срока службы [12].

Отсчетный микроскоп МПВ-1 из состава твердомера снабжен объективами 3,7[×] и 10[×], а также окулярным микрометром с окуляром 12,5[×]. Как и металлографические микроскопы, микроскоп-твердомер предназначен для работы только в отраженном свете. Излучение от источника проходит линзу и, отразившись от светоделительной пластинки, проходит в объектив и далее на исследуемый образец. Изображение образца проецируется объективом в фокальной плоскости окуляра. Для удобства наблюдения тубус окуляра расположен под углом 45° к оптической оси объектива. Для изменения хода лучей применяется

разновидность призмы AP-90°, полученная деформированием базовой призмы с изменением угла отклонения лучей на 45° [13]. Призма размещена в полусферической головке. Конструктив прибора МЭИ Т-7 был выполнен таким образом, что головка микроскопа в положении измерения размера отпечатка упиралась в консоль. Поэтому приходилось удалять часть материала с головки, что придавало не эстетичный вид прибору. Основными задачами модернизации микроскопа МПВ-1 из состава прибора МЭИ Т-7 являлись замена источника излучения на светодиодный и уменьшение габаритов головки. Светодиодный источник обеспечивает автономную работу прибора, так как питание светодиода может осуществляться от аккумуляторных батарей.

Модернизация конструкции отсчетного микроскопа проходила в несколько этапов: воспроизведение хода лучей в микроскопе; замена отражательной призмы на более компактную; проверка увеличения и поля зрения по результатам расчёта; разработка 3D-модели и выпуск чертежей механических и оптических деталей; изготовление прототипа отсчетного микроскопа.

ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА МИКРОСКОПА

С призмой AP-45°

На рис. 1 показан внешний вид отсчётного микроскопа МПВ-1 с объективом OM-12 (увеличение 3,7 \times) и окулярным микрометром, в состав которого входит ортоскопический окуляр 12,5 \times , а также три плоско параллельные пластинки, обеспечивающие измерения с помощью подвижной и неподвижной шкал. В табл. 1 приведены конструктивные параметры объектива OM-12 [14], а в табл. 2 – ортоскопического окуляра [15]. Все оптические материалы взяты из каталога ЛЗОС. В расчете окуляра материал ТК3 был заменен на ТК23, так как в используемых при расчете каталогах не представлено стекло марки ТК3, а стекло ТК23 является его близким аналогом.



Рис. 1. Отсчётный микроскоп МПВ-1

Табл. 1. Конструктивные параметры объектива ОМ-12 (3,7×0,11)

r , мм	d , мм	n (марка стекла)	D , мм
∞	2,5	1,4982 (К1)	7,0
-7,70	1,2	1,5826 (BF8)	7,0
-19,10	14,25	-	7,0
∞	1,2	1,6259 (BF12)	8,5
23,03	2,1	1,5100 (К3)	8,5
-23,03	-	-	8,5

Табл. 2. Конструктивные параметры окуляра АМ-18 (12,5×)

r , мм	d , мм	n (марка стекла)	D , мм
∞	4,5	1,5164 (К8)	18
-17,5	15,8	-	18
14,9	4,5	1,5891 (ТК3 ¹)	10
-11,05	1,0	1,6129 (F1)	10
∞	$\Sigma d = 25,8$	-	10

Объектив строит промежуточное изображение в плоскости сетки окулярного микрометра. Размер и положение плоскопараллельных пластин, в том числе сетки, были получены с серийно производимого окулярного микрометра, в расчете для моделирования пластин использовался материал К8. Размеры отражательной призмы: основание $a = 29,5$ мм, высота $h = 12,5$ мм, ширина $b = 14,0$ мм, материал – БК10. На рис. 2 показан разрез 3D-модели конструктива микроскопа без объектива и окуляра, где показано взаимное расположение призмы 1, плоскопараллельной светоделительной пластины 2 и линзы осветителя 3. Элемент 4 схематично показывает расчетное положение излучателя.

Оба объектива, используемые при работе отсчетного микроскопа МПВ-1 рассчитаны на длину тубуса 160 мм и предназначены для работы без иммерсии. Схема расположения объективов относительно тубуса микроскопа показана на рис. 3 на примере объектива М-42 (8×0,20) [15]. Поскольку объективы микроскопов 3,7×0,11 и 10×0,30 рассчитаны на длину тубуса 160 мм, схема расположения относительно тубуса будет идентичной. На рис. 2-3 обозначены: A – верхний срез тубуса, B – плоскость изображения (с ней совмещается фокальная плоскость окуляра), C – диафрагма в оправе объектива, D – нижний срез тубуса, E – вершина последней преломляющей поверхности объектива, F – вершина первой преломляющей поверхности объектива g – предмет, H – верхняя поверхность покровного стекла (толщина покровного стекла 0,17 мм). Следует отметить, что в составе отсчетного микроскопа МПВ-1 объективы работают в отраженном свете без покровного стекла. Это не сильно отражается на результатах расчета оптической схемы, на доли мм увеличивается рабочий отрезок объектива.

¹ Заменен на ТК23

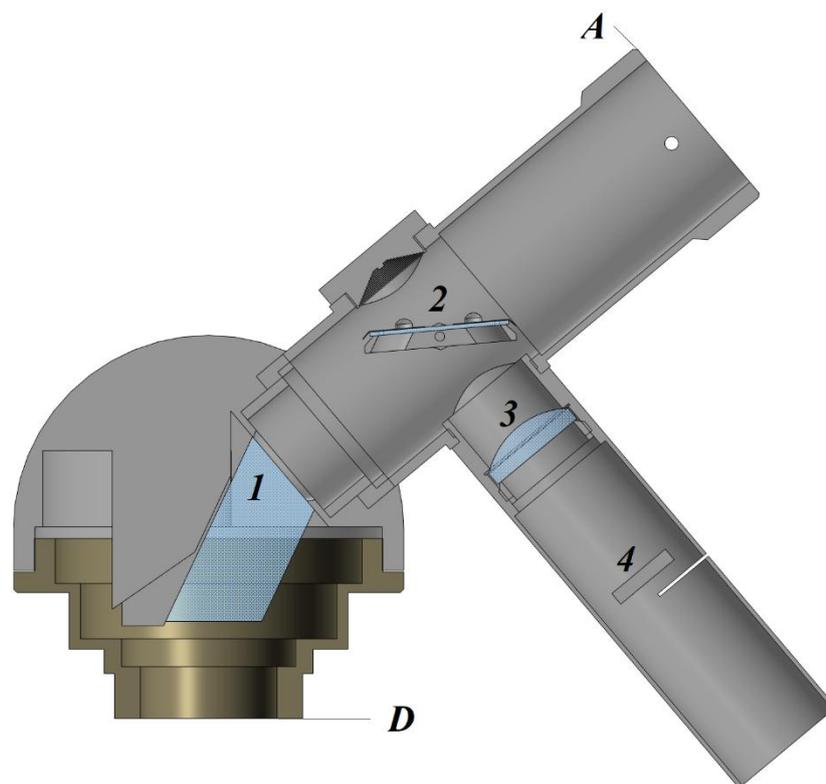


Рис. 2. Микроскоп МПВ-1 (разрез). Осветитель развернут. Объектив и окуляр не показаны

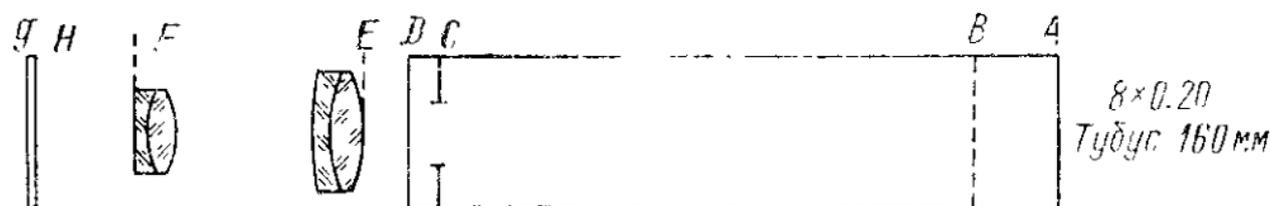


Рис. 3. Схема расположения объективов относительно тубуса микроскопа [15]

Для объективов, рассчитанных на длину тубуса 160 мм, необходимо обеспечить следующие расстояния: $AD = 160$ мм, $AB = 13,0$ мм [15]. Для объектива ОМ-12, для которого проводился расчет, $Dg = 50$ мм, $Fg = 28$ мм [16]. Эти данные справедливы для прямого тубуса без учета хода луча в отражательной призме и светоделительной плоскопараллельной пластинке.

С полупентапризмой

Поскольку в ходе работы над микроскопом МПВ-1 было принято решение заменить головку на аналогичную, но меньшего размера, типа головки микроскопа МБД и т.п., была также заменена отражательная призма. Призма АР-45° была заменена на полупентапризму (БУ-45°), габариты которой соответствуют призме, используемой в микроскопе Биолам С1 и подобных. В связи с этим ход лучей сократился, следовательно, необходимо было пересчитать расстояния от выходной грани призмы до плоскости источника в канале осветителя и длину тубуса. Согласно расчёту (рис. 4) расстояние от выходной грани призмы до плоскости промежуточного изображения составляет 119,94 мм. На рисунке также обозначены: рабочее расстояние объектива 28 мм, расстояние от первой преломляющей поверхности объектива до входной грани призмы 30 мм, расстояние от выходной грани призмы до плоско параллельной светоделительной пластины 26 мм и расстояние от плоскости промежуточного изображения до передней линзы окуляра 6,2 мм.

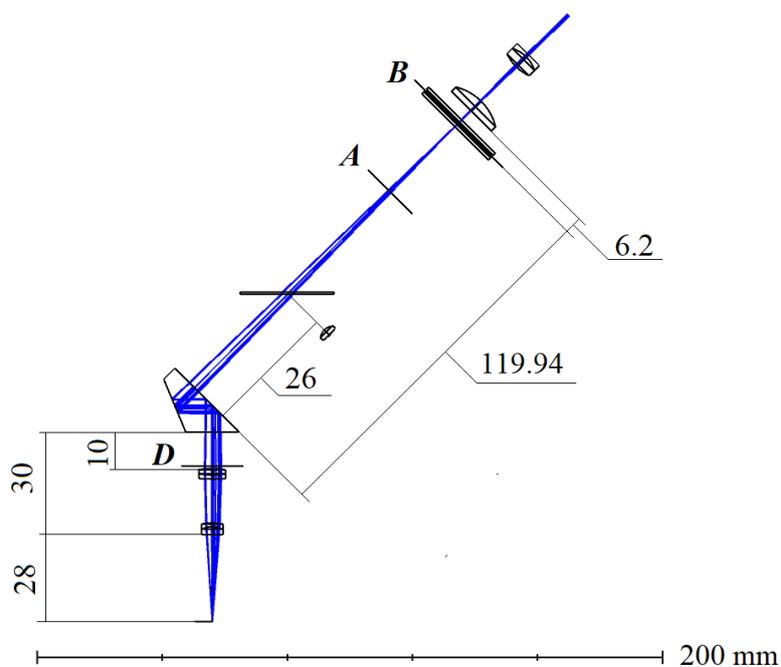


Рис. 4. Ход лучей в модернизированном микроскопе

При установке окуляра в плоскости изображения объектива должна оказаться передняя фокальная плоскость окуляра, которая совпадает с плоскостью сетки (рис. 5). Определить положение выходного торца тубуса можно, зная положение посадочного фланца окулярного микрометра МПВ-1 относительно задней поверхности сетки 2, расположенной в фокальной плоскости окуляра. Измеренное и установленное при расчете расстояние от посадочного фланца окуляра до плоскости промежуточного изображения составляет 31 мм. Цифрами 1, 2 и 3 обозначены плоскопараллельные пластины, на которые нанесены шкалы (подвижные и неподвижные). Толщина пластин 1 и 3 составляет 1 мм, толщина пластинки 2 – 0,5 мм.

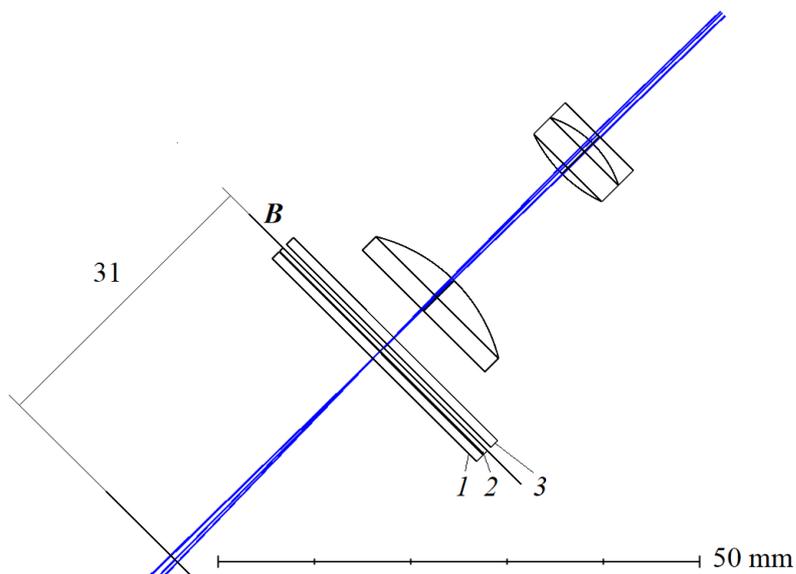


Рис. 5. Ход лучей в окулярном микрометре

Таким образом, расстояние от выходной грани призмы до верхнего среза тубуса (плоскость A) составляет $119,94 - 31 = 88,94$ мм. Полная длина тубуса зависит от его расположения относительно призмы и определяется посадкой тубуса в головку. После того, как оптические элементы размещены верно, о чем свидетельствует параллельный пучок на выходе из окуляра, и на схеме отмечено положение опорных плоскостей механических деталей, можно приступить к переработке конструкции прибора.

Канал осветителя

В ходе работы над каналом осветителя было выяснено, что тубус необходимо расположить как можно ближе к призме. Для того чтобы не уменьшать апертуру линзы осветителя при том же фокусном расстоянии. Можно было бы пересчитать канал осветителя и использовать более длиннофокусную линзу, но такой шаг представляется менее целесообразным, чем решение об усечении головки, о чём написано далее.

Светоделительная пластинка была расположена к линзе настолько близко, насколько это возможно без уменьшения апертуры. Затем, для установки светоделительной пластинки в расчётное положение, часть головки была срезана, а тубус придвинут к выходной грани призмы. Расстояние от выходной грани призмы до передней главной плоскости линзы (совпадает с вершиной преломляющей поверхности) по расчёту составило 60 мм. При этом положение плоскости источника относительно передней главной плоскости линзы осветителя составило 26,52 мм, а относительно плоской поверхности – 22 мм. На рис. 6 показана 3D-модель (разрез) отсчетного микроскопа с полупентапризмой, уменьшенной и усеченной головкой и укороченным тубусом. Расстояние от выходной грани призмы до передней посадочной плоскости тубуса составляет 18,38 мм.

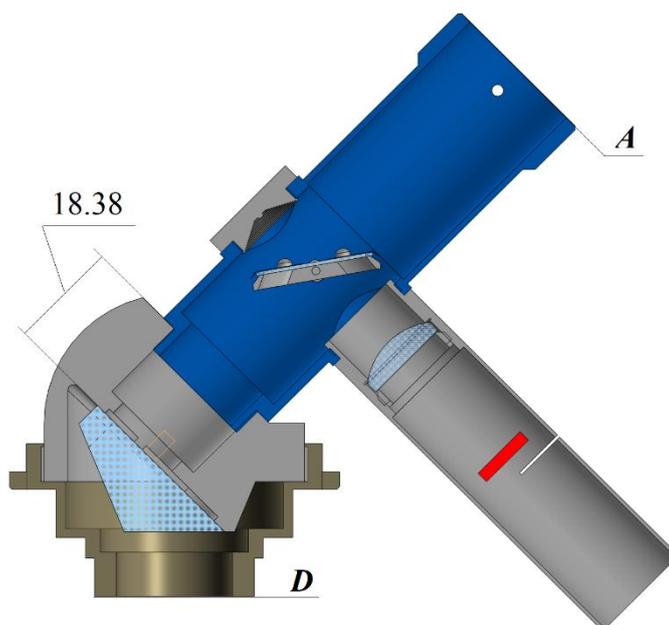


Рис. 6. Модернизированный микроскоп МПВ-1 (разрез). Осветитель развернут. Объектив и окуляр не показаны

Характеристики, полученные на модели: поле зрения, увеличение, соответствуют микроскопу МПВ-1. Строгие ограничения на размеры механических деталей не накладываются, поскольку совмещение плоскости изображения линзы осветителя с задней фокальной плоскостью объектива регулируется путем обрезки конца трубки, в которой установлены объектив и источник (или путем регулировки положения источника относительно задней фокальной плоскости объектива). Совмещение плоскости изображения объектива микроскопа с передней фокальной плоскостью окуляра обеспечивается подрезкой торца тубуса. Этот метод юстировки является стандартным при сборке микроскопов.

ПРОТОТИП ОТСЧЕТНОГО МИКРОСКОПА

Для изготовления прототипа были изготовлены следующие детали: тубус, крышка тубуса, втулка светодиодного источника, головка призмы, фланец объектива и гайка (рис. 7). Объектив, окулярный микрометр, призма, светоделительная пластина, а также линза

с некоторыми крепежными элементами были заимствованы из комплекта серийно выпускаемого отсчетного микроскопа МПВ-1. Данное решение продиктовано следующими соображениями: модернизированный микроскоп-твердомер планируется комплектовать серийно изготавливаемыми объективами и окулярными микрометрами производства АО «ЛОМО»; успешная сборка деталей макета и серийно изготовленных деталей подтверждает их совместимость и правильность принятых конструкторских решений.



Рис. 7. Прототип модернизированного отсчетного микроскопа: 1 – тубус, 2 – крышка, 3 – втулка, 4 – головка, 5 – фланец, 6 – кольцо

На рис. 8 показан внешний вид прибора МЭИ Т-7 с установленным прототипом микроскопа-твердомера.

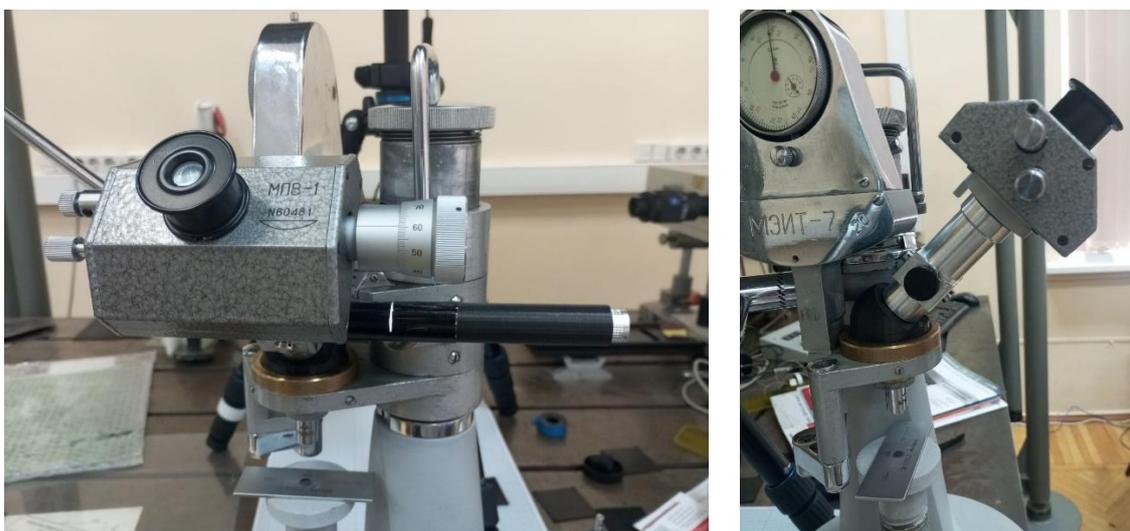


Рис. 8. Прототип модернизированного отсчетного микроскопа, установленный в прибор МЭИ Т-7 для проверки цены деления

После изготовления деталей и сборки прототипа необходимо было проверить фактическое увеличение (цену деления шкалы барабана микроскопа) системы. Согласно методике поверки [17] для того, чтобы проверить цену деления отсчетного микроскопа необходимо использовать объект-микрометр типа ОМП. Поскольку разрабатываемый

микроскоп предназначен для работы в отраженном свете, было принято решение использовать для проверки цены деления объект-микрометр отраженного света (ОМО). Объект-микрометр помещают на столик твердомера. Получают резкое изображение шкалы объект-микрометра (рис. 9), штрихи ОМО выставляют параллельно штрихам сетки отсчетного микроскопа. По неподвижной шкале микроскопа и барабану микрометрического винта снимают отсчеты a_1 и a_2 , соответствующие крайним штрихам объект-микрометра.



Рис. 9. Поле зрения прототипа модернизированного микроскопа с изображением шкалы ОМО. Объектив 3,7[×]

Согласно [17] цена деления шкалы при использовании объектива с увеличением 10[×] должна быть в пределах 0,99 до 1,01 мкм, а при использовании объектива увеличением 3,7[×] – в пределах от 2,49 до 2,51 мкм. Цена деления отсчетного микроскопа с объективом 10[×]

$$c = \frac{l}{a_2 - a_1} = \frac{700}{967 - 116} = 0,823 \text{ мкм},$$

где l – расстояние между штрихами объект микрометра, выраженное в мкм. Поскольку при использовании объектива увеличением 10[×] не вся шкала объект-микрометра помещается в поле зрения микроскопа, расчет был произведен по расстоянию между штрихами 0,7 мм. Цена деления отсчетного микроскопа с объективом 3,7[×]

$$c = \frac{l}{a_2 - a_1} = \frac{1000}{790 - 391} = 2,506 \text{ мкм},$$

что соответствует паспортным характеристикам микроскопа-твердомера МПВ-1. Цена деления отсчетного микроскопа с объективом 10[×] меньше допускаемой по методике поверки. Это может быть связано с тем, что микроскоп увеличением 3,7[×], участвующий в испытаниях, был взят из комплекта другого измерительного микроскопа МИР-2. В то время как 10[×] – из комплекта биологического микроскопа, который не предназначен для измерений. Поэтому реальное увеличение объектива может незначительно отличаться от номинального. В таком случае следует подобрать объектив с меньшим увеличением или юстировать положение объектива с помощью прокладных колец до достижения номинального увеличения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работ по модернизации отсчетного микроскопа типа МПВ-1 было выполнено обратное проектирование прибора. Затем были внесены изменения в конструкцию: заменена призма, а также осветитель прибора. Пересчитаны размеры и положение механических деталей с целью получения требуемых технических характеристик, в том числе, цены деления отсчетного микроскопа. Выполнен оптический расчет, создана 3D-модель, выпущены чертежи, по которым изготовлены ключевые детали отсчетного микроскопа. Изготовленный прототип изделия был испытан в составе прибора МЭИ Т-7. В результате испытаний было показано, что прототип обеспечивает требуемую цену деления с объективом 3,7[×]. Дальнейшая работа будет направлена на устранение выявленных недостатков: подбор объектива, обеспечивающего требуемую цену деления, замена втулки светодиодного источника на другую, которая позволяла бы регулировать положение источника. Возможно дооснащение

канала осветителя диафрагмой для регулировки яркости. По результатам будут внесены изменения в документацию и выпущен макет отсчетного микроскопа типа МПВ с доработками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Wenga J., Lindvall R., Zhuanga K., Ståhl J.-E., Dinga H., Zhou J.** A machine learning based approach for determining the stress-strain relation of grey cast iron from nanoindentation // *Mechanics of Materials*. 2020. Vol. 148. P. 1035.
2. **Rossi E., Wheeler J. M., Sebastiani M.** High-speed nanoindentation mapping: A review of recent advances and applications // *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2023. Vol. 27(5). P. 101107.
3. **Arunakumara P.C., Sagar H.N., Bimal Gautam, Raji G., Rajeesh S.** A review study on fatigue behavior of aluminum 6061 T-6 and 6082 T-6 alloys welded by MIG and FS welding methods // *Materials Today: Proceedings*. 2023. Vol. 74. Part 2. Pp. 293-301.
4. **Zhang S., Ghatei-Kalashami A., Midawi A. R. H., Zhou N. Y.** A Comparison between hardness-scaling and ball-Indentation techniques on predicting stress/strain distribution and failure behavior of resistance spot welded advanced high strength steel // *ASME. J. Manuf. Sci. Eng.* 2022. Vol. 144(8). P. 081006.
5. **D'Antino T., Papanicolaou C.** Comparison between different tensile test set-ups for the mechanical characterization of inorganic-matrix composites // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 171. Pp. 140-151.
6. **Матюнин В.М., Волков П.В., Барат В.А., Марченков А.Ю., Жгут Д.А., Цветкова Н.О.** Скретч-тестирование поверхностных слоев материалов и покрытий с использованием акустической эмиссии // *Технология металлов*. 2023. № 12. С. 17-23.
7. **Zhang Y., Xue H., Wang S., Yang C., Wang Z.** Study on correlation and scaling protocol between indentation stress-strain and uniaxial stress-strain // *Structures*. 2024. Vol. 59. P. 105684.
8. **Ma Z.S., Zhou Y.C., Long S.G., Zhong X.L., Lu C.** Characterization of stress-strain relationships of elastoplastic materials: An improved method with conical and pyramidal indenters // *Mechanics of Materials*. 2012. Vol. 54. Pp. 113-123.
9. **Herbert E.G., Pharr G.M., Oliver W.C., Lucas B.N., Hay J.L.** On the measurement of stress-strain curves by spherical indentation. *Thin Solid Films*. 2001. Vol. 398-399. Pp. 331-335.
10. **Матюнин В.М., Марченков А.Ю., Волков П.В. и др.** Преобразование кинетических диаграмм вдавливания сферического индентора в диаграммы растяжения для металлических конструкционных материалов // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2022. Т. 88. № 2. С. 54-63.
11. **Матюнин В.М., Марченков А.Ю., Волков П.В. и др.** Построение диаграмм истинных напряжений и деформаций при растяжении с определением механических свойств материалов по результатам инструментального индентирования вдавливанием и царапанием // *Технология металлов*. 2024. № 9. С. 26-36
12. **Матюнин В.М., Марченков А.Ю., Цветкова Н.О. и др.** Свойства диаграмм истинных напряжений в области сосредоточенной деформации и разрушения материалов при растяжении // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2024. Т. 90. № 8. С. 64-71.
13. **Кожевников Ю.Г.** Оптические призмы. Проектирование, исследование, расчет. М.: Машиностроение, 1984. 152 с.
14. **Иванова Т.А., Кирилловский В.К.** Проектирование и контроль оптики микроскопов. Л: Машиностроение, 1984. 231 с.

15. Скворцов Г.Е., Панов В.А., Поляков Н.И., Федин Л.А. Микроскопы Л: Машиностроение, 1969. 512 с.
16. Федин Л.А. Микроскопы, принадлежности к ним и лупы. Справочная книга. М: Оборонгиз, 1961. 252 с.
17. МИ 100-76 Методика поверки отсчетных микроскопов типа МПВ-1. М.: изд. стандартов, 1977. 6 с.

Marchenkov A.Yu., Pechinskaya O.V., Sviridov G.B.

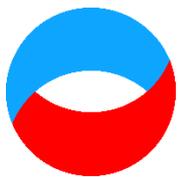
*National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: zhukovaov@mpei.ru*

MODERNIZATION OF THE HARDNESS TESTER MICROSCOPE FROM THE MEI T-7 DEVICE

ABSTRACT

The outrageous control of the mechanical properties of metal directly in mechanical engineering products is one of the main areas of work of the technological testing research laboratories. With the increasing share of aging industrial equipment, work on the outrageous control of metal properties is becoming more and more in demand. The MEI T-7 device was developed based on the MHV-1 hardness tester microscope in the second half of the twentieth century and needs some modernization. As part of joint initiative a model of a hardness tester microscope was created with a reduction in the size of the prism head and the replacement of the light source with a more autonomous LED lamp compared to an incandescent lamp. The article presents a calculation of the optical system of a microscope with the replacement of a standard reflective prism with a semi-pentaprism. A 3D model of a hardness tester microscope is presented. It is shown that the claimed fields of view and the microscope dividing value are provided by the solutions inherent in the design. The results of the mock-up of a hardness tester microscope are presented, including the results of measuring the division value of the microscope.

**MICROSCOPE DESIGN, HARDNESS TESTER, HALF-PENTA PRISM, PROTOTYPE,
DIVISION VALUE**



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 681.7.067.2, 681.786

Гоголев К.С., Печинская О.В.

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: GogolevKS@mpei.ru*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БИТЕЛЕЦЕНТРИЧЕСКОГО
ОБЪЕКТИВА С ОДНОКРАТНЫМ УВЕЛИЧЕНИЕМ**

АННОТАЦИЯ

В современном промышленном производстве контроль качества параметров готовой продукции является важнейшим этапом. Производство изделий прецизионного качества невозможно без применения высококачественного промышленного оборудования для металлообработки, одним из ключевых элементов которого является оснастка. Своевременный контроль и замена оснастки является залогом выпуска изделий высокого класса. Таким образом, разработка оптико-электронных систем для оперативных неразрушающих измерений, так называемого геометрического контроля, является важнейшей задачей для многих отраслей промышленности. В последнее время активно применяются измерительные системы, работающие на основе метода теневой проекции. Эти системы позволяют точно и быстро определять геометрические параметры сложных изделий. Ключевым элементом такой системы является объектив, который проецирует теневое изображение на матрицу фотоприемника. Наличие либо отсутствие искажений на изображении существенно влияет на точность получаемых измерений. Поэтому наиболее подходящими для упомянутых измерительных систем, например, пресеттеров, являются телецентрические объективы. В бителецентрических объективах реализуется такой ход лучей, при котором главные лучи всех пучков лучей в пространстве предметов и изображений параллельны оптической оси, поэтому в теневом изображении отсутствуют искажения перспективы. В настоящей работе представлены результаты расчёта бителецентрического объектива с увеличением $1\times$, передним рабочим отрезком 160 мм, линейным полем зрения в пространстве предметов не менее 16 мм \times 16 мм, обеспечивающего точность измерений не хуже чем ± 2 мкм. Проведён абберрационный и точностной анализ объектива. Исследовано влияние погрешности установки объектива на нормальное увеличение на такие параметры объектива как масштаб изображения, смещение плоскости изображения, функцию рассеивания края.

БИТЕЛЕЦЕНТРИЧЕСКИЙ ОБЪЕКТИВ, ПРЕСЕТТЕР, МЕТОД ТЕНЕВОЙ ПРОЕКЦИИ

ВВЕДЕНИЕ

Разработка оптико-электронных систем для оперативных неразрушающих измерений линейных размеров, толщин, глубин, диаметров, соосности, так называемого геометрического контроля, является важнейшей задачей для многих отраслей промышленности. В работе [1] подчеркивается проблема изготовления и контроля турбинных деталей со сложными геометрическими элементами, а авторы из статьи [2]

обсуждают трудности создания измерительно-измерительных систем для аддитивных процессов, связанные с отсутствием надежных систем диагностики и контроля. Качество деталей, по словам авторов, полученных аддитивными методами, может значительно варьироваться из-за неточностей размеров, шероховатости поверхности и наличия дефектов, а оптические методы контроля позволяют эффективно выявлять такие отклонения, обеспечивая соответствие изделий заданным требованиям. В последнее время активно применяются измерительные системы, работающие на основе метода теневой проекции. В статье [3] рассматриваются методы светового сечения и теневой проекции, позволяющие наблюдать за определенными участками контролируемых объектов для ткацкого производства. Сочетание этих методов и технологий распознавания используется для автоматизации контроля формы изделий сложной конфигурации. Также с помощью оптико-электронной измерительной системы, основанной на методе теневой локации, в работе [4] предлагается регистрировать координаты теней, отбрасываемые контролируемым изделием. Эти системы позволяют с высокой точностью порядка 10 мкм и быстродействием в десятки и даже сотни измерений в секунду определять геометрические параметры сложных изделий в диапазоне от 0,3 до 50 мм [5].

Ключевым элементом такой системы является объектив, который проецирует теневое изображение на матрицу фотоприемника. Наличие либо отсутствие искажений на изображении существенно влияет на точность получаемых измерений. Не вносят искажений перспективы так называемые телецентрические объективы, в которых главные лучи ортогональны плоскости предмета либо изображения. Схемы телецентрических объективов разделяются на три вида: оптические системы с телецентричностью в пространстве изображений, в пространстве предметов и с бителецентричностью [2]. Первый и третий тип применяется в системах машинного зрения и для обеспечения точных производственных измерений, второй применяется для спектроскопии, производства интегральных схем [3], создания равномерного освещения. Так, исследователям с помощью телецентрических объективов, телецентричных в пространстве предметов, удалось достигнуть погрешности не более $\pm 0,005$ мм при измерении диаметров деталей в диапазоне от 12 до 30 мм [6]. Поэтому наиболее подходящими для упомянутых измерительных систем, например, пресеттеров, являются телецентрические объективы [6, 7]. Настоящая работа посвящена расчёту бителецентрического объектива из стекла отечественных марок, а также анализу влияния погрешностей сборки оптико-электронной системы на масштаб изображения, даваемого объективом.

Телецентрический объектив в пространстве предметов менее чувствителен к расфокусировке изображения изделия – глубина резкости объективов может достигать десятков миллиметров при уменьшении апертурной диафрагмы объектива. Телецентрический объектив в пространстве изображений обеспечивает падение светового потока на фотоприемник под прямым углом на всей площади фотоприемника, что сводит к минимуму ошибку угла зрения или изменения увеличения, обеспечивая высокое разрешение и контраст при минимальной дисторсии. Также такой объектив делает оптическую систему менее чувствительной к перемещению матрицы относительно проецирующей оптики. Вследствие этого, к телецентричности в пространстве изображений тоже предъявляются требования, хотя и меньшие, чем к телецентричности в пространстве предметов.

РАСЧЕТ БИТЕЛЕЦЕНТРИЧЕСКОГО ОБЪЕКТИВА С ПОЛУПЕНТАПРИЗМОЙ

Результаты расчета с полупентапризмой

В ходе работы над проектом по созданию оптико-электронного аналога пресеттера ключевым этапом является разработка объектива, а именно: синтез бителецентрического объектива приемной части оптической системы пресеттера с требуемыми параметрами на $1\times$ увеличение со стеклами из российского каталога АО «ЛЗЭС», анализ его абберрационных

характеристик и расчет допусков. Минимальное рабочее расстояние объектива 160 мм, что является довольно большой величиной, но для однократного увеличения не критической. Система должна быть относительно компактной, с длиной приемной части не более 500 мм, и иметь возможность размещения на станке. Линейное поле зрения системы должно быть не менее 16 мм × 16 мм, обеспечивая контроль положения кромки инструмента, например, пластин фрезы, и измерения других геометрических параметров с точностью не хуже ± 2 мкм.

На начальном этапе работы над оптической системой пресеттера были получены конструктивные параметры двух вариантов объектива: из китайских и отечественных марок стекол (каталоги CDGM и ЛЗОС, соответственно). Подробно процедура и результаты расчета приведены в работе [8]. На основе полученных данных по качеству изображения приоритет был отдан объективу с отечественными марками стекол.

В ходе дальнейшей работы пентапризма была заменена на полупентапризму из стекла марки СТК12 и была проведена корректировка расчета. Схема объектива с ходом лучей представлена на рис. 1. Синим, зеленым и красным цветом показаны пучки лучей для центра поля, зоны 4 мм и края поля зрения (8 мм) соответственно.

Был получен симметричный объектив, состоящий из 14 линз, все поверхности которых сферические. В расчете были использованы стекла с особым ходом дисперсии, что позволило получить высокую степень ахроматизации в широком спектральном диапазоне от 479 нм до 644 нм. Применение полупентапризмы, как и пентапризмы, позволяет сократить габариты системы. Однако система с полупентапризмой будет обладать меньшей массой и увеличенным задним рабочим отрезком (расстояние от выходной грани полупентапризмы до плоскости изображения) по сравнению с вариантом с пентапризмой, что позволит в дальнейшем без затруднений разработать оправу, сопрягаемую с камерами с резьбовыми соединениями типа C и CS.

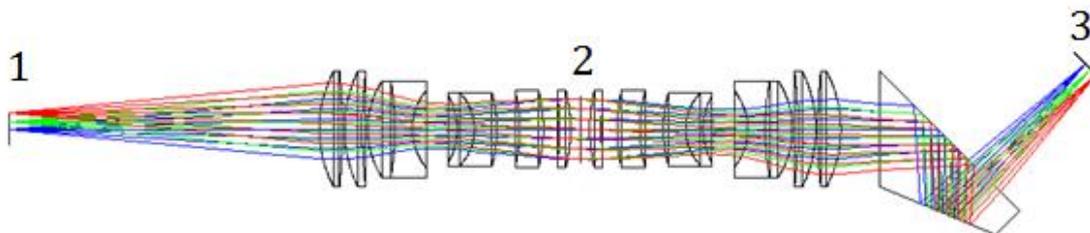


Рис 1. Схема бителецентрического объектива с ходом лучей:
1 – плоскость предмета, 2 – диафрагма, 3 – плоскость изображения

Аберрационные характеристики

В результате оптимизации оптической системы, минимизации аберраций и правильного подбора стекол объективы были ахроматизированы на 5 длин волн. Диаграммы пятен рассеяния для каждой из расчётных длин волн и трех значений полей зрения, указанных выше, представлены на рис. 2. На рис. 3 показаны полихроматические пятна рассеяния для трех значений полей зрения. Как видно из диаграмм, кружки практически укладываются в кружок Эйри, а величины радиуса RMS не превосходят радиуса кружка Эйри. По положению центра пятна рассеяния можно сделать вывод о близости расчетного значения увеличения к заданной величине $1\times$. Насколько может измениться увеличение (масштаб) вследствие погрешностей установки камеры, будет показано далее.

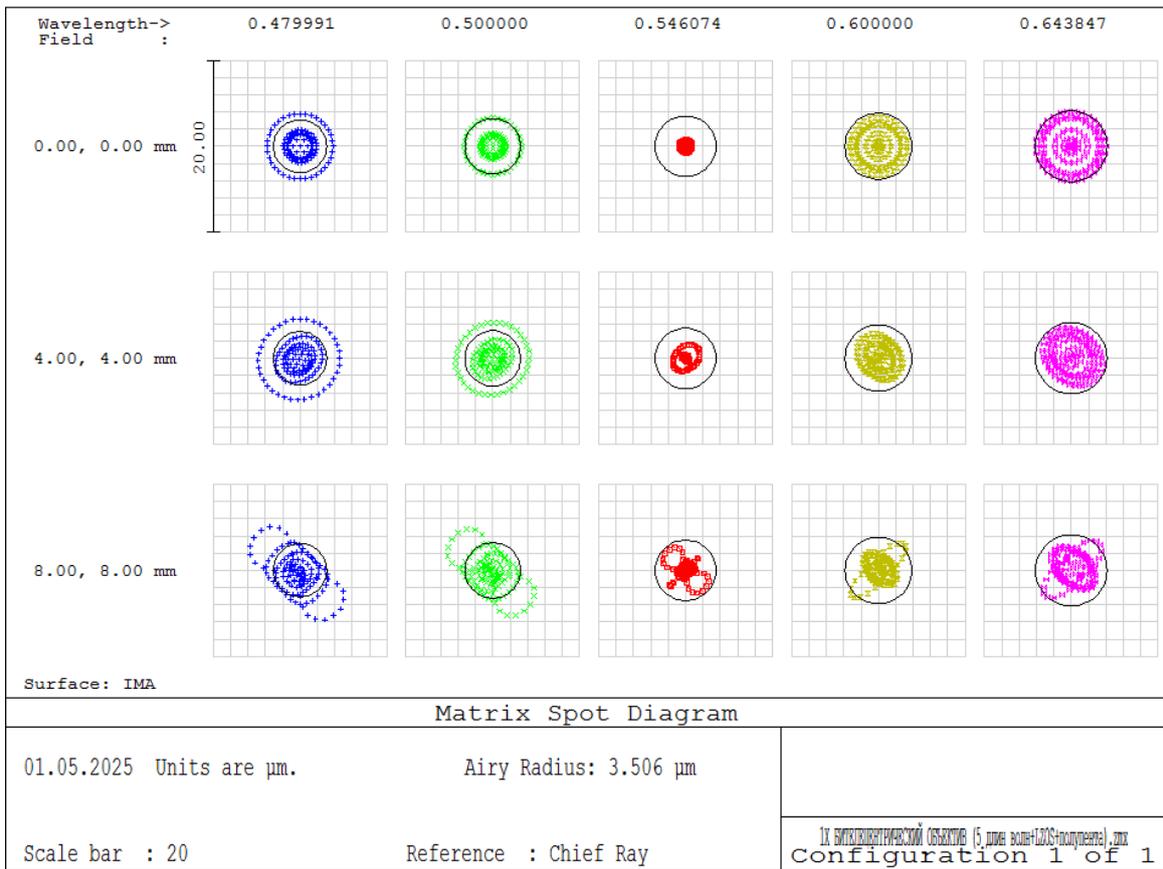


Рис 2. Точечные диаграммы для расчетных длин волн и полей зрения

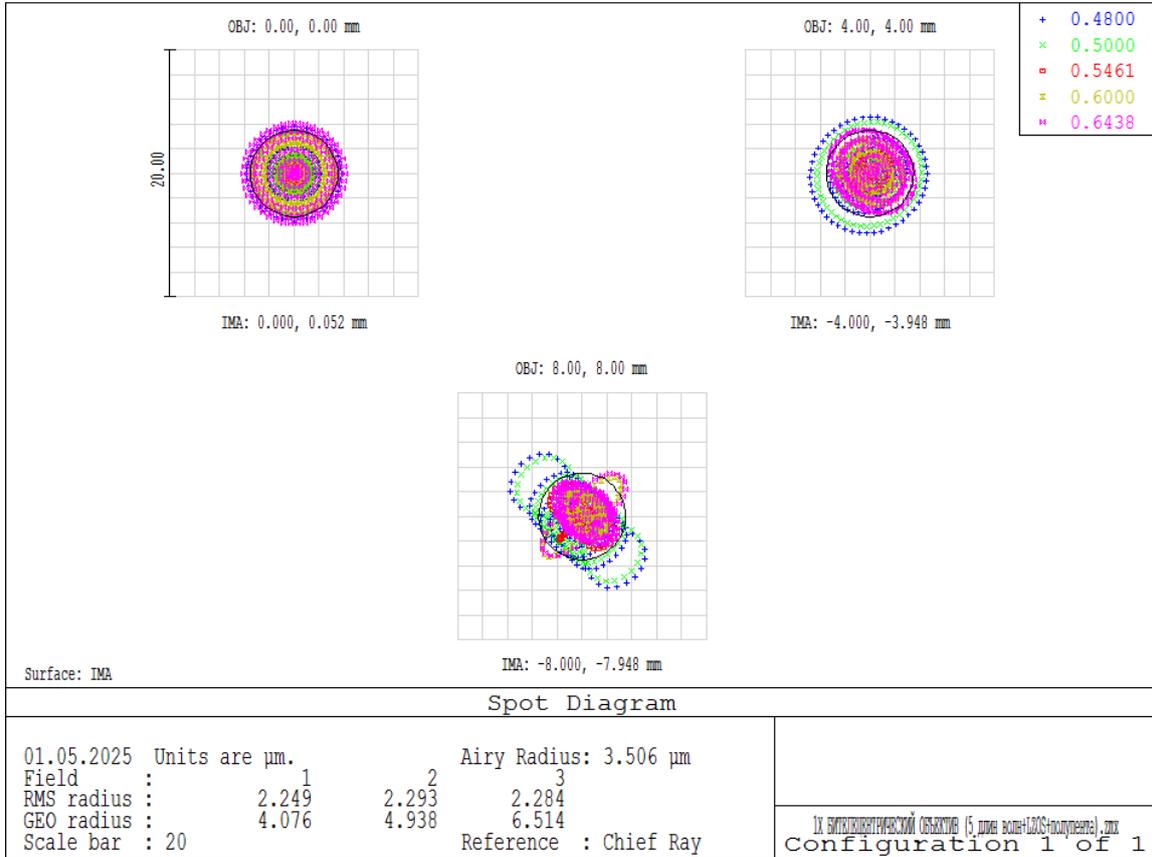


Рис 3. Точечные диаграммы для центра, зоны 4 мм и края поля зрения

На рис. 4-5 показаны графики функции передач модуляции (ФПМ) и функции размытия края (ФРК).

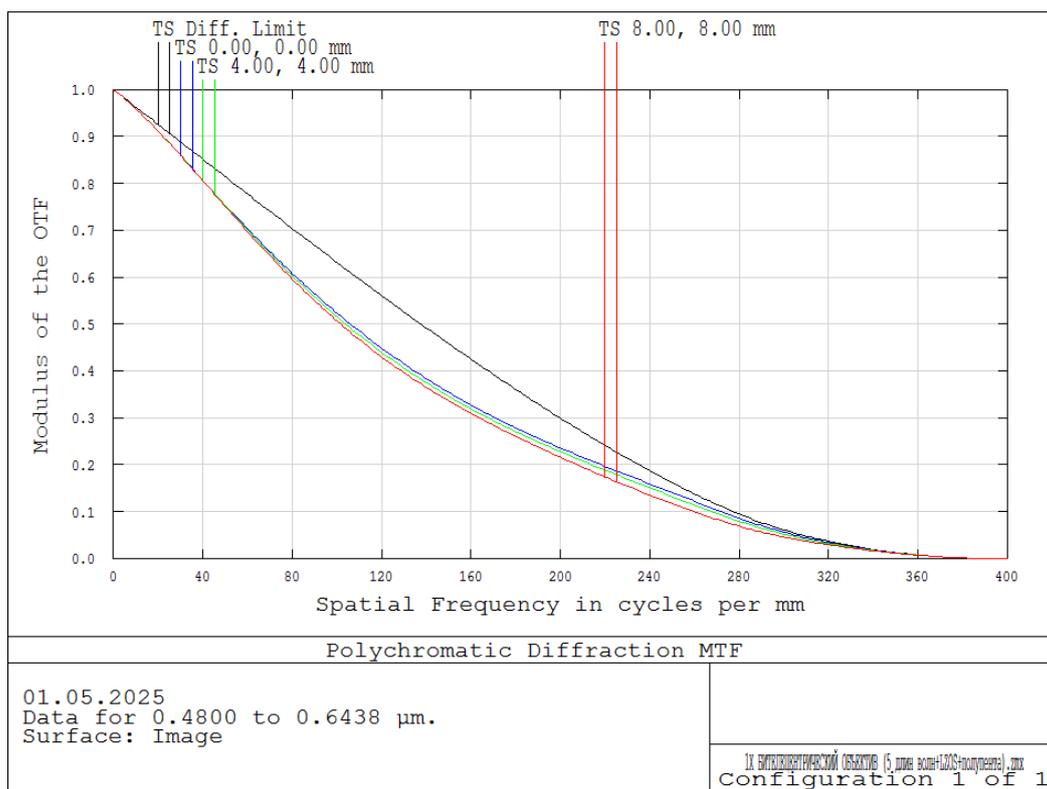


Рис 4. Функции передачи модуляции для центра, зоны 4 мм и края поля зрения. Черной линией показана дифракционная кривая

Несмотря на то, что система передает пространственные частоты с немного меньшим разрешением, по сравнению с дифракционной, видно, что ФПМ мало меняется от центра к краю поля зрения. Это является очень хорошим показателем, так как размытие теневой проекции детали, формируемой объективом, может приводить к ошибкам измерения геометрических параметров исследуемых деталей.

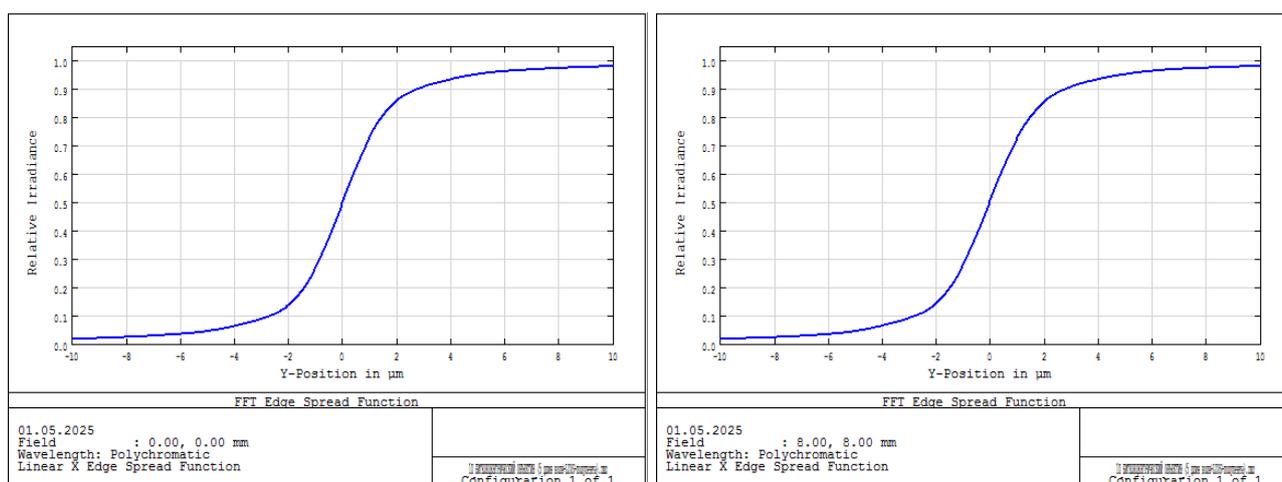


Рис 5. Функции рассеяния края для центра (слева) и края поля зрения (справа)

Как видно из графиков, представленных на рис. 5, ФРК для центра и края поля зрения практически повторяют друг друга. Полученные кривые подтверждают требуемую точность измерений ± 2 мкм.

Расчет допусков

Расчет допусков проводился с помощью специальных операторов в программе Zemax. Децентрировки и наклоны элементов и их поверхностей имитировались специальными плоскостями, а ошибка нерегулярности формы поверхности вносилась, как половина сферической аберрации и астигматизма [5, 9]. Жесткие допуски накладываются на децентрировку и наклон. Это обусловлено тем, что данный объектив бителецентрический, то есть он должен сохранять параллельность главных лучей, как в пространстве предметов, так и в пространстве изображений. Если оптические элементы или их поверхности будут смещены друг относительно друга или наклонены, то телецентричность будет нарушаться.

Допуски на все радиусы составляют $\pm 0,10$ мм, за исключением некоторых преломляющих поверхностей, для которых эта величина составляет $\pm 0,02$ мм или $\pm 0,05$ мм. Допуск на локальное отклонение формы рабочей поверхности для всех поверхностей составляет $\pm 0,5$. Допуск на толщину всех элементов составляет $\pm 0,10$ мм, за исключением некоторых элементов, для которых эта величина составляет $\pm 0,02$ мм или $\pm 0,05$ мм. Допуск на децентрировку каждой поверхности составляет $\pm 0,01$ мм. Допуск на наклон каждой поверхности составляет $\pm 0,01^\circ$. Допуск на размеры воздушных промежутков составляет $\pm 0,10$ мм, за исключением определенных расстояний, для которых это значение составляет $\pm 0,05$ мм. Допуск на показатель преломления для всех марок стекла составляет $\pm 0,0005$. Допуск на число Аббе для всех марок стекла составляет $\pm 0,5\%$.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ РАБОЧЕГО ОТРЕЗКА

Несмотря на то, что допуски на толщины всех воздушных промежутков не превышают $\pm 0,10$ мм, не исключена ошибка установки матрицы относительно плоскости изображения на большую величину вследствие неточного позиционирования матрицы в камере и применения резьбового соединения объектива с камерой. Также возможно изменение заднего рабочего отрезка вследствие изменения температуры окружающей среды. Во всех этих случаях потребуются перефокусировка объектива для получения резкого изображения теневой проекции исследуемой детали, что сопряжено с небольшим изменением переднего отрезка. Для того чтобы проследить зависимость изменения масштаба изображения и взаимосвязь величины заднего и переднего рабочего отрезков бителецентрического объектива было проведено моделирование изменения переднего рабочего отрезка в диапазоне $\pm 1,0$ мм с шагом $0,1$ мм относительно номинального 160 мм. После каждого шага с помощью инструмента Quick Focus в программе Zemax проводилась «подфокусировка» по критерию минимизации радиуса кружка рассеяния. Графики зависимости контролируемых данных: задний отрезок и размер кружка рассеяния (RMS) для трех полей зрения, от изменения расстояния наведения приведены на рис. 6-7.

Из графика, представленного на рис. 6 видно, что изменение заднего рабочего отрезка и изменении переднего (и наоборот) происходит линейно в пределах анализируемого диапазона значений. Изменению переднего отрезка в пределах $\pm 1,0$ мм относительно номинального соответствует аналогичное изменение заднего рабочего отрезка. При этом масштаб, который определялся по смещению центра кружка рассеяния для крайней точки поля зрения в пространстве изображений, остается практически неизменным. Наблюдается тенденция к уменьшению масштаба при увеличении дальности наведения, что будет иметь место, если матрица окажется ближе расчетного значения к выходной грани призмы по каким-либо причинам, однако абсолютные значения пренебрежимо малы. При изменении рабочего отрезка в пределах $\pm 1,0$ мм масштаб изменился на величину порядка 10^{-5} , что позволяет говорить о постоянстве масштаба.

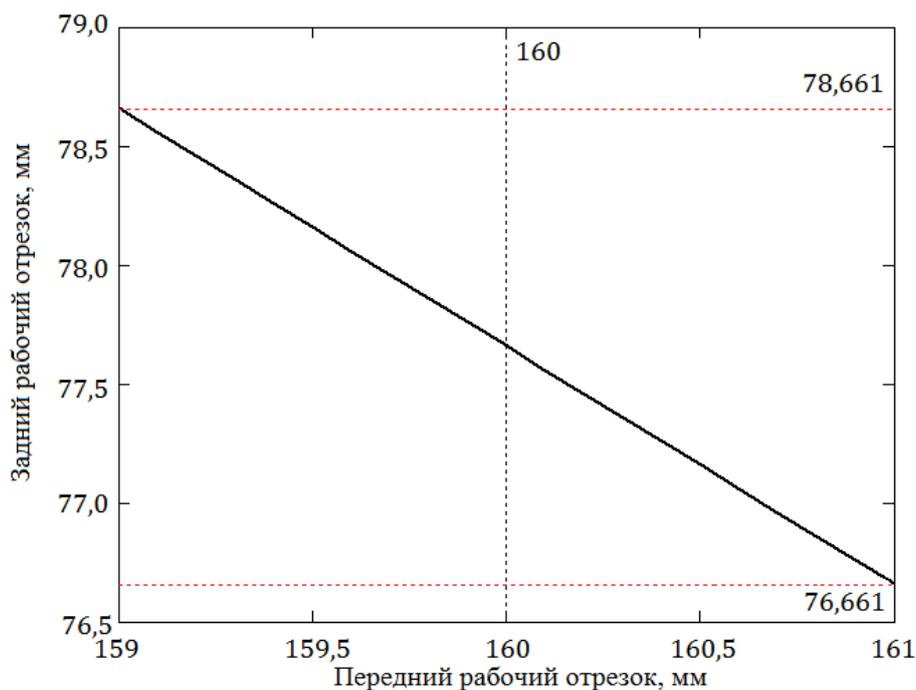


Рис 6. Взаимосвязь переднего и заднего рабочих отрезков рассчитанного бителецентрического объектива

Интерес представляет анализ изменения радиуса кружков рассеяния для разных полевых углов. На рис. 7 представлены графики зависимости радиуса кружка рассеяния при изменении рабочего отрезка в пределах $\pm 1,0$ мм.

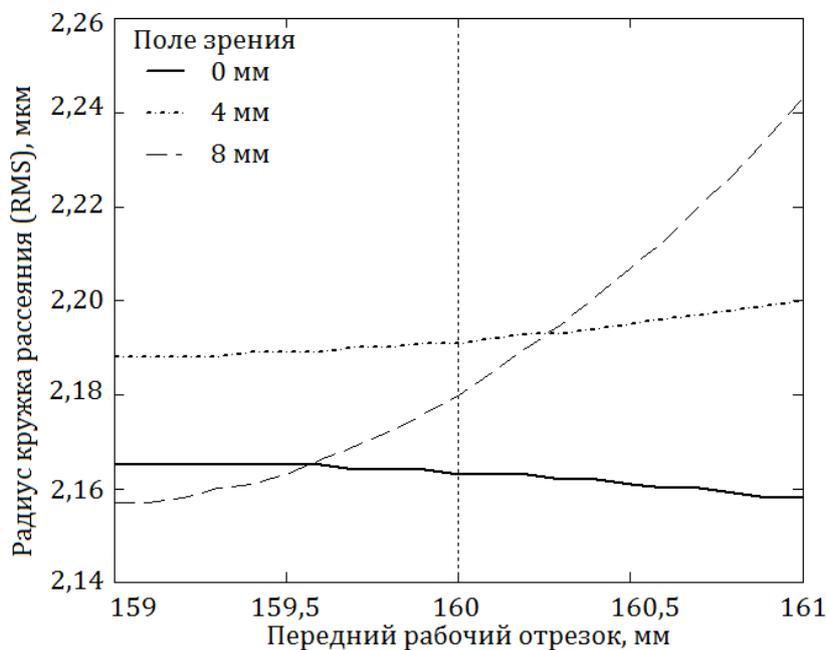


Рис 7. Графики зависимости радиуса кружка рассеяния от величины переднего рабочего отрезка

При увеличении переднего отрезка, что соответствует сокращению заднего рабочего отрезка, размер кружка рассеяния в центре поля незначительно уменьшается, на зоне 4 мм также незначительно увеличивается, а вот на краю поля нелинейно возрастает. Разность радиусов кружков в центре и на краю поля достигает 0,08 мкм. Эта величина кажется незначительной, однако может негативно отразиться на точности проводимых измерений, так как будет приводить к большему размытию границ теневой проекции контролируемого изделия на периферии изображения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа была посвящена доработке бителецентрического объектива на единичное увеличение с анализом его абберрационных характеристик, расчетом допусков и анализом влияния погрешностей установки матрицы на изменение масштаба изображения и изменение переднего рабочего отрезка. Рассчитанный объектив имеет оптическое увеличение $1\times$ при номинальном рабочем расстоянии 160 мм. Линейное поле зрения системы 16 мм × 16 мм. Оптическая система от передней линзы до плоскости установки матрицы имеет длину порядка 400 мм. Для сокращения заднего рабочего отрезка и выноса плоскости изображения над объективом используется полупентапризма. Для линз были использованы материалы с особым ходом дисперсии, за счет которых удалось ахроматизовать объектив на 5 длин волн для монохроматического источника света.

По расчету допусков можно сделать вывод, что такие объективы сложны в производстве, так как жесткие ограничения накладываются на децентрировку и наклон, как элементов, так и их поверхностей, друг относительно друга, что значительно усложняет их сборку. Тем не менее, при обеспечении всех заявленных допусков, объектив устойчив к смещению плоскости матрицы и, соответственно, переднего рабочего отрезка, в пределах $\pm 1,0$ мм, так как изменение масштаба изображения крайне незначительно. При смещении матрицы к выходной грани полупентапризмы наблюдается нелинейный рост размера кружка рассеяния на краю поля с одновременным уменьшением кружка для центра, что может негативно сказаться на точности определения геометрических параметров протяжённых изображений контролируемой детали. В качестве дальнейшего развития работы можно выделить два направления. Сравнительный анализ характеристик системы с полупентапризмой, выполненной из более традиционного материала – стекла марки БК10. Получение тестовых изображений с помощью макета объектива или объектива со сходными характеристиками и оценка фактической точности измерения геометрических параметров контролируемых изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Осипович Д.А.** Разработка технологического процесса контроля деталей типа «рабочее колесо» с использованием оптических методов измерения // Ползуновский вестник. 2012. № 2/1. С. 184-188.
2. **Минаев В.Л., Вишняков Г.Н., Иванов А.Д., Левин Г.Г.** Методы контроля геометрических параметров и внутренних напряжений изделий аддитивных технологий // Фотоника. 2020. № 1. С. 42-54.
3. **Нуриев М.Н., Иманова Г.М.** Механические и оптические методы и средства контроля геометрических размеров и формы текстильных паковок // Бюллетень науки и практики. 2016. № 5. С. 65-74.
4. **Демкин В.И., Литманович А.М.** Оптико-электронная измерительная система для определения пространственного положения объекта на основе метода теневой локации // Известия вузов. Электроника. 2011. № 3(89). С. 69-74.
5. **Жимулева Е.С.** Разработка и создание оптико-электронных теневых проекционных систем для размерного контроля трехмерных объектов с повышенной точностью в промышленном производстве: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.07 / Жимулева Елена Сергеевна. Новосибирск. 2017. 20 с.
6. **Жимулева Е.С., Завьялов П.С., Кравченко М.С.** Разработка для систем размерного контроля // Автометрия. 2018. Т. 54. № 1. С. 61-70.

7. **Митюшенко Н.А., Хацевич Т.Н.** Разработка бителецентрического объектива // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2023. Т.7. № 1. С. 82-89.
8. **Gogolev K.S.** Development and investigation of optical system parameters for a presetter // Proceeding of the 2025 7th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). Moscow. 2025. Pp. 1-5.
9. **Кожевников Ю.Г.** Оптические призмы. М.: Машиностроение. 1984. 152 с.

Gogolev K.S., Pechinskaya O.V.

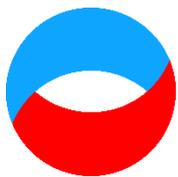
National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: GogolevKS@mpei.ru

INVESTIGATION OF THE ACCURACY CHARACTERISTICS OF A UNITY MAGNIFICATION BITELECENTRIC LENS

ABSTRACT

In modern industrial production, quality control of finished product parameters is the most important stage. Production of precision quality products is impossible without the use of high-quality industrial equipment for metalworking, one of the key elements of which is tooling. Timely control and replacement of equipment is the key to the production of high-class products. Thus, the development of optical-electronic systems for operational non-destructive measurements, the so-called geometric control, is a critical task for many industries. Recently, measuring systems operating on the basis of the shadow projection method have been actively used. These systems allow for precise and rapid determination of geometric parameters of complex products. The key element of such a system is a lens that projects a shadow image onto the photodetector matrix. The presence or absence of distortions in the image significantly affects the accuracy of the measurements obtained. Therefore, telecentric lenses are the most suitable for the mentioned measuring systems, such as presetters. In bitelecentric lenses, such a ray path is realized, in which the chief rays of all beams in the space of objects and images are parallel to the optical axis, therefore there are no perspective distortions in the shadow image. This paper presents the results of designing a bitelecentric lens with a unity magnification, a front working distance of 160 mm, a linear field of view in the space of objects of at least 16 mm x 16 mm, ensuring measurement accuracy of no worse than $\pm 2 \mu\text{m}$. An aberration analysis and tolerance calculation of the lens was performed. The influence of the lens installation error on normal magnification on such lens parameters as image scale, image plane shift, and edge spread function was investigated.

BI-TELECENTRIC LENS, PRESETTER, SHADOW PROJECTION METHOD



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 538.911

Ветрова Н.А., Куимов Е.В., Лунева Л.А.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет)", Россия, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5, стр.1, E-mail: vetrova@bmstu.ru, kuimov@bmstu.ru, luneva@bmstu.ru

**ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВАХ РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНЫХ
ДИОДОВ НА УЧАСТКЕ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ
ПРОВОДИМОСТИ**

АННОТАЦИЯ

Резонансно-туннельный диод является перспективным нелинейным элементом для устройств приемо-передающего тракта нового поколения, что обусловлено высоким быстродействием и возможностью варьирования ВАХ. Особенный интерес представляет участок ВАХ с отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП), который используется в устройствах генерации сигналов, сверхбыстродействующих переключателях, ячейках памяти и т.д. Однако проектирование таких устройств требует построения модели ВАХ РТД на участке ОДП, подходящей для инженерных приложений с точки зрения соответствия результатам измерений и временной сложности расчёта. Существующие модели ВАХ РТД не удовлетворяют этим требованиям одновременно: модели теоретического класса неинтегрируемы в современные САПР вследствие неоправданно большого времени расчёта даже одной ВАХ (при этом методики проектирования радиоэлектронных устройств содержат многоитерационные циклы); эмпирические модели ВАХ РТД требуют для достижения необходимой обобщающей способности (даже в предположении о стабильности и устойчивости технологического процесса) недостижимого объёма данных. Поэтому представляется актуальной задача разработки модели участка ОДП на ВАХ РТД для приложений проектирования устройств радиоэлектронной аппаратуры в рамках компактного подхода, сочетающего преимущества теоретических и эмпирических моделей.

РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА ЗАРЯДА, РАДИОТЕХНИКА

ВВЕДЕНИЕ

Определяющее влияние на показатели назначения функциональных узлов радиоэлектронной аппаратуры приёмо-передающего тракта (смесителей и умножителей частоты, детекторов мощности, генераторов сигналов и т.д.) оказывают электрические характеристики нелинейных элементов, в первую очередь, вольт-амперные характеристики (ВАХ) диодов и транзисторов. С точки зрения нелинейности ВАХ интерес представляет резонансно-туннельный диод (РТД). Исследования последних лет, обзор которых представлен в [1], показывают, что за счёт более высокого быстродействия, чем у диодов Шоттки и

туннельных диодов и возможности варьирования ВАХ, использование РТД в качестве нелинейного элемента позволяет улучшить показатели назначения широкого спектра радиоэлектронных устройств. Тем не менее, внедрение РТД затруднено по ряду по причине обеспечения заданной формы ВАХ вследствие отсутствия моделей переноса для задач проектирования РТД. Наиболее перспективным подходом к моделированию токопереноса в РТД для прикладных инженерных задач является метод компактного моделирования [2-10]. Однако приемлемая достоверность прогнозирования ВАХ обеспечена в узком диапазоне напряжений. Особенно проблематичным является участок ОДП, где достаточно трудно получить даже качественное согласование с экспериментом, из-за наличия на этом участке так называемого «плато».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для расчёта участка плато в модель вводятся паразитные импедансы с помощью схемы Брауна [11-14], с учётом которых динамика напряжения в активной области $V_{RTD} = V_{RTD}(t)$ следующей системой дифференциальных уравнений

$$\frac{d^2 V_{RTD}}{dt^2} + \omega_0 \rho G_{RTD} \frac{dV_{RTD}}{dt} + \omega_0^2 V_{RTD} = \omega_0^2 V, \quad (1)$$

где $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ – собственная частота колебаний, $\rho = \sqrt{L/C}$ – характеристическое сопротивление, $G_{RTD} = dI_{RTD}/dV_{RTD}$ – дифференциальная проводимость активной области РТД, L, C – паразитная индуктивность и ёмкость, $V = const$ – внешнее напряжение, V_{RTD} – напряжение в активной области, $I_{RTD}(V_{RTD})$ – ВАХ РТД, рассчитываемая с помощью стационарной компактной модели.

Уравнение (1) представляет собой уравнение для описания вынужденных колебаний. Если второе слагаемое в левой части уравнения (1) больше нуля, то уравнение (1) описывает затухающие колебания, если меньше нуля – то усиливающиеся. Отсюда следует, что на участке отрицательной дифференциальной проводимости ВАХ РТД, где $G_{RTD} < 0$, система входит в режим автоколебаний, когда при постоянном внешнем напряжении $V = const$ сила тока является периодической функцией от времени $I \neq const$. Измеряемая сила тока в зависимости от внешнего напряжения определяется как временное среднее функции силы тока от времени. Отметим, что собственная частота колебаний ω_0 , входящая в уравнения (1), не влияет на измеряемую силу тока.

Для описания кривой $I_{RTD}(V_{RTD})$, которая определяет дифференциальную проводимость РТД G_{RTD} , не применимы широко используемые компактные модели с проблемами насыщения и отсутствия учёта диссипативных процессов (подробнее см. [15-17]), так как традиционные компактные модели не позволяют адекватно оценить ширину и контрастность участка ОДП и кривизну ВАХ на начальном участке, которые, как видно из (3) и (4), определяют силу тока $I(t)$. Поэтому рекомендуется использование ненасыщающей компактной модели с учётом диссипативных процессов в канале РТД. Предложенная модель обладает двумя особенностями, которые делают её подходящей для описания зависимости $I_{RTD}(V_{RTD})$ с точки зрения корректности описания участка «плато». Во-первых, физический учёт межэлектронного взаимодействия, позволяет проводить корректные оценки ВАХ на начальном участке и ширины участка ОДП, так как межэлектронное взаимодействие оказывает существенное влияние на эти параметры ВАХ РТД. Во-вторых, представленная компактная модель показывает хорошие результаты с точки зрения прогнозирования контрастности участка ОДП, недостижимые в рамках традиционно используемых компактных моделях, а корректный расчёт контрастности участка необходим для определения амплитуды автоколебаний напряжения V_{RTD} .

В предложенной компактной модели считается, что сила тока и концентрация электронов в квантовой яме РТД определяется электронами с энергией, равной энергии

резонансных уровней, образующихся в квантовой яме РТД из-за интерференции электронных волн. Сила тока в этой модели определяется формулой (2)

$$I_{RTD}(V) = \frac{q}{\tau} (f_{2D}(\varepsilon)F(\varepsilon) - f_{2D}(\varepsilon + qV)F(\varepsilon + qV)), \quad (2)$$

где q – элементарный заряд, τ – время жизни электронов в квантовой яме, f_{2D} – распределение двумерного электронного газа, F – функция, определяющаяся по формуле (3), ε – энергия резонансного уровня, которая определяется по формуле (4)

$$F(\varepsilon) = \frac{1}{\pi} \frac{2 \operatorname{arctg}(2)}{1 + e^{-\frac{\tau}{\hbar} \frac{2\varepsilon}{\operatorname{arctg}(2)}}} \quad (3)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - kqV + \frac{q}{C} n_w, \quad (4)$$

где ε_0 – энергия резонансного уровня в отсутствие внешних полей и нулевой концентрации электронов, k – коэффициент асимметричности (для симметричных структур равен 1/2), C – квантовая ёмкость канала, с помощью которой учитывается межэлектронное взаимодействие, n_w – концентрация электронов в квантовой яме РТД, которая определяется по формуле (5)

$$n_w = \frac{1}{v_w \tau} (f_{2D}(\varepsilon)F(\varepsilon) + f_{2D}(\varepsilon + qV)F(\varepsilon + qV)), \quad (5)$$

где v_w – скорость электронов в квантовой яме РТД.

Измерения ВАХ тестовых РТД проводились на программно-аппаратном комплексе, состоящем из микрондового устройства SIGNATON S-1160 PROBE STATION, источника питания Agilent 3640A DC Power Supply, мультиметра Agilent 34401A и персонального компьютера. Стенд позволяет проводить измерения ВАХ в диапазоне напряжений от 0,1 мкВ до 20 В и токов от 10 нА до 3 А с погрешность не более 0,05% по напряжению и не более 0,15% по току. Результаты измерений для одной из тестовых структур в сравнении с результатами расчётов приведены на рис. 1.

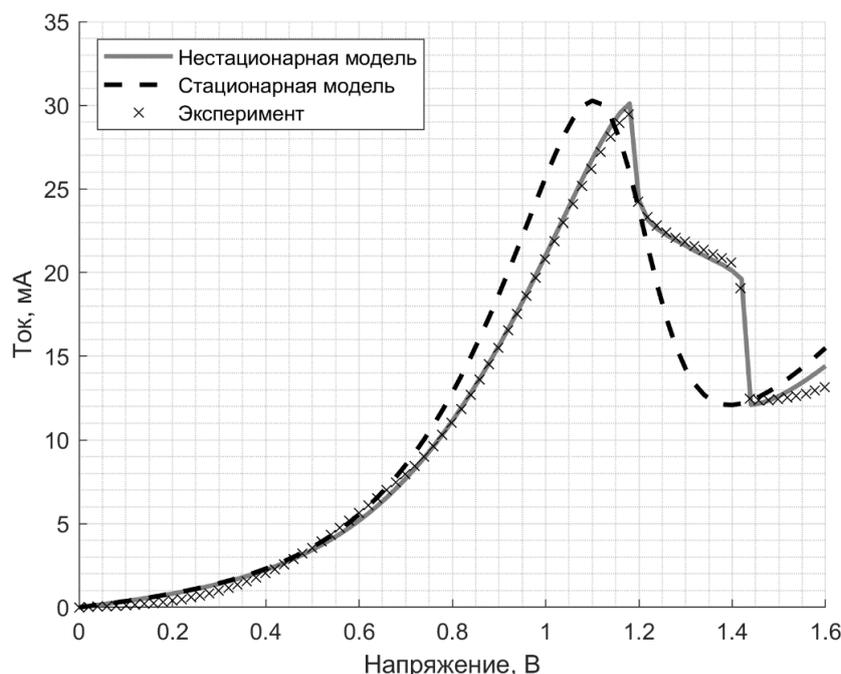


Рис. 1. Измерения ВАХ РТД в сравнении с расчётом

В результате валидации модели подтверждена высокая точность модели не только на начальном участке ВАХ (относительная погрешность $\Delta < 1,6\%$), но и по таким (традиционно прогнозируемые с низкой точностью или вообще на «качественном» уровне без возможности количественной оценки) характеристикам как: пиковая сила тока ($\Delta < 1,7\%$), пиковое напряжение ($\Delta < 2\%$), долинная сила тока ($\Delta < 0,01\%$), по контрастности участка ОДП ($\Delta < 5\%$), ширина участка ОДП ($< 2\%$). Хорошее согласование с экспериментом на участке «плато» объясняется высоким валидационным уровнем предложенной авторами компактной стационарной модели ВАХ РТД по ширине участка ОДП и его контрастности. Таким образом, разработанная компактная модель позволяет не только качественно описывать ВАХ РТД, но и получать количественные оценки, причём на различных участках ВАХ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана эффективная нестационарная модель токопереноса в нелинейном элементе на двухбарьерной гетероструктуре AlGaAs/GaAs для преобразователя СВЧ сигналов с учетом диссипативных процессов (включая квантовомеханический самосогласованный расчет для межэлектронного взаимодействия в низкоразмерном канале диода). Модель построена на базовых идеях так называемого «компактного» моделирования с реализацией принципов декомпозиции, которые существенно упрощают качественное и количественное исследование и интерпретацию волновых и диссипативных свойств токопереноса в канале, описываемых связанными квантовомеханическими уравнениями. Именно такое исследование и физическо-математический анализ позволили впервые в мировой практике обеспечить адекватное прогнозирование участка ОДП РТД и гистерезисных явлений в рамках стационарной модели.

Валидация модели позволила подтвердить высокую точность модели не только на начальном участке ВАХ (относительная погрешность $\Delta < 1,6\%$), но и такие (традиционно прогнозируемые с низкой точностью или вообще на «качественном» уровне без возможности количественной оценки) характеристики как:

- пиковая плотность тока ($\Delta < 1,7\%$),
- пиковое напряжение ($\Delta < 2\%$),
- долинная плотность тока ($\Delta < 0,01\%$).
- параметры петли гистерезиса: (погрешность по ширине петли составила $\Delta < 0,5\%$, по контрастности – $\Delta < 7\%$).

Впервые был получен такой уровень согласования результатов моделирования и эксперимента не только на одном участке, а по всем параметрам ВАХ РТД (в том числе параметров гистерезиса), что делает разработанную компактную модель пригодной для моделирования работы широкого спектра устройств с РТД в качестве нелинейного элемента с рабочей точкой на различных участках. Отсюда делается вывод о перспективности интеграции разработанной модели в системы автоматического проектирования радиоэлектронных и оптоэлектронных устройств на основе РТД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Cimbri D. et al.** Resonant tunneling diodes high-speed terahertz wireless communications – A review // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2022. Vol. 12. №. 3. Pp. 226-244.
2. **Kuimov E.V. et al.** Validation of the model for predicting VAC RTD photonics // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1571. №. 1. P. 012008.
3. **Zebrev G.I. et al.** Compact modeling of MOSFET I–V characteristics and simulation of dose-dependent drain currents // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2017. Vol. 64. №. 8. Pp. 2212-2218.
4. **Rahman E. et al.** A physically based compact I–V model for monolayer TMDC channel MOSFET and DMFET biosensor // Nanotechnology. 2018. Vol. 29. №. 23. P. 235203.

5. **Huang H.S. et al.** IV model of nano nMOSFETs incorporating drift and diffusion current // *Vacuum*. 2018. Vol. 155. Pp. 76-82.
6. **Buccafurri E.** Analytical modeling of silicon based resonant tunneling diode for RF oscillator. Doctoral dissertation, Lyon, INSA. 2010.
7. **Diebold S., Fujita M., Nagatsuma T.** Asymmetrical conductance model to analyze resonant tunneling diode terahertz oscillators // 2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS). IEEE, 2017. Pp. 1795-1797.
8. **Diebold S. et al.** Modeling and simulation of terahertz resonant tunneling diode-based circuits // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2016. Vol. 6. №. 5. Pp. 716-723.
9. **Encomendero J. et al.** Room temperature microwave oscillations in GaN/AlN resonant tunneling diodes with peak current densities up to 220 kA/cm² // *Applied Physics Letters*. 2018. Vol. 112. №. 10. P. 103101.
10. **Kuimov E.V. et al.** A compact current-transfer model in resonant-tunneling structures with consideration of interelectronic interaction // *Electronics*. 2023. Vol. 12. №. 3. P. 519.
11. **Liu Q. et al.** Unified AC model for the resonant tunneling diode // *IEEE Transactions on electron devices*. 2004. Vol. 51. №. 5. Pp. 653-657.
12. **Suzuki S. Asada M.** Fundamentals and recent advances of terahertz resonant tunneling diodes // *Applied Physics Express*. 2024. Vol. 17. №. 7. P. 070101.
13. **Spudat C. et al.** Limitations of output power and efficiency of simple resonant-tunneling-diode oscillators // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2022. Vol. 13. №. 1. Pp. 82-92.
14. **Morariu R. et al.** Accurate small-signal equivalent circuit modeling of resonant tunneling diodes to 110 GHz // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2019. Vol. 67. №. 11. Pp. 4332-4340.
15. **Vetrova N. et al.** Bistability of AlGaAs/GaAs resonant-tunneling diodes heterostructural channel // *Sensors*. 2023. Vol. 23. №. 18. P. 7977.
16. **Vetrova N. et al.** A compact current-transfer model in resonant-tunneling structures with consideration of interelectronic interaction // *Electronics*. 2023. Vol. 12. №. 3. P. 519.
17. **Vetrova N. et al.** Resonant tunneling nanostructures: eliminating current saturation on negative differential conductivity region in compact dissipative simulations // *Nanomaterials*. 2025. Vol. 15. №. 2. P. 100.

Vetrova N.A., Kuimov E.V., Luneva L.A.

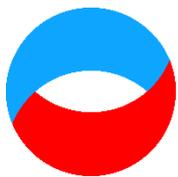
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "N.E. Bauman Moscow State Technical University (National Research University)", Russia, 105005, Moscow, 2-ya Baumanskaya St., 5, building 1, E-mail: vetrova@bmstu.ru, kuimov@bmstu.ru, luneva@bmstu.ru

FEATURES OF MODELING THE IV CHARACTERISTICS OF RESONANCE-TUNNEL DIODES IN THE SECTION OF NEGATIVE DIFFERENTIAL CONDUCTIVITY

ABSTRACT

A resonant tunnel diode is a promising nonlinear element for devices of the new generation of transceiver path, which is due to its high speed and the ability to vary the IV characteristic. Of particular interest is the section of the I-V characteristic with negative differential conductance (NDC), which is used in signal generation devices, ultra-fast switches, memory cells, etc. However, the design of such devices requires the construction of a model of the I-V characteristic of the RTD on the NDC section, suitable for engineering applications in terms of compliance with the measurement results and the time complexity of the calculation. Existing models of the I-V characteristic of the RTD do not satisfy these requirements simultaneously: theoretical class models cannot be integrated into modern CAD systems due to the unreasonably long calculation time of even one I-V characteristic (while the design methods of electronic devices contain multi-iteration cycles); empirical models of the I-V characteristic of the RTD require an unattainable amount of data to achieve the necessary generalizing ability (even under the assumption of stability and sustainability of the technological process). Therefore, the task of developing a model of the NDC section on the I-V characteristic of the RTD for applications in the design of electronic equipment devices within the framework of a compact approach combining the advantages of theoretical and empirical models seems relevant.

RESONANCE-TUNNEL STRUCTURES, MATHEMATICAL MODELING, CHARGE TRANSFER PHENOMENA, RADIO ENGINEERING



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 531.74

Иванова Е.В., Поройков А.Ю., Еремин Д.В., Лапицкая И.А.

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: shmatkoyn@mpei.ru*

**ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ОРИЕНТАЦИИ
СВОБОДНОВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЛАТФОРМЫ**

АННОТАЦИЯ

Методы компьютерного зрения широко применяются для контроля положения и ориентации различных объектов. Эта задача может решаться различными способами. В работе рассматривается несколько вариантов решения этой задачи, как по одному изображению, полученному одной видеокамерой, так и по паре изображений, полученных со стереосистемы камер. В качестве контролируемого объекта выступает свободновращающаяся в трех плоскостях на аэростатическом подшипнике платформа. В работе представлены результаты оценки погрешности измерения ориентации контролируемого объекта путем сравнения результатов измерения методами компьютерного зрения с результатами инструментальных измерений. Оцениваемые измерения проводились на основе цифровой обработки изображений с кодовыми маркерами путем решения задачи PnP, триангуляции на стереоизображениях и решения задачи RBT. Инструментальные измерения проведены с применением призмы правильной многогранной и автоколлиматора.

**ПОЛОЖЕНИЕ И ОРИЕНТАЦИЯ ОБЪЕКТА, ФОТОГРАММЕТРИЯ, КОДОВЫЙ МАРКЕР,
СТЕРЕОИЗОБРАЖЕНИЯ, АВТОКОЛЛИМАТОР, МНОГОГРАННАЯ ПРИЗМА**

ВВЕДЕНИЕ

Задача определения положения и ориентации объекта в пространстве встречается во многих отраслях науки и техники. Для её решения применяются различные методы, в том числе оптические. Одним из таких является фотограмметрия для определения трехмерных координат объекта по его двумерным изображениям [1].

Несмотря на наличие работ по оценке погрешности определения положений и ориентации объектов с кодовыми маркерами, подавляющая часть работ оценивает погрешность конкретных измерительных систем с определенными характеристиками, и применить их напрямую для оценки погрешности другой системы нельзя. При этом подавляющая часть работ не поднимает вопрос повышения точности измерений, а использует классический подход на решении задачи PnP (*Perspective-n-Point*, «перспектива *n*-точек») [2] для четырех углов маркера. В этой работе также оцениваются измерения на основе триангуляции [3] на стереоизображениях и решения задачи RBT (*Rigid Body Transformation*) [4]. Дополнительно для каждого алгоритма предлагается методика, заключающаяся в нахождении на изображении дополнительных точек, соответствующих углам квадратов внутреннего рисунка (идентификатора маркера).

Для оценки эффективности методик было проведено экспериментальное измерение точности определения угла поворота платформы на статическом аэроподшипнике на основе многогранной призмы и автоколлиматора. Полученные результаты могут быть использованы при конструировании оптико-электронных комплексов, предназначенных для определения положения и ориентации объектов, в том числе в лабораторных условиях для отработки алгоритмов управления микроспутниками.

ОЦЕНКА ИЗМЕРЕНИЙ ПОЛОЖЕНИЯ И ОРИЕНТАЦИИ ОБЪЕКТА

Измерения на основе цифровой обработки изображений с кодовыми маркерами

В работе всего используется три варианта алгоритмов обработки изображений объекта с кодовыми маркерами, которые реализованы в программном обеспечении (ПО) *MotionVision* [5]. Описание трех вариантов обработки приведены в предыдущей работе [6]. Дополнительно для каждого алгоритма предлагается методика, заключающаяся в нахождении на изображении дополнительных точек, соответствующих углам квадратов внутреннего рисунка, которые можно робастно найти по локальному максимуму градиента, и использовании их в дополнении к четырем углам меток, которые используются стандартно, для решения задачи *PnP*. Двухмерные координаты углов квадратов можно рассчитать, зная номер метки в словаре, и их положение на рисунке формируется с той же точностью, что и углов маркеров. Увеличение количества точек для задачи *PnP* должно повысить точность ее решения.

Методика оценки на основе инструментальных измерений

Для того, чтобы оценить погрешность измерений и оценить эффективность предложенных алгоритмов была разработана методика и соответствующая экспериментальная установка для оценки точности оптико-электронного комплекса измерения положения и ориентации на основе прямых инструментальных физических измерений. Фотография внешнего вида экспериментальной установки представлены на рис. 1.

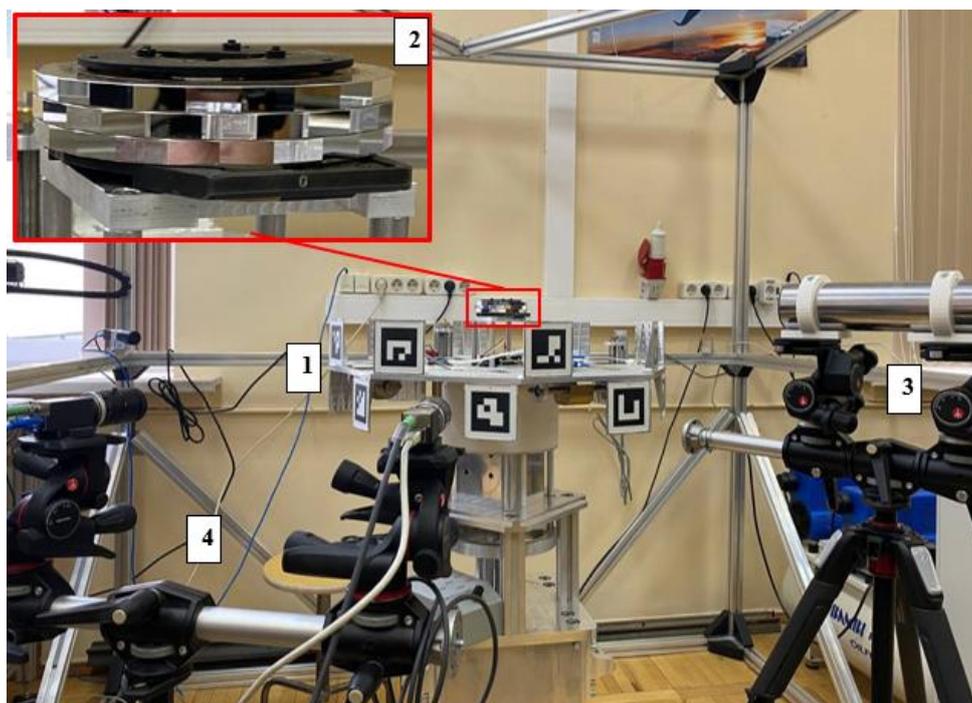


Рис. 1. Экспериментальная установка для оценки погрешности алгоритмов определения положения и ориентации объекта: 1 – свободновращающаяся платформа; 2 – призма многогранная тип ПМ 4-24 (ТУ 50-474-84); 3 – автоколлиматор АКТ-15; 4 – стереосистема камер

Для верификации разработанных алгоритмов было решено использовать призму многогранную (ПМ), представляющую собой расположенных в три ряда повернутые друг относительно друга на 5° типа ПМ 4-24 (ТУ 50-474-84) с общим количеством граней 72 шт. с отклонением рабочих углов от номинального значения не более $15''$ (угловых секунд). В итоге имеется многогранная призма, позволяющая измерять угловое положение на 360° с шагом в 5° (см. рис. 1). Поворот платформы контролируется по отражению перекрестья от граней многогранной призмы с помощью автоколлиматора АКТ-15, имеющий погрешность при двухкоординатных измерениях $15''$.

В геометрический центр исследуемой платформы была установлена ПМ. Изображение платформы регистрируется с помощью стереосистемы, установленной на штативе. В эксперименте используются две монохромные камеры Baumer VCXG-32M с разрешением 2048×1536 пкс, размером пикселя $3,45$ мкм. На обеих камерах установлены объективы SV-0814H с фокусным расстоянием 8 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для сравнительного анализа полученные изображения обрабатываются всеми реализованными алгоритмами в ПО *MotionVision*. В качестве опорных данных используются значения углов, полученных с помощью призмы и автоколлиматора. В результате получено количественное совпадение найденных углов по изображениям и с помощью автоколлиматора и призмы. На рис. 2 приведены сравнительные графики с оценкой определения угла поворота платформы.

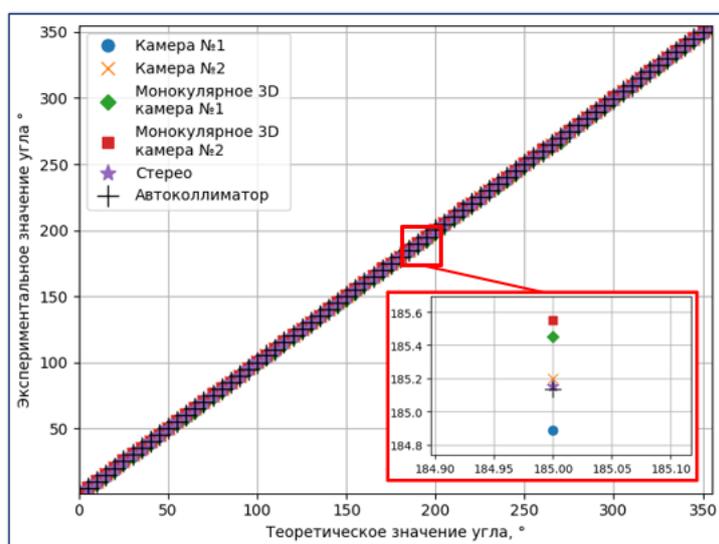


Рис. 2. Сравнительные графики с оценкой определения угла поворота платформы

Для определения погрешности реализованных алгоритмов обработки изображений используется абсолютная ошибка определения угла. В качестве дополнительного анализа результатов обработки используется ошибка репроекции. Результаты обработки изображений разработанным алгоритмом на основе структуры внутреннего рисунка кодовых маркеров показали уменьшение абсолютной погрешности не менее чем на 10% и не менее чем в 30% раза с применением стереосистемы видеокамер по сравнению с классическим подходом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена методика для оценки точности измерения ориентации объектов по изображениям кодовых маркеров на основе инструментальных физических измерений. Методика использовалась для оценки точности разработанных и реализованных алгоритмов цифровой обработки изображений. Для этого проведено экспериментальное измерение

точности определение угла поворота платформы на статическом аэроподшипнике на основе многогранной призмы и автоколлиматора. Результаты измерений по изображениям кодовых маркеров и с помощью автоколлиматора качественно совпали.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00469, <https://rscf.ru/project/24-21-00469/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Liu T., Burner A., Jones Th., Barrows D.** Photogrammetric techniques for aerospace applications // Progress in Aerospace Sciences. 2012. Vol. 54. Pp. 1-58.
2. **Fischler M.A., Bolles R.C.** Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography: 6 // Commun. ACM. 1981. Vol. 24. № 6. Pp. 381-395.
3. **Hartley R., Zisserman A.** Multiple view geometry in computer vision. Cambridge University Press, 2003. 676 p.
4. **Eggert D.W., Lorusso A., Fisher R.B.** Estimating 3-D rigid body transformations: a comparison of four major algorithms // Machine Vision and Applications. 1997. Vol. 9. № 5. Pp. 272-290.
5. **Шматко Е.В., Поройков А.Ю., Сивов Н.Ю., Еремин Д.В.** Программа для определения положения и ориентации объекта в пространстве по его изображению «MotionVision» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024663289 от 05.06.2024.
6. **Шматко Е.В., Поройков А.Ю., Еремин Д.В., Неткачев В.В.** Оценка положения и ориентации свободноповорачиваемого объекта на основе стереоизображений кодовых маркеров // Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации: Труды XVII Международной научно-технической конференции, Суздаль, 23–26 сентября 2024. М.: НТЦ УП РАН, 2024. С. 501-504.

Ivanova E.V., Poroykov A.Yu., Eremin D.V., Lapitskaya I.A.

*National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: shmatkoyv@mpei.ru*

INSTRUMENTAL ESTIMATION OF THE ORIENTATION MEASURING ERROR FOR A FREE-ROTATING PLATFORM

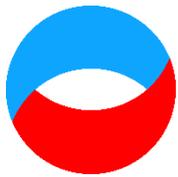
ABSTRACT

Computer vision methods are widely used to control the position and orientation of various objects. This problem can be solved in various ways. The paper considers several options for solving this problem, both by one image obtained by one video camera and by a pair of images obtained from a stereo camera system. The controlled object is a platform freely rotating in three planes on an aerostatic bearing. The paper presents the results of estimating the error in measuring the orientation of the controlled object by comparing the results of measurements by computer vision methods with the results of instrumental measurements. The estimated measurements were carried out based on digital processing of images with fiducial markers by solving the PnP problem, triangulation on stereo images and solving the RBT problem. Instrumental measurements were carried out using a regular polyhedral prism and an autocollimator.

OBJECT POSITION AND ORIENTATION, PHOTOGRAMMETRY, FIDUCIAL MARKER, STEREO IMAGES, AUTOCOLLIMATOR, POLYHEDRAL PRISM

Секция 5

Компьютерные методы обработки сигналов и изображений



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 621.383, 528.8, 004.94

Кривоклякин Г.Д., Винецкий Ю.Р.

*АО «ПО «УОМЗ» – филиал «Урал-Геофизика», Россия,
111123, Москва, ул. Плеханова, 4, E-mail: grigori.2000@mail.ru*

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ОЭС ДЗЗ
БЕЗ НЕОБХОДИМОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕСТ-ОБЪЕКТОВ
МЕТОДОМ «ВИРТУАЛЬНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ МИРЫ»**

АННОТАЦИЯ

При испытаниях оптико-электронных систем дистанционного зондирования Земли (ОЭС ДЗЗ) для экспериментальной оценки реализуемой системой разрешающей способности широко применяется ряд способов, основанных на предъявлении ОЭС специальноготавливаемых тест-объектов – пространственных мир. Создание таких объектов и обеспечение их надлежащих свойств при испытаниях, в особенности применительно к инфракрасному диапазону спектра (ИКД), является весьма сложной и трудоёмкой задачей. Предлагаемый метод не требует наличия специальноготавливаемых мир: он основан на анализе изображений естественных сцен, рассматриваемых ОЭС при полёте носителя, выделении из глобального изображения линейных контрастных фрагментов и последующей автоматической композиции из контрастных переходов серии виртуальных изображений мир «шпального» типа. После этого серия ВПМ может быть предъявлена наблюдателям для проведения классической разрешающей процедуры визуального определения разрешения, либо контрасты могут быть определены автоматически, а критические значения разрешения установлены по ВПМ с заданным уровнем контраста.

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ, ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА, РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ, ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ, УГЛОВОЕ РАЗРЕШЕНИЕ, МИРА, НОВЫЙ МЕТОД

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при испытаниях оптико-электронных систем дистанционного зондирования Земли (ОЭС ДЗЗ) для экспериментальной оценки реализуемого системой важнейшего показателя разрешающей способности – углового разрешения (УР), или соответствующего пространственного разрешения, широко применяется ряд способов, основанных на предъявлении ОЭС специально изготавливаемых тест-объектов – пространственных мир, например, мир полосчатого типа (т.н. штриховых, или «шпальных»). Создание таких объектов, а также обеспечение их надлежащих оптических свойств в ходе натурных испытаний является весьма сложной и трудоёмкой задачей [1-3]. Мира должна обеспечивать достаточный контраст, а яркости её шпал не должны выходить за пределы динамического диапазона яркостей, воспроизводимых ОЭС. В видимом диапазоне спектра (ВД), где контраст имеет чисто отражательный характер, эти условия выполнить проще – следует лишь выбрать коэффициенты отражения шпал, обеспечить их стабильность и предусмотреть надлежащий уровень освещённости. В ИК-диапазоне (ИКД), где в условиях

натурной съёмки контраст носит смешанный излучательно-отражательный характер, подготовка и применение физических мир вызывает ряд дополнительных сложностей, обусловленных значительно более многофакторной зависимостью излучаемого шпалами потока от условий измерений, поскольку необходимо не только предусмотреть надлежащий уровень естественной облучённости поверхности «шпал», но также обеспечить надлежащие уровни их собственного излучения. Ввиду сильной зависимости уровня собственного излучения «шпалы» в ИКД от ее теплообмена с подстилающей поверхностью и конвективного обмена с воздушной средой (в свою очередь, зависящего от столь нестабильных и трудно контролируемых факторов, как влажность воздуха и скорость воздушных потоков в окрестности мира), сложность организации натуральных испытаний в ИКД с применением специально изготавливаемых мир представляется достаточно очевидна. По названным причинам специальным способом изготовления мир, в той или иной мере облегчающим соблюдение требуемых параметров «шпал» в условиях реальных испытаний, посвящен целый ряд работ [3-7]. Предлагаемые в них технические решения весьма затратны и решают проблему далеко не полностью. В данной работе с целью более радикального преодоления вышеописанных затруднений изложен и верифицирован в натуральных испытаниях подход, при котором реализуемая ОЭС ДЗЗ разрешающая способность может быть определена *без применения* «физических» – специально изготавливаемых – мир.

Предлагаемый метод «виртуальной пространственной миры» (ВПМ) основан на регистрации естественных сцен, рассматриваемых ОЭС при полёте носителя; выделении из глобального изображения присутствующих в нем линейных контрастных фрагментов; последующей автоматической композиции из контрастных переходов серии изображений виртуальных мир «шпального» типа с рядом прогрессивно меняющихся периодов. Практика показывает, что фрагменты, обладающие необходимыми свойствами, как правило, без особых затруднений могут быть найдены в глобальных изображениях, поверхности Земли, регистрируемых ОЭС ДЗЗ в ходе натурной съёмки: их источниками могут служить, например, рассматриваемые в надир крыши домов, контейнеры, участки дорожного покрытия, другие техногенные объекты (примеры исходных изображений и избираемые на них для дальнейшей обработки фрагменты для ВД и ИКД представлены ниже соответственно на рис.1 и 2). После формирования серии ВПМ такая серия может быть предъявлена экспертам-наблюдателям для проведения классической решающей процедуры определения разрешающей способности [8,9] – ровно так, как это предусматривается действующим стандартом [10]. В том же случае, когда техническими требованиями предусматривается определение разрешающей способности ОЭС *применительно к задаваемому уровню контраста*, этот уровень может быть определен по сгенерированной серии ВПМ автоматически, а критическое разрешение найдено по мире с минимальной шириной шпал в серии, реализующей заданный уровень контраста.

Ниже после изложения основного замысла метода подробно описывается расчетный алгоритм, требующий участия оператора только в начальной фазе – при выборе фрагментов. Приводятся результаты практических работ, в которых метод, реализованный посредством специально разработанного программного обеспечения (ПО), был апробирован на натуральных изображениях. Далее полученные методом ВПМ значения УР сравниваются с УР, определёнными традиционным методом по серии «физических» мир. Положительные результаты сравнения позволяют рекомендовать описываемый подход к практическому использованию при проведении натуральных испытаний широкого класса ОЭС ДЗЗ, в особенности применительно к ИК-диапазону, где привносимый методом ВПМ эффект снижения трудозатрат выражен в наибольшей степени.

ЗАМЫСЕЛ МЕТОДА

Сама по себе идея характеризовать разрешающую способность, реализуемую ОЭС ДЗЗ, на основе анализа цифрового изображения как такового, не адресуясь ни к известным свойствам каких-либо специально приготавливаемых тест-объектов, ни даже к наличию в глобальном

изображении естественных участков с априорно известной специальной формой – не является оригинальной. Так, например, в [11] предложено реконструировать функцию рассеяния точки (ФРТ) ОЭС непосредственно по искаженному «смазом» и «размытием» изображению, применяя преобразование Фурье для получения отправных параметров «смаза» и «размытия» с последующим восстановлением неискаженного изображения посредством винеровской деконволюции с регуляризацией по Тихонову [12]. При этом подход и методы, подобные изложенным в [11], могут быть охарактеризованы как «абсолютистские» – в том смысле, что они не требуют наличия в глобальном изображении фрагментов, обладающих какими-либо априорно известными свойствами (такими, например, как форма контрастных границ). Подлежащее обработке изображение может быть произвольным, в чём состоит несомненное достоинство такого подхода. Вместе с тем он обладает и серьёзным недостатком, так как в ходе выполняемых трансформаций от исходного изображения «ничего не остаётся»: результаты, предъявляемые к финальной бинарной процедуре вынесения решения о реализации в ОЭС заданного уровня разрешающей способности («да/нет»), изображениями не являются, что полностью исключает проведение предусмотренной стандартом [10] процедуры визуальной оценки. Даже в том случае, когда вместо визуального распознавания в качестве финальной процедуры допускается упомянутая выше чисто числовая оценка на основе заданного уровня контраста, описываемый подход не может считаться корректным до тех пор, пока применяемые алгоритмы промежуточных преобразований не будут верифицированы применительно ко всем факторам неидеальности, присущим исходным изображениям, как то: неоднородности пикселей («геометрическому шуму»), различного рода аддитивным и мультипликативным амплитудным помехам, регулярным смещениям строк «чет-нечет» и более сложным, случайным шумам. Наиболее сильно перечисленные факторы неидеальности проявляются в ИКД. Без скрупулезного изучения границ робастности вычислительных процедур, необходимых в «абсолютистских» методах, их применимость к практическим изображениям, как правило, несвободным от названных выше факторов неидеальности, не гарантирована. По-видимому, в связи с их трудоемкостью такие оценки ни в работе [11], ни в иных известных нам публикациях не представлены. До их проведения, по нашему мнению, для оценки разрешающей способности ответственных ОЭС ДЗЗ рассматриваемый подход непригоден.

Предлагаемый нами альтернативный подход, до некоторой (на практике мало ограничительной) степени сужая класс допустимых исходных изображений, призван сохранить неизменной финальную «каноническую» визуальную процедуру оценки разрешающей способности ОЭС наблюдателями, при этом сохраняя все визуальные детали, в том числе несовершенства исходного фрагмента изображения, чем исключается возможность переоценки уровня разрешающей способности ОЭС ДЗЗ. Это качество достигается тем, что применяемые в методе ВПМ преобразования фрагментов изображения исчерпываются поворотами, инверсией и сдвигами – трансформациями, в которых очевидным образом наследуются все детали исходных фрагментов (в том числе помеховые). При этом главное полезное качество критикуемого выше метода – возможность обойтись без использования «физических» мир – сохраняется.

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ВПМ

Примеры участков практических глобальных изображений, сформированных современной ОЭС ДЗЗ, и избираемые на них для дальнейшей обработки фрагменты для ВД и ИКД, представлены ниже соответственно на рисунках 1 и 2. В нижеследующей последовательности действий оператор выполняет только первый шаг – выбор из глобального изображения фрагментов для последующих автоматических преобразований.

Выбор фрагментов для построения ВПМ

Фрагмент должен обладать следующими характеристиками.

- Быть прямоугольным, ограниченным столбцами и строками.

- Содержать контрастный перепад «темное-светлое» с линейной границей протяженностью не менее ~20 пикселей. Ориентация границы может быть любой (в примерах, представленных на рис. 1 и 2, длины границы фрагментов составляют от 32 до 120 пикселей).
- Обладать достаточно высоким контрастом по отношению к уровню шума для уверенного разрешения тёмной и светлой областей (в примере, представленном на рис. 3, отношение сигнал/шум в темной части фрагмента Ф2 составляет ~12).
- Яркости граничащих светлого и темного участков фрагмента должны находиться в пределах динамического диапазона на линейном участке передаточной характеристики.

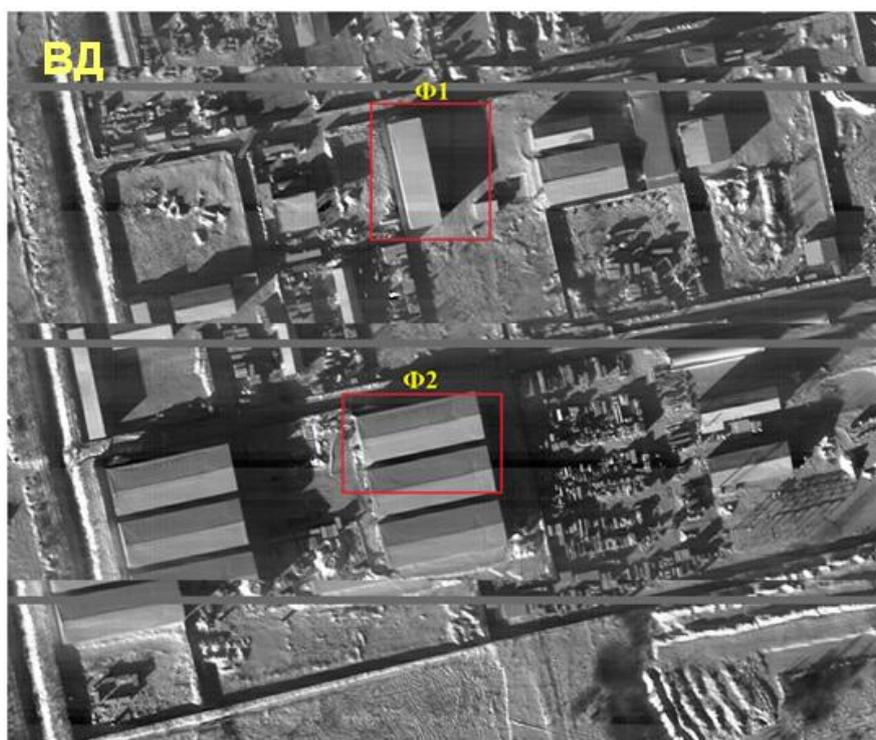


Рис. 1. Участок глобального кадра ВД с выбранными фрагментами

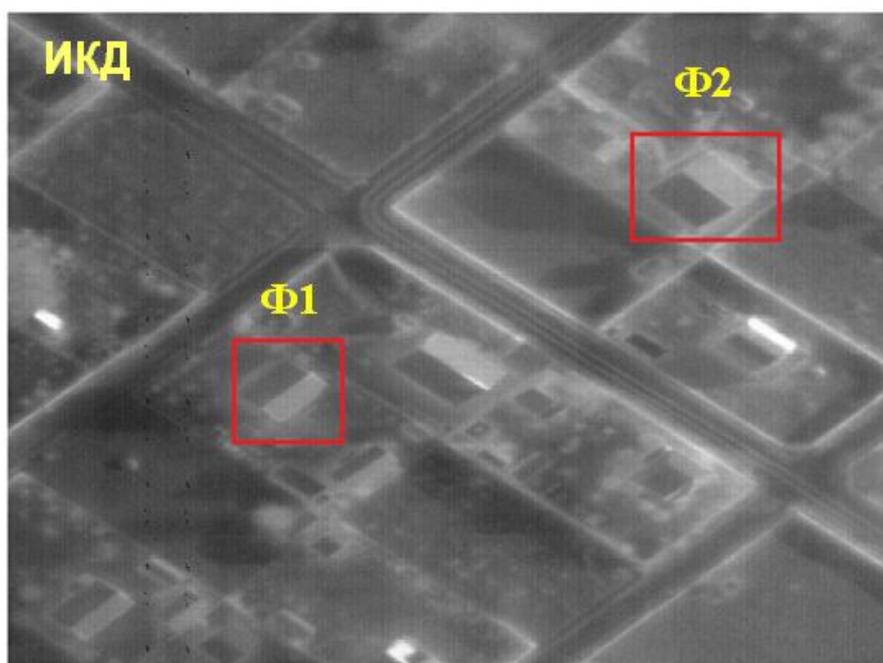


Рис. 2. Участок глобального кадра ИКД с выбранными фрагментами

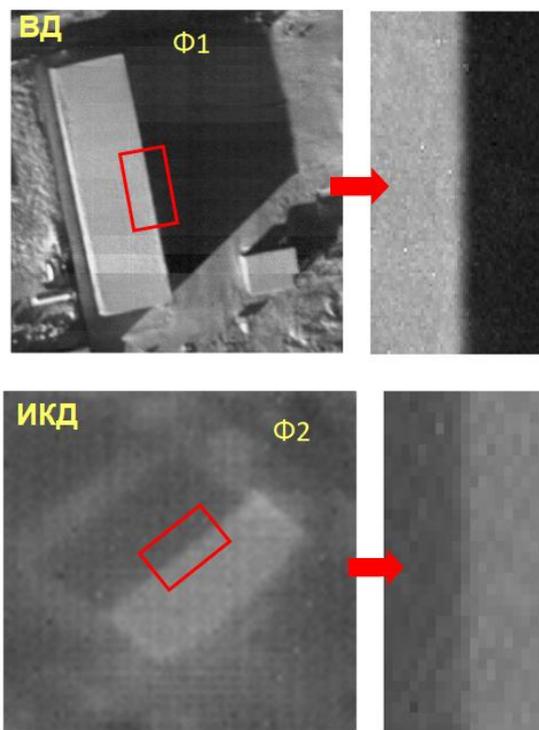


Рис. 3. Предварительные повороты для приведения яркостной границы в вертикальное положение на примерах фрагментов Ф1 (ВД) и Ф2 (ИКД)

Описание вычислительных процедур

1. Автомат поворачивает изображение фрагмента так, чтобы контрастная граница приняла вертикальное положение (рис. 3).
2. Яркостный сигнал усредняется по столбцам (рис. 4а) с формированием последовательности S_i средних по столбцу значений (рис. 4б; i – номер столбца).
3. Последовательность S_i интерполируется с шагом Δx , значительно меньшим шага $pitch$ расположения пикселей, с формированием функции $I(x)$, где x – расстояние; $I(i \cdot pitch) = S_i$ (рис. 4в) (в разработанной нами программе применялось $\Delta x = 0,01 \cdot pitch$). Строится «зеркальное отражение» $R(x | x_0)$ кривой $I(x)$ относительно вертикали, располагаемой на некоторой (пока не определенной) позиции x_0 : $R(x | x_0) = I(x_0 - x)$; значение x_0 , пока неопределенное (произвольное), будет определено на следующем шаге (рис. 4г). Функция $R(x | x_0)$ отвечает яркостному переходу, обратному тому, какой был на исходном фрагменте, то есть тому, как ОЭС будет воспроизводить переход от светлой шпалы мира к темной.
4. Автомат варьирует значения сдвига инверсной кривой яркости с ранее примененным шагом, вычисляя для каждого сдвига сумму прямого и инверсного профиля яркостей $B(x) = I(x) + I(x_0 - x)$; тот из сдвигов, который доставляет $B(x)$ минимум контраста* (рис. 4д), принимается за положение x_0 границы перехода «яркое-темное» на оси абсцисс. От этого положения далее ведется отсчет размера (ширины) «шпалы» мира.

* Здесь и ниже под контрастом понимается отношение разницы яркостей Δ между светлой и темной шпалами, к ее значению M , отвечающему максимуму гистограммы яркостного распределения пикселей в избранном фрагменте. В приводимых примерах в ВД эти значения колеблются между 250-255 младших значащих разрядов (МЗР) 8-битного сигнала, т.е. близки к верхней границе динамического диапазона – 255 МЗР, поэтому за оценку контраста можно принимать отношение глубины «провала» Δ , выраженной в МЗР, к 255, что и сделано на рис. 4, д-ж.

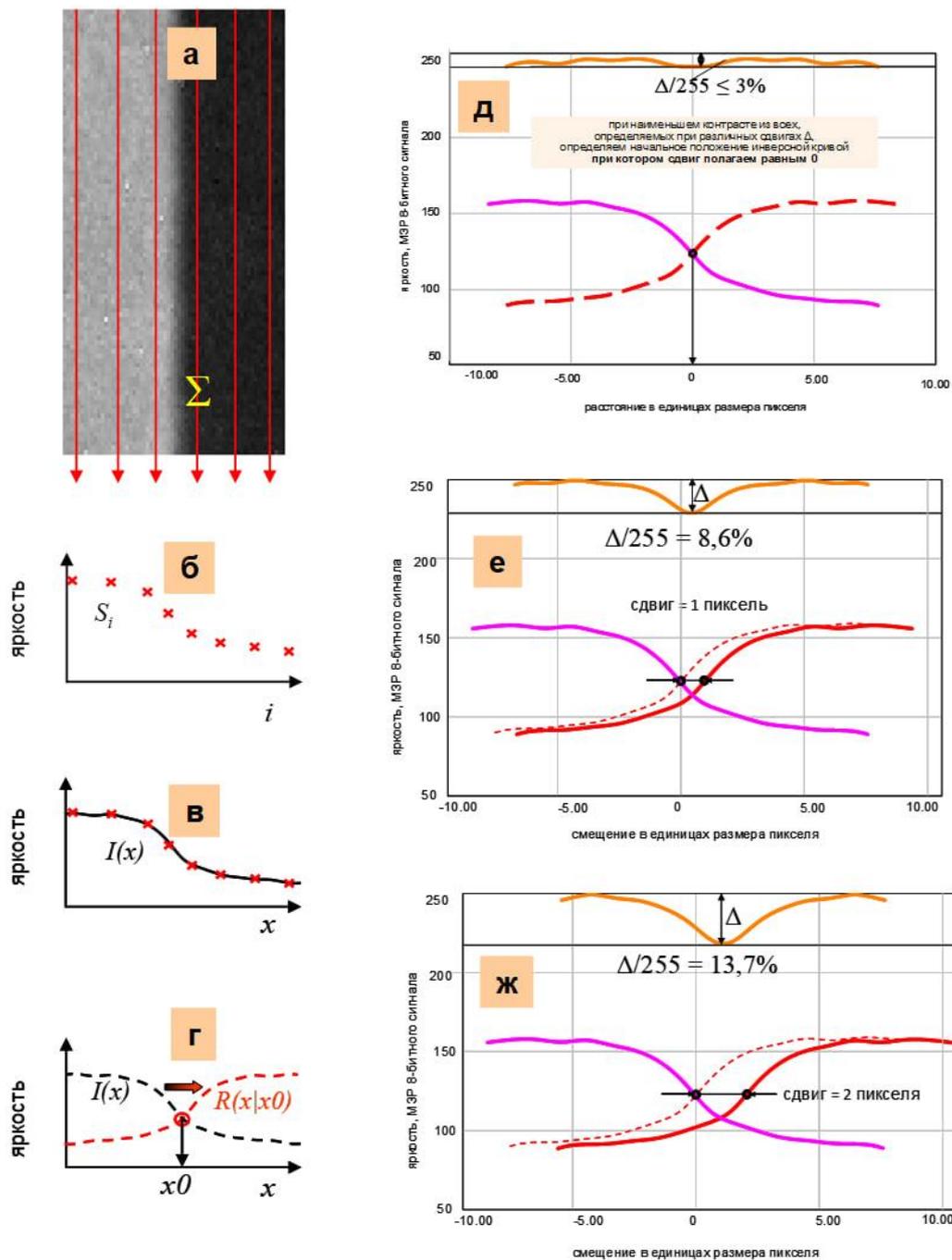


Рис. 4. Пояснение преобразований, производимых в ходе работы алгоритма построения ВПМ. Фрагменты д, е, ж построены на основе одного из фрагментов реального изображения видимого диапазона. Верхняя желтая кривая на них есть сумма фиолетовой и красной кривых – яркостный профиль участка будущей ВПМ с шириной темного участка, равной текущему сдвигу красной и фиолетовой кривых. На фрагменте «е» ширина темного участка миры составляет 1 пиксель, на фрагменте «ж» – 2 пикселя

- Для заданного ряда значений сдвига N в пикселях (например, целочисленного $N = 1, 2, 3..$) строятся яркостные профили – как сумма прямого и инверсного яркостных перепадов, сдвинутых друг относительно друга соответственно на N пикселей. Таким образом автоматически формируется «элементарная ячейка» для построения шпальной ВПМ с соответствующей шириной шпалы. На фрагментах рис. 4е и рис. 4ж показаны примеры построения «элементарной ячейки» для мир с шириной «шпалы» соответственно 1 и 2 пикселя.
- Полная ВПМ с заданным шагом формируется путём мультиплицирования в горизонтальном направлении полученной выше «элементарной ячейки».

7. Для каждой из ряда ВПМ, обладающей своим шагом, определяется величина контраста: $K(N) = \Delta/M$, где Δ – амплитуда яркостного «провала» (см. рис. 4е-ж), M – определяемое в окрестности яркостной границы фрагмента значение яркости, отвечающее максимуму яркостной гистограммы на светлых участках.

В случае, если в качестве решающей финальной процедуры определения разрешающей способности предусматривается выполнение условия наличия критического контраста K_{cr} , значения контрастов для каждой из ВПМ в серии $K(1), K(2), K(3)$ сопоставляются с заданным критическим уровнем K_{cr} , и за показатель пространственного разрешения (ПР) принимается ширина шпалы той из мир в серии, на которой условие $K \geq K_{cr}$ выполняется с наименьшим в серии периодом. Соответственно, рассчитывается и угловое разрешение (УР) при известной высоте полета носителя.

В случае использования классической процедуры визуального распознавания штрихов мира наблюдателями [8-10], автомат, задаваясь рассчитанными яркостными профилями $V(x)$, размером пикселя и заданной разрядностью изображения (в нашем случае изображения были 8-битными) формирует ряд соответствующих растровых изображений ВПМ, по которым подобным же образом – по наиболее «плотной» из распознанных в серии мир, удовлетворяющей условию $K \geq K_{cr}$, – выносится решение о значении ПР (УР).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Для обработки изображений вышеописанным методом использовались глобальные кадры как в ВД, так и в ИКД. Изображение ВД получено при съемке с высоты 4900 м, ИКД – 6000 м. Части этих изображений, на которых приведены по 2 типовых фрагмента, избранных для обработки, представлены выше на рис. 1 и 2. Всего в каждом диапазон обрабатывалось по 5 подобных фрагментов, удовлетворявших сформулированным условиям. Для каждого из этих фрагментов:

а) генерировались, как описано выше, растровые изображения серии мир «шпальных» с прогрессивно растущим размером «шпал».

б) применительно к ИКД в расчете на вышеописанную процедуру определения ПР(УР) по заданному критическому уровню контраста вычислялись значения K для последовательности ВПМ с различными размерами шпал, при этом критическое значение K_{cr} принималось равным 0,2.

Пример результатов создания ВПМ для одного из фрагментов в каждом из спектральных диапазонов представлен ниже на рис. 5. Полученные методом ВПМ значения УР также сравнивались со значениями УР, полученными традиционными способами – с использованием физических мир. Результаты сравнения представлены в таблицах 1 и 2.

Табл. 1. Сравнение значений УР в видимом диапазоне, полученных методом ВПМ и при использовании серии физических мир²

№ фрагмента	Визуальное распознавание ВПМ		Классическая процедура распознавания по серии физических мир	
	УР [мкрад]	контраст K	УР [мкрад]	контраст K
Ф1	68	0,21	73	0,25
Ф2	77	0,20		
Ф3	100	0,34		
Ф4	160	0,20		
Ф5	110	0,27		

²За показатель УР в таблицах 1, 2 принималась ширина одной шпалы.

Табл. 2. Сравнение значений УР в инфракрасном диапазоне, полученных методом ВПМ и при использовании серии физических мир**

№ фрагмента	Достижение условия $K \geq 0,24$ по рассчитанным профилям яркости ВПМ		Серия физических мир, расчет контраста K по 8-битному изображению, условие $K \geq 0,2$	
	УР [мкрад]	контраст K	УР [мкрад]	контраст K
Ф1	70	0,24	65	0,20
Ф2	60	0,45		
Ф3	47	0,33		
Ф4	70	0,50		
Ф5	70	0,45		

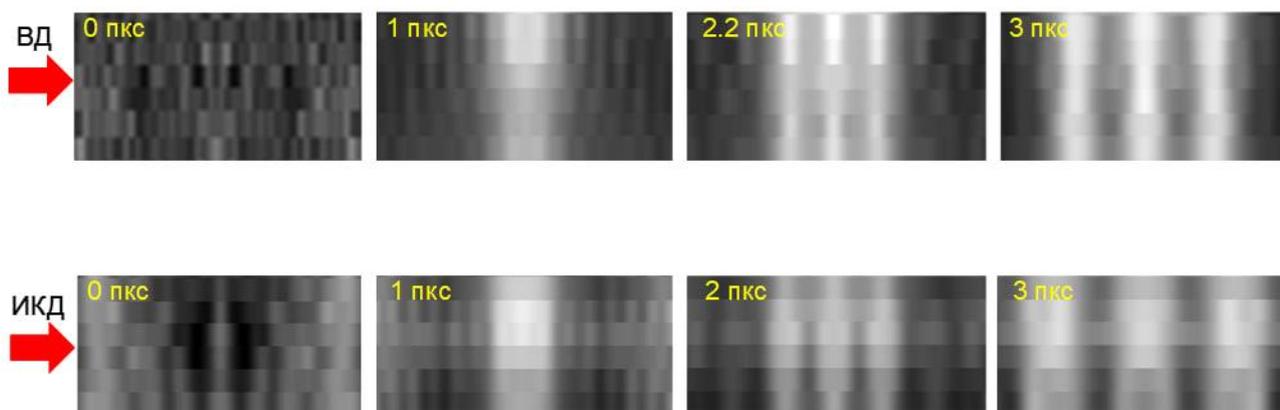


Рис. 5. Результаты генерации серии ВПМ с различными размерами «шпал» в ВД и ИКД. Базовыми были фрагменты, показанные на рис. 3 – Ф1 для ВД и Ф2 для ИКД

Как можно видеть из изображений ВПМ, представленных на рис. 5, как в ВД, так и в ИКД изображения мир разрешаются, уже начиная с размера шпалы ~ 2 пикселя. Далее, из таблиц 1 и 2 видно, что соответствие результатов, полученных предлагаемым методом, результатам, полученным на основе применения физических мир, вполне удовлетворительно. Действительно, в ВД два первых фрагмента показывают хорошее соответствие референтному значению, полученному по физическим мирам; при том, что из пяти избранных фрагментов референтное значение подтверждается двумя, очевидно, что наличие в ВД «аномально плохого» результата (Ф3) является лишь результатом неудачного выбора фрагмента, что может быть на фоне прочих результатов интерпретировано как естественный промах (в статистическом смысле термина). Таблица 2 демонстрирует в ИКД еще более убедительное соответствие результатов по методу ВПМ таковым по физическим мирам. В частности, показатели УР по ВПМ в случае фрагментов Ф2 и Ф3 превосходят результаты по классическому методу, что объясняется упомянутыми выше во вводной части статьи трудностями надлежащего исполнения эксперимента с физическими мирами в этом диапазоне спектра.

Полученные результаты дают основание считать предлагаемый метод верифицированным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан и апробирован метод виртуальной пространственной миры – ВПМ, позволяющий определять разрешающую способность ОЭС ДЗЗ без использования специальных тест-объектов – полосчатых («шпальных») мир, используя взамен них фрагменты исходного изображения, содержащие линейные контрастные границы. Метод

сохраняет в качестве финальной решающей процедуры классическую процедуру визуального распознавания изображения наблюдателями, при этом «прозрачность» выполняемых преобразований, трансформирующих исходные фрагменты в предъявляемый образ ВПМ, обеспечивает наследование ВПМ всех визуальных особенностей (в том числе несовершенств) исходных фрагментов, чем гарантируется объективность выносимого решения. Метод апробирован с положительными результатами как для видимого, так и инфракрасного диапазонов. При этом получено хорошее совпадение результатов с референтными значениями углового разрешения современной ОЭС ДЗЗ, определенными традиционным методом по изображениям «физических» мир. Метод резко сокращает объем усилий на подготовку и проведение натуральных испытаний и может быть полезен специалистам в области разработки и испытаний ОЭС ДЗЗ и ОЭС аналогичного назначения.

Авторы выражают благодарность И.Ю. Чхиквадзе за выполнение качественных предобработок крупноформатных глобальных изображений, В.Д. Утицкому и возглавляемой им команде сотрудников ГНЦ ЛИИ им. М.М. Громова за подготовку физических мир.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Молчанов А.С.** Методика определения линейного разрешения на местности на пиксель оптико-электронной системы при проведении летных испытаний // Информация и Космос. 2019. № 2(9). С. 93-98.
2. **Молчанов А.С.** Определение линейного разрешения на местности оптико-электронных систем с учетом контраста штриховой миры // Информация и Космос. 2024. № 1(4). С. 133-138.
3. **Утицкий В.Д., Дворников В.Н., Корчуганова Н.И.** Пассивная инфракрасная штриховая мира // Патент РФ № RU2605818C1. 2016.
4. **Утицкий В.Д., Саонов Н.И., Яковлев Е.Я.** Пассивная инфракрасная мира // Патент РФ № RU2105956C1. 1998.
5. **Саонов Н.И.** Пассивная инфракрасная мира с системой автоматического регулирования // Патент РФ № RU2387969C1. 2010.
6. **Саонов Н.И., Фастовский А.Х.** Способ автоматизированной оценки разрешающей способности авиационных оптико-электронных систем дистанционного зондирования в видимом и инфракрасном диапазонах волн и универсальная пассивная мира для его реализации // Патент РФ № RU2293960C1. 2007.
7. **Веселов Ю.Г., Данилин А.А., Мельник Ю.С., Сельвесюк Н.И.** Штриховой тест-объект оценки в натуральных экспериментах пространственно-частотного и энергетического разрешений цифровых инфракрасных систем получения видовой информации // Радиостроение. 2018. № 01. С. 1-8.
8. **Holst G.C.** Electro-optical imaging system performance / Gerald C. Holst. - 2nd ed. p. cm., JCD Publishing, Winter Park, Florida USA and SPIE OPTICAL ENGINEERING PRESS, Bellingham, Washington USA, 2000.
9. **Молчанов А.С., Тарасов В.В.** Оценивание пространственно-частотных характеристик и показателей качества цифровых оптико-электронных систем при проведении авиационных летных экспериментов // Информация и Космос. 2024. № 4(4). С. 118-125.
10. **ГОСТ 2819-84.** Материалы фотографические. Метод определения разрешающей способности. М.: изд. стандартов, 1985. 7 с.
11. **Сизиков В.С., Рущенко Н.Г.** Новые устойчивые методы восстановления искаженных изображений // Изв. ВУЗов. Приблостроение. 2023. Т. 66. № 7. С. 559-567.

12. **Волынский М.А., Гуров И.П., Ермолаев П.А.** Методы компьютерной фотоники: Учебно-методическое пособие по практическим работам. СПб: Университет ИТМО. 2014. С. 54.

Krivoklyakin G.D., Vinetski Yu.R.

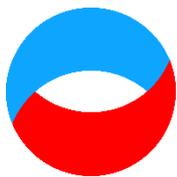
*JSC «PA «UOMP» – branch «Ural-Geofizika», Russia,
111123, Moscow, Plekhanova str., 4, E-mail: grigori.2000@mail.ru*

**DETERMINATION OF SPATIAL RESOLUTION OF THE EARTH'S REMOTESENSING
ELECTRO-OPTICAL SYSTEM BY THE "VIRTUAL LINE PATTERN" METHOD
WITHOUT THE NEED OF SPECIAL TEST OBJECTS**

ABSTRACT

When evaluating the resolution of the Earth's remote sensing electro-optical systems (ERS EOS) in the full-scale tests, various techniques are employed using specially prepared test objects known as line test patterns. Both preparations of such the objects and providing their proper use during the field test - are a complex and time-consuming processes, especially, when it comes to the infrared (IR). In contrast, the method proposed does not require any specially prepared pattern: instead, this one is based on the analysis of images of the natural scene viewed by the EOS during the carrier flight, extracting from the scene a number of the fragments having line border with sufficiently high contrast, and, finally, automatically composing a series of virtual images of the virtual line test patterns (VTP) prepared from the above fragments. After that, the series of the VTP of progressively decreased width can be presented to observers for classic visual resolution determination procedure; alternately, the contrast for each VTP in the series can be determined automatically, and the EOS resolution can be determined by the last VTP in the series having contrast not less than a preset contrast level.

**REMOTE SENSING, ELECTRO OPTICAL SYSTEM, RESOLUTION, SPATIAL RESOLUTION,
ANGLE RESOLUTION, LINE TEST PATTERN, NOVEL METHOD**



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 53.088

Кузьмин В.И.¹, Тытик Д.Л.², Абатуров М.А.², Касаткин В.Э.²

¹МИРЭА – Российский технологический университет, Россия,
119454 г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78, E-mail: vik271935@yandex.ru

²ИФХЭ РАН, Россия,
119071 г. Москва, Ленинский пр., д.31, корп. 4, E-mail: dtytik@yandex.ru

**СДВИГОВАЯ ФУНКЦИЯ НА ОСНОВЕ МЕТРИК ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ
ПРОСТРАНСТВ ПРИ АНАЛИЗЕ БОЛЬШИХ ДАННЫХ**

АННОТАЦИЯ

Производительность современных компьютеров позволяет проводить анализ больших данных без привлечения процедур сглаживания или аппроксимации данных в подходящем базисе функций, когда может быть утрачена важная информация из-за «отбрасывания» части экспериментальных точек. Для учета вклада всех экспериментальных точек предложен метод на основе класса моделей, с использованием нормированного по числу измерений дискретного варианта расстояний в функциональных пространствах, в частности, в пространстве почти-периодических функций.

Проведены исследования вибрационных характеристик поверхностей лабораторного помещения с целью сертификации места установки оптических приборов. Использован высокочувствительный мобильный сейсмометр и зарегистрированы данные колебаний лабораторных поверхностей. Методом почти-периодического анализа определены спектральные характеристики колебаний поверхностей лабораторного помещения. Проведено сравнение с данными Фурье анализа.

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МЕТРИКИ, ПОЧТИ-ПЕРИОД, ПОЧТИ-ПЕРИОДИЧЕСКИЕ
ФУНКЦИИ, СДВИГОВАЯ ФУНКЦИЯ, ГРУБОСТЬ**

ВВЕДЕНИЕ

Основным противоречием между технической возможностью современной вычислительной техники и используемых алгоритмов обработки данных, является представление (аппроксимация) данных в том или ином базисе функций. Вопрос о том, что при такой процедуре может быть утрачена важная информация об измеряемой системе, как правило, не обсуждается. При этом доступное временное разрешение сигнала и возможность хранения его «целиком» (большие данные) растет с каждым годом. В статье рассмотрены методы анализа временных рядов разной природы с использованием метрик функционального анализа, которые можно применять и к большим данным.

ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ

Класс почти-периодических функций

Почти-периодическая функция, значения которой приближенно повторяются при добавлении к аргументам надлежащим образом выбранных постоянных чисел. Точнее, каково

бы ни было $\varepsilon > 0$, можно указать $L(\varepsilon) > 0$ такое, что в каждом интервале длины L найдется, по крайней мере, одно τ , удовлетворяющее условию $|f(x + \tau) - f(x)| < \varepsilon$ [1, 2].

Метрики функциональных пространств

Основное в классе почти-периодических функций то, что метод анализа результатов измерений оставляет без изменения исходный временной ряд. Будем рассматривать экспериментальные точки как дискретный аналог класса непрерывных почти-периодических функций [2]. Это позволяет воспользоваться основными результатами функционального анализа применительно к дискретной процедуре реализации измерений (дискретная функция). При этом использование разных метрик при анализе конкретного временного ряда позволяет при совпадении результатов анализа на разных метриках функционального пространства гарантировать истинность полученных результатов обработки.

Для получения результата обработки временного ряда, не зависящего от длины временного ряда, в дискретное выражение для сдвиговой функции как дискретного аналога расстояний вводится оператор усреднения, т.е. расстояния в «дискретном» функциональном пространстве делится на число точек суммирования. Таким образом, сдвиговая функция с оператором усреднения определяет величину расстояния при фиксированном значении τ . При этом варьирование величины τ в сдвиговой функции позволяет найти значения наиболее близкие к нулю. Если в каких-то точках, соответствующих конкретным значениям τ , получается нулевое значение, то это соответствует определению «точных» периодов. Как правило, при анализе конкретных временных рядов такие варианты, хотя и являются теоретически возможными, встречаются крайне редко.

В функциональном анализе [3] для определения расстояния в метрическом пространстве в случае дискретных функций используются следующие метрики

$$\rho(x, y) = \sqrt[n]{\sum_{t=1}^n (x_t - y_t)^{2n}}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (1)$$

$$\rho_p(x, y) = \sum_{t=1}^n (|x_t - y_t|^p)^{\frac{1}{p}}, \quad p = 1, 2, 3, \dots, \quad (2)$$

где $\rho_p(x, y)$ – расстояние в пространстве l_p .

Сдвиговая функция

Приведенным функциональным метрикам можно сопоставить следующие сдвиговые функции, модифицированные для дискретного случая, когда размер экспериментального ряда составляет n точек

$$a(\tau_k) = \frac{1}{n - \tau_k} \sqrt[n]{\sum_{i=1}^{n - \tau_k} (f(t_i + \tau_k) - f(t_i))^{2n}}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (3)$$

$$a(\tau_k) = \frac{1}{n - \tau_k} \left(\sum_{i=1}^{n - \tau_k} |f(t_i + \tau_k) - f(t_i)|^p \right)^{\frac{1}{p}}, \quad p = 1, 2, 3, \dots. \quad (4)$$

Отметим, что при $p = 1$ имеем

$$a(\tau_k) = \frac{1}{n - \tau_k} \sum_{i=1}^{n - \tau_k} |f(t_i + \tau_k) - f(t_i)|. \quad (5)$$

где n общее число отсчетов дискретной функции $f(t_i)$, заданной экспериментальными значениями, что соответствует функции Джонсона [4]. В этом случае сдвиговая функция

представляет среднемодульное отклонение, вычисляемое для ряда пробных периодов τ_k . При этом целесообразно для пробных периодов ограничиться значениями $k \leq \frac{3}{4}n$, поскольку для больших значений почти-периодов получается слишком малая база осреднения и достоверность определенных почти-периодов становится сомнительной [5].

Реальные процессы развития как природных, так и физико-химических систем представлены иерархической соподчиненной системой медленных и быстрых движений, первое из которых определяет общее направление развития (тренд), а второе колебание относительно этих тенденций (трендов). Они характеризуются как иерархически соподчиненные процессы, происходящие на микро- и макроуровнях. И.Ньютон впервые решил задачу о разделении движений, представленных основной траекторией движения центра масс системы и колебаниями относительно центра масс. При этом проблема моделирования движения центра масс решалась им на основе уравнений, когда масса умноженная на ускорение равнялась сумме действующих на систему сил. В результате из характеристик измерений реального процесса (временной ряд) вычиталась трендовая компонента, и оставались колебания доступные для самостоятельного анализа [6, 7]. В этой формулировке применительно к анализу физических процессов эту задачу решали Смолуховский, Эйнштейн [8] и Юкава [9].

Тестирование метода сдвиговой функции на эталоне временного ряда

В качестве примера для тестирования метода определения почти-периодов с помощью вычисления сдвиговой функции рассмотрим хорошо документированный ряд среднемесячных чисел Вольфа, которые регистрируются с 1749 года до настоящего времени (рис. 1а) [10]. На рис. 1б приведена первая разность (аналог производной) для функции среднемесячных чисел Вольфа. Сдвиговая функция ряда чисел Вольфа, для расчета которой использовано среднемодульное отклонение приведена на рис. 2. На нем хорошо проявлен ряд минимумов, например, самый глубокий минимум на рис. 2 соответствует 11-летнему циклу («цикл Швабе» или «цикл Швабе-Вольфа»), который является наиболее заметно выраженным циклом солнечной активности (рис. 1а). 22-летний цикл («цикл Хейла») является удвоенным циклом Швабе. Вековой цикл солнечной активности («цикл Гляйсберга») имеет длину около 70-100 лет и проявляется в модуляциях 11-летних цикла [11].

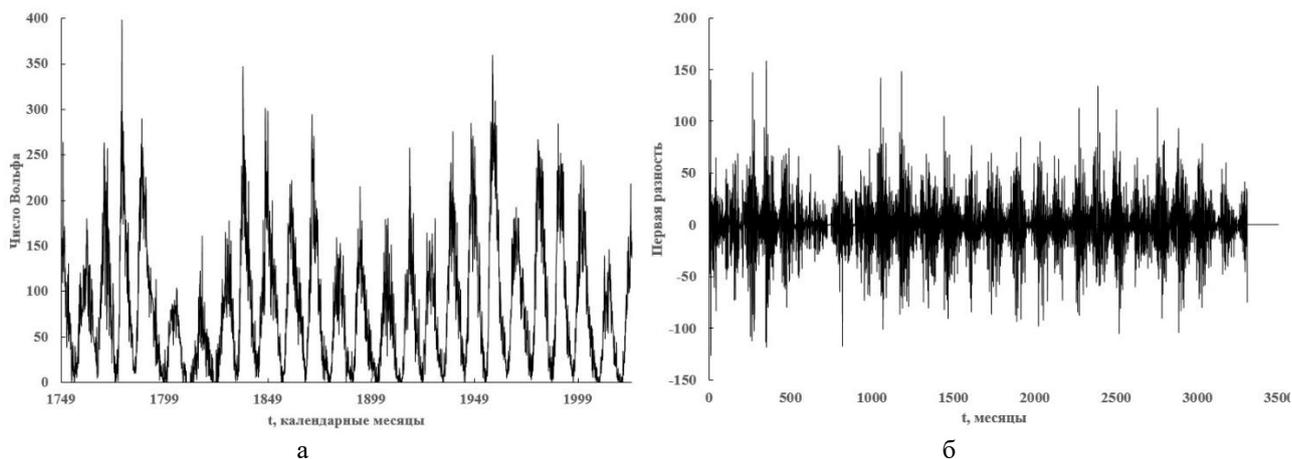


Рис. 1. Документированный ряд среднемесячных чисел Вольфа:

а – среднемесячные числа Вольфа от начала наблюдений по настоящее время (указаны промежуточные календарные годы); б – первая разность для функции среднемесячных чисел Вольфа

Для того чтобы доказать корректность применения сдвиговой функции и достоверность результатов анализа при вычислении почти-периодических компонент необходимо испытание исходной функции (временного ряда) на грубость.

Проверка на грубость

Андронов и Понтрягин [12] ввели понятие грубости динамических систем как свойство решений сохранять близость к опорной траектории при изменении вида модели, описывающей процесс. По внутренней сути это аналог метода проверки устойчивости динамических систем, который реализуется через оценку изменения правых частей дифференциальных уравнений на сохранение близости получаемого решения к исходной траектории. Для рассматриваемого случая такая проверка может быть проведена путем построения и сопоставления сдвиговых функций на основе рассмотренных функциональных метрик как в [6]. Для того чтобы результаты почти-периодического анализа имели смысл, требуется проверка на принадлежность результатов анализа измерений классу почти-периодических функций. При этом почти-периодические функции обладают следующими свойствами: модуль, производная и интеграл почти-периодической функции являются почти-периодическими функциями [7]. В данном случае принадлежность к классу почти-периодических функций и корректность применения сдвиговой функции на основе метрики среднемодульного расстояния между точками в функциональном пространстве проверена для производной (первая разность) (рис. 1б) исходной функции (рис. 1а – среднемесячные числа Вольфа).

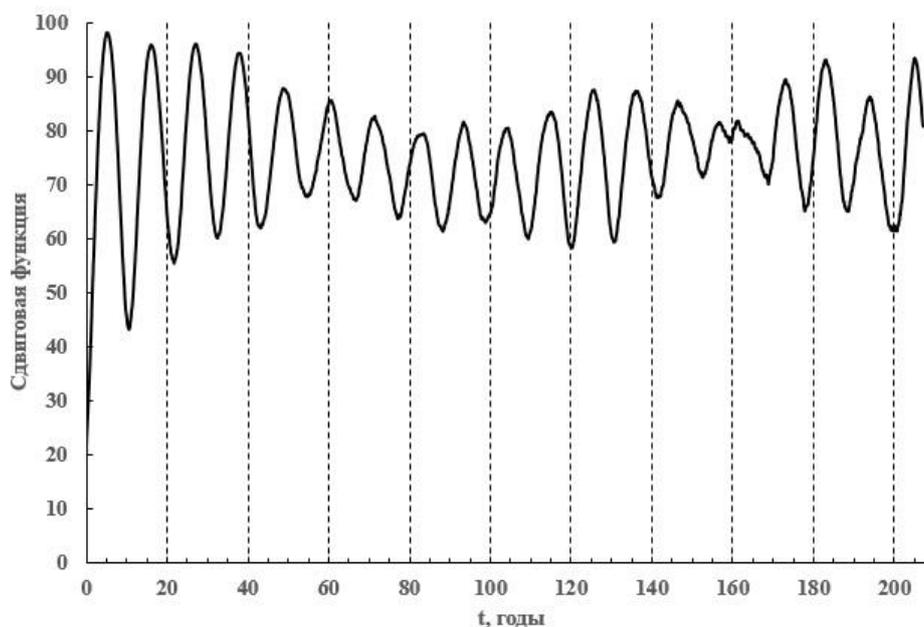


Рис. 2. Сдвиговая функция, построенная для среднемесячных значений чисел Вольфа (см. рис. 1а); данные приведены в годах

В случае совпадения значений почти-периодов у сдвиговых функций, построенных для исходной функции и ее производной, можно судить о том, что получаемые значения почти-периодов зависят или не зависят от класса используемых преобразований. Если получаемые значения почти-периодических функций совпадают, можно говорить о том, что они органически соответствуют свойствам анализируемого временного ряда. Результаты этой проверки приведены на рис. 2 и рис. 3.

Таким образом, дополнительная проверка грубости анализируемого временного ряда, проведенная для производной (первая разность) исходного ряда показала корректность проведенного почти-периодического анализа, что свидетельствует о закономерной структуре этого ряда.

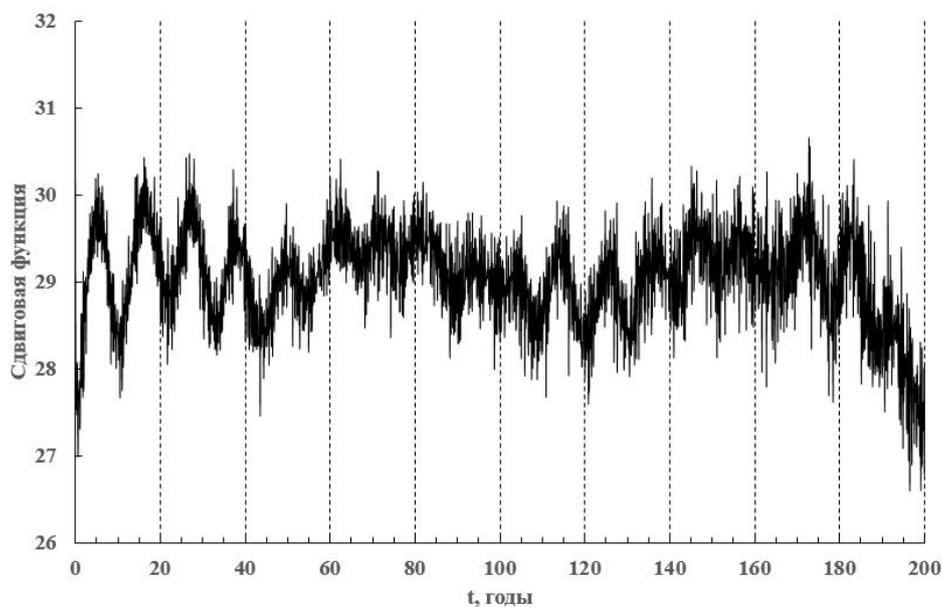


Рис. 3. Сдвиговая функция для первой разности функции среднемесячных чисел Вольфа (см. рис. 16); данные приведены в годах

Сравним спектр для сдвиговой функции среднемесячных чисел Вольфа с результатами Фурье анализа (рис. 4). Видно, Фурье анализ «не видит» большие периоды в данных (ряд чисел Вольфа), например, более 100 лет (период парада планет).

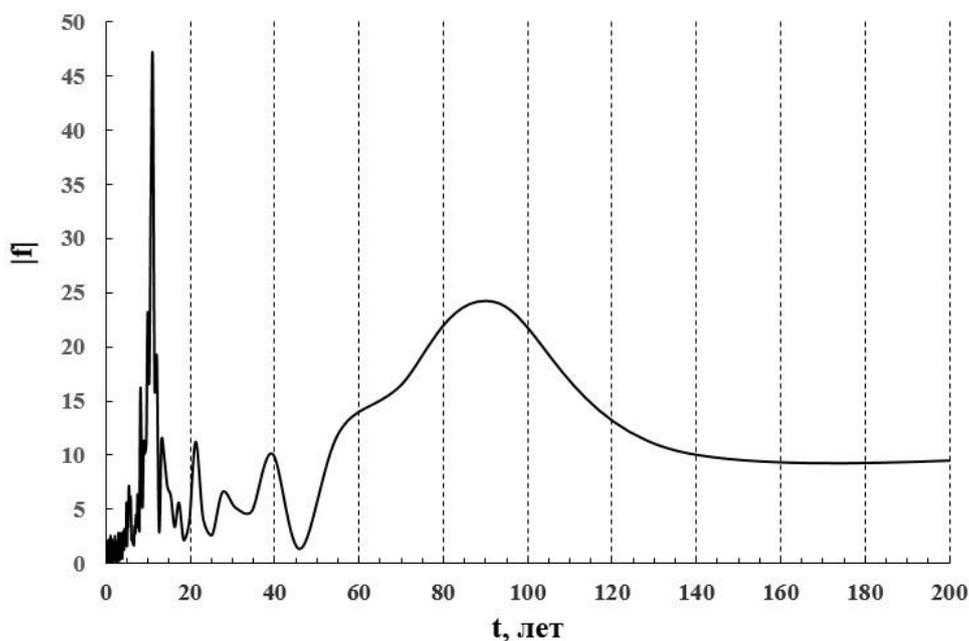


Рис. 4. БФП для функции среднемесячных чисел Вольфа

Следует отметить, что Фурье анализ данных о среднемесячных числах Вольфа дает согласованные результаты в сравнении с методом сдвиговой функции (функция Джонсона) примерно до 40 лет (рис. 4). Отдельно необходимо исследовать вопрос о том насколько «точные» максимумы функции, определенные по методу Фурье. Для функции Джонсона (рис. 2) таких проблем нет, поскольку ее построение свободно от модельных предположений, например, выбора базиса функций и основывается на использовании исключительно экспериментальных данных. Другое дело, что современные знания не позволяют интерпретировать весь набор почти-периодов, вычисленным для среднемесячных чисел Вольфа.

Резюмируя, следует отметить, что предложенный метод почти-периодического анализа временных рядов является вполне конкурентным в сравнении с современными методами выделения периодических компонент в экспериментальных данных.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Проведены исследования вибрационных характеристик поверхностей лабораторного помещения с целью сертификации места установки оптических приборов (лабораторный стол). Использован высокочувствительный мобильный сейсмометр прецизионного класса разработки ООО НТК Анчар в диапазоне 0,1-45 Гц с 24-разрядной оцифровкой 93,06 Гц. Зарегистрированы колебания лабораторных поверхностей. Анализировался весь массив данных длительностью около 1050 с. Фурье-преобразование делалось по алгоритму быстрого Фурье преобразование (БПФ) в оконном режиме (прямоугольное окно). Длительность каждого окна – 2048 точек. Разбивка массива на окна непрерывная без сдвигов и без перекрытий. Результаты измерений сигнала с датчика были получены в исходной форме в виде вольт (В) и прокалиброваны в микроны. Результаты Фурье анализа даны, соответственно, в виде спектральной плотности S в $\text{В/Гц}^{1/2}$.

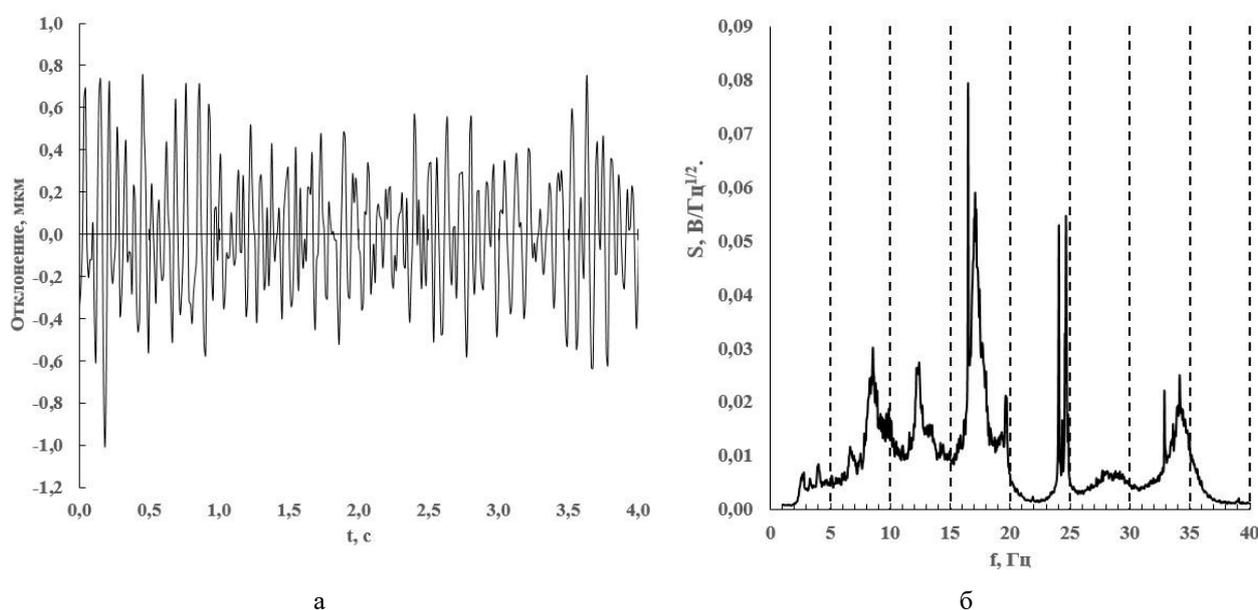


Рис. 5. а – фрагмент исходных данных (колебания датчика перпендикулярно поверхности лабораторного стола), прокалиброванные в микронах); б – Фурье спектр для временного ряда колебаний датчика

Аналогичный расчет для временного ряда колебаний лабораторного стола (рис. 5а) проведен как методом Фурье анализа (рис. 5б), так и методом сдвиговой функции (рис. 6а). Отметим хорошо проявленные минимумы на сдвиговой функции, соответствующие основным частотам колебаний в исходных данных. Обоиими методами вычислены частоты 8, 17 и 34 Гц. Частота 17 Гц близка к частоте третьей субгармоники частоты промышленной сети 50 Гц. При этом в спектре, полученным методом БПФ, есть компоненты 24 Гц и 28 Гц, но минимумы на этих частотах в сдвиговой функции отсутствуют. Это может, по-видимому, свидетельствовать о «частотах-артефактах» метода БПФ и необходимы дополнительные исследования с использованием независимого метода.

На рис. 6б показан начальный участок сдвиговой функции, соответствующий низкочастотным колебаниям. Низкочастотные компоненты проявлены в исходных данных в виде своеобразных компонент «низкочастотных модуляций» высокочастотных колебаний (рис. 5а, рис. 6б). Физический смысл таких «модуляций» предполагается определить в дальнейшем исследовании. На рис. 5а такие модуляции, по-видимому, проявлены в виде своеобразных «пачек» высокочастотной компоненты.

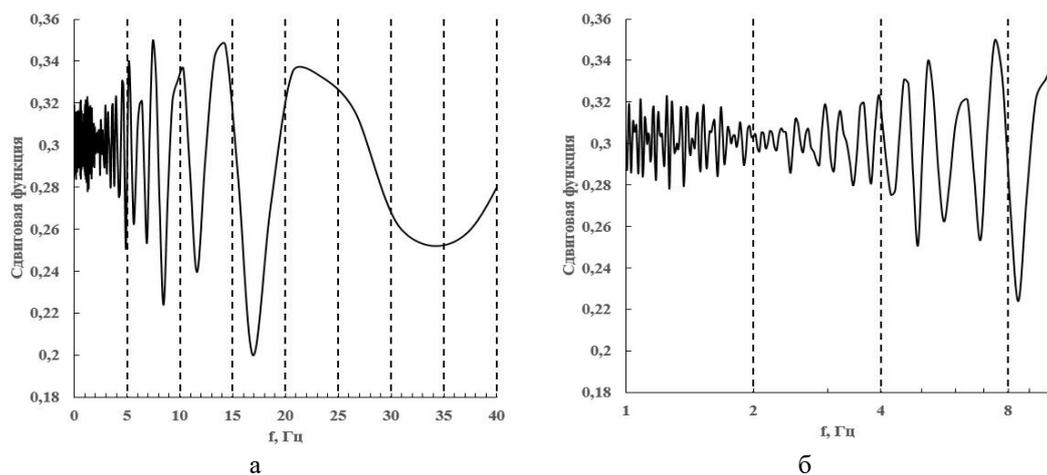


Рис. 6. а – фрагмент сдвиговой функции для временного ряда колебаний лабораторного стола; б – фрагмент начального участка сдвиговой функции (полулогарифмические координаты)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Общая проблема анализа произвольных сигналов направлена на выявление достоверной периодичности в данных, которые на первый взгляд стохастичны. Разные формы Фурье анализа позволяют выделить периодические компоненты, но их физический смысл часто не поддается интерпретации. Сравнивая спектр Фурье (рис. 5б) и спектр сдвиговой функции (рис. 6а) можно отметить наличие «расщепленных» максимумов в первом случае (рис. 5б) и набор хорошо проявленных минимумов во втором случае (рис. 6а).

Предложенный метод сдвиговой функции свободен от недостатков, связанных с представлением сигнала в том или ином базисе функций. Более того, этот метод в некотором смысле даже «избыточен» поскольку вычисляется полный набор локальных минимумов для временного ряда. При этом наиболее глубокие локальные минимумы в первую очередь являются «претендентами» реальной спектральной компоненты сигнала. В дальнейшем необходимо провести исследование для определения критерия, по которому локальный минимум может быть отнесен к реальной спектральной частоте. Тем не менее, на первом этапе метод сдвиговой функции может служить, например, своеобразной проверкой спектра, полученным методом БПФ.

Метод почти-периодического анализа (метод сдвиговой функции) позволяет оперировать понятием почти-периода, то есть значением наиболее близким к «идеальному» периоду. При этом достоверность вычисленных почти-периодов исследуемого временного ряда определяется исключительно точностью регистрации сигнала и длиной временного ряда для обеспечения достоверной статистики. Другими словами, чем больше время регистрации сигнала, тем вероятнее достоверность вычисленных почти-периодов (спектр сдвиговой функции).

Следует отметить, что предложенный метод приближает к идеальному случаю учета всех экспериментальных точек, то есть, когда в методе обработки «работает» каждая точка. При этом остается проблема корректной физической интерпретации вычисленных значений почти-периодов.

Работа выполнена в соответствии с Госзаданием и при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мантуров О.В., Солнцев О.К., Соркин Ю.И., Федин Н.Г. Толковый словарь математических терминов М.: Просвещение, 1965. 540 с.
2. Левитан Б.М. Почти-периодические функции. М.: ИТТЛ, 1953. 395 с.

3. **Колмогоров А.Н., Фомин С.В.** Элементы теории функций и функционального анализа. М.: ФМ 1968. 496 с.
4. **Johnson M.** Correlations of cycles in weather, solar activity, geomagnetic values and planetary configurations. San Francisco: Phillips and Van Orden, 1944. 149 p.
5. **Дискретность и непрерывность в свойствах физико-химических систем / В.И. Кузьмин, Д.Л. Тытик, А.Ф. Гадзаов и др., Под ред. В.И. Кузьмина, Д.Л.Тытика, А.Ф.Гадзаова.** М.: Наука, ФИЗМАТЛИТ, 2014. 176 с.
6. **Кузьмин В.И., Самохин А.Б., Гадзаов А.Ф., Чердынцев В.В.** Модели и алгоритмы анализа нелинейных колебаний с трендом. М.: МИРЭА, 2015. 94 с.
7. **Парамонов А.А., Кузьмин В.И.** Программный комплекс обработки сигналов, представленных нелинейными колебаниями с трендом. / Труды 17-й международной научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков» 26-30 июня 2023 г. М.: МЭИ, 2023. С. 265-273.
8. **Чандрасекар С.** Стохастические проблемы физики и астрономии. М.: ИЛ, 1947. 168 с.
9. **Юкава Х.** Лекции по физике. М.: Энергоиздат, 1981. 127 с.
10. **Мировой Центр Данных по Солнечно-Земной Физике.** [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.wdcb.ru/stp/data/solar.act/sunspot/SILSO/ver2/SN_m/ (дата обращения 28.04.2025).
11. **Чистяков В.Ф.** Циклическая деятельность Солнца. Владивосток: Дальневосточное книжное издательство, 1971. 123 с.
12. **Андронов А.А., Понтрягин Л.С.** Грубые системы // ДАН СССР. 1937. Т. 14. № 5. С. 247-250.

Kuzmin V.I.¹, Tytik D.L.², Abaturov M.A.², Kasatkin V.E.²

¹*MIREA Russian Technological University, Russia,
119454 Moscow, Vernadskii pr., 78, E-mail: vik271935@yandex.ru*

²*IPCE RAS, Russia,
119071 Moscow, Leninsky pr., 31, bldg. 4 E-mail: dtytik@yandex.ru*

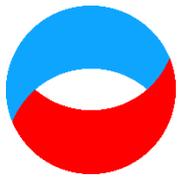
SHIFT FUNCTION BASED ON FUNCTION SPACE METRICS IN BIG DATA ANALYSIS

ABSTRACT

The performance of modern computers allows analyzing big data without involving smoothing procedures or approximating the data in a suitable basis of functions, when important information may be lost due to “discarding” a part of experimental points. To take into account the contribution of all experimental points, we propose a method based on a class of models, using a discrete version of distances normalized by the number of measurements in function spaces, in particular, in the space of almost-periodic functions.

The vibration characteristics of the laboratory room surfaces were investigated in order to certify the location of optical devices. A highly sensitive mobile seismometer was used and large vibration data of laboratory surfaces were recorded. The spectral vibration characteristics of the laboratory room surfaces were determined by the near-periodic analysis method. Comparison with Fourier analysis data is carried out.

FUNCTIONAL METRICS, ALMOST-PERIOD, ALMOST-PERIODIC FUNCTIONS, SHIFT FUNCTION, COARSENESS



*Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.*

УДК 004.89

Кадыров Р.И., Стаценко Е.О., Нгуен Т.Х.

*Институт геологии и нефтегазовых технологий
Казанского (Приволжского) федерального университета, Россия,
420008, Казань, Кремлевская ул., 4/5, E-mail: rail7777@gmail.com*

ФИЗИЧЕСКИ ИНФОРМИРОВАННОЕ МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ В ЦИФРОВОМ КЕРНЕ: ПРОГНОЗ ГАЗОВОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ КАРБОНАТОВ НА ОСНОВЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ МИКРОТОМОГРАФИИ СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ

АННОТАЦИЯ

В работе представлен комбинированный подход к прогнозированию газовой проницаемости карбонатных коллекторов на основе микротомографических изображений стандартных образцов. Для построения моделей использовались стеки 2D-срезов, полученные с помощью микротомографии низкого разрешения, прошедшие специализированную обработку и разметку на основе фрактальных моделей порового пространства. Для прогнозирования проницаемости применялась архитектура трансформера со сдвигаемыми окнами, обученная на двух различных типах агрегированных данных: с использованием гармонического среднего и модели бутылочного горлышка. Проведённое тестирование на независимой выборке карбонатных образцов показало, что разработанные модели обеспечивают быструю оценку проницаемости по микротомографическим изображениям с достаточной степенью соответствия экспериментальным данным. При этом модель бутылочного горлышка продемонстрировала преимущество в точности и устойчивости предсказаний на всём диапазоне проницаемостей, что позволяет рекомендовать её для задач экспресс-оценки фильтрационно-емкостных свойств пород в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. Полученные результаты подтверждают перспективность применения методов физически информированного машинного обучения для цифрового керна.

**ПРОНИЦАЕМОСТЬ, КАРБОНАТЫ, МИКРОТОМОГРАФИЯ, ЦИФРОВОЙ КЕРН,
ФИЗИЧЕСКИ ИНФОРМИРОВАННОЕ МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ

Определение фильтрационно-емкостных свойств горных пород, таких как пористость и проницаемость, является ключевым этапом при разработке нефтегазовых месторождений [1]. Оценка этих свойств осложняется сложностью строения и неоднородностью пород, особенно в карбонатных коллекторах [2]. Проницаемость определяется структурой порового пространства и может существенно варьироваться даже в пределах одного пласта [3, 4].

Существующие методы оценки проницаемости включают экспериментальные измерения, эмпирические модели и цифровую физику горных пород. Экспериментальные методы требуют значительных затрат [5] а эмпирические уравнения [6, 7], такие как формула Козени–Кармана [8], часто требуют подбора параметров для конкретных типов пород. Численное моделирование структуры пор требует реконструкции 3D-сетей и больших

вычислительных ресурсов, а также связано с неопределённостями из-за разрешения и масштабирования [9-11].

Машинное обучение стало рассматриваться как перспективная альтернатива для быстрой оценки свойств коллектора. Использование микротомографических изображений в сочетании с алгоритмами глубокого обучения позволяет прогнозировать различные характеристики пород [12], в частности пористость и проницаемость, за считанные секунды [13, 14]. Показана высокая эффективность применения нейронных сетей для анализа как сегментированных, так и серых 2D- и 3D-изображений [15-17].

Однако перенос обученных моделей на новые образцы остаётся проблемой из-за переобучения и ограниченного числа примеров. Особенно это актуально для 3D-данных, требующих значительных ресурсов. Разделение объёма на стек 2D-срезов и обучение моделей по ним позволяет снизить нагрузку [10, 12], но предсказание проницаемости остаётся сложной задачей из-за зависимости от трёхмерной связности порового пространства. Ранее были предложены методы быстрой оценки проницаемости на основе физических моделей и анализа 2D-срезов [15, 18, 19], однако они часто ориентированы на синтетические данные, требуют сложной подготовки изображений или ограничены применением к реальным карбонатным образцам.

В данной работе предложен комбинированный подход, основанный на микротомографии низкого разрешения (34,8–36 мкм) и машинном обучении, для экспресс-прогнозирования экспериментальной газопроницаемости карбонатных образцов по стекам 2D-изображений. Модель обучается предсказывать проницаемость по отдельным срезам без сегментации, а итоговая оценка проницаемости образца строится на основе распределения предсказаний по всему стеку.

МЕТОДИКА

Подготовка датасета

Для проведения исследования была подготовлена коллекция из 71 стандартного карбонатного образца (цилиндры высотой и диаметром по 30 мм). Стоит отметить, что из набора были исключены образцы с выраженной кавернозностью или трещиноватостью, поскольку наличие таких вторичных преобразований затрудняет корректное применение выбранного подхода, ориентированного в основном на матричную пористость. Образцы сканировались с помощью микрофокусной и нанофокусной рентгеновской системы компьютерной томографии General Electric Phoenix v|tome|x S 240 с разрешением 34,6–36,0 мкм. При сканировании поддерживались следующие параметры: ток рентгеновской трубки – 150 мкА, напряжение – 150 кВ, число проекций – 1200 с коэффициентом усреднения 3 и временем экспозиции 200 мс на проекцию. Полученные проекции реконструировались в 3D-изображения с использованием программного обеспечения phoenix datos|x. Для устранения краевых артефактов и стандартизации данных во всех образцах была выделена цилиндрическая область интереса размером 737×737 вокселей по диаметру и высоте, гарантированно находящаяся внутри границ каждого стандартного образца керна. Полученный объём затем преобразовывался в стек 2D-срезов вдоль оси z, совпадающей с осью цилиндра, по 737 изображений на каждый стек.

Открытая пористость и газовая проницаемость с поправкой Клинкенберга для каждого образца измерялась с помощью анализатора газопроницаемости и пористости ПИК-ПП (Россия). Распределение проницаемости в коллекции образцов варьируется от 0,1 до $2192 \text{ мкм}^2 \times 10^{-3}$, что отражает высокую гетерогенность исследуемых карбонатных образцов. Для подмножества образцов с проницаемостью выше $1 \text{ мкм}^2 \times 10^{-3}$, большинство значений сосредоточено в диапазоне от 10 до $200 \text{ мкм}^2 \times 10^{-3}$. Более высокие значения встречаются значительно реже и характерны лишь для отдельных образцов.

Разметка изображений

Ключевым этапом построения физически информированной модели является формирование достоверной и репрезентативной разметки, отражающей внутреннюю фильтрационную неоднородность керн. В условиях применения машинного обучения к 2D-срезам необходимо корректно сопоставить каждому изображению значение, характеризующее проницаемость. В данной работе использован подход, основанный на фрактальной модели порового пространства [19], согласно которой проницаемость может быть приближённо оценена на основе геометрических характеристик, извлечённых из 2D-изображений: пористости, минимального и максимального радиуса пор, извилистости и фрактальной размерности. Также ранее было показано [12], что модели машинного обучения способны извлекать ключевые признаки структуры карбонатных пород даже с микротомографических изображений невысокого разрешения (36-38 мкм).

В качестве основы для такой модели используется метод сегментации порового пространства, при котором границы пор подбираются индивидуально для каждого образца так, чтобы средняя 2D-пористость по стеку соответствовала экспериментально измеренной 3D-пористости. Это обеспечивает учёт неразрешённых пор и адаптацию процедуры сегментации к конкретным особенностям каждого образца. Контур пор затем выделялись методом водораздела [20], максимальный 2D-радиус каждой поры вычислялся через преобразование расстояний [18], а двумерная фрактальная размерность структуры определялась методом подсчёта в ячейках [21]. Минимальный 2D-радиус пор, ввиду ограниченного разрешения микротомографических изображений (34,8-36 мкм) и невозможности точного определения, принимался равным 1 мкм для всех изображений на основе литературных данных [22, 23].

На основании методики, описанной в работе [19], для каждого изображения рассчитывались объёмная пористость, трансформационная размерность, трёхмерная фрактальная размерность, объём порового пространства и характерные 3D радиусы пор. Далее по этим параметрам определялась 3D-проницаемость для каждого 2D-среза с использованием следующего аналитического выражения:

$$K_{3D} = \frac{\pi D_f 2^{D_T} r_{3D,max}^{D_f} (r_{3D,max}^{3-D_f+D_T} - r_{3D,min}^{3-D_f+D_T})}{16V^{-\frac{1+D_T}{3}} (3-D_f+D_T)}, \quad (1)$$

где D_f – фрактальная размерность трехмерной структуры пор, D_T – трансформационная размерность, $r_{3D,max}$ – максимальный 3D-радиус пор, $r_{3D,min}$ – минимальный 3D-радиус пор, V – эффективный объем пористого пространства.

Таким образом, для каждого изображения в стеке было рассчитано индивидуальное значение 3D-проницаемости, и каждый образец получил 737 таких значений. Хотя низкое разрешение и искажения форм пор при сегментации могут приводить к расхождениям между порядками рассчитанных и экспериментальных величин, полученное распределение 3D-проницаемостей вдоль оси цилиндрического образца чётко демонстрирует внутреннюю фильтрационную неоднородность образца.

Агрегация и нормализация

Для перехода от распределённого набора значений 3D-проницаемости, рассчитанных по срезам, к единой оценке проницаемости всего образца, были протестированы 2 подхода. Первый основан на использовании гармонического среднего, которое широко применяется в задачах фильтрации в пористых средах, когда отдельные участки с различной проницаемостью соединены последовательно вдоль направления потока, как это имеет место при вертикальном фильтрационном потоке через цилиндрический керн:

$$K_{harm} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{K_{3D}(i)} \right)^{-1}, \quad (2)$$

где $K_{3D}(i)$ — значение 3D-проницаемости на i -м срезе, $N = 737$ — общее число изображений в стеке.

Второй подход реализует концепцию бутылочного горлышка, согласно которой общая проницаемость определяется наиболее узкими, слабо проницаемыми зонами. Для расчёта использовалась схема скользящего окна шириной в пять последовательных срезов: в пределах каждого окна вычислялось среднее значение проницаемости, а итоговым результатом принималось минимальное из этих средних:

$$K_{bottle} = \min_{j \in [1, N-\omega+1]} \left(\frac{1}{\omega} \sum_{i=j}^{j+\omega-1} K_{3D}(i) \right), \quad (3)$$

где $K_{3D}(i)$ – значение 3D проницаемости на i -срезе, ω – ширина окна равная 5, N – общее число срезов в стеке (737).

Для сопоставления агрегированных оценок с экспериментальными данными была применена нормализация. Она заключалась в масштабировании всех локальных значений проницаемости на постоянный коэффициент C , обеспечивающий точное соответствие итогового агрегированного значения экспериментальному:

$$C_{harm} = \frac{K_{harm}}{K_{exp}}, \quad (4)$$

$$C_{bottle} = \frac{K_{exp}}{K_{bottle}}, \quad (5)$$

где K_{exp} – экспериментально определенное значение газовой проницаемости.

Применение нормализации позволило сохранить характер распределения локальных проницаемостей вдоль оси образца и одновременно устранить систематические расхождения между агрегированными оценками и экспериментальными измерениями. Таким образом, для каждой модели были сформированы два независимых нормированных датасета, предназначенных для последующего обучения алгоритмов машинного обучения.

Архитектура и обучение модели

Для решения задачи предсказания проницаемости по микротомографическим изображениям использовалась архитектура трансформера со сдвигаемыми окнами (Swin Transformer) [24]. В отличие от традиционных сверточных сетей, данная архитектура позволяет моделировать как локальные, так и глобальные зависимости в изображении за счёт применения самовнимания внутри небольших окон и их последовательного сдвига, что обеспечивает эффективный учёт как мелкомасштабных поровых деталей, так и дальнедействующих связей на всём изображении.

Для уменьшения влияния ограниченного объёма данных использовались предобученные веса на датасете ImageNet-1k. На этапе подготовки данные нормировались по интенсивности, маскировались по контуру цилиндрического образца и масштабировались до разрешения 224×224 пикселя с помощью интерполяции по площади. Для повышения обобщающей способности модели применялась аугментация путём случайных поворотов изображений на 0° , 90° , 180° и 270° .

В рамках работы были обучены две отдельные модели Swin Transformer: одна на датасете с агрегированием через гармоническое среднее, другая – на основе модели бутылочного горлышка. В каждом случае объём данных составлял 52 327 изображений карбонатных образцов (71 образец \times 737 срезов), причём для каждого изображения

формировалась обучающая метка в виде нормированного значения 3D-проницаемости. Поскольку исходные значения проницаемости характеризовались широким диапазоном и неравномерным распределением, для стабилизации обучения использовалось логарифмическое преобразование: в процессе обучения прогнозировался логарифм проницаемости, а для интерпретации результатов применялось обратное преобразование в физические единицы.

Каждый датасет был разделён на обучающую и валидационную выборки в соотношении 80/20. Обучение проводилось с использованием оптимизатора AdamW при начальной скорости обучения 1×10^{-4} , размере батча 16 и в течение 20 эпох. В качестве функции потерь использовалась среднеквадратичная ошибка (MSE) между предсказанными и истинными логарифмами проницаемости. Дополнительно контролировались метрики средней абсолютной ошибки (MAE) и коэффициента детерминации (R^2) на валидационной выборке.

Архитектура модели соответствовала стандартной структуре Swin Transformer с последовательным уменьшением разрешения и увеличением размерности признаков на каждом уровне. Выходные признаки подвергались глобальному усреднению (Global Average Pooling) и подавались в полносвязный регрессионный слой для предсказания одного скалярного значения. Для повышения устойчивости к переобучению использовались функции активации ReLU и слой Dropout. Все эксперименты проводились с использованием библиотеки PyTorch 1.13.1 на видеокарте NVIDIA Quadro P5000 с поддержкой CUDA 11.7, операционная система – Windows 10, программная среда – Python 3.8.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты обучения моделей

Для решения задачи прогнозирования нормированных значений 3D-проницаемости по микротомографическим изображениям были обучены две отдельные модели Swin Transformer: одна на датасете, сформированном с использованием агрегирования проницаемости по гармоническому среднему, другая – на датасете, построенном на основе модели бутылочного горлышка. Обе модели обучались в течение 20 эпох на выборке из 52 327 изображений (41 861 для обучения и 10 466 для валидации).

Модель гармонического среднего показала высокую сходимость и стабильность при обучении, к концу которого значение функции потерь в логарифмической шкале снизилось до 0,0715 на обучающей выборке и 0,1596 на валидационной. Итоговые метрики в лог-пространстве составили: среднеквадратичная ошибка (MSE) – 0,1596, средняя абсолютная ошибка (MAE) – 0,1912, коэффициент детерминации (R^2) – 0,988. Низкие значения ошибок объясняются использованием логарифмического преобразования проницаемости, что позволило сгладить разброс значений и обеспечить устойчивую сходимость модели. В физическом масштабе коэффициент детерминации составил $R^2 = 0,904$, что свидетельствует о сохранении высокой степени соответствия между прогнозируемыми и измеренными значениями проницаемости.

Модель бутылочного горлышка также продемонстрировала хорошую сходимость и устойчивость обучения достигнув к 20-й эпохе значения функции потерь 0,0474 в логарифмической шкале на обучающей выборке и 0,0642 на валидационной. Основные метрики модели в лог-пространстве достигли: среднеквадратичная ошибка (MSE) – 0,1742, средняя абсолютная ошибка (MAE) – 0,1971, коэффициент детерминации (R^2) – 0,986. Работа в логарифмическом пространстве позволила эффективно стабилизировать процесс обучения на фоне значительного разброса исходных значений проницаемости. В физическом масштабе коэффициент детерминации составил $R^2 = 0,879$, что также подтверждает способность модели адекватно описывать глобальные закономерности изменения проницаемости вдоль образцов.

Результаты тестирования моделей

Точность предсказания проницаемости обученных моделей была дополнительно оценена на тестовой выборке, состоящей из 10 карбонатных образцов, для которых были проведены экспериментальные измерения газопроницаемости (табл. 1). Образцы были предварительно отсняты на микротомографе, разделены на стеки срезов и подвергнуты предобработке в соответствии с методикой, описанной ранее. Каждому образцу были сопоставлены прогнозируемые значения проницаемости, полученные двумя моделями: моделью, обученной на гармоническом среднем, и моделью бутылочного горлышка. Диаграммы распределения предсказания 3D-проницаемостей двумя моделями вдоль стека образца 1 представлены на рис. 1.

Табл. 1. Результаты тестирования моделей

Образец	Экспериментальная проницаемость, $\text{мкм}^2 \times 10^{-3}$	Проницаемость по гармонической модели $\text{мкм}^2 \times 10^{-3}$	Проницаемость по модели бутылочного горлышка, $\text{мкм}^2 \times 10^{-3}$
1	617,9	423,8	762,6
2	9,3	16,3	2,9
3	202,3	159,9	102,7
4	2,1	0,4	0,2
5	53,6	130,7	92,4
6	35,3	21,1	4,6
7	488,6	524,6	915,2
8	2295,2	1485,6	2336,6
9	0,4	0,1	0,2
10	984,9	1454,8	736,2

Для обеих моделей были рассчитаны ключевые метрики качества предсказаний: средняя абсолютная ошибка (MAE) и среднеквадратичная ошибка (RMSE). Расчёт метрик проводился по значениям абсолютных отклонений прогнозируемой проницаемости от экспериментальных данных. Средняя абсолютная ошибка для модели, обученной на гармоническом среднем, составила $165,2 \text{ мкм}^2 \times 10^{-3}$, а для модели бутылочного горлышка — $103,9 \text{ мкм}^2 \times 10^{-3}$. Среднеквадратичная ошибка для этих моделей составила $303,9 \text{ мкм}^2 \times 10^{-3}$ и $166,9 \text{ мкм}^2 \times 10^{-3}$ соответственно. Таким образом, модель бутылочного горлышка показала существенно более высокую точность предсказания: значения MAE и RMSE для неё оказались на 37 % и 45 % ниже, чем для модели на гармоническом среднем.

Следует отметить, что модель бутылочного горлышка обеспечивала более стабильные результаты как для образцов с низкой проницаемостью (например, для образцов 4 и 9), так и для образцов с высокой проницаемостью (образцы 1 и 8). В то время как модель на гармоническом среднем в ряде образцов с высокой проницаемостью демонстрировала значительные отклонения (например, ошибки для образцов 8 и 10 достигали $809,6$ и $469,9 \text{ мкм}^2 \times 10^{-3}$ соответственно), однако показала достаточно стабильные результаты на образцах с низкой (образцы 2, 4 и 9) и средней проницаемостью (образцы 1, 3 и 7).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведённый сравнительный анализ показал, что обе модели могут быть использованы для приближённой оценки газовой проницаемости карбонатных коллекторов на основе микротомографических данных. Модель бутылочного горлышка продемонстрировала более высокую точность предсказаний по всей тестовой выборке, что свидетельствует о её большей пригодности для задач предварительной количественной оценки проницаемости, в том числе в широком диапазоне её значений – от низкопроницаемых до высокопроницаемых

образцов. Модель гармонического среднего также показала удовлетворительные результаты, особенно для образцов с низкой и средней проницаемостью. Это позволяет рассматривать её в качестве альтернативного подхода в случаях, когда требуется быстрое получение оценки проницаемости при минимальных вычислительных затратах или при работе с гомогенными коллекторами.

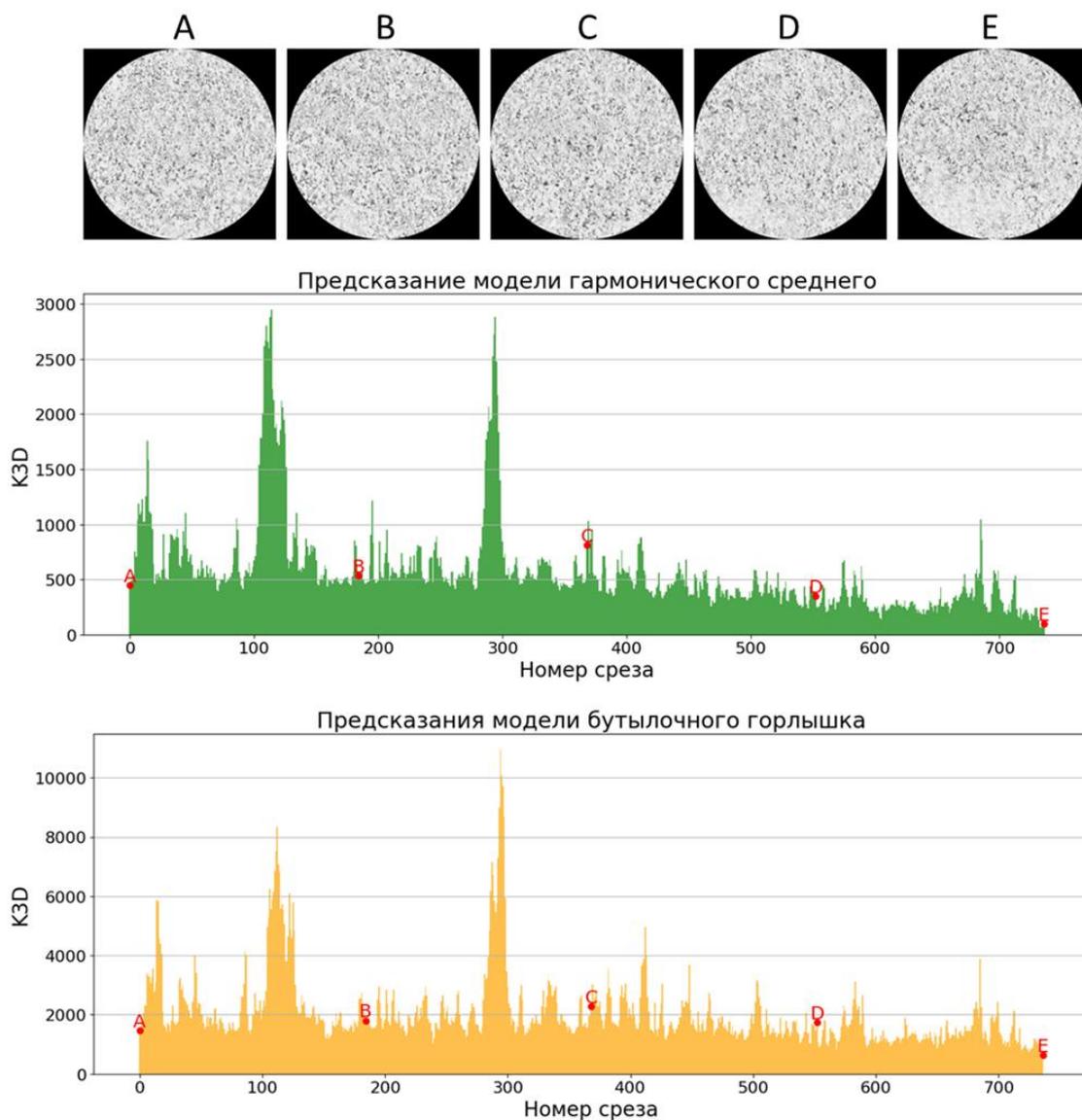


Рис. 1. Диаграммы распределения предсказаний 3D-проницаемостей двумя моделями вдоль стека образца 1

Полученные результаты подтверждают перспективность использования разработанных моделей в практике обработки микротомографических данных керна для проведения первичного скрининга проницаемости. Их применение может существенно сократить время и трудоёмкость проведения экспериментальных измерений, повысить оперативность анализа и способствовать более эффективному отбору образцов для последующих детальным исследований.

Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан» (соглашение № 20/2024-ПД).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Tembely M., AlSumaiti A.M., Alameri W.S.** Machine and deep learning for estimating the permeability of complex carbonate rock from X-ray micro-computed tomography // Energy Reports. 2021. Vol. 7. Pp. 1460-1472.
2. **Wu H.Y. et al.** Deep learning in the advanced core sample porosity determination with XCT image // Earth Sci. Informatics. 2025. Vol. 18. № 1. P. 17.
3. **Karimpouli S., Tahmasebi P.** Image-based velocity estimation of rock using Convolutional Neural Networks // Neural Networks. Pergamon, 2019. Vol. 111. Pp. 89-97.
4. **Karimpouli S., Kadyrov R.** Multistep Super Resolution Double-U-net (SRDUN) for enhancing the resolution of Berea sandstone images // J. Pet. Sci. Eng. Elsevier B.V. 2022. Vol. 216. P. 110833.
5. **McPhee C., Reed J., Zubizarreta I.** Developments in Petroleum Science Volume 64 Core Analysis: A Best Practice Guide. 1st Editio. Elsevier Science Ltd, 2015. 852 p.
6. **Niya S.M.R., Selvadurai A.P.S.** A Statistical Correlation Between Permeability, Porosity, Tortuosity and Conductance // Transp. Porous Media. 2018. Vol. 121. № 3. P. 741-752.
7. **Costa A.** Permeability-porosity relationship: A reexamination of the Kozeny-Carman equation based on a fractal pore-space geometry assumption // Geophys. Res. Lett. 2006. Vol. 33. № 2.
8. **Xu P., Yu B.** Developing a new form of permeability and Kozeny-Carman constant for homogeneous porous media by means of fractal geometry // Adv. Water Resour. 2008. Vol. 31. № 1. Pp. 74-81.
9. **Saxena N. et al.** Estimating permeability from thin sections without reconstruction: Digital rock study of 3D properties from 2D images // Comput. Geosci. 2017. Vol. 102. Pp. 79-99.
10. **Karimpouli S. et al.** Applicability of 2D algorithms for 3D characterization in digital rocks physics: an example of a machine learning-based super resolution image generation // Acta Geophys. 2024. Vol. 72. № 2. Pp. 861-874.
11. **Kadyrov R.I.** Multiple Cubes Growth Algorithms for Simple Representative Elementary Volume Determination on 3D Binary Images // Sci. Vis. 2024. Vol. 16. № 50. Pp. 124-135.
12. **Kadyrov R., Statsenko E., Nguyen T.H.** Integrating μ CT imaging of core plugs and transfer learning for automated reservoir rock characterization and tomofacies identification // Mar. Pet. Geol. 2024. Vol. 168. P. 107014.
13. **Zhang H. et al.** Permeability prediction of low-resolution porous media images using autoencoder-based convolutional neural network // J. Pet. Sci. Eng. 2022. Vol. 208. P. 109589.
14. **Araya-Polo M. et al.** Deep learning-driven permeability estimation from 2D images // Comput. Geosci. 2020. Vol. 24. № 2. Pp. 571-580.
15. **Wu J., Yin X., Xiao H.** Seeing permeability from images: fast prediction with convolutional neural networks // Sci. Bull. 2018. Vol. 63. № 18. Pp. 1215-1222.
16. **Alqahtani N. et al.** Machine learning for predicting properties of porous media from 2d X-ray images // J. Pet. Sci. Eng. 2020. Vol. 184. P. 106514.
17. **Tembely M., AlSumaiti A.M., Alameri W.** A deep learning perspective on predicting permeability in porous media from network modeling to direct simulation // Comput. Geosci. 2020. Vol. 24. № 4. Pp. 1541-1556.
18. **Kalule R. et al.** Stacked ensemble machine learning for porosity and absolute permeability prediction of carbonate rock plugs // Sci. Rep. 2023. Vol. 13. № 1. P. 9855.
19. **Lei G. et al.** Estimating Permeability of Porous Media from 2D Digital Images // J. Mar. Sci. Eng. 2023. Vol. 11. № 8. P. 1614.

20. **Meyer F.** Topographic distance and watershed lines // *Signal Processing*. 1994. Vol. 38. № 1. Pp. 113-125.
21. **Kadyrov R.I., Zakirov T.R.** 2D fractal and multifractal analysis of porous space in carbonate oil reservoir // *Neft. Khozyaystvo - Oil Ind. OIJ*, 2016. Vol. 2016. № 11. Pp. 72-74.
22. **Baek S.H. et al.** X-Ray Computed Microtomography Imaging of Abiotic Carbonate Precipitation in Porous Media From a Supersaturated Solution: Insights Into Effect of CO₂ Mineral Trapping on Permeability // *Water Resour. Res.* 2019. Vol. 55. № 5. Pp. 3835-3855.
23. **Bouchard J. et al.** Terahertz imaging for non-destructive porosity measurements of carbonate rocks // *Sci. Rep.* 2022. Vol. 12. № 1. P. 18018.
24. **Liu Z. et al.** Swin Transformer: Hierarchical Vision Transformer using Shifted Windows // *Proc. IEEE Int. Conf. Comput. Vis.* 2021. Pp. 9992-10002.

Kadyrov R.I., Statsenko E.O., Nguyen T.H.

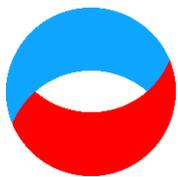
*Institute of Geology and Petroleum Technologies,
Kazan (Volga Region) Federal University, Russia,
420008, Kazan, Kremlyovskaya st., 4/5, E-mail: rail7777@gmail.com*

PHYSICS-INFORMED MACHINE LEARNING IN DIGITAL CORE: GAS PERMEABILITY PREDICTION OF CARBONATES BASED ON MICRO-CT IMAGES OF STANDARD SAMPLES

ABSTRACT

This work presents a combined approach to predicting the gas permeability of carbonate reservoirs based on microtomographic images of standard core samples. The models were built using stacks of 2D slices obtained by low-resolution microtomography, followed by specialized preprocessing and labeling based on fractal pore space models. For permeability prediction, a transformer architecture with shifted windows was employed, trained on two different types of aggregated data: using the harmonic mean and the bottleneck model. Testing on an independent set of carbonate samples demonstrated that the developed models enable rapid permeability evaluation from microtomographic images with a sufficient degree of agreement with experimental data. The bottleneck model showed an advantage in terms of prediction accuracy and robustness across the entire permeability range, making it recommended for rapid assessment of filtration and reservoir properties under limited computational resources. The obtained results confirm the potential of applying physics-informed machine learning methods for digital core analysis.

PERMEABILITY, CARBONATES, MICROTOMOGRAPHY, DIGITAL CORE, PHYSICS-INFORMED MACHINE LEARNING



УДК 535.016

Павлов И.Н.

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: inpavlov@bk.ru*

ИЗБАВЛЕНИЕ ОТ АРТЕФАКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ БЛИЖНЕПОЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ

АННОТАЦИЯ

В статье рассматриваются проблемы, связанные с появлением артефактов на изображениях, получаемых с помощью сканирующего ближнепольного оптического микроскопа, и методы их устранения. Приведено описание метода сканирующей ближнепольной микроскопии, его особенности, преимущества и недостатки, схема используемого микроскопа и методика проведения экспериментов на нем. Описан алгоритм обнаружения и устранения артефактов на изображениях, связанных с резким изменением рельефа поверхности образца. Приведен пример работы разработанного метода и пути его дальнейшего усовершенствования.

**БЛИЖНЕЕ ПОЛЕ, СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ,
НАНОТЕХНОЛОГИИ, ОПТИЧЕСКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ, ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ,
АРТЕФАКТЫ**

ВВЕДЕНИЕ

Сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия (СБОМ) является мощным инструментом для исследования поверхности с высокой разрешающей способностью, превосходящей дифракционный предел [1]. Базовые принципы, лежащие в основе работы СБОМ, были предложены еще до появления сканирующих зондовых микроскопов и предполагали улучшение пространственного разрешения оптических микроскопов за счет использования эванесцентных волн, появляющихся при локализации света с помощью нанометровой апертуры [2]. Однако ввиду многочисленных технических сложностей до практической реализации этих принципов дело дошло гораздо позже [3, 4]. В настоящее время наиболее распространенным способом реализации СБОМ является использование в качестве зонда кварцевого заостренного оптоволокна, кончик которого покрыт тонким слоем металлического напыления с наноразмерной апертурой на торце. Для поддержания постоянного расстояния между кончиком зонда и сканируемой поверхностью используется сигнал сдвиговых сил (т.н. shear force). Обычно это достигается за счет прикрепления рабочего конца зонда к одной из ветвей кварцевого камертона, колеблющегося на резонансной частоте. При приближении кончика зонда к поверхности образца на расстояние порядка 10 нм на него со стороны поверхности начинают действовать тангенциальные сдвиговые силы, под действием которых амплитуда колебаний зонда меняется. Измеряя изменение амплитуды колебаний или изменение подстраивающего сигнала обратной связи при поддержании неизменной амплитуды колебаний, можно записать рельеф сканируемой поверхности.

Одновременно с помощью чувствительного фотоприемника записывается оптический сигнал, образующийся при взаимодействии эванесцентного поля на кончике зонда с материалом образца. Расширение пространственного спектра зондирующего оптического поля за счет использования эванесцентных компонент позволяет значительно улучшить оптическое разрешение и даже превзойти дифракционный предел [5]. Таким образом можно получить оптическое изображение сверхвысокого разрешения вплоть до 10 нм, а также получать информацию о распределении спектральных свойств образца при использовании спектрометра в качестве приемника излучения.

Однако, несмотря на многочисленные преимущества данного метода, одним из основных вызовов остаются артефакты на получаемых изображениях, которые могут значительно ухудшить качество результатов и затруднить правильную интерпретацию полученных изображений [6]. Артефакты могут возникать по различным причинам, включая дефекты оборудования, проблемы с обработкой данных или физические особенности поверхностей, что затрудняет точное изучение наноструктурированных объектов.

Ранее предложенные в литературе методы в основном фокусируются на устранении таких артефактов с использованием различных фильтрационных и коррекционных техник [7] или усложнения методики сканирования [8]. Однако большинство из них требует значительных вычислительных ресурсов или существенного увеличения времени сканирования или обработки полученных изображений.

Таким образом, актуальность работы заключается в необходимости разработки более простых, но достаточно эффективных алгоритмов обработки изображений, которые позволят минимизировать время сканирования и обработки изображений, но при этом снизить влияние артефактов и повысить качество получаемых данных.

МЕТОД СКАНИРУЮЩЕЙ БЛИЖНЕПОЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ

Как уже было сказано выше, метод СБОМ основан на облучении поверхности исследуемого образца эванесцентным полем и регистрации получаемого при взаимодействии этого поля с материалом образца оптического отклика в каждой точке поверхности путем сканирования. Для создания эванесцентного поля нужно локализовать распространяющееся от источника оптическое излучение на наноразмерной апертуре. Как известно, свет не может пройти сквозь отверстие, диаметр которого меньше половины длины волны. Однако на ближайшем расстоянии от отверстия (порядка его диаметра) образуется эванесцентное (затухающее, ближнее) поле, которое может быть обнаружено при его взаимодействии с веществом, например, флуоресцентной молекулой или торцом оптоволокна. В результате этого взаимодействия образуется распространяющееся излучение, которое может быть зарегистрировано в дальней зоне с помощью обычного фотоприемника. Чаще всего ближнее эванесцентное поле в СБОМ генерируется с помощью оптоволоконного зонда с конусообразным торцом, кончик которого покрыт слоем алюминия толщиной 20-30 нм с отверстием на конце конуса, которое играет роль апертуры. Источником распространяющегося оптического излучения обычно служит лазер, расположенный на другом конце оптоволокна. Помимо проблемы создания зондирующего эванесцентного поля в СБОМ существует проблема поддержания расстояния между кончиком зонда и поверхностью образца на уровне примерно половины глубины затухания эванесцентного поля, т.е. порядка десятков нанометров. Для решения этой проблемы в СБОМ должна быть организована система обратной связи, сигналом в которой служит амплитуда колебаний кварцевого камертона, одной из ветвей прикрепленного к заостренному концу оптоволокна и управляемого генератором переменного напряжения, входящим в состав системы обратной связи. Как уже было упомянуто во введении, этот метод организации обратной связи называется *shear force* и основан на влиянии сдвиговых сил, действующих со стороны поверхности образца на кончик зонда и тем самым изменяющих амплитуду колебаний кончика зонда при его приближении к поверхности. Значительный прорыв в СБОМ был осуществлен в 1991 году, когда был

продемонстрирован метод изготовления зондов с помощью вытягивания кварцевого оптоволокна при нагреве [9]. Данный метод в дальнейшем лег в основу массового производства зондов для СБОМ.

Для достижения наилучших результатов зонд должен обладать двумя основными характеристиками: во-первых, размер пятна, определяемый апертурой, должен быть настолько мал, насколько это возможно, и, во-вторых, интенсивность света, проходящего через апертуру, должна быть настолько высока, насколько это возможно.

Зонд на основе оптоволокна представляет собой заостренное оптическое волокно из стекла или кварца с металлическим покрытием, которое ограничивает распространение света через боковые поверхности [10]. Вне зависимости от типа, острие апертурного СБОМ зонда имеет внешний диаметр несколько сотен нм, что ограничивает применение методики лишь относительно плоскими образцами. Для шероховатых образцов становится затруднительным удерживать зонд на заданном незначительном удалении от поверхности, так как зонд с большим радиусом закругления острия касается поверхности различными участками в зависимости от рельефа поверхности [11].

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Используемый в данной работе микроскоп NT-MDT Ntegra Solaris может работать в режиме сбора с помощью высокоапертурного объектива и ФЭУ отраженного оптического сигнала, получающегося при взаимодействии эванесцентного поля волоконного зонда MF112_NTF, прикрепленного к кварцевому камертону, с поверхностью исследуемого образца. Схема его работы показана на рис. 1.

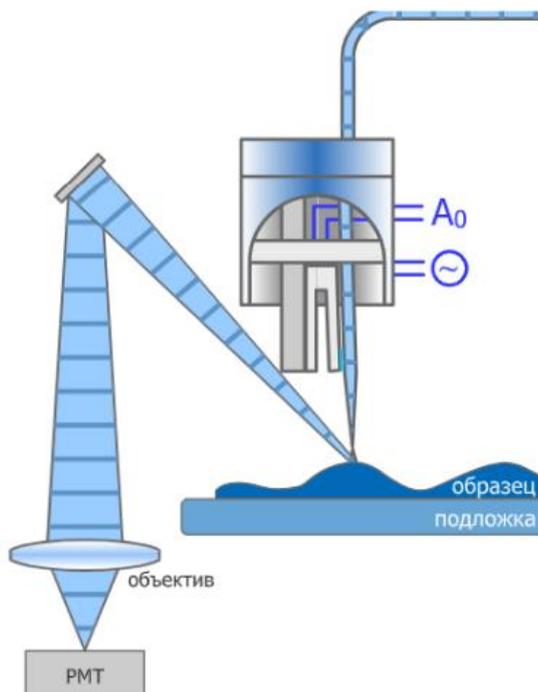


Рис. 1. Схема сканирующего ближнепольного оптического микроскопа, работающего в режиме сбора отраженного сигнала [12]

Излучение лазера с длиной волны 532 нм вводится в одномодовое оптоволокно диаметром 125 мкм с помощью микрообъектива и трехкоординатного позиционера. Другой конец оптоволокна заточен на конус с углом раскрытия 20° , покрыт слоем алюминия толщиной 70 нм с адгезионным подслоем хрома толщиной 20 нм и прикреплен к одной из ветвей кварцевого камертона, который возбуждается напряжением частотой 32 кГц с

помощью генератора, управляемого с персонального компьютера с помощью программного обеспечения, поставляемого с микроскопом. Апертура такого зонда обычно составляет 100 ± 30 нм.

Перед началом работы образец закрепляется на опорном столике, соединенном с системой грубого и точного подвода, зонд с камертоном закрепляется в соответствующей измерительной головке, головка устанавливается на микроскоп и регулируется по высоте в зависимости от толщины образца. Сначала столик подводится вручную таким образом, чтобы расстояние от кончика зонда до поверхности образца составляло 1-2 мм. Затем с помощью программного обеспечения измеряется резонансная кривая камертона с прикрепленным зондом, по ней выставляется рабочая частота и амплитуда колебаний камертона, а также выставляется целевое значение амплитуды, которое должно поддерживаться в процессе сканирования. Затем включается система автоматического точного подвода, которая останавливает процесс сближения зонда с поверхностью образца при достижении заданного значения амплитуды колебаний камертона. После этого осуществляется юстировка свободного торца оптоволокну и положения ФЭУ по критерию достижения максимума оптического сигнала. На следующем этапе выбираются область и параметры сканирования и запускается процесс сканирования. В результате получается два изображения, одно из которых строится по сигналу обратной связи, поддерживающей постоянное расстояние между кончиком зонда и поверхностью образца, и называется топографическим изображением, а второе строится по оптическому сигналу и называется СБОМ-изображением.

ПОЯВЛЕНИЕ АРТЕФАКТОВ И АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Для правильного использования СБОМ необходимо знать, как связаны параметры полученного сигнала и свойства исследуемой поверхности. Все явления, которые влияют на результат измерений и не связаны с интересующими свойствами образца, называются артефактами [7].

Ведущим принципом микроскопии ближнего поля является то, что количество рассеянного ближнего поля должно прямо соотноситься с местными оптическими свойствами поверхности. На практике оказывается, что присутствие образца перед наноизлучателем может влиять на его пропускную способность, что делает систему СБОМ нелинейной.

СБОМ изображения часто могут быть зашумлены. Крайне маленькие апертуры зонда могут излучать поле очень слабой интенсивности, которую трудно зарегистрировать на фоне засветки. Также может присутствовать электронный шум.

В результате сканирования возможно появление топографических артефактов. Вертикальное топографическое разрешение определяет наименьшее обнаружимое изменение рельефа поверхности. Оно связано с характером силы взаимодействия зонда и образца, со структурой и формой зонда, а также с отношением сигнал-шум сигнала топографии. В некоторых случаях небольшие изменения рельефа разрешимы на оптическом сигнале, но не видны на топографии.

Также артефакты могут появляться из-за невозможности сохранять постоянное расстояние между зондом и образцом при работе в соответствующем режиме. Схема движения зонда в режиме постоянного зазора (*constant gap mode*) вдоль неровностей рельефа с резкими границами показана на рис. 2.

Из этого рисунка видно, что при движении по ровной поверхности, как в случаях 1, 3 и 5, расстояние между зондом и образцом с помощью системы обратной связи поддерживается постоянным. А в случаях 2 и 4 на зонд, помимо исследуемой части поверхности, действуют и границы неровности рельефа. Из-за этого воздействия расстояние между зондом и образцом меняется, что приводит к изменению регистрируемого сигнала и, следовательно, к появлению артефактов на оптических изображениях.

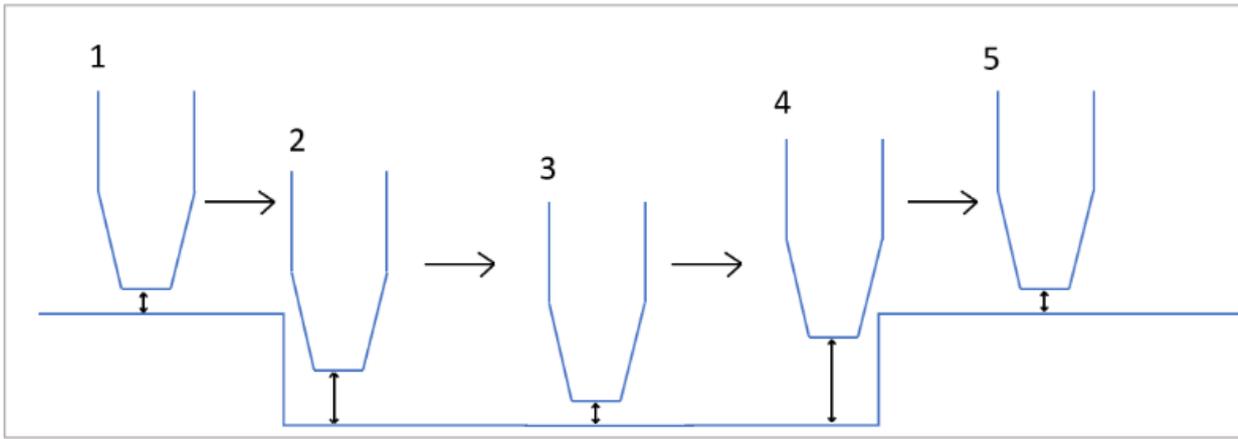


Рис. 2. Схема движения зонда вдоль неровностей рельефа с резкими границами

Поскольку оптический сигнал может значительно зависеть от расстояния, сканирование должно выполняться на постоянном расстоянии от поверхности. С другой стороны, механизмы регулирования расстояния приводят к влиянию топографии на оптический сигнал. При исследовании образцов рекомендуется предварительно исследовать структуру другим и хорошо установленным методом, например, сканирующей электронной микроскопией или атомно-силовой микроскопией. В этом случае есть возможность правильно интерпретировать результаты, полученные с помощью метода СБОМ даже в случаях, изображенных на рис. 3, где показано, как зонд проходит над участком поверхности, на котором присутствуют впадины с поперечным размером меньше диаметра зонда. На топографическом изображении такие детали практически не будут заметны вследствие недостаточной разрешающей способности методики сдвиговых сил, а на оптическом сигнале вполне могут быть заметны и неправильно интерпретированы как оптические неоднородности образца.

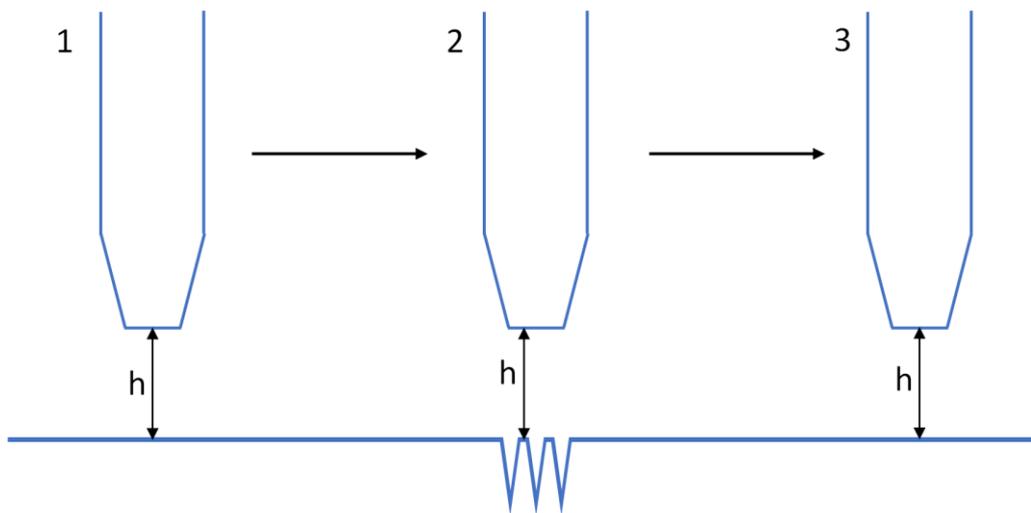


Рис. 3. Схема движения зонда вдоль мелкомасштабных неровностей рельефа

Еще одним из основных артефактов, на который всегда следует обращать внимание, является эффект наложения. Этот эффект может проявиться в сканирующей микроскопии, поскольку он связан с проблемой дискретизации, так как изображения восстанавливаются из дискретных данных. Для того, чтобы избежать появления данного типа артефактов, необходимо верно подобрать область сканирования и количество точек в ней [7].

Еще одним возможным источником артефактов является гистерезис пьезоэлектрического преобразователя, выполняющего сканирование. Этот эффект

проявляется, особенно на больших сканах, в виде деформаций изображений, которые могут достигать 20% [7].

Для правильной оценки оптического разрешения в СБОМ должны выполняться следующие критерии. Плохая корреляция или ее отсутствие между топографическим и ближнепольным изображениями. Смещение коррелированных структур на постоянную величину между топографическим и оптическим изображениями. Различное разрешение топографии и оптического изображения [7].

Предлагаемая в данной работе методика избавления от артефактов, связанных с резкими границами рельефа, основана на следующих соображениях. Артефакты на СБОМ изображениях, связанные с изменением расстояния между зондом и образцом, находятся в тех же местах, что и резкие изменения рельефа поверхности образца. Таким образом, при сравнении топографии и СБОМ изображения можно определить, какие из артефактов появились из-за резкого изменения топографии. Также предварительно следует провести низкочастотную фильтрацию для удаления шумов. Изображение с примерами таких артефактов показано на рис. 4.

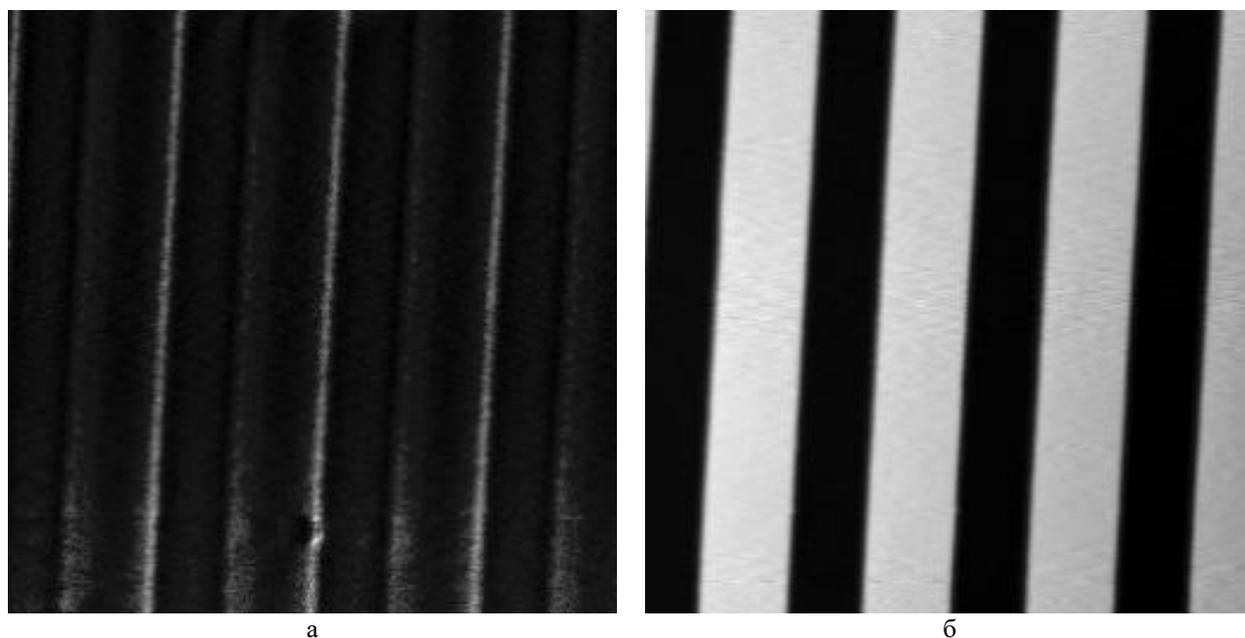


Рис. 4. Изображения калибровочной решетки прямоугольного профиля с артефактами, связанными с резкими изменениями рельефа образца:
а – СБОМ-изображение, б – топографическое изображение

На нем отчетливо видны светлые вертикальные полосы, расположение которых соответствует резкому изменению рельефа на топографических изображениях. Механизм образования таких артефактов проиллюстрирован рис. 2.

Для нахождения мест резкого изменения рельефа была написана программа расчета градиента изображения [13]. Градиент рассчитывался с помощью оператора Собеля. Оператор Собеля – это один из методов обработки изображений, используемый для расчета градиента яркости. Градиент является вектором, который показывает направление наибольшего изменения яркости в каждой точке изображения, а его амплитуда отражает степень этого изменения.

Оператор состоит из пары сверток, которые применяются к изображению для вычисления приближенных значений производных яркости по горизонтальному и вертикальному направлениям. Для вычисления градиента каждый пиксель изображения свертывается с соответствующим ядром оператора Собеля. Это выполняется путем перемещения ядра по всему изображению и вычисления суммы произведений значений пикселей изображения и соответствующих значений ядра. После выполнения свертки для каждого пикселя вычисляются амплитуда и направление градиента. Амплитуда вычисляется

как корень из суммы квадратов горизонтального и вертикального градиентов. Направление градиента определяется арктангенсом отношения вертикального к горизонтальному градиенту.

Преимущества использования оператора Собеля включают простоту реализации, низкую вычислительную сложность и хорошую способность выделения краев на изображении. Однако, он также имеет недостатки, такие как чувствительность к шумам и низкую способность выявлять края в направлениях, отличных от горизонтального и вертикального. В данном случае использовалась реализация из библиотеки OpenCV.

После расчета градиента полученное изображение с некоторым коэффициентом вычиталось из оптического изображения. Коэффициент подбирался таким образом, чтобы большая часть ярких пикселей на СБОМ изображении была равна наиболее светлым частям на изображении, визуализирующем градиент топографии. Изображения, полученные после вычисления градиента и после коррекции СБОМ-изображения, показаны на рис. 5.

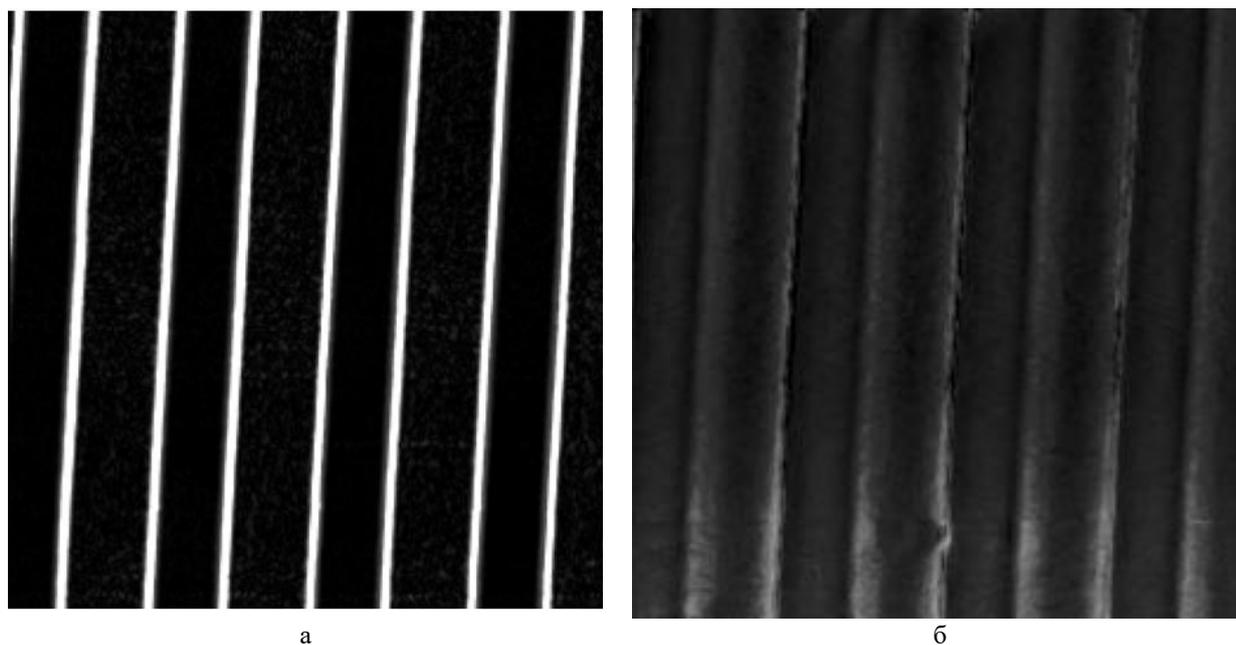


Рис. 5. Изображение градиента топографии (а) и скорректированное с его помощью СБОМ-изображение (б)

Из полученных изображений видно, что данный метод обработки позволяет удалять артефактную засветку, которая появляется на СБОМ изображениях при резком изменении рельефа. Однако на границах появляются иные артефакты, но они не так сильно мешают визуальному восприятию и анализу полученных изображений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены принципы работы, преимущества и недостатки метода СБОМ, описана схема используемого микроскопа и приведена методика проведения экспериментов на этом микроскопе. Показано, что артефакты являются неотъемлемой частью изображений, получаемых на сканирующем ближнепольном микроскопе. Многие из них не могут быть полностью удалены из получаемых изображений. В работе предложен подход по обнаружению артефактов, связанных с резким изменением рельефа поверхности образца, и снижению их влияния на качество получаемых СБОМ-изображений. Он состоит в определении областей на топографическом изображении с максимальным градиентом интенсивности и вычитании полученного изображения градиента с некоторым подобранном коэффициентом из СБОМ-изображения. Очевидно, что данная реализация метода является лишь первым весьма несовершенным шагом к разработке полноценного метода удаления артефактов и повышения качества СБОМ-изображений. В дальнейшем планируется

разработать более продвинутую методику, основанную на деконволюции СБОМ-изображений с определенной аппаратной функцией используемого зонда и коррекции СБОМ-изображений с учетом зависимости интенсивности оптического сигнала от расстояния от кончика зонда до поверхности образца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Новотный Л., Хехт Б.** Основы нанооптики. Пер. с англ. / Под ред. В.В. Самарцева. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 484 с.
2. **Synge E.H.** XXXVIII. A suggested method for extending microscopic resolution into the ultra-microscopic region // *Philos. Mag. Ser. 7.* 1928. Vol. 6. № 35. Pp. 356-362.
3. **Pohl D.W., Denk W., Lanz M.** Optical stethoscopy: Image recording with resolution $\lambda/20$ // *Appl. Phys. Lett.* 1984. Vol. 44. № 7. Pp. 651-653.
4. **Hecht B. et al.** Scanning near-field optical microscopy with aperture probes: Fundamentals and applications // *J. Chem. Phys. AIP Publishing*, 2000. Vol. 112. № 18. P. 7761.
5. **Миронов В.Л.** Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Техносфера, 2005. 144 с.
6. **Жданов Г.С., Либенсон М.Н., Марциновский Г.А.** Ближнепольная оптика. СПб.: СПб ГУ ИТМО, 2007. 98 с.
7. **Labardi M., Gucciardi P.G., Allegrini M.** Near-field optical microscopy // *Rivista del Nuovo Cimento.* 2000. Vol. 23. Pp. 1-35.
8. **Jordan C.E., Stranik S.J., Richter L.J., and Cavanagh R.R.** Removing optical artifacts in near-field scanning optical microscopy by using a three-dimensional scanning mode // *J. of Appl. Phys.* 1999. Vol. 86. № 5. Pp. 2785-2789.
9. **Betzig E. et al.** Breaking the diffraction barrier: optical microscopy on a nanometric scale // *Science.* 1991. Vol. 251. № 5000. Pp. 1468-1470.
10. **Novotny L., Pohl D.W., Hecht B.** Scanning near-field optical probe with ultrasmall spot size // *Opt. Lett.* 1995. Vol. 20. № 9. P. 970.
11. **Hecht B. et al.** Scanning near-field optical microscopy with aperture probes: Fundamentals and applications // *The J. of Chem. Phys.* 2000. Vol. 112. № 18. Pp. 7761-7774.
12. **NT-MDT Spectrum Instruments.** [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ntmdt-si.ru/> (дата обращения: 18.03.2024).
13. **Ибрагимова Э.И.** Исследование особенностей метода ближнепольной сканирующей микроскопии // *Маг. дисс. М.: НИУ «МЭИ».* 2024. 85 с.

Pavlov I.N.

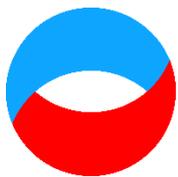
*National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: inpavlov@bk.ru*

REMOVING ARTIFACTS FROM IMAGES OBTAINED BY SCANNING NEAR-FIELD OPTICAL MICROSCOPY

ABSTRACT

The paper discusses the problems associated with the appearance of artifacts in images obtained using a scanning near-field optical microscope and methods for eliminating them. A description of the scanning near-field microscopy method, its features, advantages and disadvantages, a diagram of the microscope used and a method for conducting experiments on it are given. An algorithm for detecting and eliminating artifacts in images associated with a sharp change in the relief of the sample surface is described. An example of the operation of the developed method and ways of its further improvement are given.

**NEAR FIELD, SCANNING PROBE MICROSCOPY, NANOTECHNOLOGY, OPTICAL
RESOLUTION, IMAGE PROCESSING, ARTIFACTS**



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 004.932.1; 004.932.2; 004.942

Анциперов В.Е., Кершнер В.А.

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Россия,
125009, Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7, E-mail: vladkershner@mail.ru*

**ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ПОДХОД К ОБРАБОТКЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ОСНОВАННЫЙ НА
НЕЙРОМОРФНОМ ДЕКОДИРОВАНИИ В ПАРАДИГМЕ МАРРА**

АННОТАЦИЯ

В вопросах компьютерного зрения определение границ объектов, а также их текстур, является одной из ключевых задач. Несмотря на то, что в задачах распознавания объектов уже достигнут значительный прогресс, существующие модели и алгоритмы обработки существенно уступают возможностям зрительной системы человека, в частности это связано с затратами ресурсов, используемых при передаче информации. В предыдущих работах было предложено несколько методов определения контуров объектов, позволяющих не только выделить границы отдельных объектов на изображении, но и существенно уменьшить число искажений, связанных с размытием нечетких изображений, уменьшить шумовую составляющую изображения и восстановить слабо выраженную границу. В этой статье рассматриваются некоторые актуальные проблемы компьютерного зрения на примере ранее разработанного биоинспирированного алгоритма обработки изображений.

**НЕЙРОМОРФНЫЕ МЕТОДЫ, ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ОБРАЗЦОВ, РЕЦЕПТИВНЫЕ ПОЛЯ,
ПОВЫШЕНИЕ КОНТРАСТНОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПУТЕМ ПОДЧЕРКИВАНИЯ ГРАНИЦ**

ВВЕДЕНИЕ

Современные алгоритмы и методы компьютерного зрения позволяют получать результаты, сопоставимые, а иногда даже превосходящие возможности человека. Однако реализация этих методов требует значительных затрат ресурсов памяти и энергии на передачу и обработку данных. Чтобы минимизировать затрачиваемые ресурсы, современные методы обработки делают максимально приближенными к биологическим аналогам, в частности, для работы с визуальными данными используются хорошо известные нейромеханизмы зрительной системы человека, которые представлены рядом биоинспирированных алгоритмов обработки изображений. Основываясь на функциональных особенностях зрительной системы, Дэвид Марр сформулировал вычислительную теорию зрения, также известную как парадигма Марра [1]. Его теория активно используется в задачах машинного обучения для определения границ объектов.

В предыдущих работах мы получили ряд успешных результатов, связанных с кодированием данных и последующим их восстановлением с использованием нейрофизиологических механизмов, в частности, модели рецептивного поля и используя такие особенности биполярных клеток сетчатки глаза, как латеральное торможение и структура рецептивных полей, включающая ON- и OFF-клетки [2, 3]. Мы разработали статистическую модель формирования изображения в виде потока однородных событий (пуассоновский процесс), которая является аналогом внешнего излучения, регистрируемого

сетчаткой глаза [4]. Следующим шагом стала разработка алгоритма кодирования данных, который формально соответствует механизму латерального торможения нейронов. И, наконец, была представлена модель декодирования данных, которая позволила качественно восстановить изображение с точки зрения перцептивного восприятия.

В данной статье обсуждаются полученные результаты и рассматриваются алгоритмы и методы определения границ для реализации задач компьютерного зрения.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПЕРАТОРА МАРРА ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ГРАНИЦ

Ранее нами была предложена процедура кодирования выборочного представления в следующем виде:

$$\delta \bar{I} = \frac{k^2 - 1}{4k^2} Z \Delta I(\mathbf{0}), \quad (1)$$

где k – коэффициент больше нуля, Z – величина момента инерции, Δ – оператор Лапласа. $\delta \bar{I} = \bar{I} - \bar{I}_c$ – разность интенсивностей для всего рецептивного поля и его центра, которая может быть представлена в следующем виде:

$$\delta \bar{I} = \bar{I} - \bar{I}_c = \frac{n}{\sigma} - \frac{n_c}{\sigma_c} = -\frac{1}{\sigma_c} \delta, \quad \delta > 0. \quad (2)$$

Уравнение (2) связывает значения изменения интенсивности внутри рецептивного поля с особенностями $\delta = n_c - (\sigma_c/\sigma) n$ рецептивных полей, где n – общее количество отсчетов, принадлежащих этому рецептивному полю, n_c – количество отсчетов в его центре, а $\sigma = |\Delta|$ и $\sigma_c = |\Delta_c|$ – области типичного рецептивного поля Δ и его центра Δ_c соответственно.

В данном случае происходит расчёт дефекта интенсивности с помощью оператора Марра [5], который используется для обнаружения краев объектов. Линии резкого изменения интенсивности (нуль-линии) характеризуются условием Марра $\Delta I(\mathbf{x}) = 0$. Это условие является довольно удобным для определения контуров объектов. Для его реализации были использованы хорошо известные методы интерполяции изображений с низким разрешением с добавлением ранее зарегистрированных коэффициентов расхождения. Учитывая, что значения отсчетов кода $\{n\}$ представляют собой, по сути, результат работы сглаживающего фильтра со скользящим окном области рецептивного поля σ , мы можем сразу сказать, что искажения, связанные с этой частью кода, имеют вид размывания исходного изображения, в результате чего возникает заблуривание изображения со значительным сглаживанием краев объектов. Если же мы добавим к числам отсчетов часть кода, содержащую коэффициенты расхождения $\{\delta\}$ для всего набора рецептивных полей, мы придем к реализации ступенчатого фильтра, постоянного и положительного в области центра рецептивного поля и постоянного, но отрицательного на его периферии.

Эта процедура позволит нам свести к минимуму искажения, возникающие в результате использования сглаживающего фильтра, заменив его фильтром, аналогичным ступенчатому фильтру. Такие фильтры хорошо известны в области цифровой обработки изображений, в частности, предложенный нами фильтр в точности соответствует фильтру COSO (Center-On-Surround-Off), предложенному для модели отклика фильтра LoG (Laplacian of Gaussian), используемой в работах Марра и Хильдerta в теории обнаружения границ [6].

Поскольку оказалось, что используемые коэффициенты расхождения $\{\delta\}$ связаны с оператором Лапласа, нули линейной интерполяции вдоль решетки представляют собой области резких перепадов интенсивности, которые описываются тезисом Марра. Дальнейшее восстановление границ может быть сведено к использованию многочисленных методов интерполяции границ, которые обеспечивают наилучшее качество восприятия и могут быть использованы в алгоритмах компьютерного зрения.

РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА

Цветное изображение размером 481×321 пиксель "29030" было взято из базы данных изображений BSDS500 (Берклиевский набор сегментированных данных) [7] для демонстрации работы алгоритма выделения краев (рис. 1).



Рис. 1. Исходное изображение "29030" из базы данных BSDS500 [7]

Изображение было преобразовано из цветного в градациях серого, затем была выполнена стандартная процедура кодирования изображения (аналог бинаризации). На этом этапе было сформировано выборочное представление исходного изображения с количеством отсчетов в представлении равным $n = 10.000.000$. Затем полученные данные были обработаны с использованием биоинспирированного алгоритма, основанного на модели рецептивного поля (рис. 2).



Рис. 2. Декодирование выборочного представления исходного изображения, содержащего 10.000.000 отсчетов

Для устранения заблюренности изображения и подчеркивания контуров объекта, был применен алгоритм выделения особенностей, основанный на механизме латерального торможения клеток сетчатки. Области с сильным перепадом интенсивности излучения были соответствующим образом отмечены, на рис. 3 показана "карта" полученных особенностей.

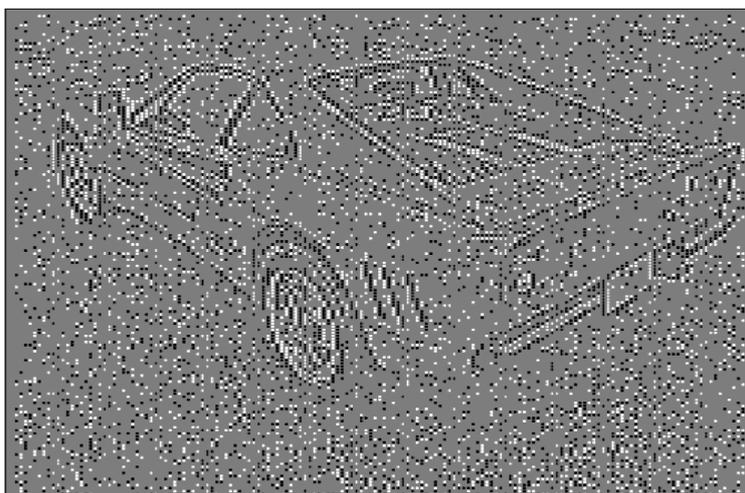


Рис. 3. Выделение особенностей, связанных с изменением интенсивности излучения на изображении

Следующим шагом было произведена попытка восстановления границ объекта для дальнейшей обработки и анализа. Для этого полученные области с выделенными особенностями были последовательно объединены в линии, образующие границы на изображении. Поскольку размеры таких линий определяются размером рецептивных полей, алгоритм становится достаточно избирательным, позволяя как выделить общие контуры объектов на изображении, так и отдельные текстурные элементы. Чтобы качественно выделить границу, был сформирован набор из нескольких изображений, полученный путем изменения размера рецептивных полей при реализации биоинспирированного алгоритма. Этот набор затем был просуммирован и отфильтрован от шумового сигнала (рис. 4).

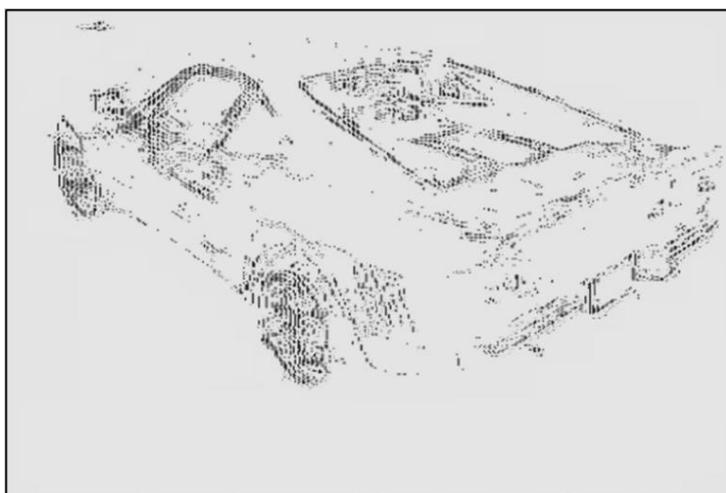


Рис. 4. Выделение ребер с помощью алгоритма, основанного на тезисе Марра

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проанализирована разработка биоинспирированных методов определения краев объектов, выявлены нейромеханизмы зрительной системы, направленные на регистрацию изображений и обнаружение краев объектов, которые активно используются в современных моделях машинного обучения при обработке изображений. Была формализована модель определения границ, основанная на использовании оператора Марра, используемого для обнаружения границ объектов на изображениях. Для демонстрации работы метода было использовано изображение из базы данных BSDS500. Полученный алгоритм позволил выделить не только краевые области объектов на изображении, но и текстуры объекта. Основываясь на полученных результатах, авторы надеются на дальнейшее развитие нейробиологических методов в области обработки изображений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Marr D.** Vision: A computational investigation into the human representation and processing of visual information / MIT press, 2010. 38 p.
2. **Hubel D.H., Wiesel T.N.** Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex // J. Physiol. 1962. Vol. 1(160). Pp. 106-154.
3. **Kuffler S.W.** Discharge patterns and functional organization of mammalian retina // Journal of neurophysiology. 1953. Vol. 1(16). Pp. 37-68.
4. **Antsiperov V.** New centre/surround retinex-like method for low-count image reconstruction // In Proceedings of the 12th International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods (ICPRAM 2023), SCITEPRESS, 2023. Pp. 517-528.
5. **Antsiperov V.E., Kershner V.A., Pavlyukova E.R.** Image interpolation consistent with neuromorphic coding data // Proc. of 26th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA), 2024. Pp. 1-6.
6. **Marr D., Hildreth E.** Theory of edge detection // Proc R Soc Lond B Biol Sci. 1980. Vol. 1167(207). Pp. 187-217.
7. **Schiller P.H., Tehovnik E.J.** Vision and the visual system / Oxford University Press, 2015. 384 p.

Antsiperov V.E., Kershner V.A.

*Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Russia,
125009, Moscow, Mokhovaya 11-7, E-mail: vladkershner@mail.ru*

A PROMISING APPROACH TO IMAGE PROCESSING BASED ON NEUROMORPHIC DECODING IN THE MARR'S PARADIGM

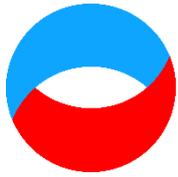
ABSTRACT

In computer vision tasks, detecting object boundaries, as well as their textures, is one of the key ones. Despite the fact that significant progress has already been made in object recognition tasks, existing processing models and algorithms are significantly inferior to the capabilities of the visual system. In previous works, several methods have been proposed to determine the contours of objects, allowing not only to highlight the boundaries of each object in the image, but also to significantly eliminate distortions associated with the blurring of fuzzy images, reduce the noise component of the image, and restore the indistinctly defined border. This article discusses current issues in computer vision using the example of a previously developed bioinspired image processing algorithm.

**NEUROMORPHIC METHODS, SAMPLE REPRESENTATION, RECEPTIVE FIELDS, IMAGE
CONTRAST ENHANCEMENT BY UNDERLINING BORDERS**

Секция 7

Применение оптических методов



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 621.315.592

Терехова А.С., Смирнов С.В.

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Россия,
634050, Томск, пр. Ленина, 40, E-mail: tas18102004@mail.ru*

**ПОГЛОЩЕНИЕ ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ СВОБОДНЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ В
НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЕНКАХ ИТО**

АННОТАЦИЯ

С помощью ИК Фурье-спектроскопии были исследованы оптические свойства наноразмерных пленок оксида индия, легированного оловом (ИТО), полученных методом магнетронного распыления из компактной мишени индия-олова (In-90%, Sn-10%) в среде аргона и кислорода на предварительно разогретую подложку. Методами термо-эдс, спектральной эллипсометрии, четырехзондовым методом определялись концентрация свободных носителей заряда, электропроводность и положение уровня Ферми пленок. Исследовался вклад в концентрацию и электропроводность кислородных вакансий и ионизированных атомов олова. Исходя из экспериментальных результатов, была рассчитана частота плазменного резонанса для образцов, а с помощью ИК-Фурье спектроскопии получены спектры их отражения. Установлено, что плазменная частота свободных электронов в этих пленках наблюдается в диапазоне от 2000 до 3000 см⁻¹. Были получены зависимости коэффициента отражения пленок от угла падения излучения для различных сред, соприкасающихся с ними, что позволило оценить чувствительность пленок к изменениям окружающей среды и определить их пригодность для дальнейшего использования в биосенсорах.

ПЛЕНКИ ИТО, МАГНЕТРОННОЕ РАСПЫЛЕНИЕ, СВОБОДНЫЕ ЭЛЕКТРОНЫ, КИСЛОРОДНЫЕ ВАКАНСИИ, ИОНИЗИРОВАННЫЕ АТОМЫ ОЛОВА, ПЛАЗМЕННАЯ ЧАСТОТА

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время большое внимание уделяется разработке и исследованию различного рода устройств, использующих явление поверхностного плазменного резонанса [1, 2]. Наиболее перспективным материалом для этих устройств являются пленки оксида индия, легированные оловом (ИТО), Применимость пленок ограничивается частотой плазменного резонанса (1), которая, в свою очередь определяется концентрацией свободных электронов [2-5].

$$\omega_p = \sqrt{\frac{q^2 \cdot n}{\varepsilon_0 \cdot m_e^* \cdot \varepsilon_L}}, \quad (1)$$

где q – заряд электрона, n – концентрация свободных носителей заряда, ϵ_0 – электрическая постоянная, m_e^* – эффективная масса электрона (для пленок ИТО $m_e^* = 0,36 m_e$), ϵ_L – вклад кристаллической решетки в диэлектрическую проницаемость.

Для металлов, с высокой концентрацией свободных электронов частота объемного плазменного резонанса соответствует видимой области спектра, в то время как в пленках ИТО, по результатам многочисленных исследований соответствует ближнему и среднему ИК-диапазону.

Целью данной работы является исследование пленок ИТО, полученных магнетронным распылением, в среднем ИК-диапазоне длин волн, а так же основных электрофизических характеристик, что позволит оценить возможность их дальнейшего использования для создания различного рода биосенсоров.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Исследуемые в данной работе, образцы были получены методом магнетронного распыления в установке для вакуумного напыления тонких пленок EPOS-PVD из компактной мишени индий-олово (90%-In, 10%-Sn) в газовой среде аргона с добавкой кислорода. Давление кислорода составляло 10-30% от общего давления в камере [3, 6]. Такой диапазон значений был выбран в результате эксперимента, в котором установлено, что содержание кислорода ниже 10% приводит к значительному снижению коэффициента пропускания пленки, а содержание кислорода выше 30% приводит к снижению электропроводности. В качестве подложек использовались кремний и боросиликатное стекло. Напыление длилось 20 минут на предварительно разогретую до 350 °С подложку, с последующим отжигом в вакууме при температуре 400 °С в течение 30 минут.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Структура полученных образцов исследовались на рентгеновском дифрактометре Дифрей-401. Рентгенофазовый анализ показал, что пленки, полученные при описанном выше режиме, частично кристаллизуются, о чем соответствуют характерные пики на дифрактограмме, представленной на рис. 1. Область когерентного рассеяния при этом составила 18-53 нм. Это позволяет сделать вывод, что температура отжига является достаточной для частичной кристаллизации пленок ИТО.

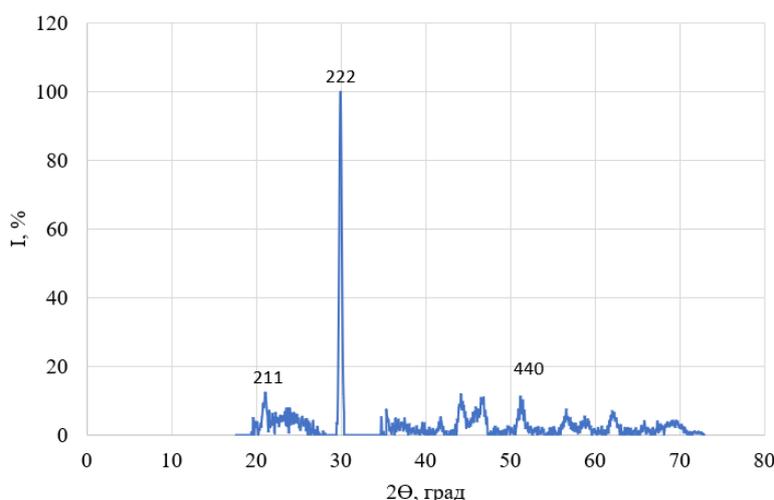


Рис. 1. Дифрактограмма пленки ИТО на кремниевой подложке

Как следует из дифрактограммы, основной пик соответствует плоскости [222], что свидетельствует о текстурируемом росте пленки.

Толщину пленок исследовали на спектральном эллипсомере «Эллипс 1891 САГ». Толщина пленок, полученных данным методом, составила 130-170 нм, а их показатель преломления варьируется в пределах от 1,8 до 2,1. Концентрацию свободных носителей заряда и положение уровня Ферми, определяли из измерений термо-эдс микро-зондовым методом.

Для оценки вклада кислородных вакансий в электропроводность исследовалась зависимость концентрации носителей заряда и электропроводности пленок от разного процентного содержания кислорода в камере [4]. В табл. 1 представлены значения электрофизических параметров пленок, полученных при различном содержании кислорода.

Табл. 1. Параметры пленок ИТО, полученных при различном содержании кислорода

Образец	Процентное содержание кислорода	Положение уровня Ферми E_F , ЭВ	Концентрация n , $см^{-3}$	Электропроводность σ , $(Ом \cdot м)^{-1}$	Длина волны плазменного резонанса λ_p , мкм
1	23	0,19	$8 \cdot 10^{19}$	$3 \cdot 10^4$	4,4
2	17	0,43	$2,7 \cdot 10^{20}$	10^5	2,4
3	22	0,29	$1,5 \cdot 10^{20}$	$1,3 \cdot 10^4$	3,2
4	15	0,13	$4,6 \cdot 10^{19}$	10^4	6
5	16	0,35	$2 \cdot 10^{20}$	$2,7 \cdot 10^4$	2,8

Результаты измерений имеют некоторый разброс что связано с большим числом параметров и воспроизводимостью процесса напыления. Тем не менее, можно сделать вывод, что после отжига пленок в бескислородной среде концентрация свободных носителей существенно увеличивается.

Для оценки влияния отжига на электропроводность образец ИТО на подложках из кварцевого стекла производился отжиг при различных температурах. При этом для каждого режима отжига были сняты температурные зависимости удельного сопротивления. Результаты представлены на рис. 2.

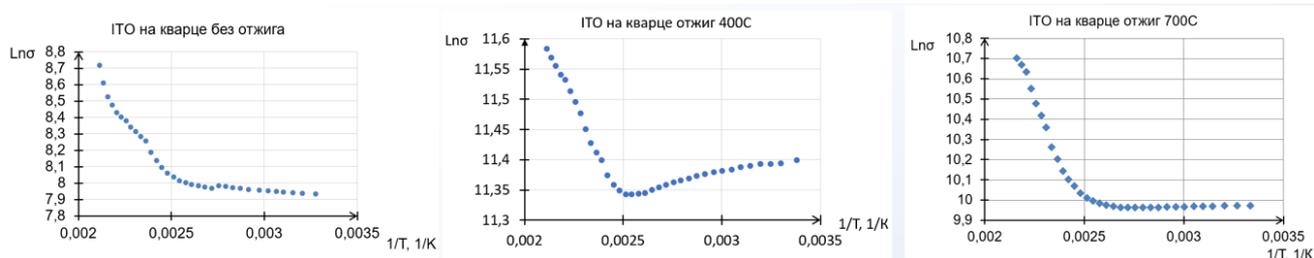


Рис. 2. Температурные зависимости удельного сопротивления ИТО на подложке из кварцевого стекла

Можно заметить, что зависимости имеют два участка, причем участок, соответствующий более низким температурам, обусловлен ионизацией примесных атомов олова. Увеличение концентрации свободных электронов демонстрируется металлическим характером температурной зависимости электропроводности. Второй, высокотемпературной, участок температурной зависимости соответствует полупроводниковому характеру электропроводности, что может быть связано с ионизацией электронов с кислородных вакансий.

Оптические свойства полученных образцов исследовались в среднем ИК-диапазоне длин волн от 2 до 10 мкм с помощью ИК Фурье-спектрометра FT-801. Для регистрации плазменного резонанса нами была сконструирована специальная приставка к Фурье-спектрометру, представленная на рис. 3.

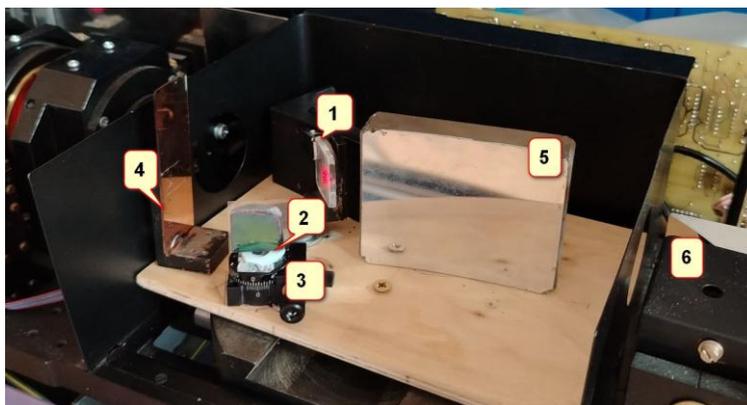


Рис. 3. Оптическая приставка:

1 – поляризатор, 2 – образец, 3 – поворотный столик, 4, 5 – зеркала, 6 – фотоприемник

С помощью приставки была исследована спектральная зависимость коэффициента отражения пленок от угла падения излучения. Возбуждение поверхностного плазменного резонанса в пленке проводилось методом Кречмана, схема реализации которого представлена на рис. 4 [7, 8].

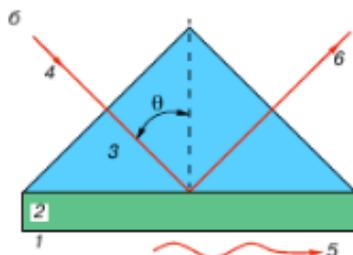


Рис. 4. Схема реализации метода Кречмана с помощью призмы из арсенида галлия

Данный метод основан на явлении нарушения полного внутреннего отражения и заключается в пропускании света поляризации ТМ под определенным углом через призму, находящуюся в соприкосновении с пленкой. В результате часть энергии от излучения не отражается, а остается в пленке, что приводит к возбуждению поверхностной волны.

В качестве материала для призмы был выбран арсенид галлия, т.к. он является прозрачным в диапазоне длин волн от 4 до 10 мкм ($2500-1000\text{ см}^{-1}$), а его показатель преломления в данном диапазоне составляет 3,65, что больше показателя преломления ИТО. Эти условия позволяют осуществить измерения нарушенного полного внутреннего отражения в средней ИК-области, где, согласно расчетам, находится плазменная частота исследуемых образцов. Спектр отражения образца 1 представлен на рис. 5.

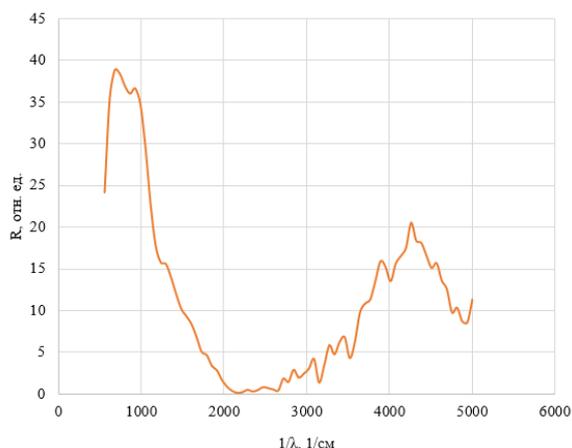


Рис. 5. Спектр отражения образца 1

Минимум отражения соответствует плазменной частоте, но плазменный край отражения размыт, что характерно для металлов и вырожденных полупроводников [2]. Рассчитанное из данных табл. 1 значение частоты поверхностного плазменного резонанса (2) хорошо коррелирует с результатами полученной экспериментальным путем [4].

$$\omega_{ps} = \frac{\omega_{pr}}{\sqrt{2}}, \quad (2)$$

где ω_{pr} – частота объемного плазменного резонанса.

На рис. 6 представлена зависимость коэффициента отражения пленки от угла падения излучения для двух сред, находящихся в соприкосновении с пленкой: воздуха и глицерина.

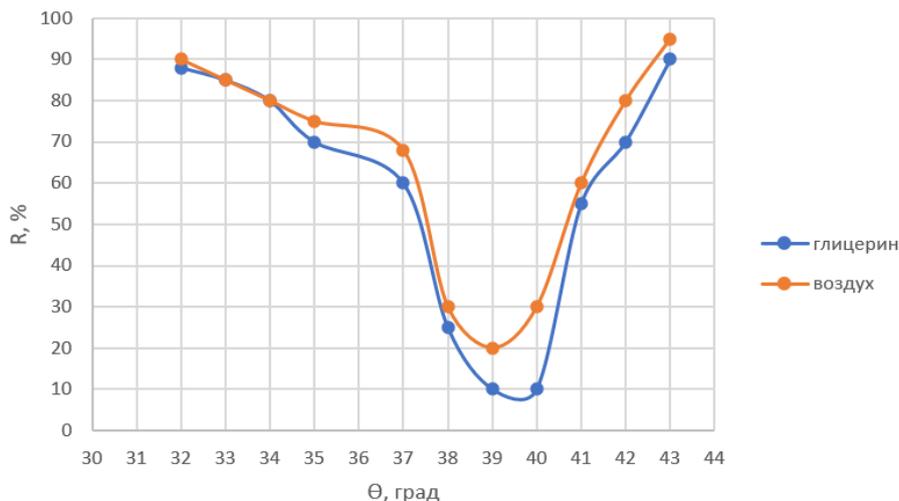


Рис. 6. Зависимость коэффициента отражения пленки от угла падения излучения

На зависимостях наблюдается минимум, свидетельствующий о том, что часть энергии излучения резонансным путем передается в пленку. Также наблюдается смещение минимума угла возбуждения при изменении диэлектрической проницаемости внешней среды, например, с помощью слоя глицерина.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований наноразмерных пленок ИТО в среднем ИК-диапазоне, с использованием метода Кречмана, определена частота поверхностного плазменного резонанса, получены угловые зависимости коэффициента отражения для двух сред с разными показателями преломления: воды и глицерина. Установлено, что при изменении показателя преломления среды, соприкасающейся с пленкой ИТО, наблюдается хорошо регистрируемый сдвиг минимума угла возбуждения поверхностного резонанса, что открывает новые возможности применения пленок ИТО для создания биосенсоров [9].

Работа выполнена по гранту № FEWM-2024-0004 «Теоретические исследования и экспериментальная разработка оптической приставки для анализа параметров компонентов высокоскоростных волоконно-оптических систем передачи аналогового и цифрового сигналов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Maier S.A.** Plasmonics: fundamentals and applications // UK: Centre for Photonics and Photonic Materials Department of Physics, University of Bath. 2011. 292 p.

2. **Watad I., Abdulhalim I.** Spectropolarimetric surface plasmon resonance sensor and the selection of the best polarimetric function // In: IEEE Journal of selected topics in quantum electronics. 2017. Vol. 23. Pp. 209-218.
3. **Zhidik Y., Ivanova A., Smirnov S., Zhuk K., Ynusov I., Trojn P.** Nanoscale ITO films for plasmon resonance-based optical sensors // Coatings. 2022. Vol. 12. № 12. P. 1868.
4. **Zhangbo Li, Zhiliang Zhang, Kai Chen** Indium–tin–oxide nanostructures for plasmon-enhanced infrared spectroscopy: a numerical study // Micromachines. 2019. Vol 10. P. 241.
5. **Гроссе П.** Свободные электроны в твердых телах. Изд-во Мир, 1982. 270 С.
6. **Амосова Л.П., Исаев М.В.** Магнетронное напыление прозрачных электродов ИТО из металлической мишени на холодную подложку // Журнал технической физики. 2014. Т. 84. № 10. С. 127-132.
7. **Либенсон М. Н.** Поверхностные электромагнитные волны оптического диапазона // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 10. С. 92-98.
8. **Петрин А.Б.** Сравнительный анализ чувствительности оптических датчиков на поверхностных волнах, возбуждаемых по схеме Кречмана // Оптика и спектроскопия. 2019. Т. 127. № 6. С. 1051-1056.
9. **Оптические** методы исследования потоков / И.Н. Павлов, Б.С. Ринкевичюс, А.Е. Тарасов и др.; Перспективы использования метода поверхностного плазмонного резонанса для исследования процессов в пристеночном слое жидкости // под ред. Ю.Н. Дубнищева и Б.С. Ринкевичюса. Издательство МЭИ. 2015. С. 281-287.

Terekhova A.S., Smirnov S.V.

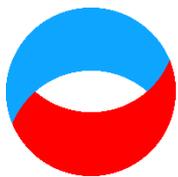
*Tomsk state university of control system and radioelectronics, Russia,
634050, Tomsk, Lenin st., 40, E-mail: tas18102004@mail.ru*

IR ABSORPTION BY FREE ELECTRONS IN ITO NANOSCALE FILMS

ABSTRACT

The optical properties of tin-doped indium oxide (ITO) nanoscale films obtained by magnetron sputtering from a compact indium-tin target (In-90%, Sn-10%) in argon and oxygen medium onto a preheated substrate were investigated using FTIR spectroscopy. The concentration of free charge carriers, electrical conductivity, and the position of the Fermi level of the films were determined by thermal-EDS, spectral ellipsometry, and four-probe method. The contribution to the concentration and electrical conductivity of oxygen vacancies and ionized tin atoms was investigated. Based on the experimental results, the plasmon resonance frequency for the samples was calculated and their reflectance spectra were obtained using FTIR spectroscopy. It was found that the plasma frequency of free electrons in these films is observed in the range from 2000 to 3000 cm⁻¹. The dependences of the films' reflection coefficient on the angle of incidence of radiation for different media in contact with them were obtained, which made it possible to evaluate the sensitivity of the films to environmental changes and to determine their suitability for further use in biosensors.

ITO FILMS, MAGNETRON SPUTTERING, FREE ELECTRONS, OXYGEN VACANCIES, IONIZED TIN ATOMS, PLASMA FREQUENCY



УДК 532.546

Шестаков М.В., Ягодницына А.А.

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия,
630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1, E-mail: maximvsh@gmail.com*

УПРАВЛЕНИЕ ЛИНИЯМИ ТОКА В МАССИВЕ СТОЛБЦОВ

АННОТАЦИЯ

Экспериментально исследовано управление топологией линий тока в массиве цилиндрических столбцов посредством бокового вдува/отсоса жидкости. Установлена зависимость угла отклонения линий тока от соотношения расходов вдува/отсоса и суммарного расхода на входе в устройство, что позволяет динамически регулировать критический диаметр селективной сортировки частиц. Результаты демонстрируют потенциал данного подхода для создания адаптивных микрофлюидных систем с программируемой гидродинамической сортировкой без изменения геометрии чипа.

СОРТИРОВКА ЧАСТИЦ, DLD, ЛИНИИ ТОКА, УПРАВЛЕНИЕ, PIV

ВВЕДЕНИЕ

Сортировка и отбор частиц в потоке несущей жидкости играют ключевую роль в широком спектре приложений, включая фармацевтику, биомедицинские исследования и клиническую диагностику. Массивы столбцов с детерминированным боковым смещением (DLD) являются одним из наиболее перспективных и эффективных методов гидродинамической сортировки [1]. Они применимы как для твёрдых сферических частиц, так и для деформируемых объектов сложной формы, включая биологические объекты [2]. В основе DLD лежит использование массива столбцов с боковым смещением, которые разделяют частицы на основе их диаметра благодаря асимметричной бифуркации ламинарного потока вокруг препятствий [3,4]. Однако применение и развитие метода DLD сталкивается с рядом ограничений. Так, критический диаметр сортировки D_c , определяющий характерный размер сортируемых объектов, задается геометрией устройства, является фиксированной величиной для конкретного чипа [5]:

$$D_c = 1.4g \varepsilon^{0,48},$$

где g – ширина зазора между столбцами, $\varepsilon = \tan(\theta)$ – тангенс угла наклона массива по отношению к направлению потока.

Перспективным направлением развития технологии DLD являются создание настраиваемых DLD-устройств. В настоящее время существует лишь несколько исследований, в которых предлагается управлять критическим диаметром сортировки без изменения геометрии обтекаемых столбцов. В настоящей работе реализована модель перенастраиваемого DLD устройства, представляющего собой массив столбцов без бокового

смещения, и проведено экспериментальное исследование возможности управления топологией линий тока с помощью бокового отсоса и вдува жидкости.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема экспериментальной установки и детализация рабочего участка представлены на рис. 1. Основой рабочего участка служил упорядоченный массив цилиндрических столбцов диаметром 600 мкм, с шириной зазора 450 мкм между соседними элементами. Количество столбцов в ряду – 37, количество рядов – 111. Глубина чипа составляла 1300 мкм, что обеспечивало квазидвумерный характер течения. Подача жидкости в систему осуществлялась через два независимых входа с регулируемыми расходами Q_1 и Q_2 при помощи прецизионного шприцевого насоса. Вдув (с расходом Q_{in}) и отсос (с расходом Q_{out}) жидкости производился посредством шприцевого насоса через восемь симметрично расположенных боковых каналов, объединенных в распределительный коллектор. В качестве рабочей жидкости использовался водоглицериновый раствор (плотность 1,26 г/см³, динамическая вязкость 820 мПа·с). Характерные числа Рейнольдса, рассчитанные по диаметру столбца, составили $\sim 10^{-3}$.

Для визуализации структуры течения в массиве столбцов применялся метод PIV. Жидкость засеивалась флуоресцентными трассерами из полиметилметакрилата диаметром 20-50 мкм и плотностью 1,19 г/см³. Освещение рабочей области обеспечивалось непрерывным лазером с длиной волны 532 нм (мощность 5 Вт) с цилиндрической линзой, формирующей световой нож толщиной ~ 1 мм, которой заводился с помощью зеркала через боковую стенку чипа. Регистрация трассерных частиц выполнялась цифровой камерой Imrexh (матрица 4 Мпикс) через оранжевый светофильтр для подавления фонового излучения. Пространственное разрешение системы составляло 58 мкм/пиксель. Для каждого из исследуемых комбинаций расходов регистрировалось 1000 пар изображений. Предварительная обработка данных включала в себя вычитание медианного значения интенсивности. Обработка PIV-данных проводилась в программном комплексе ActualFlow с помощью итерационного кросс-корреляционного алгоритма с изначальным размером расчетной ячейки 8x128 пикселей и 75% перекрытием. Пространственное разрешение полей скорости составило 1 вектор на ячейку 110x1886 мкм.

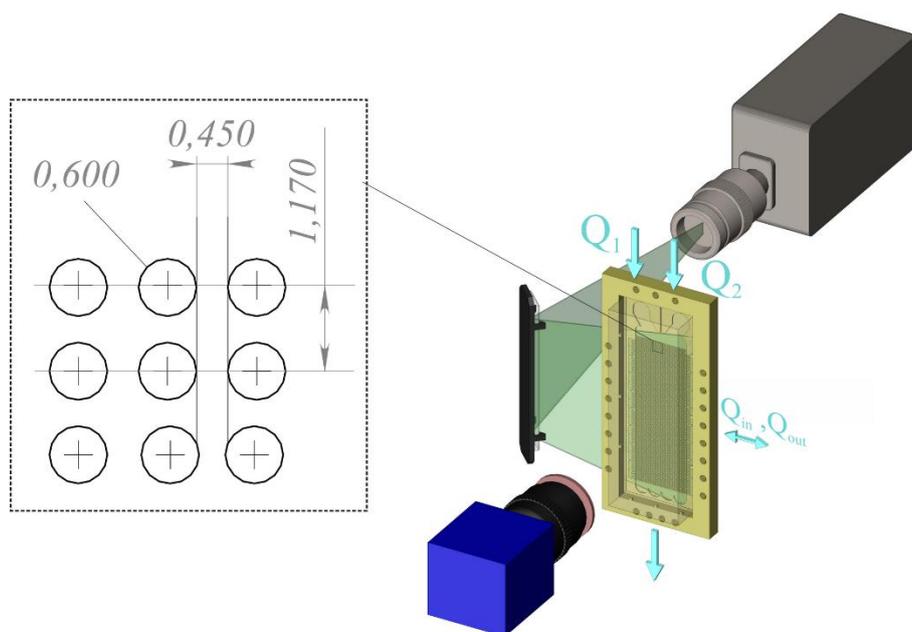


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведено исследование влияния безразмерного параметра α – отношения расходов вдува Q_{in} или отсоса Q_{out} к суммарному расходу на входе в чип $Q_0 = Q_1 + Q_2$, на топологию линий тока. Эксперименты выполнялись при симметричных входных условиях ($Q_1 = Q_2$), а значение исследуемого параметра α варьировалось в диапазоне 0-50%. Для каждого значения α получены усредненные поля скорости, на основе которых реконструированы линии тока (рис. 2). Угол отклонения линий тока θ относительно оси массива столбцов кодирован цветом, что позволяет визуализировать топологию линий тока.

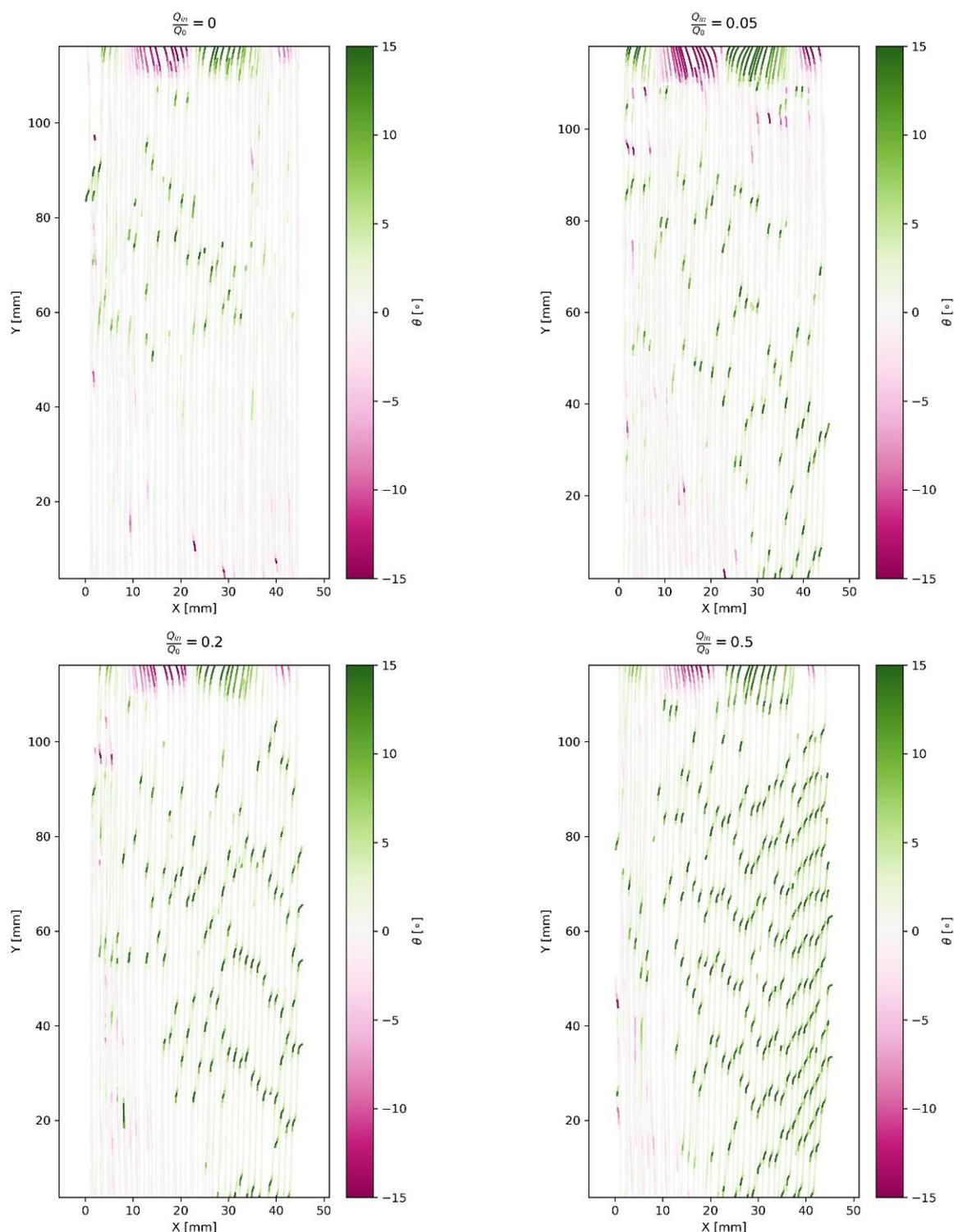


Рис. 2. Линии тока при вариации отношения расходов бокового вдува и суммарного расхода на входе в чип

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально продемонстрирован метод управления топологией линий тока в массиве цилиндрических столбцов за счет регулирования бокового вдува или отсоса жидкости. Показано, что изменение параметра α позволяет локально изменять наклон линий тока. Полученные данные подтверждают, что боковой вдув/отсос жидкости является эффективным инструментом для адаптивной гидродинамической сортировки в DLD устройствах. Метод перспективен для создания управляемых микрофлюидных систем, где требования к размеру сортируемых частиц могут оперативно корректироваться изменением топологии течения.

Исследование поддержано грантом РФФ 24-79-10291.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Huang L.R., Cox E.C., Austin R.H., Sturm J.C.** Continuous particle separation through deterministic lateral displacement // *Science*. 2004. Vol. 304. №. 5673. Pp. 987-990.
2. **Salafi T., Zhang Y., Zhang Y.** A review on deterministic lateral displacement for particle separation and detection // *Nano-Micro Letters*. 2019. Vol. 11. Pp. 1-33.
3. **Davis J.A., Inglis D.W., Morton K.J., Lawrence D.A., Huang L.R., Chou S.Y., Sturm J.C., Austin R.H.** Deterministic hydrodynamics: Taking blood apart // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2006. Vol. 103. №. 40. Pp. 14779-14784.
4. **Inglis D.W., Davis J.A., Austin R.H., Sturm J.C.** Critical particle size for fractionation by deterministic lateral displacement // *Lab on a Chip*. 2006. Vol. 6. №. 5. Pp. 655-658.
5. **Davis J.A.** Microfluidic separation of blood components through deterministic lateral displacement. PhD dissertation. Princeton, 2008. 152 p.

Shestakov M.V., Yagodnitsyna A.A.

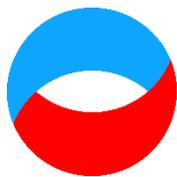
*Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Russia,
630055, Novosibirsk, Lavrentev ave., 1, E-mail: maximvsh@gmail.com*

CONTROL OF STREAMLINES IN AN ARRAY OF COLUMNS

ABSTRACT

An experimental study investigates the control of streamline topology in an array of cylindrical columns via lateral fluid injection/suction. A dependence of the streamline deviation angle on the injection/suction flow rate ratio and inlet flow rate is established, enabling dynamic adjustment of the critical diameter for selective particle sorting. The results demonstrate the potential for creating adaptive microfluidic systems with programmable hydrodynamic sorting without altering chip geometry.

PARTICLE SORTING, DLD, STREAMLINES, CONTROL, PIV



УДК 544.07

Курьяков В.Н.

Институт проблем нефти и газа РАН, Россия,
119333, Москва, Губкина ул., 3, E-mail: Vladimir.kuryakov@ipng.ru

НЕКОТОРЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА УЛЬТРАМИКРОСКОПИИ И ПРИМЕНЕНИЕ ДАННОГО МЕТОДА В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

АННОТАЦИЯ

В работе рассматриваются теоретические основы и техническая реализация метода ультрамикроскопии (российский прибор), а также приводятся конкретные примеры возможного использования данного метода для исследовательских и прикладных задач: контроль чистоты жидкостей на содержание наноразмерных примесей с малыми концентрациями; измерение численной концентрации наночастиц в жидких средах (на примере наночастиц коллоидного золота 34 нм, SiO₂ 100 нм и 200 нм); измерение концентрации и скорости движения подвижных бактерий; измерение размера наночастиц; исследование процессов агрегации нефтяных фракций (асфальтенов).

НАНОЧАСТИЦЫ, УЛЬТРАМИКРОСКОПИЯ, РАЗМЕР ЧАСТИЦ, КОНЦЕНТРАЦИЯ, АГРЕГАЦИЯ

ВВЕДЕНИЕ

Метод ультрамикроскопии позволяет визуализировать движение наночастиц в жидкости и измерять их численную концентрацию. Метод разработан Рихардом Зигмонди, нобелевским лауреатом 1925 года по химии. В основе данного метода лежит специальный способ освещения образца жидкости лазером под углом 90 градусов к оптической оси наблюдения. Наблюдение производится при помощи оптического микроскопа. Такой метод позволяет измерять концентрацию частиц размером до 10 нм (для металлических частиц). При этом сами наночастицы в данном методе не видны, наблюдается рассеяние лазерного излучения на отдельных частицах [1]. Характерный вид поля зрения ультрамикроскопа представлен на рис. 1. В сфокусированном луче лазера видны частицы, вне луча частиц не видно. Ограничений, связанных с дифракционным пределом, здесь нет, поскольку, видны не сами частицы, а рассеяние от них.

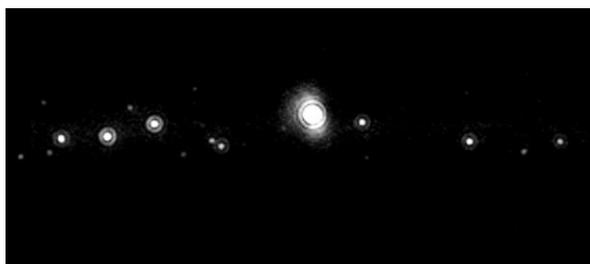


Рис. 1. Характерный вид поля зрения ультрамикроскопа при наблюдении наночастиц SiO₂ ($R = 55$ нм) в воде

Каждая светлая точка на изображении – рассеяние от отдельной наночастицы. Специальное программное обеспечение позволяет определить количество таких светящихся точек в каждом кадре записанного видео. Предварительная оценка объема части образца, в котором происходит наблюдение, позволяет рассчитать численную концентрацию наночастиц.

Для наночастиц разной природы разные ограничения на минимальный размер частиц, которые можно наблюдать конкретным ультрамикроскопом, в зависимости от мощности используемого лазера и чувствительности цифровой камеры. На используемом в работе приборе для металлических частиц из-за их сильного рассеяния минимальный размер около 10 нм. Для частиц из других материалов минимальный размер 40-50 нм. При этом с появлением более чувствительных цифровых камер данный метод будет применим к частицам меньшего размера. Благодаря визуализации частиц таким способом становится возможным не только подсчитать их число в единице объема – измерить численную концентрацию, а также исследовать поведение частиц в реальном времени при воздействии на них различных физических полей, например, магнитного.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАМИКРОСОКПИИ

Контроль чистоты жидкостей

Актуальной является задача экспресс-контроля чистоты воды, особенно при производстве микроэлектроники. Для воды выделяют три класса чистоты по содержанию растворенных в ней солей. Очищенная или обессоленная вода – дистиллированная вода с максимальной электропроводностью 1 мкСм/см. Чистая вода или глубокообессоленная с электропроводностью в интервале от 1 мкСм/см до 0,1 мкСм/см и удельным сопротивлением до 10 МОм·см. Такая вода подходит для выполнения аналитических работ, она соответствует бидистиллированной воде. Ультрачистая вода или особо чистая (высокоомная) с максимальной электропроводностью 0,0555 МкСм/см и удельным сопротивлением 18,2 МОм·см. Контроль чистоты воды по содержанию растворенных в ней солей можно осуществить измерением проводимости (электрического сопротивления). Аппаратные решения для такого рода задач достаточно хорошо развиты. Фильтрационные системы для удаления механических примесей, вплоть до наноразмерных (например, системы обратного осмоса), также имеются в большом количестве на рынке и легко доступны. При этом методы контроля за содержанием механических примесей в ультрачистой воде не так хорошо развиты и задача разработки таких методов актуальна. Поскольку небольшие количества наноразмерных частиц могут попадать в уже очищенную воду во время хранения, транспортировки или использования, отделяясь от стенок тары хранения или системы водоподведения [2].

Измерение размера наночастиц

Если для образца раствора наночастиц предварительно известна массовая концентрация (или ее можно измерить по сухому остатку) и известен материал наночастиц (плотность материала), то из измерений численной концентрации в таком образце, можно получить оценку среднего размера частиц.

$$M_1 = \frac{C_m}{C_N}, \quad M_1 = \rho \frac{4}{3} \pi R^3, \quad R = \sqrt[3]{\frac{3C_m}{4C_N \pi \rho}}$$

где M_1 – масса одной частицы, C_m и C_N – массовая и численная концентрация частиц в образце соответственно, ρ – плотность материала наночастиц, R – средний радиус частиц.

В работе проведены исследования водных растворов наночастиц (НЧ) золота (32 нм), водных дисперсий наноразмерных n-алканов (200 нм) и растворов наночастиц SiO₂ в воде (100

нм и 200 нм). Для всех образцов измерены концентрации и размеры наночастиц методами ультрамикроскопии. Размеры частиц также измерены методами динамического рассеяния света (ДРС) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Показано хорошее совпадение результатов измерений тремя различными методами для образцов коллоидного золота и наночастиц n-алкана. Для наночастиц SiO₂ измерения размера частиц методом ультрамикроскопии при табличных значениях плотности не дает результата схожего с ДРС и СЭМ. Только при плотности существенно ниже табличной для такого образца можно получить результат методом ультрамикроскопии, сравнимый с результатами, полученными другими методами. Можно предположить, что НЧ SiO₂ имеют пористую структуру, и плотность таких частиц отличается от табличного значения плотности SiO₂. Таким образом, метод ультрамикроскопии позволяет получить оценку плотности материала наночастиц, что сложно сделать другими методами.

Определение порога устойчивости нефтяных систем к выпадению тяжелых фракций (определение порога устойчивости растворов)

Асфальтены одна из высокомолекулярных фракций нефти. Совместно с такими фракциями нефти, как парафины и смолы, асфальтены могут формировать асфальто-смолисто-парафиновые отложения (АСПО) при разработке нефтяных месторождений или при транспортировке и переработке добытой нефти. Образование АСПО приводит к снижению дебета скважин, уменьшает эффективный диаметр нефтепровода, может приводить к выходу из строя технологического оборудования. Борьба с АСПО – актуальная задача в нефтяной отрасли. Одним из этапов борьбы с АСПО является изучение процессов выпадения асфальтенов из нефти и нефтяных систем.

Важной информацией для нефтяной системы, содержащей растворенные асфальтены, является то, при каких условиях и как из такой системы начинают выпадать в виде твердой фазы асфальтены. Выпадение асфальтенов из раствора может происходить при изменении температуры, давления или состава нефтяной системы. Устоявшейся методикой оценки устойчивости нефтяных систем является процесс титрования такой системы осадителем асфальтенов (жидким алканом, например, гептаном или пентаном) и определения концентрации осадителя, превышение которой приводит к выпадению асфальтенов из раствора (в виде наночастиц) и началу их агрегации. При этом методов детектирования начала агрегации достаточно много, но все они являются не прямыми.

Ультрамикроскопия позволяет измерять концентрацию асфальтеновых агрегатов в модельных нефтяных системах и из анализа таких измерений при титровании определять пороговое значение осадителя (гептана) [3]. Сравнение результатов определения пороговой концентрации гептана методом ультрамикроскопии и методами динамического и статического рассеяния света (СРС) показало, что метод ультрамикроскопии по чувствительности не уступает этим двум методам. Можно сказать, что метод ультрамикроскопии позволяет исследовать более ранние стадии агрегации асфальтенов, чем методы ДРС и СРС, поскольку позволяет детектировать отдельные наночастицы в жидкости и исследовать образцы растворов наночастиц с более низкими концентрациями, чем методы ДРС и СРС.

Измерение скорости движения бактерий

Измерение общей концентрации живых бактерий в образце жидкости является актуальной и непростой задачей в микробиологии. При низких концентрациях (менее 10⁶ шт/мл) методами оптической микроскопии их сложно детектировать и невозможно измерить концентрацию. Методы измерения колониеобразующих единиц (КОЕ) специфичны и требуют длительного времени проведения измерений. Метод ультрамикроскопии в реальном времени позволяет измерить концентрацию подвижных бактерий в образце воды, а

также измерить скорость движения бактерий. Совершенствование метода ультрамикроскопии, например, использование ультрафиолетового освещения образца и предварительного окрашивания микроорганизмов, позволит расширить его применение для измерений общего микробного числа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод ультрамикроскопии был разработан сто лет назад, но к настоящему времени не получил широкого распространения. При этом данный метод обладает рядом возможностей, которые востребованы в научных исследованиях и прикладных задачах.

Список литературы

1. **Описание** метода ультрамикроскопии: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://nrcounter.ru/> (дата обращения: 01.05.2025).
2. **Попов К., Vainer Y., Silaev G., Kuryakov V., Trukhina M., Koltinova E., Trokhin V., Oshchepkov M., Butakova M., Oshchepkov A.** Potential nano/microcenters of crystal nucleation in reagent-grade purity solvents and their differentiation by fluorescent-tagged antiscalant // *Crystals*. 2024. Vol. 14. P. 650.
3. **Kuryakov V.N.** Determining the onset of asphaltene precipitation in a model oil system toluene–asphaltene–heptane by ultramicroscopy method // *Actual Probl. Oil Gas*. 2024. Vol. 15. Pp. 338-348.

Kuryakov V.N.

*Oil and Gas Research Institute of RAS, Russia,
119333, Moscow, Gubkina st., 3, E-mail: Vladimir.kuryakov@ipng.ru*

SOME CAPABILITIES OF ULTRAMICROSCOPY AND ITS APPLICATION IN SCIENTIFIC RESEARCH

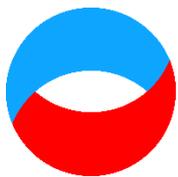
ABSTRACT

The paper examines the theoretical foundations and technical implementation of the ultramicroscopy method (a Russian device) and provides specific examples of its potential applications for research and practical tasks: monitoring the purity of liquids for the presence of nanoscale impurities at low concentrations; measuring the numerical concentration of nanoparticles in liquid media (using the example of 34 nm colloidal gold nanoparticles, 100 nm and 200 nm SiO₂ particles); measuring the concentration and speed of motile bacteria; determining nanoparticle size; and studying the aggregation processes of oil fractions (asphaltenes).

NANOPARTICLES, ULTRA MICROSCOPY, PARTICLE SIZE, CONCENTRATION, AGGREGATION

Секция 8

Акустооптика и оптоакустика



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 535-15

Сударев А.А.¹, Шарикова М.О.^{1,2}, Польщикова О.В.¹

¹ Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Россия,
117342, Москва, Бутлерова ул., 15, E-mail: sudarev.aa@ntcip.ru

² Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14

**ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА АКУСТООПТИЧЕСКОГО ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО
ИНФРАКРАСНОГО МИКРОСКОПА**

АННОТАЦИЯ

*Гиперспектральная визуализация – это технология сбора и анализа данных, основанная на измерении интенсивности электромагнитного излучения после взаимодействия с объектом исследования во множестве узких спектральных полос в широком спектральном диапазоне. На сегодняшний день данный метод широко используется в различных областях: науке, медицине и технике. В работе демонстрируется оптическая схема акустооптического гиперспектрального инфракрасного микроскопа. Система включает в себя источник излучения, микрообъектив, две конфокальные линзы, акустооптический перестраиваемый фильтр, работающий в диапазоне 900-1700 нм, и камеру с объективом. Для повышения светосилы используется неполяризаторная схема фильтрации. Собранный макет акустооптического гиперспектрального инфракрасного микроскопа обладает увеличением $2,5\times$ и полем зрения 4×4 мм. С его помощью были получены спектры отражения листа *Euphorbia pulcherrima*, которые совпали с данными, полученными с помощью спектрометра.*

**АКУСТООПТИЧЕСКИЙ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ФИЛЬТР, МИКРОСКОПИЯ,
ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ**

ВВЕДЕНИЕ

Гиперспектральная визуализация – это аналитический инструмент, который позволяет неинвазивно собирать пространственную и спектральную информацию об образце. В настоящее время он получил широкое распространение и активно используется в медицине и биологии для изучения тканей и клеточных структур [1], причем наиболее информативным для этих целей является ближний инфракрасный диапазон, так как в нем биологические ткани имеют наибольшую прозрачность, а следовательно, можно наблюдать структуры, скрытые в объеме. Спектральную селекцию излучения можно осуществить при помощи множества различных способов: сменные фильтры, дифракционные решетки, призмы и т.д. [2, 3]. Фильтрация при помощи акустооптического фильтра (АОФ) обладает рядом преимуществ, таких как узкая полоса пропускания, широкий рабочий спектральный диапазон, высокая скорость перестройки. Также АОФ имеет малые габариты, и в нем отсутствуют подвижные элементы, что позволит уменьшить размеры прибора и повысить его надежность.

В данной работе представлена схема акустооптического гиперспектрального инфракрасного микроскопа, а также собран экспериментальный стенд. Разработанный стенд апробирован на примере съемки спектра отражения листа *Euphorbia pulcherrima*.

ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА

Схема акустооптического гиперспектрального инфракрасного микроскопа изображена на рис. 1. Объект располагается в передней фокальной плоскости микрообъектива (МО) и подсвечивается источником излучения (ИИ). Отраженное от объекта излучение коллимируется МО и направляется в блок фильтрации излучения. Он состоит из АОФ и двух линз (L_1 и L_2), которые обеспечивают конфокальное распространение света через АОФ. С целью повышения светосилы разрабатываемой установки было решено реализовать схему без использования поляризаторов на входе и на выходе АОФ [4]. В результате дифракции после АОФ формируются три пучка. Пучок +1-го порядка дифракции соответствует обыкновенно поляризованному излучению (о), пучок -1-го порядка – необыкновенно поляризованному излучению (е), а 0-й порядок представляет собой сдвоенный пучок, несущий в себе недифрагированное излучение обеих компонент поляризации. Чтобы избавиться от засветки 0-го и -1-го порядков дифракции было решено использовать диафрагмы (D_1 и D_2), которые в данной схеме выполняют роль входного и выходного зрачка. После блока фильтрации излучение собирается объективом, и изображение объекта проецируется на матричный приемник излучения (МПИ).

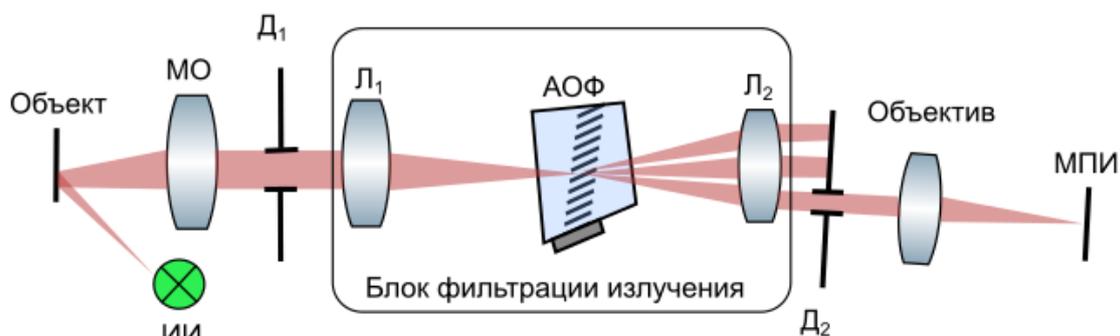


Рис. 1. Схема акустооптического гиперспектрального инфракрасного микроскопа

ЭКСПЕРИМЕНТ

В экспериментальной установке, показанной на рис. 2, в качестве источника излучения использовалась галогенная лампа (ИС-2Г-150/220, НПП «СиМТ»), свет от которой собирался МО (5^x Plan Apo NIR Infinity Corrected Objective, Mitutoyo). Далее свет поступал в блок фильтрации излучения, в состав которого входят линзы с фокусным расстоянием 75 и 50 мм (AC254-075-AB; AC254-050-AB, Thorlabs) и АОФ (материал кристалла TeO_2 , угол среза 7° , угол задней грани $4^\circ 55'$, НТЦ УП РАН). Отфильтрованное изображение собиралось объективом с фокусным расстоянием 50 мм и проецировалось на матричный приемник излучения (Goldeye CL-008 TEC1, Allied Vision). Экспериментальная установка обладает увеличением $2,5\times$ и полем зрения 4×4 мм.

При нахождении пространственного распределения спектрального коэффициента отражения наблюдаемой области образца используются зарегистрированные калибровочные серии спектральных изображений, а также серии спектральных изображений объекта. Такой гиперспектральный массив $\rho(x, y, \lambda)$ рассчитывается как отношение спектральной интенсивности излучения $I_{об.}(x, y, \lambda)$, отраженного от образца, и излучения от эталона $I_{эт.}(x, y, \lambda)$, с учетом пространственного распределения шумовых составляющих обоих сигналов $I_{об.ш.}(x, y, \lambda)$ и $I_{эт.ш.}(x, y, \lambda)$

$$\rho(x, y, \lambda) = \frac{I_{об.}(x, y, \lambda) - I_{об.ш.}(x, y, \lambda)}{I_{эт.}(x, y, \lambda) - I_{эт.ш.}(x, y, \lambda)} \quad (1)$$

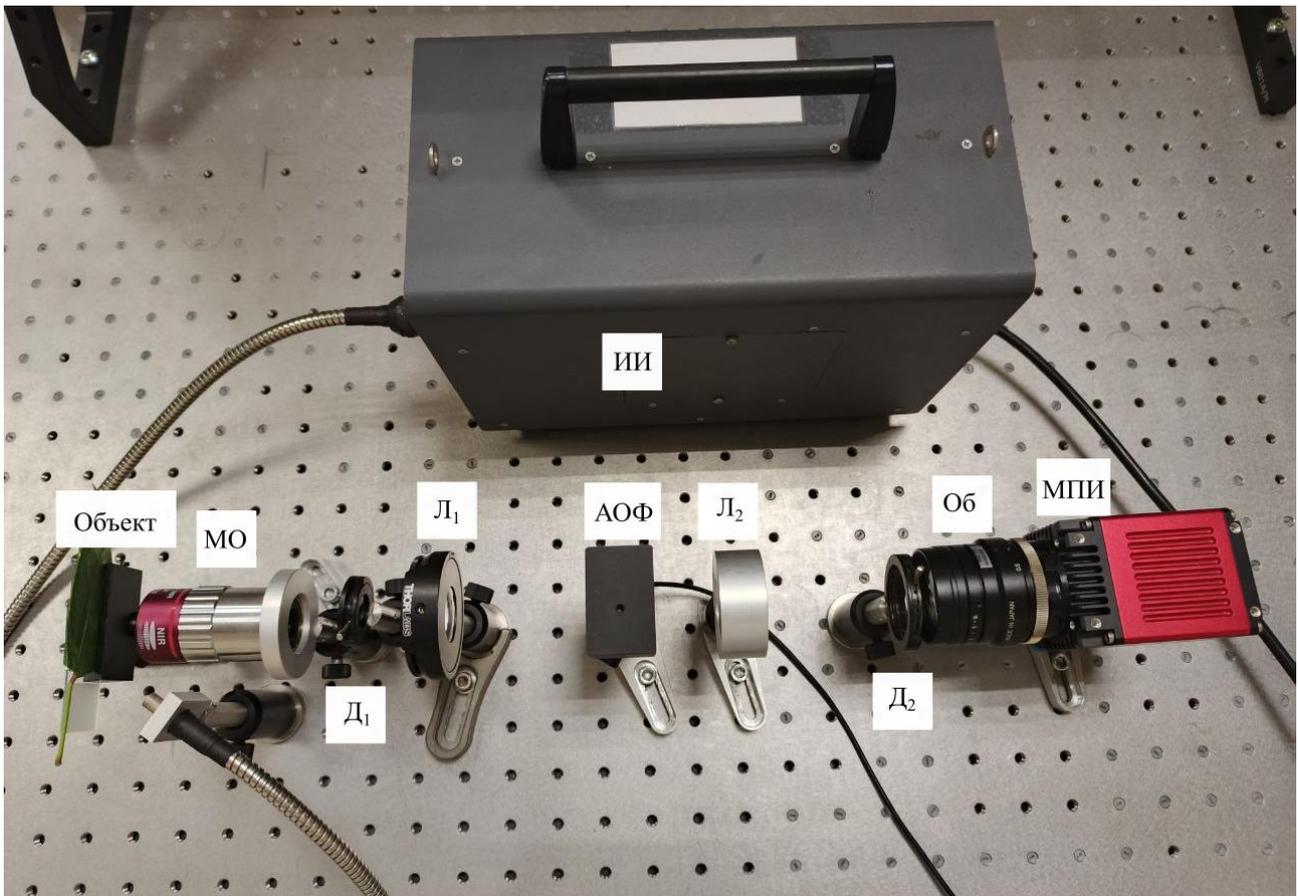


Рис. 2. Внешний вид экспериментальной установки

В качестве объекта был выбран лист *Euphorbia pulcherrima*. С помощью разработанной установки был получен гиперспектральный куб данных. В результате его обработки с помощью формулы (1) был получен спектральный коэффициент отражения листа *Euphorbia pulcherrima*. Сравнив данные, полученные с помощью разработанной установки, с данными, полученными с дифракционного спектрометра (FLAME-NIR, Ocean Optics), можно заметить, что они имеют схожий характер.

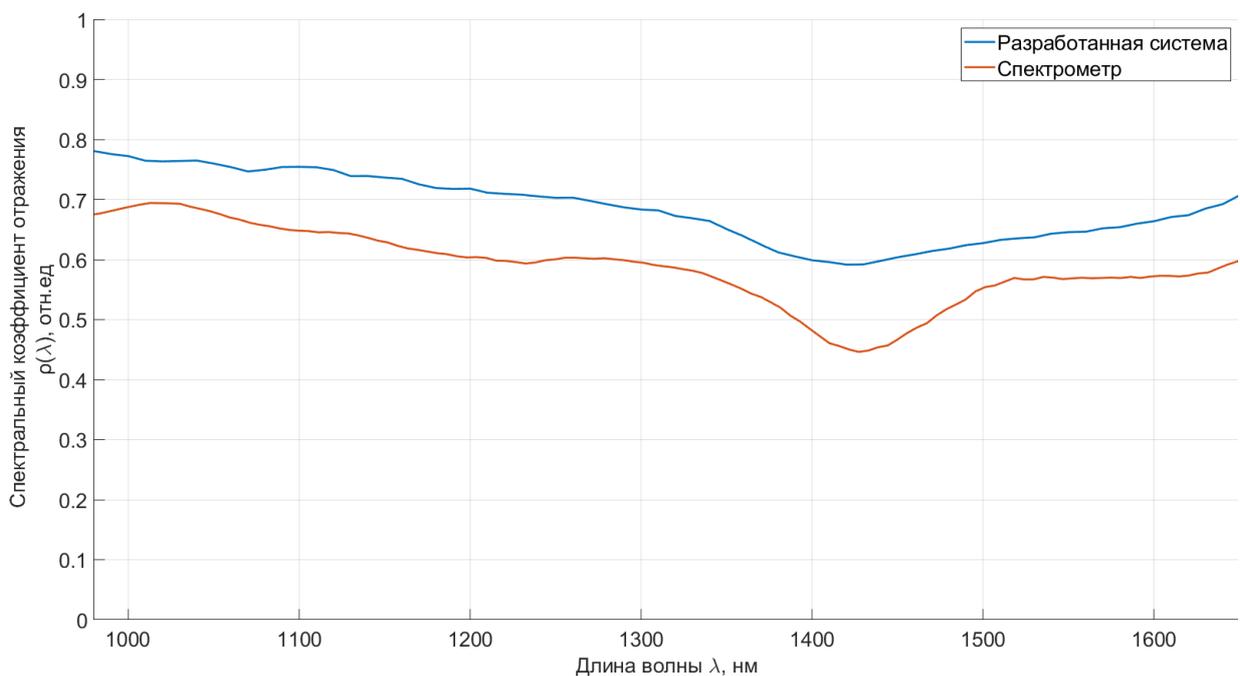


Рис. 3. Спектральный коэффициент отражения листа *Euphorbia pulcherrima*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была предложена схема акустооптического гиперспектрального инфракрасного микроскопа, которая позволяет быстро получать гиперспектральные кубы данных, с помощью которых можно определять состав и пространственное распределение компонентов исследуемого образца. Также был собран экспериментальный стенд, который продемонстрировал работоспособность системы.

Дальнейшее развитие предложенного гиперспектрального инфракрасного микроскопа будет направлено на улучшение оптических характеристик системы, таких как пространственное разрешение, увеличение и т.д.

Работа выполнена в рамках государственного задания НТЦ УП РАН (проект FFNS-2025-0006). Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования НТЦ УП РАН [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Hahn R. et al.** Diffraction-based hyperspectral snapshot imager // Optical Engineering. 2022. Vol. 61. № 1. Pp. 015106-015106.
2. **Lu G., Fei B.** Medical hyperspectral imaging: a review // Journal of Biomedical Optics. 2014. Vol. 19. № 1. Pp. 010901-010901.
3. **Baek S. H. et al.** Compact single-shot hyperspectral imaging using a prism // ACM Transactions on Graphics (TOG). 2017. Vol. 36. № 6. Pp. 1-12.
4. **Batshev V. et al.** Polarizer-free AOTF-based SWIR hyperspectral imaging for biomedical applications // Sensors. 2020. Vol. 20. № 16. P. 4439.
5. **Центр** коллективного пользования НТЦ УП РАН [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://ntcup.ru/ckp-i-unu/> (дата обращения 16.04.2025).

Sudarev A.A.¹, Sharikova M.O.^{1,2}, Polschikova O.V.¹

¹ *Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of RAS, Russia, 117342, Moscow, Butlerova St., 15, E-mail: sudarev.aa@ntcup.ru*

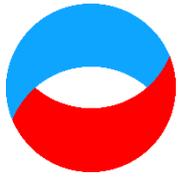
² *National Research University "MPEI", Russia, 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya St., 14*

OPTICAL SCHEME OF AN ACOUSTO-OPTIC HYPERSPECTRAL INFRARED MICROSCOPE

ABSTRACT

*Hyperspectral imaging is a data collection and analysis technology based on measuring the intensity of electromagnetic radiation after interaction with an object of study in a variety of narrow spectral bands in a wide spectral range. Today, this method is widely used in various fields: science, medicine and technology. The paper demonstrates the optical scheme of an acousto-optic hyperspectral infrared microscope. The system includes a radiation source, a microscope objective lens, two confocal lenses, an acousto-optical tunable filter operating in the 900-1700 nm range, and a camera with a lens. A non-polarizing filtration scheme is used to increase the light intensity. The assembled model of an acousto-optic hyperspectral infrared microscope has a magnification of 2.5^x and a field of view of 4×4 mm. With its help, the reflection spectra of the *Euphorbia pulcherrima* leaf were obtained, which coincided with the data obtained using the spectrometer.*

ACOUSTO-OPTICAL TUNABLE FILTER, MICROSCOPY, HYPERSPECTRAL IMAGING



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 535.36:534.23

Никитин П.А.^{1,2}

¹ Научно-технологический центр уникального приборостроения
Российской академии наук, Россия,
117342, Москва, Бутлерова ул., 15, E-mail: nikitin.pavel.a@gmail.com

² Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14

**ОПТИМИЗАЦИЯ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ФОКУСИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА,
ИСПОЛЬЗУЮЩЕГО ЛИНЕЙНО ЧАСТОТНО МОДУЛИРОВАННЫЙ ИМПУЛЬС
ЗВУКА**

АННОТАЦИЯ

Представлена строгая модель акустооптического фокусирующего устройства, использующего импульс звука с линейной частотной модуляцией. В модели используется интеграл Рэлея-Зоммерфельда, наиболее точно учитывающий дифракционные эффекты. Показано, что при нормальном падении света учёт длины (0,5 мм) акустооптического взаимодействия приводит к увеличению размера фокального пятна в 1,3 раза. Установлено, что распределение интенсивности в фокальном пятне асимметрично и сильно отличается от аналитического решения для бесконечно малой длины акустооптического взаимодействия. Продемонстрировано, что за счёт наклонного падения света можно добиться не только симметричного распределения интенсивности в фокальном пятне, но и уменьшить его размер в 1,8 раза.

АКУСТООПТИКА, ДИФРАКЦИЯ, ИЗЛУЧЕНИЕ, ФОКУСИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО

ВВЕДЕНИЕ

Акустооптические (АО) устройства позволяют управлять параметрами пучков излучения в реальном времени, компактны, надёжны и энергоэффективны, благодаря чему они нашли широкое применение во многих областях науки и техники. АО эффект заключается в дифракции излучения на фазовой дифракционной решетке, наведённой в среде ультразвуковым пучком. Для фокусировки излучения в [1] было предложено использовать цилиндрическую АО ячейку, где средой взаимодействия является жидкость, а излучателем ультразвука является вся боковая поверхность цилиндра. При непрерывной генерации ультразвука в такой АО ячейке формируется стоячая звуковая волна с радиальным профилем амплитуды в виде функции Бесселя. Если диаметр пучка излучения много меньше расстояниями между первыми минимумами функции Бесселя, то в этой области можно считать профилем амплитуды ультразвука как квадратично зависящий от расстояния до оси цилиндра. Это совпадает с математической моделью тонкой линзы. Подобные устройства используются как часть объектива для реализации перестраиваемой фокусировки и потому нашли применение в медицине [2].

Существует также и другой способ реализации акустооптического фокусирующего устройства (АОФУ). Как было упомянуто ранее, ультразвук формирует в среде фазовую

дифракционную решётку. Известно, что угол $\Delta\theta$ между соседними дифракционными порядками определяется частотой f и скоростью V звука, а также длиной волны λ излучения:

$$\Delta\theta = \frac{\lambda f}{V}. \quad (1)$$

Фокусировка пучка излучения с помощью АО метода возможна, когда частота f ультразвука зависит от времени t . В этом случае угол отклонения излучения зависит от координаты в АО ячейке. Такое АОФУ может фокусировать только в одном направлении, т.е. работать как цилиндрическая линза. Известно, что при прохождении светом цилиндрической линзы дополнительная фаза квадратично зависит от координаты [3]. С помощью АО метода это можно реализовать только в случае, когда частота f ультразвука линейно зависит от времени t . В АО устройствах рабочая полоса частот ультразвука ограничена, как несовершенством цепи электрического согласования с источником сигнала, так и резонансными свойствами излучателя ультразвука. Поэтому в эксперименте используются линейно частотно модулированные (ЛЧМ) импульсы ультразвука [4].

Фокальное пятно в описанном АОФУ представляет собой полосу, т.к. свет фокусируется только в направлении распространения ультразвука. Длина полосы в другом (продольном) направлении определяется структурой исходного пучка света, используемыми дополнительными оптическими компонентами и расстояниями между ними. Поэтому в данной работе исследуется только поперечная структура фокального пятна. В работе [5] проведён анализ для АОФУ, использующего ЛЧМ-импульсы ультразвука. Показано, что: 1) поперечный профиль интенсивности в фокальном пятне имеет форму вида $\text{sinc}^2(\xi)$; 2) фокальное пятно смещено относительно серединного перпендикуляра к АОФУ. Однако, разработанная модель обладает двумя существенными недостатками: 1) длина АО взаимодействия предполагается бесконечно малой; 2) используется модель дифракции Френеля, которая не полностью учитывает дифракционные эффекты. Целью данной работы была оптимизация предложенного АОФУ, для чего была усовершенствована указанная модель с учётом конечной длины АО взаимодействия и с использованием строгой модели дифракции излучения, а также найдены оптимальные параметры, обеспечивающие минимальный поперечный размер фокального пятна.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Рассмотрим импульс ультразвука, в котором частота f зависит от времени t по линейному закону

$$f = f_1 + \frac{\Delta f}{T} t, \quad (2)$$

где f_1 – начальная частота ультразвука при $t = 0$, f_2 – конечная частота ультразвука в момент t , равный длительности T импульса ультразвука, $\Delta f = f_2 - f_1$ – полоса частот ЛМЧ импульса.

Пусть центр АОФУ имеет координату $x = 0$, а в момент $t = T$ ЛМЧ звуковой импульс полностью заполняет пространство между $x = -L/2$ и $x = L/2$, где $L = V/T$ – длина ЛМЧ звукового импульса в АОФУ. Тогда зависимость показателя преломления n от координаты x вдоль направления распространения ультразвука описывается следующим образом [5]

$$n(x) = n_0 + \Delta n(x) = n_0 + \Delta n_0 \exp \left\{ i2\pi \left[f_1 \left(\frac{T}{2} - \frac{x}{V} \right) + \frac{1}{2} \frac{\Delta f}{T} \left(\frac{T}{2} - \frac{x}{V} \right)^2 \right] \right\}. \quad (3)$$

Амплитуда Δn_0 изменения показателя преломления определяется известной формулой

$$\Delta n_0 = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{M_2 P_a}{L_{AO} b}}, \quad (4)$$

где M_2 – коэффициент АО качества среды, P_a – мощность ультразвука, L_{AO} – длина АО взаимодействия, равная длине излучателя звука, b – ширина излучателя звука.

Схема АОФУ приведена на рис. 1. Исходный пучок света падает слева на АОФУ вдоль оси Oz . После АОФУ может располагаться дополнительная линза с фокусным расстоянием F . В отсутствие звука на экране, расположенном на расстоянии F от АОФУ, будет классическое распределение интенсивности вида $\text{sinc}^2(2\xi / d_{Airy})$, где d_{Airy} – диаметр пятна Эйри. В момент $t = T$, когда ЛЧМ импульс звука заполнил АОФУ, на экране расположенном на расстоянии F_{AO} от АОФУ будет сформировано дополнительное пятно с размером d_0 на расстоянии ξ , обусловленное АО дифракцией. Здесь F_{AO} – фокусное расстояние системы АОФУ и линзы.

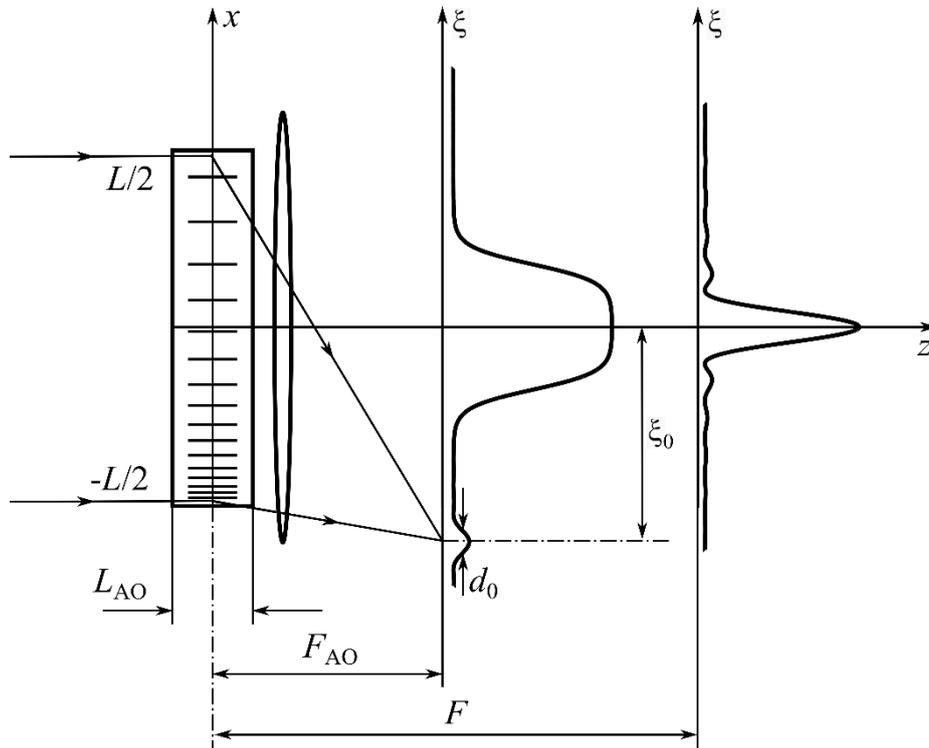


Рис. 1. Схема системы АОФУ с тонкой линзой

Дополнительная фаза пучка после АОФУ с бесконечно малой длиной АО взаимодействия имеет вид

$$\Phi(x) = \exp(ikL_{AO}n(x)), \quad (5)$$

где $k=2\pi/\lambda$ – волновое число излучения в вакууме.

Тогда, используя строгую модель дифракции Рэлея-Зоммерфельда, поле на экране можно найти следующим образом:

$$E(\xi, z) = -\frac{1}{2\pi} \int_{-L/2}^{L/2} E_{AO} \left(x, \frac{L_{AO}}{2} \right) \exp \left(-i \frac{\pi}{\lambda F} x^2 \right) \left(ik + \frac{1}{R} \right) \frac{\exp(ikR)}{R} K dx, \quad (6)$$

где предполагалось, что тонкая линза расположена непосредственно после АОФУ, и использованы следующие обозначения: $R = \sqrt{z^2 + (x - \xi)^2}$, $K = z/R$, E_{AO} – амплитуда поля после АОФУ.

При $L_{AO} = 0$ поле после АОФУ будет равно произведению $\Phi(x)$ и амплитуды исходного пучка $E_0(x)$. Будем называть это – модель «тонкого» АОФУ. При конечном значении L_{AO} поле

$E_{AO}(x, L_{AO}/2)$ после АОФУ мы предлагаем рассчитывать, как сумму полей от «тонких» АОФУ, которые в свою очередь рассчитываются с помощью модели дифракции Рэлея-Зоммерфельда.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Расчёты проводились для следующих значений параметров: $\rho = 6 \text{ г/см}^3$, $V = 4,3 \text{ км/с}$, $\lambda = 0,6 \text{ мкм}$, $n = 2,2$, $M_2 = 34 \times 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$, $P_a = 1 \text{ Вт}$, $L_{AO} = 0,5 \text{ мм}$, $b = 1 \text{ см}$, $T = 4 \text{ мкс}$, $L = VT = 17 \text{ мм}$, $f_1 = 600 \text{ МГц}$, $f_2 = 300 \text{ МГц}$. Предполагалось, что на АОФУ падает плоская волна света. Показано, что в рамках модели дифракции Рэлея-Зоммерфельда распределение нормированной интенсивности I_{norm} в фокальном пятне становится несимметричным, а учёт конечной толщины ещё больше усиливает эту асимметрию (см. рис. 2а). В тоже время было установлено, что при наклонном падении пучка на АОФУ можно добиться симметричной структуры пятна (см. рис. 2б).

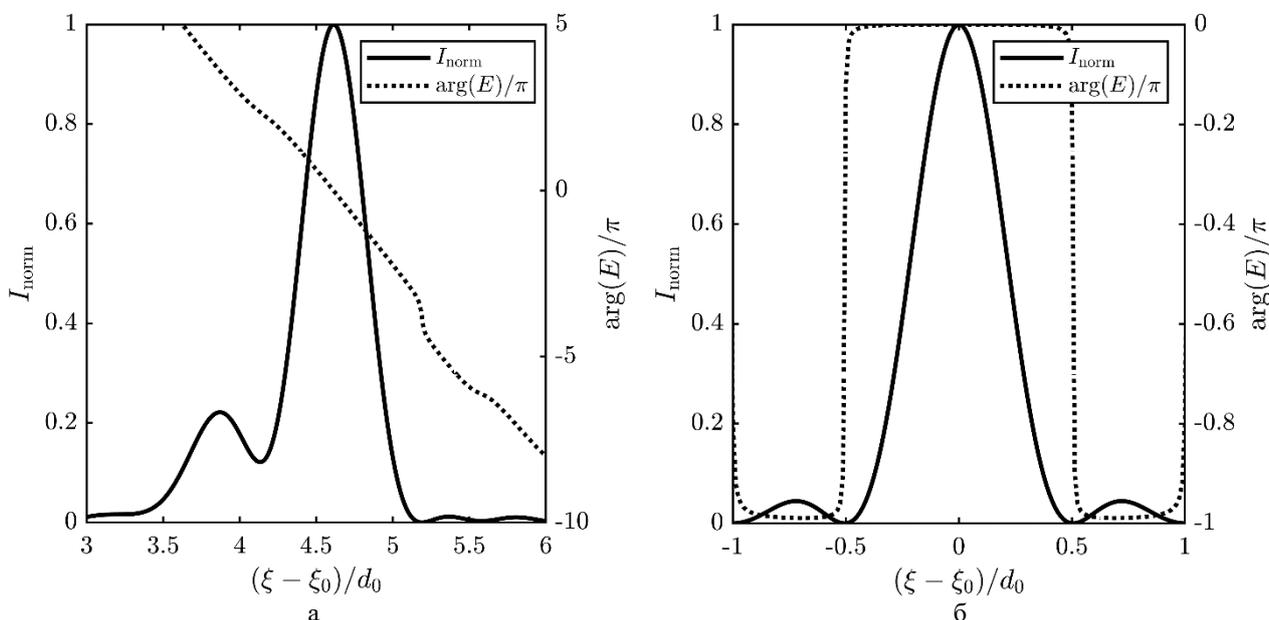


Рис. 2. Распределение фазы поля и интенсивности в фокальном пятне:
а – нормальное падение света, б – наклонное падение света

Из графиков следует, что полная ширина фокального пятна на полувывсоте в обоих случаях составляет около 12-13 мкм. Однако если ширину фокального пятна оценивать по уровню 84% от функции концентрации энергии (она показывает долю энергии внутри заданного диапазона координат), то в случае нормального падения она составляет 30 мкм, в то время как при наклонном падении – 17 мкм.

Суть предложенного решения по оптимизации АОФУ состоит в том, чтобы угол падения пучка был равен углу отклонения фокального пятна от оси исходного пучка. В этом случае фокальное пятно находится строго на серединном перпендикуляре к АОФУ, что обеспечивает симметрию его структуры в направлении оси $O\xi$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена усовершенствованная модель АОФУ, использующего ЛЧМ ультразвуковые импульсы. В результате расчёта установлено, что при наклонном падении света на АОФУ учёт конечной длины АО взаимодействия приводит к увеличению размера фокального пятна. Кроме этого, структура пятна является сильно асимметричной. Численное моделирование показало, что при правильном выборе угла падения света на АОФУ можно

получить симметричное фокальное пятно с минимальным размером, равным размеру фокального пятна для АОФУ с бесконечно малой длиной АО взаимодействия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Szulzycki K., Savaryn V., Grulkowski I.** Rapid acousto-optic focus tuning for improvement of imaging performance in confocal microscopy [Invited] // *Applied Optics*. 2018. Vol. 57. № 10. P. C14.
2. **Konstantinou G., Kirkby P.A., Evans G.J., Naga Srinivas Nadella K.M., Griffiths V.A., Mitchell J.E., Silver R.A.** Dynamic wavefront shaping with an acousto-optic lens for laser scanning microscopy // *Optics Express*. 2016. Vol. 24. № 6. Pp. 6283-6299.
3. **Sheppard C.J.R.** Cylindrical lenses – focusing and imaging: a review [Invited] // *Applied Optics*. 2013. Vol. 52. № 4. Pp. 538-545.
4. **Shan D., Wen A., Men Y., Chen C.** Photonics-based wideband multi-format tunable radar jamming signal generator // *Optics Communications*. 2024. Vol. 562. P. 130528.
5. **VanderLugt A., Bardos A.M.** Design relationships for acousto-optic scanning systems // *Applied Optics*. Optica Publishing Group, 1992. Vol. 31. № 20. Pp. 4058-4068.

Nikitin P.A.^{1,2}

¹ *Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation RAS, Russia, 117342, Moscow, Butlerova str., 15*

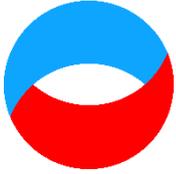
² *National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russia, 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14*

OPTIMISATION OF ACOUSTO-OPTIC FOCUSING DEVICE USING LINEARLY FREQUENCY MODULATED SOUND PULSE

ABSTRACT

A rigorous model of an acousto-optic focusing device using a linear frequency modulated sound pulse is presented. The model uses the Rayleigh-Sommerfeld integral, which most accurately accounts for diffraction effects. It is shown that at normal light incidence, the length (0.5 mm) of the acousto-optic interaction leads to a 1.3-fold increase in the size of the focal spot. It is established that the intensity distribution in the focal spot is asymmetric and strongly differs from the analytical solution for an infinitesimal length of the acousto-optic interaction. It is demonstrated that due to the oblique incidence of light it is possible to achieve not only symmetric intensity distribution in the focal spot, but also to reduce its size by a factor of 1.8.

ACOUSTO-OPTICS, DIFFRACTION, RADIATION, FOCUSING DEVICE



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 29.37.25; 535.44

Пожар В.Э.

*Научно-технологический центр уникального приборостроения
Российской академии наук (НТЦ УП РАН), Россия,
117342, Москва, ул. Бутлерова, 15, E-mail: vitold@ntcup.ru*

**ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ДИФРАКЦИИ СВЕТА НА АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ
В АКУСТООПТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ**

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены два вида классического описания взаимодействия света со звуковыми волнами: корпускулярное, как рассеяние фотонов на фонах, и волновое – с помощью приближения уравнений связанных волн. Отмечено, что хорошо известные свойства акустооптической дифракции, такие как энергообмен и «закон сохранения интенсивности световых потоков», справедливы при определённых условиях, которые обычно выполнены. Однако в особых случаях следует учитывать дополнительные особенности дифракции, а закон сохранения выполняется по отношению к числу частиц.

АКУСТООПТИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ, ДИФРАКЦИЯ БРЭГГА, РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ПОЛЯ, УРАВНЕНИЯ СВЯЗАННЫХ ВОЛН, ПОГРЕШНОСТЬ МОДЕЛИ

ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие света со звуковыми волнами хорошо описывается как качественно посредством условий Брэгга, представляющих собой, по сути, законы сохранения для рассеяния фотонов на фонах, так и количественно - с помощью уравнений связанных волн в приближении плоских волн [1]. Проблемы заключаются в том, что первый подход позволяет описывать трансформацию световых потоков на микроуровне, а потому только энергетические характеристики, а второй подход применим лишь для решения задач с нерасходящимися пучками (в безграничной среде). При необходимости отследить изменение пространственно-угловой структуры световых пучков, что требуется в задачах распространения неоднородных расходящихся пучков, несущих информацию об изображении объектов, вышеуказанные подходы не достаточны. В этом случае необходимо перейти от описания пучков в целом к локальному описанию, характеризующему распространение отдельных, парциальных пучков, причем с учетом фазовых соотношений между ними, т.е. их интерференции.

Причина, по которой не полностью адекватными оказываются методы рассеяния, заключается в том, что они представляют волны в виде потока несвязанных между собой частиц, фотонов и фононов, а рассеяние - случайным, так что весь процесс носит чисто статистический характер. Основная причина, почему классические лучевые методы оказываются неэффективными, заключается в распределенности акустооптического (АО) взаимодействия по пространству. А именно, каждый луч падающего светового потока непрерывно рассеивается по мере прохождения по неоднородной структуре, вызванной в

среде наличием акустических волн, и когерентно рассеянные волны складываются с образованием дифрагированных волн в дальней зоне. При этом спектральные изображения объекта, т.е. пространственное распределение яркости на разных длинах волн, в значительной мере сохраняются, что позволяет использовать АО фильтры для анализа спектральных (монохроматизированных) изображений.

В основе этих применений лежит поиск спектральных особенностей объекта наблюдения и их пространственная локализация, что невозможно осуществить без получения четких (неискаженных) изображений на разных длинах волн. Ввиду дисперсии свойств материалов, составляющих основу оптических приборов, трансформация спектральных изображений различна на разных длинах волн, а потому необходим прецизионный расчет хроматических искажений изображений при дифракции на ультразвуке, чтобы иметь возможность коррекции получаемых снимков.

Два метода можно выделить при необходимости точных расчетов. Первый приближение заданного поля падающей световой волны и решение находится интегрированием по всей области взаимодействия (пересечения с акустическим полем). Но этот случай подразумевает достаточно малый коэффициент дифракции, что для практики не представляет интереса. Второй случай – дифракция в квазиколлинеарной геометрии, в которой дифрагированный световой пучок идет по направлению падающего и задача становится одномерной [2-3]. Для этой геометрии, широко используемой на практике, разработаны даже аналитические алгоритмы трансформации, которые в виде расчетных модулей, могут применяться в составе инженерного программного обеспечения для прецизионного расчета оптических систем [4]. В связи с этим возникает вопрос, насколько точны сами уравнения связанных мод, лежащие в основе этих алгоритмов.

В работе рассматриваются две особенности дифракции света на акустических волнах, которые могут иметь значение при расчете: точность выполнения указанных уравнений и справедливость пренебрежения изменением числа фононов в процессе дифракции.

ПРИМЕНИМОСТЬ ПРИБЛИЖЕНИЯ МЕДЛЕННО-МЕНЯЮЩИХСЯ АМПЛИТУД

В основе описания дифракции световых потоков на акустических волнах (потоках) лежат укороченные уравнения связанных собственных мод [1], содержащие производные низшего порядка в приближении медленно меняющихся амплитуд волн E_α

$$\begin{aligned} dE_1/dx &= \Gamma E_2 \exp(ix\Delta k) \\ dE_2/dx &= \Gamma E_1 \exp(-ix\Delta k), \end{aligned} \quad (1)$$

в которых ключевую роль играют коэффициент связи Γ , определяемый амплитудой модуляции диэлектрической проницаемости $\Gamma = (\Delta\varepsilon/\varepsilon)k/4$, и волновая расстройка Δk , зависящая от длины волны света ($\lambda = 2\pi/k$) и определяющая эффективную длину взаимодействия $L_{\text{эфф}} \sim 1/\Delta k$.

Вид их решений, описывающий передачу энергии, сопровождаемый изменением интенсивности $I_\alpha = |E_\alpha|^2$, известен и при дифракции в обратном направлении имеет характер отражения на длине L акустооптического взаимодействия

$$I_{\text{отр}}(\Delta k=0) \equiv I_2(x=0) = I_{\text{пад}} \text{th}^2(\Gamma L), \quad (2)$$

тогда как при попутном рассеянии (дифракции)

$$I_{\text{диф}}(\Delta k=0) \equiv I_2(x=L) = I_{\text{пад}} \sin^2(\Gamma L), \quad (3)$$

имеет вид периодического энергообмена: $|E_1(x)|^2 + |E_2(x)|^2 = \text{const}$.

Один из принципиальных вопросов – точность самих уравнений, ограничивающая в принципе точность расчетов при их использовании.

Поскольку при их выводе пренебрегается членами со вторыми производными

$$d^2 E_\alpha / dx^2 \ll 2k \cdot dE_\alpha / dx, \quad (4)$$

то, подставляя решения (2) или (3), получаем условие применимости укороченных уравнений

$$\Gamma \ll 2k, \quad (5)$$

которое, с одной стороны, сводится к условию

$$\Delta \varepsilon / \varepsilon \ll 8, \quad (6)$$

выполняющемуся во всех равновесных средах, а с другой стороны, с учетом того, что существенный энергообмен или коэффициент дифракции имеет влияние, начиная с $\Gamma \sim 1/L$, неравенство (5) принимает вид

$$\lambda / L \ll 2\pi, \quad (7)$$

которое также очевидно выполняется.

Кроме вторых производных, при выводе уравнений (1) отбрасываются члены, не находящиеся в синхронизме с первой производной. И наименьшая расстройка у таких членов равна пространственной частоте ультразвука $Q_{\text{ак}} \equiv 2\pi / \Lambda_{\text{ак}}$. Условие, при котором этим членом можно пренебречь, выглядит подобно условию (7), а именно $\Lambda_{\text{ак}} / L \ll \pi$. Иными словами, оно сводится к требованию достаточно большого числа рабочих периодов УЗ решетки: $N_{\text{раб}} \equiv L / \Lambda_{\text{ак}} \gg 1$. Если в основе расчета лежит пошаговый алгоритм с разбиением вычислений на M шагов, относительная погрешность может как убывать ввиду усреднения, так и систематически возрастать: $p \equiv \Delta E / E \sim M^{1/2}$.

Оценим требования к степени выполнения условий (6) и (7). Предположим, что требуемая точность вычисляемой конечной величины, например амплитуды волны, составляет $p_{\text{фин}} \sim 0,1\%$, что не так уж много для количественных расчетов. Тогда при числе шагов $M \sim 100$ указанные величины $\Delta \varepsilon / \varepsilon$ и λ / L должны составлять 10^{-3} . Эти требования, как правило, выполняются с запасом (например, при $\lambda \sim 1$ мкм достаточно $L > 1$ мм). Однако, уже в длинноволновом диапазоне выполнение этого условия нуждается в проверке. То же относится к относительно легко сжимаемым средам, а также при больших акустических мощностях. В последнем случае необходимо, конечно, учитывать и иные эффекты, прежде всего акустическую нелинейность.

УЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Другой фактор, который не часто принимают во внимание при расчетах, изменение амплитуды акустического поля. При этом амплитуда может изменяться за счет поглощения ультразвука в среде, которое может быть особенно существенно на высоких частотах или за счет расходимости ультразвука, которая оказывает больше влияние на низких частотах, и приводит к неоднородности звукового поля в ближней («прожекторной») зоне акустического пьезоизлучателя. Если эти два фактора, достаточно подробно изучены, то еще один эффект никогда не принимается во внимание. Этот эффект связан с тем, что в каждом акте когерентного рассеяния («дифракции») фотона на фоне, последний поглощается,

$$\omega_{\text{пад}} + \Omega_{\text{ак}} \rightarrow \omega_{\text{диф}}, \quad (8)$$

а потому и количество фононов, а соответственно и мощность УЗ потока (интенсивность) уменьшается.

Оценим соотношение фотонов и фононов в типичной ситуации. При мощности акустической волны $P_{\text{ак}} = 1$ Вт и ее частоте $f_{\text{ак}} \equiv \Omega/2\pi = 100$ МГц поток фононов составляет

$$N_{\text{ак}} = P_{\text{ак}} / (hf_{\text{ак}}) \approx 1,5 \cdot 10^{25} \text{ фонон/с}, \quad (9)$$

где h – постоянная Планка. Предположим, что световой поток имеет такую же величину $N_{\text{опт}} = N_{\text{ак}}$. Тогда для фотонов на длине волны $\lambda_{\text{опт}} = 633$ нм мощность светового излучения составит

$$P_{\text{опт}} = N_{\text{опт}} \cdot hc / \lambda_{\text{опт}} = 5 \text{ МВт}, \quad (10)$$

где c – скорость света.

Таким образом, при такой не слишком высокой мощности света, число фотонов сравнимо с числом фононов и поскольку каждый дифрагирующий фотон поглощает один фонон, то при 100%-ной дифракции акустическая волна, а с ней и решетка должны были бы исчезнуть, что показывает в этом случае некорректность используемых представлений о дифракции на неизменном УЗ поле. Даже если в основе дифракции будет лежать противоположный процесс, а именно вынужденный распада фотона, при котором дифрагирующие фотоны рожают фононы

$$\omega_{\text{пад}} \rightarrow \Omega_{\text{ак}} + \omega_{\text{диф}}, \quad (11)$$

стандартный подход, в котором мощность ультразвука считается постоянной $P_{\text{ак}} = \text{const}$, является неверным. В этом случае необходимо учитывать изменение всех волн [5], т.е. к паре уравнений (1) нужно добавить уравнение изменения амплитуды акустической волны

$$dU_{\text{ак}}/dx = \Gamma' E_1 E_2 \exp(ix\Delta k), \quad (12)$$

где $\Gamma' \sim \Gamma$ – соответствующий перенормированный коэффициент связи. Решение этой нелинейной системы уравнений выражается, через эллиптические функции Якоби, а в качестве сохраняющейся величины - комбинацию $|E_1|^2/\omega_1 - |U_{\text{ак}}|^2/\Omega_{\text{ак}} = \text{const}$ (соотношения Мэнли-Роу), имеющую смысл закона сохранения числа частиц: $N_{\text{пад}} - N_{\text{ак}} = \text{const}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при расчете акустооптического взаимодействия в общем случае, например, при дифракции мощных световых импульсов, следует проверять ряд условий, которые обычно считаются выполненными автоматически.

Работа выполнена в рамках Государственного задания «Разработка мультиспектральных и гиперспектральных приборов и методов на основе акустооптических технологий» (FFNS-2025-0006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Акустооптические** процессоры спектрального типа / Под ред. В.В. Проклова, В.Н. Ушакова. М.: Радиотехника, 2012. 192 с.
2. **Пожар В.Э., Дьяконов Е.А.** Особенности широкоапертурной геометрии акустооптической спектральной фильтрации света // Оптические методы исследования потоков: Тез. докл. 17-й Межд. конф. М.: МЭИ, 2023. С. 477.

3. **Пожар В.Э., Дьяконов Е.А.** О формировании спектральной характеристики широкоапертурного акустооптического фильтра // Автометрия. 2024. Т. 60. № 5. С. 111-119.
4. **Machikhin A., Batshev V., Pozhar V.** Aberration analysis of AOTF-based spectral imaging systems // J. Optical Society America. 2017. A 34. № 7. Pp. 1109-1113.
5. **Шкердин Г.Н., Проклов В.В., Гуляев Ю.В.** К теории акустооптических явлений при большой интенсивности света // Физика твердого тела. 1977. Т. 19. № 2. С. 424-429.

Pozhar V.E.

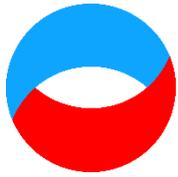
*Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation,
Russian Academy of Science, (STC UI RAS) Russia,
117342, Москва, ул. Бутлерова, 15, E-mail: vitold@ntcup.ru*

**SPECIFIC FEATURES OF LIGHT-BY-ULTRASOUND DIFFRACTION EFFECT
TO BE CONSIDERED IN ESTIMATION OF
ACOUSTO-OPTICAL DEVICES CHARACTERISTICS**

ABSTRACT

Two types of classical description of the interaction of light with sound waves are considered: the corpuscular formalism, which involves the scattering of photons on phonons, and the wave description, which uses the coupled-waves equations approximation. It is noted that the well-known properties of acousto-optical diffraction, such as energy exchange and the "light flux intensity conservation law," are valid under certain conditions that are typically met. However, in specific cases, additional features of diffraction should be considered, and the conservation law applies to the number of particles.

ACOUSTO-OPTICAL INTERACTION, BRAGG DIFFRACTION, CALCULATION OF OPTICAL FIELD DISTRIBUTION, COUPLED WAVE EQUATIONS, MODEL PRECISION



*Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.*

УДК 681.785.52

Поляков М.П.

*НТЦ УП РАН, Россия,
117342, Москва, Бутлерова ул., 15, E-mail: polyakov.mp@ntcup.ru*

**ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АКУСТООПТИЧЕСКИХ
ВИДЕОСПЕКТРОМЕТРОВ**

АННОТАЦИЯ

Акустооптические видеоспектрометры, равно как и другие приборы гиперспектральной визуализации, всё более широко применяются в различных областях науки и техники. Однако часто не удаётся использовать потенциал акустооптических видеоспектрометров, так как акустооптические перестраиваемые фильтры, являющиеся диспергирующим элементом акустооптического видеоспектрометра, имеют ряд недостатков и особенностей, которые существенно влияют на качество изображения и восстановление спектральных характеристик исследуемых объектов. Частично эти недостатки возможно устранить расчётом оптической системы видеоспектрометра, но для достижения высокой точности восстановления спектральных характеристик исследуемых объектов требуется программная коррекция получаемых гиперспектральных кадров. В данной работе рассмотрены типы искажений, вносимых акустооптическим перестраиваемым фильтром в изображение для различных архитектур оптических систем, а также методы минимизации данных искажений.

АКУСТООПТИЧЕСКИЙ ВИДЕОСПЕКТРОМЕТР, ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ, ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА, АКУСТООПТИЧЕСКИЙ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ФИЛЬТР, АБЕРРАЦИИ, ПРОСТРАНСТВЕННО-СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ

ВВЕДЕНИЕ

Акустооптические (АО) видеоспектрометры, как и другие гиперспектральные приборы, активно применяются в различных областях науки и техники [1-3]. Использование гиперспектральной аппаратуры и, в частности, АО видеоспектрометров охватывает огромное количество сфер, включая экологический мониторинг, геологические исследования, медицинскую диагностику, дистанционное зондирование и многое другое [4-7]. Гиперспектральная аппаратура предоставляет уникальные возможности для анализа и изучения различных объектов с высокой степенью спектральной и пространственной детализации.

Одними из ключевых преимуществ АО видеоспектрометров являются отсутствие механического сканирования по спектру и произвольная спектральная адресация, так как в качестве диспергирующего элемента используется акустооптический перестраиваемый фильтр (АОПФ). Эти свойства выгодно выделяют АОПФ на фоне классических спектральных приборов на дифракционных решётках и призмах.

Однако часто не удаётся использовать весь потенциал АО видеоспектрометров из-за ряда ограничений, связанных с их конструкцией и принципом работы. Особенности работы

АОПФ существенно влияют на качество изображения и восстановление спектральных характеристик исследуемых объектов, а также требуют особого подхода в проектировании АО видеоспектрометров.

СТРУКТУРА АО ВИДЕОСПЕКТРОМЕТРА

Как уже было сказано, основным элементом АО видеоспектрометра является АОПФ. Однако АО видеоспектрометр является сложным высокотехнологичным устройством, содержащим в себе большое количество оптических и электронных компонентов и узлов (рис. 1) [8].



Рис. 1. Обобщённая структурная схема АО видеоспектрометра

Остановимся подробнее на принципе работы АОПФ. Типичная последовательность действий оператора при работе с АО видеоспектрометром выглядит следующим образом: оператор отправляет команду на модуль управления АО монохроматором (далее – модуль), модуль генерирует управляющий высокочастотный (ВЧ) сигнал, усиливает его до необходимых значений мощности сигнала и отправляет на пьезопреобразователь АОПФ, который совершает механические колебания с частотой ВЧ-сигнала и, таким образом, внутри АОПФ распространяется ультразвуковая волна, которая в свою очередь формирует объёмную дифракционную решётку. Изменяя частоту управляющего ВЧ-сигнала, можно изменять пропускаемую АОПФ длину волны света.

Таким образом АОПФ является главным компонентом АО видеоспектрометра, формирующим спектральные кадры и последующий гиперспектральный куб данных, но при этом АОПФ является основным ограничивающим звеном АО видеоспектрометра. Остановимся на недостатках АОПФ подробнее.

НЕДОСТАТКИ АОПФ И МЕТОДЫ ИХ КОМПЕНСАЦИИ

Основными характеристиками АОПФ являются: ширина спектральной линии, рабочий спектральный диапазон, угловая и линейная апертуры, диапазон частот управляющего ВЧ сигнала, дифракционная эффективность [9]. Предельно достижимые значения каждой из этих

характеристик зависят от типа АО материала, используемого в АОПФ. Однако независимо от типа АО материала любой АОПФ будет обладать следующими недостатками:

- неравномерность дифракционной эффективности по рабочему спектральному диапазону;
- зависимость положения полосы пропускания от температуры;
- спектральный дрейф;
- уширение полосы пропускания при увеличении апертуры оптической системы (ОС);
- неравномерность спектрального пропускания по полю зрения при увеличении апертуры ОС;
- пространственные искажения связанные с дифракцией света на объёмной решётке.

Неравномерность дифракционной эффективности по рабочему спектральному диапазону может существенно влиять на яркость регистрируемых гиперспектральных данных и, как следствие, на достоверность восстанавливаемых спектральных характеристик. Указанная неравномерность связана с физическими особенностями работы АОПФ и электрической схемой согласования, обеспечивающей согласование импедансов усилителя и АОПФ. Чаще всего этот недостаток устраним простой калибровкой уровня мощности управляющего ВЧ-сигнала по рабочему спектральному диапазону АО видеоспектрометра.

Показатель преломления любого АО кристалла, как и других оптических компонентов, изменяется в зависимости от температуры. Рассмотрим следующее выражение, описывающее взаимосвязь показателя преломления АОПФ, частоты управляющего ВЧ-сигнала и пропускаемой АОПФ длины волны света:

$$\lambda = \frac{\Lambda}{f} \left(n_i \sin \theta_B^e - \sqrt{n_o^2 - n_i^2 \cos^2 \theta_B^e} \right), \quad (1)$$

где λ – пропускаемая АОПФ длина волны, f – частота управляющего ВЧ-сигнала, Λ – длина ультразвуковой волны в АОПФ, n_i и n_o – показатели преломления падающей (необыкновенной) и обыкновенной волн, соответственно, θ_B^e – угол Брэгга для необыкновенной (дифрагированной) волны.

Таким образом, учитывая (1), становится очевидно, что при изменении температуры АОПФ будет изменяться пропускаемая им длина волны света, что повлечёт за собой ошибки при восстановлении спектров с гиперспектральных данных. Данный недостаток может быть устранён введением спектральной калибровки АОПФ при различных температурах и дальнейшей программной коррекции при работе АО видеоспектрометра.

Остальные указанные недостатки АОПФ могут как проявляться, так и отсутствовать в АО видеоспектрометре, в зависимости от его ОС (табл. 1) [10].

Как видно из табл. 1 ни одна архитектура ОС не устраняет полностью пространственно-спектральные искажения вносимые АОПФ и требует их программной компенсации посредством калибровки.

Табл. 1. Особенности различных архитектур ОС используемых с АОПФ

Архитектура ОС	Преимущества	Недостатки
Одиночная коллимирующая	1. Простая архитектура схемы с малыми габаритными размерами и массой. 2. Простая абберационная коррекция. 3. Удобная сборка и юстировка.	1. Спектральный дрейф. 2. Неравномерность функции пропускания по полю зрения. 3. Малый контраст.

Продолжение табл. 1.

Архитектура ОС	Преимущества	Недостатки
Двойная коллимирующая	<ol style="list-style-type: none"> 1. Повышенное спектральное разрешение. 2. Практически полное отсутствие боковых лепестков. 3. Практически полная компенсация пространственно-спектральных искажений вносимых АОПФ. 4. Простая абберационная коррекция. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Малая светосила. 2. Большие габаритные размеры и масса. 3. Неравномерность функции пропускания по полю зрения. 4. Повышенные требования к настройке электрической схемы управления АО монохроматором.
Одиночная телецентрическая	<ol style="list-style-type: none"> 1. Простая архитектура схемы с малыми габаритными размерами и массой. 2. Практически полная компенсация пространственно-спектральных искажений вносимых АОПФ. 3. Равномерная функция пропускания по полю зрения. 4. Удобная сборка и юстировка. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Спектральный дрейф. 2. При увеличении светосилы ухудшается спектральное разрешение. 3. Малый контраст, при работе без пространственного разнесения дифрагированного и недифрагированного пучков лучей.
Двойная телецентрическая	<ol style="list-style-type: none"> 1. Простая архитектура схемы с малыми габаритными размерами и массой. 2. Практически полная компенсация пространственно-спектральных искажений вносимых АОПФ. 3. Равномерная функция пропускания по полю зрения. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Спектральный дрейф. 2. При увеличении светосилы ухудшается спектральное разрешение. 3. Неравномерность освещённости в изображении. 4. Малый контраст, при работе без пространственного разнесения дифрагированного и недифрагированного пучков лучей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на существующие ограничения при проектировании, связанные с особенностями работы АОПФ, АО видеоспектрометры имеют огромную перспективу для использования. Основные недостатки АОПФ могут быть компенсированы программными и аппаратными методами на этапах проектирования и сборки АО видеоспектрометра с минимальными затратами. Дальнейшее развитие и усовершенствование АО видеоспектрометров будет способствовать расширению областей их применения и повышению эффективности работы.

Работа выполнена в рамках Государственного задания «Разработка мультиспектральных и гиперспектральных приборов и методов на основе акустооптических технологий» (FFNS-2025-0006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Pozhar V.E. et al.** Technical implementation of acousto-optical instruments: basic types // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. Vol. 1421. № 1. 2019. P. 012058.
2. **Machikhin A. et al.** Acousto-optic tunable spectral filtration of stereoscopic images // Optics Letters. Vol. 43. № 5. 2018. Pp. 1087-1090.
3. **Епихин В.М. и др.** Акустооптические спектрометры изображения видимого и ближнего ИК диапазонов // Физические основы приборостроения. Т. 2. № 4. 2013. С. 116-125.
4. **Bhargava A. et al.** Hyperspectral imaging and its applications: A review // Heliyon. Vol. 10. № 12. 2024.
5. **Yoon J.** Hyperspectral imaging for clinical applications // BioChip Journal. Vol. 16. № 1. 2022. Pp. 1-12.
6. **Gu Y. et al.** Multimodal hyperspectral remote sensing: an overview and perspective // Science China Information Sciences. Vol. 64. 2021. P. 121301.
7. **Faltynkova A. et al.** Hyperspectral imaging as an emerging tool to analyze microplastics: A systematic review and recommendations for future development // Microplastics and Nanoplastics. Vol. 1. 2021. P. 13.
8. **Поляков М.П.** Метод проектирования акустооптических видеоспектрометров // Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации: Труды XVI Международной научно-технической конференции. Москва, 2023. С. 105-109.
9. **Магдич Л.Н., Молчанов В.Я.** Акустооптические устройства и их применение. М: Радио и связь, 1978. 111 с.
10. **Batshev V. et al.** Spectral imaging experiments with various optical schemes based on the same AOTF // Materials. Vol. 14. № 11. 2021. P. 2984.

Poliakov M.P.

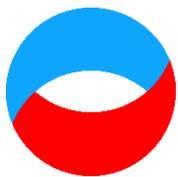
STC UI RAS, Russia,
117342, Moscow, Butlerova st., 15, E-mail: polyakov.mp@ntcup.ru

FEATURES OF DESIGNING ACOUSTO-OPTIC IMAGING SPECTROMETERS

ABSTRACT

Acousto-optic imaging spectrometers, as well as other hyperspectral imaging devices, are increasingly used in various fields of science and technology. However, it is often impossible to use the potential of acousto-optic imaging spectrometers, since acousto-optic tunable filters, which are the dispersive element of the acousto-optic imaging spectrometer, have several disadvantages and features that significantly affect the image quality and the restoration of the spectral characteristics of the investigation objects. These disadvantages can be partially eliminated by computation the optical system of the imaging spectrometer, but to achieve high accuracy of restoration of the spectral characteristics of the investigation objects, software correction of the resulting hyperspectral frames is required. This paper examines the types of distortions introduced by an acousto-optic tunable filter into an image for various optical system architectures, as well as methods for minimizing these distortions.

ACOUSTO-OPTIC IMAGING SPECTROMETER, OPTICAL SYSTEM DESIGN, OPTICAL SYSTEM, ACOUSTO-OPTIC TUNABLE FILTER, ABERRATIONS, SPATIAL-SPECTRAL DISTORTIONS



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 535.233, 536.521

Балашова А.М., Лапицкий К.М., Печинская О.В.

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: almbalash@yandex.ru*

**МАКЕТ ПИРОМЕТРА НА ОСНОВЕ АОФ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ
ГОРЕНИЯ ГАЗОВОГО ПЛАМЕНИ**

АННОТАЦИЯ

В современных научных исследованиях и промышленности существует потребность в точном определении температуры исследуемого объекта. Например, в разработке и эксплуатации авиационных двигателей, дефектоскопии, в задачах контроля качества промышленного оборудования. Наиболее востребованными при измерении высоких температур являются бесконтактные оптические методы. В данной работе рассмотрена задача по бесконтактному определению температуры пламени газовой горелки по излучению одного из его компонентов – водяного пара. Именно его группы линий спектра удобно регистрировать и выделять с помощью спектроделителя в пирометрах спектрального отношения и мультиспектральных пирометрах. В ходе работы был собран и отъюстирован макет пирометра на основе акустооптического фильтра ближнего ИК-диапазона, позволяющий измерять температуру пламени по спектру излучения паров воды, находящихся за пределами излучательной способности сажи, что позволяет снизить влияние излучения частиц сажи на результаты измерений. Данная установка, собранная авторами, позволяет проводить регистрацию фотосигнала в диапазоне длин волн от 1000 нм до 1700 нм. Регистрация излучения проводилась на основе метода мультиспектральной пирометрии, что позволяет измерять температуру без предварительной информации о спектральном коэффициенте излучательной способности исследуемого объекта.

В результате исследования были определены спектральные интервалы, в которых следует проводить измерения температуры ламп накаливания и пламени горелки. Были получены температуры нити накала лампы при различных электрических мощностях, а также получены температуры пламени газовой горелки при различных режимах подачи топлива.

АКУСТООПТИЧЕСКИЙ ФИЛЬТР, МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНАЯ ПИРОМЕТРИЯ

ВВЕДЕНИЕ

Оптическая пирометрия основана на измерении температуры поверхности по собственному тепловому излучению. Тепловое электромагнитное излучение испускается телами, имеющими температуру больше 0 К, в результате изменения энергетических состояний электронов и ионов, входящих в состав излучающего тела. Тепловое излучение всех тел описывается двумя основными законами – закон Кирхгофа и закон Планка. Чем выше температура тела, тем сильнее кривая спектральной плотности мощности излучения абсолютно чёрного тела (АЧТ) смещается влево. Однако спектр теплового излучения объектов зависит не только от их температуры, но и от излучательной способности. Эта величина

определяется физическими свойствами объекта и микроструктурными характеристиками его поверхности, характеризует отличие его спектра от спектра АЧТ и в общем случае зависит как от длины волны, так и от температуры. Для некоторых материалов известно значение излучательной способности в некоторых спектральных и температурных диапазонах, для других установлены более общие закономерности, однако универсальной модели, описывающей зависимость излучательной способности от длины волны и температуры, не существует. Для многих материалов не существует и вовсе каких-либо экспериментальных данных. Это приводит к необходимости при моделировании и расчетах задавать значение излучательной способности практически произвольно, что неизбежно приводит к погрешности определения температуры. Однако существует метод, позволяющий оценить температуру газового потока по излучению его компонент, чему посвящена настоящая работа [1].

В рамках данной работы будет рассмотрен способ измерения температуры горения газового пламени, позволяющий не учитывать излучательную способность [2, 3]. В работе применялся перестраиваемый спектральный фильтр, а именно акустооптический, что позволило применить метод многоспектральной пирометрии, обеспечивающей меньшую погрешность измерения температуры, чем иные методы оптической пирометрии [2].

АКУСТООПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОМЕТРИЯ

Современные направления спектрального анализа требуют от приборов высокой производительности и многофункциональности при минимизации габаритных размеров, массы, энергопотребления и стоимости. Наиболее универсальным и гибким методом является применение схем на основе перестраиваемых спектральных фильтров. Установлено, что среди таких фильтров наиболее перспективными являются акустооптические, обеспечивающие высокое быстродействие, интерактивное управление формой аппаратной функции и другие преимущества.

В основе акустооптического (АО) взаимодействия излучения лежит его дифракция на фазовой дифракционной решетке, образованной в среде акустической волной за счет эффекта фотоупругости. Для узкополосной спектральной фильтрации излучения используют режим дифракции Брэгга, в котором все максимумы дифракционной картины, кроме 0-го и 1-го, становятся пренебрежимо малыми.

Акустооптические перестраиваемые фильтры имеют сравнительно небольшие световой размер и угловую апертуру, а также сравнительно невысокое спектральное разрешение. Эти факторы ограничивают основные характеристики АО спектральных приборов. Однако существуют методы преодоления указанных ограничений. Для повышения спектрального разрешения и устранения влияния дисторсии и хроматического сдвига на качество изображения применяют двойную АО фильтрацию [4].

Существует ряд работ, доказывающий принципиальную возможность оценки распределения температуры с помощью акустооптического перестраиваемого фильтра, однако метод всё ещё требует доработки. Что касается измерения температуры объектов, то зачастую спектральная пирометрия применяется для измерения температуры нагретых твердых тел, а не температуры пламени, оптические свойства которого существенно отличаются от свойств твердых тел. Известен подход к измерению температуры пламени спектральными методами по излучению частиц сажи, которые в свою очередь являются твердыми частицами, и распределение их спектральной плотности светимости подчиняется распределению Планка [2]. В рамках настоящей работы предполагается осуществлять измерение температуры пламени по спектру излучения паров воды в диапазоне длин волн, выходящему за пределы максимума излучательной способности сажи, что позволит снизить влияние излучения этих частиц на результаты измерений. В спектральной пирометрии при наблюдении выражения $\lambda \cdot T < 3 \cdot 10^{-3} \text{ К} \cdot \text{м}$ преобразуют приближение Вина, выводимое из законов Кирхгофа и Планка, в формулу

$$\ln(I(\lambda, T)\lambda^5) = -\frac{C_2}{T \cdot \lambda} + \ln(\varepsilon(\lambda, T) \cdot C_1), \quad (1)$$

где h – постоянная Планка, c – скорость света, k – постоянная Больцмана, $C_1 = 3,7415 \cdot 10^{-16}$ Вт · м² – первая константа излучения, $C_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2}$ м · К – вторая константа излучения, $\varepsilon(\lambda, T)$ – коэффициент спектральной излучательной способности.

Сигнал макета многоканального спектрометра зависит как от распределения спектральной плотности светимости, так и от параметров оптико-электронной системы, часть из которых является функцией длины волны проходящего излучения. В приближении узкого спектрального интервала $\Delta\lambda$ можно записать (2)

$$V(\lambda, T) = R \cdot S_I(\lambda) \cdot \varphi'_e(\lambda, T) \cdot \Delta\lambda, \quad (2)$$

где $V(\lambda, T)$ – напряжение фотосигнала, R – сопротивление нагрузки, $S_I(\lambda)$ – абсолютная токовая спектральная чувствительность фотодиода, $\varphi'_e(\lambda, T)$ – спектральная плотность потока на приёмной площадке приемника, $\Delta\lambda$ – полоса пропускания АОФ.

В свою очередь спектральная плотность мощности определяется спектральной плотностью светимости и, при отсутствии виньетирования, площадью источника и передним апертурным углом оптической системы

$$\varphi'_e(\lambda, T) = \tau(\lambda) \cdot m_e(\lambda, T) \cdot \sin^2 \sigma_A \cdot S_{ист}, \quad (3)$$

где $\tau(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания, $m_e(\lambda, T)$ – спектральная плотность светимости реального излучателя, σ_A – передний апертурный угол, $S_{ист}$ – площадь источника излучения.

При использовании диафрагмы необходимо учесть уменьшение потока пропорционально телесному углу, в который распространяется излучение после диафрагмы, тогда

$$\varphi'_e(\lambda, T) = \frac{\tau(\lambda) \cdot m_e(\lambda, T) \cdot \sin^2 \sigma_A \cdot S_{ист} \cdot S_d}{4 \cdot \pi \cdot r^2}, \quad (4)$$

где S_d – площадь отверстия диафрагмы, r – расстояние от источника до диафрагмы.

С использованием (2) и (4) получим следующее выражение для спектральной плотности светимости

$$m_e(\lambda, T) = \frac{V(\lambda, T) \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2}{R \cdot S_I(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot \sin^2 \sigma_A \cdot S_{ист} \cdot S_d \cdot \Delta\lambda}, \quad (5)$$

С учетом полученного выражения преобразуем (1) и получим основное расчетное соотношение

$$\ln \left[\lambda^5 \frac{V(\lambda, T)}{S_I(\lambda) \tau(\lambda) \Delta\lambda} \right] = -\frac{C_2}{\lambda \cdot T} + \ln[C_1 \cdot \varepsilon(\lambda, T)] - \ln \left[\frac{4 \pi r^2}{R \sin^2 \sigma_A S_{ист} S_d} \right]. \quad (6)$$

Как видно, измеренный сигнал необходимо скорректировать с учетом спектральной чувствительности приёмника, спектрального коэффициента пропускания оптической системы и спектральной полосы, которая имеет квадратичную зависимость от длины волны [2]. Второе и третье слагаемое в правой части уравнения отвечают только за постоянное смещение прямой и не изменяют ее наклон, поэтому не влияют на результат определения температуры. Для точных измерений температуры необходимо проводить калибровку пространственных и спектральных искажений, вносимых АОФ.

МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

На основе принципов, описанных во 2 разделе данной работы, были выбраны комплектующие для реализации всех блоков (модулей) пирометра.

Первые измерения проводились на удобном для исследовательских задач по тепловому излучению объекте – лампе накаливания с вольфрамовой нитью. Благодаря особенностям работы лампы накаливания существует возможность регистрации сигнала без существенной переработки узла ввода излучения многоканального пирометра, а также быстрой регулировки мощности источника в рабочем диапазоне температур. Однако в рамках данной работы не предусмотрена калибровка, а информация о реальном спектре пропускания фильтра не известна, поэтому оценка работоспособности проводилась по качественному изменению зависимости напряжения фотосигнала от длины волны.

Данная работа является дальнейшим развитием макета пирометра спектрального отношения, разработанного на базе интерференционных фильтров. Было принято решение заменить интерференционные фильтры на акустооптический фильтр. Первый этап тестовых измерений проводился для одиночного монохроматора на основе акустооптического фильтра (АОФ) в схеме с параллельным ходом лучей. При работе с неполяризованным излучением для выделения рабочего порядка дифракции совместно с акустооптической ячейкой применяют два скрещенных поляризатора. При этом расположение дифрагированного пучка относительно 0-го порядка зависит от ориентации плоскости поляризации падающего пучка. На рис. 1 показана схема измерений с одиночным монохроматором в параллельных пучках. Световой пучок попадает на первый поляризатор, отсекающий одну из световых компонент. Далее происходит дифракция света в акустооптическом фильтре. Полученные два световых пучка проходят через второй поляризатор, и на приёмник излучения попадает свет, соответствующий первому порядку дифракции.

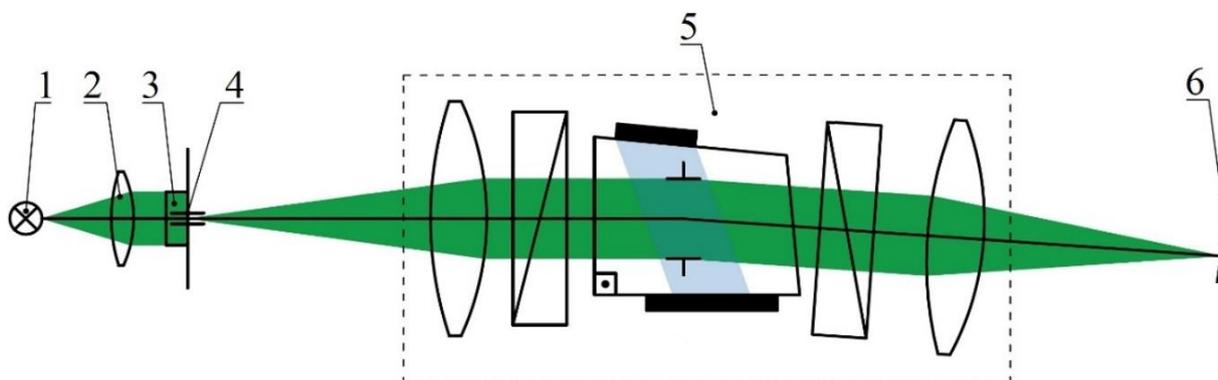


Рис. 1. Схема измерений с одиночным монохроматором в параллельных пучках:
1 – лампа, 2 – линза, 3 – матовое стекло, 4 – диафрагма, 5 – акустооптический монохроматор

Оптическая ось системы при этом отклоняется от оси падающего пучка на угол немногим более 1° (зависит от выделяемой длины волны). Угол между выходящими пучками составляет порядка 4° . Второй поляризатор, как и вся последующая часть оптической системы устанавливается нормально к оптической оси дифрагированного пучка. Выходная линза монохроматора 5 фокусирует пучок на фоточувствительную площадку фотодиода 6.

Внешний вид монохроматора на основе АОФ показан на рисунке 2. В качестве источника использовался осветитель (ИИ) из состава оптической скамьи, снабжённый матовым рассеивающим стеклом и диафрагмой. Лампа К12-90 запитывалась от лабораторного источника питания Mastech NY3005D-2 для того, чтобы иметь возможность регулировать мощность источника, а также контролировать ток в цепи лампы и напряжение питания.

Диафрагма установлена в фокальной плоскости линзы (Л1) с фокусным расстоянием 25 мм. Размер диафрагмы определялся полем зрения АОФ и составил 1,75 мм при угловом поле $\pm 2^\circ$ и фокусном расстоянии линзы 25 мм. Управление АОФ осуществлялось с помощью

входящего в комплект поставки высокочастотного (ВЧ) драйвера. В работе использовались идентичные поляризаторы (П1, П2) ThorLabs LPIREA100-C, предназначенные для работы в диапазоне длин волн от 1050 нм до 1700 нм.

В тубусе, соединённом с оправой поляризатора, установлена линза (Л2) ThorLabs LBF254-050 с фокусным расстоянием 50 мм, фокусирующая пучок на чувствительной площадке фотодиода (ФД) Thorlabs FGA21. Фотодиод также крепится в тубусе с помощью резьбового адаптера. Это позволяет, при необходимости, перемещать фотодиод вдоль оптической оси линзы. Оправа выходного поляризатора неподвижно закреплена на поворотном столике. Благодаря этому при повороте столика линза и фотодиод не смещаются друг относительно друга, а поворачиваются вслед за поляризатором. Поскольку ось вращения столика не совпадает осью поворота оптической оси, столик с закрепленным на нем поляризатором, выставляется не строго на основную оптическую ось, а с небольшим смещением. В силу малости углов, большой ошибки при регистрации сигнала смещение осей не вызывает. Поиск дифрагированного пятна осуществлялся по максимуму отклика на текущей длине волны, выделяемой АОФ. В дальнейшем при перестройке длин волн контролировался возможный уход фокального пятна с фоточувствительной площадки фотодиода. Сигнал с фотодиода через усилитель из комплекта макета МПСО регистрировался осциллографом RIGOL MSO2302A.

Следует учесть, что АОФ располагается обычно в выходном зрачке ПОС. Выполнение этого требования позволяет минимизировать габариты пучков на входной и выходной гранях кристалла, тем самым не будет теряться значительная часть излучения на входе в АОФ. Кроме того, при работе с нагретыми твердыми телами следует учитывать смещение максимума спектральной излучательной способности в область более коротких длин волн. Так, при нагреве от 1500 К до 2000 К максимум спектра излучения смещается от 2 мкм к 1,5 мкм.

Вопрос выбора оптимального рабочего диапазона длин волн рассматривается в рамках настоящей работы. При этом требование ахроматизации оптической системы на две рабочие длины волны должно быть выполнено после уточнения их значений. Ожидается, что выбор оптимального расположения рабочих длин волн позволит улучшить точность измерения температуры за счет снижения случайной составляющей погрешности.

Акустооптический фильтр производства НТЦ УП РАН предназначен для выделения заданных узкополосных спектральных интервалов из падающего оптического излучения в пределах рабочего спектрального диапазона длин волн.

Принцип действия АОФ основан на брэгговской дифракции оптического излучения на объемной динамической решетке, создаваемой ультразвуковой волной [5]. В состав АОФ входит кристалл, изготовленный из TeO_2 , закрепленный на металлическом основании, представляющим собой корпус АОФ. Внутри кристалла с помощью ультразвуковой волны, формируемой акустическим излучателем, присоединенным к кристаллу, создается объемная дифракционная решетка, на которой осуществляется анизотропная дифракция проходящего через кристалл оптического излучения. Перестройка АОФ по спектру осуществляется путем изменения периода решетки, определяемого частотой ВЧ электрического сигнала, подаваемого на акустический излучатель.

При оптимальном выборе длин волн точность измерения температуры методом спектральной пирометрии становится выше. В частности, группировка рабочих длин волн в начале и конце диапазона измерений предпочтительнее эквидистантного расположения длин волн при сканировании по спектру, так как при этом удаётся снизить случайную составляющую погрешности определения температуры на 30%÷50%. Это даёт возможность улучшить абберрационные характеристики оптической системы, так как достаточно будет исправить хроматизм на двух длинах волн, а не в пределах всего диапазона измерений. Рабочий диапазон длин волн пирометра ограничен в первую очередь характеристиками оптических элементов. Например, в макете МПСО снизу диапазон ограничен свойствами поляризатора и начинается с 1050 нм. Сверху ограничен как диапазоном работы поляризатора, так и диапазоном перестройки АОФ, и составляет 1700 нм. В то же время, как показали

тестовые измерения, начиная с длины волны 1540 нм наблюдается падение сигнала вследствие падения спектральной чувствительности приемника. При достаточной точности измерений диапазон можно было бы ограничить 1500 нм. Измерения предпочтительно проводить на восходящей ветви планковской кривой.

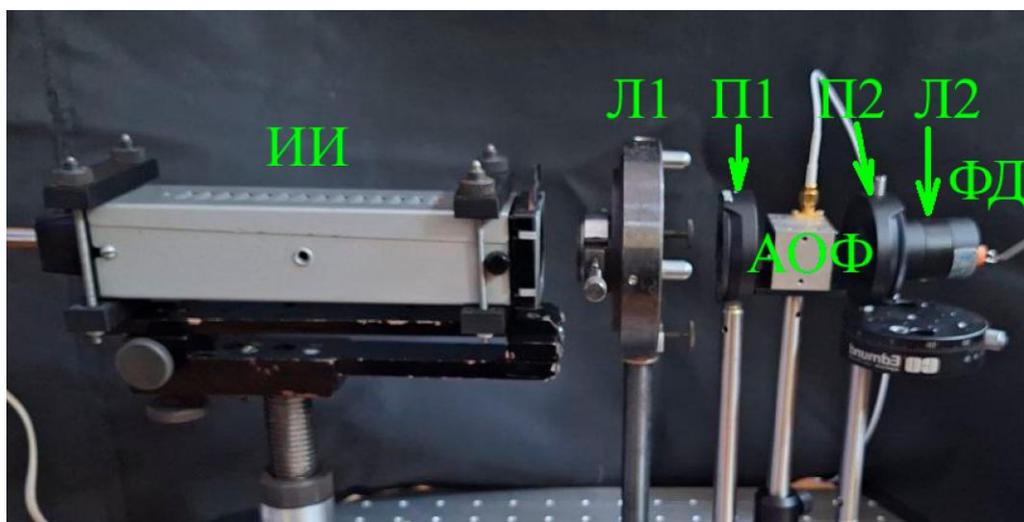


Рис. 2. Схема измерений с одиночным монохроматором в параллельных пучках:
ИИ – источник излучения, Л1, Л2 – линзы, П1, П2 – поляризатор, АОФ – акустооптический фильтр, ФД – фотодиод

В рамках работы было проведено несколько серий измерений температуры как лампы накаливания, так и горения газового пламени. На основе полученного фотосигнала были проведены расчёты, в рамках которых были учтены характеристики оптической системы, в том числе коэффициенты пропускания всех оптических элементов. Данные о спектре излучения лампы были построены в координатах Вина. Был выделен линейный участок в данных координатах, к которому были созданы аппроксимирующие прямые для каждой кривой. Для произведения серии измерений зависимости напряжения от длины волны газового пламени источник излучения был заменён с лампы накаливания на газовую горелку.

На основе полученных данных был сделан вывод, что оптимальным диапазоном при измерении температуры спирали лампы накаливания является диапазон от 1020 нм до 1340 нм. В табл. 1 занесены данные эксперимента с лампой накаливания.

Табл. 1. Данные экспериментов с лампой накаливания

Р, Вт	Т, К
31,5	1962
29,16	2021
27,13	1897
23,45	1855

На рис. 3 показаны зависимости напряжения от длины волны для лампы накаливания, а на рис. 4 – линейный участок в координатах Вина. Стоит уточнить, что измерение, соответствующие мощности 29,16 Вт, с лампой было проведено после повторной юстировки оптической системы.

Далее из величины угла наклона прямых были высчитаны температуры. Диапазон определённых температур для лампы накаливания составляет от 1855 до 2021 К, что соответствует ожидаемым температурам.

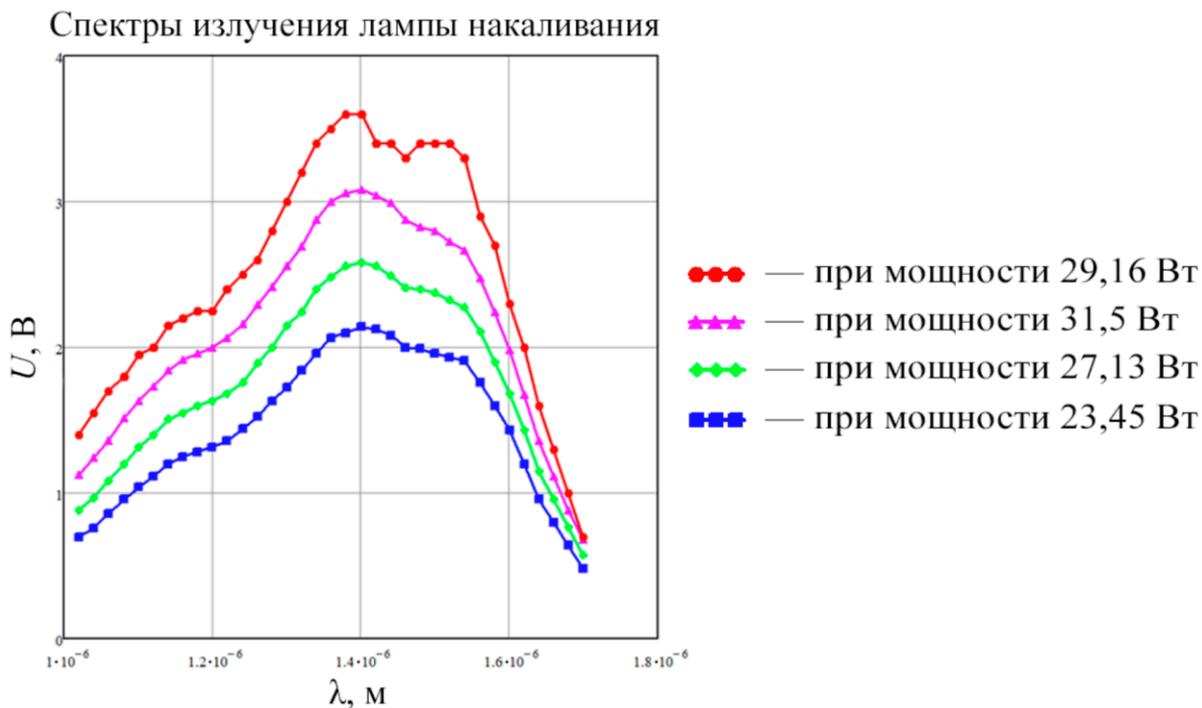


Рис. 3. Зависимость напряжения от длины волны при эксперименте с лампой накаливания

Спектры излучения лампы в координатах Вина

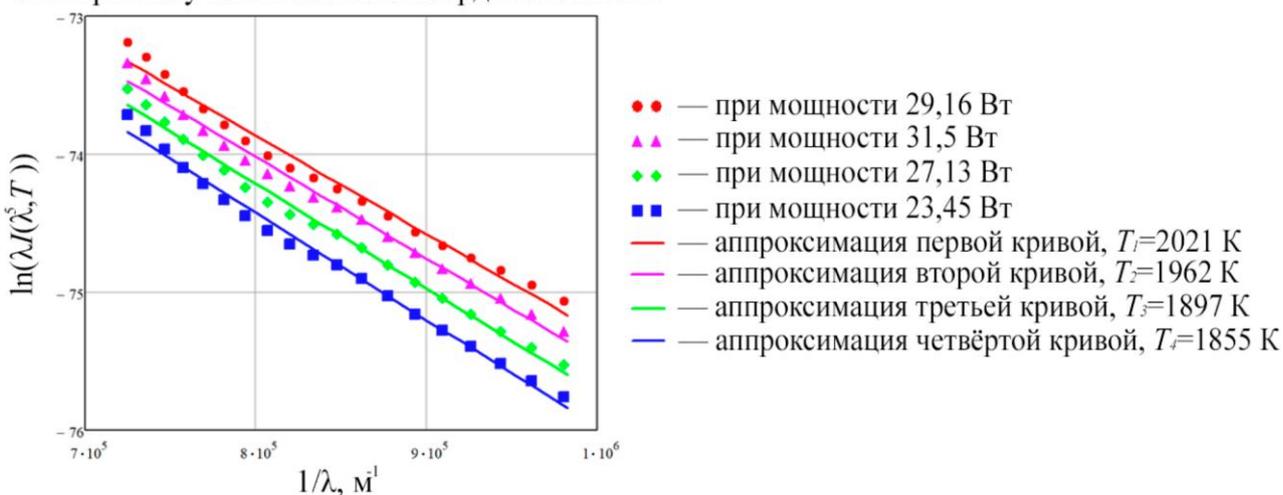


Рис. 4. Результаты экспериментов с лампой накаливания в координатах Вина

Для перехода к непосредственному измерению температуры углеводородного пламени в экспериментальной установке был заменён источник излучения – вместо лампы накаливания с вольфрамовой нитью использовалась газовая горелка для создания пламени. На рисунке 5 показана измеренная зависимость напряжения от длины волны при эксперименте с газовым пламенем. На рисунке 6 показан выбранный участок для аппроксимации линейной функции.

Из величины угла наклона прямых были высчитаны температуры. Диапазон температур для углеводородного пламени составляет от 611 до 1015 К, что соответствует ожидаемым температурам. На основе полученных данных был сделан вывод, что оптимальным диапазоном при измерении температуры пламени газовой горелки является диапазон от 1300 нм до 1450 нм. Однако, так как спектр излучения пламени сильно отличается от планковской кривой, существует необходимость в усовершенствовании метода.

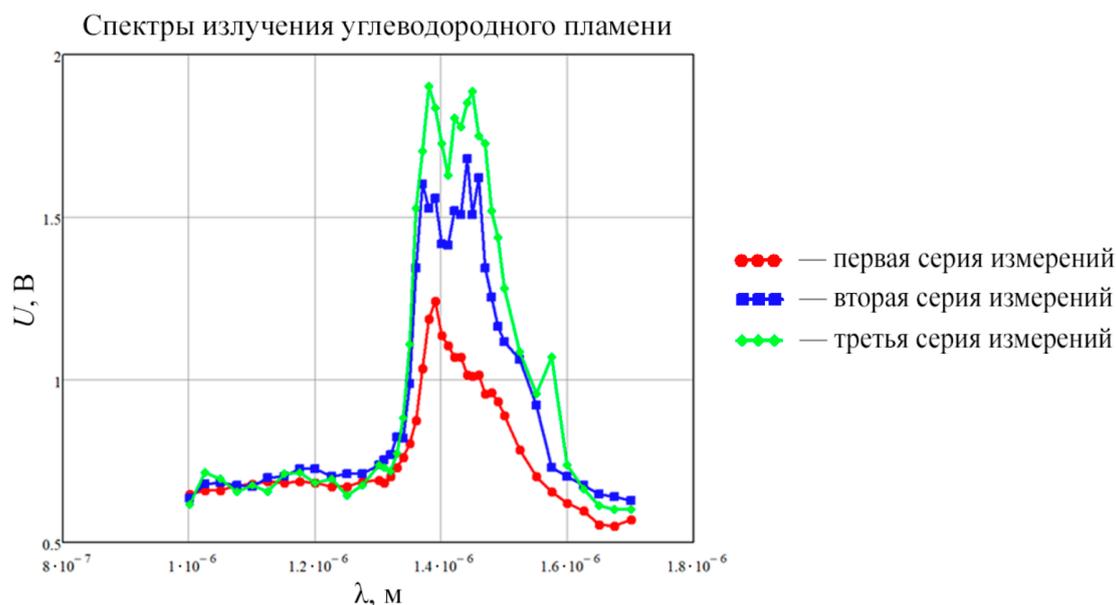


Рис. 5. Зависимость напряжения от длины волны при эксперименте с газовым пламенем

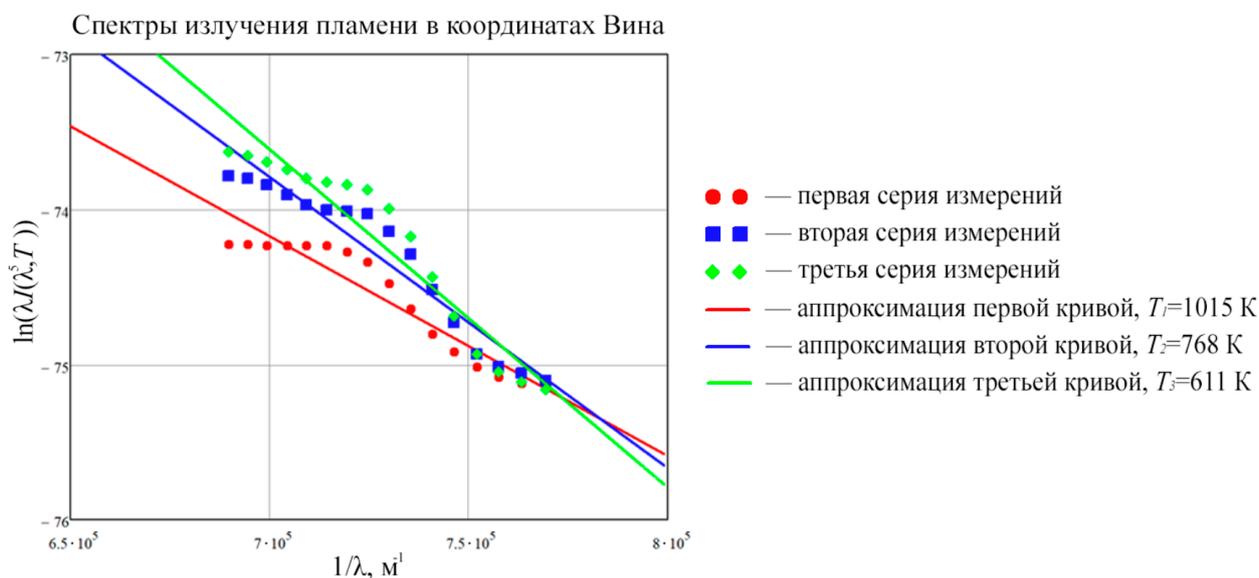


Рис. 6. Результаты экспериментов с газовым пламенем в координатах Вина

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был собран макет многоканального пирометра на основе акустооптического фильтра. С его помощью был проведён ряд экспериментов, направленных на определение температуры исследуемого источника излучения – лампы накаливания и пламени газовой горелки.

В результате исследования были получены данные о зависимости напряжения фотосигнала от длины волны излучения, а также определён диапазон измерений и проведена оценка температур для лампы накаливания. Диапазон температур лампы накаливания, полученный описанным методом, составляет от 1855 К до 2021 К, что соответствует ожидаемым температурам. На основе полученных данных был сделан вывод, что оптимальным диапазоном при измерении температуры спирали лампы накаливания является диапазон от 1020 нм до 1340 нм.

Была получена зависимость напряжения фотосигнала от длины волны излучения углеводородного пламени при разном режиме подачи топлива, а также определён диапазон измерений и проведена оценка температур для пламени. Определено, что диапазон длин волн,

подходящий для измерений температуры газового пламени, составляет от 1300 нм до 1450 нм, а диапазон температур составляет от 611 К до 1015 К. Однако, поскольку спектры не в полной мере соответствуют планковским кривым, метод определения температуры требует дальнейшей проработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сахаров В.Б.** Пирометр спектрального отношения для определения температуры газовых потоков / В.Б. Сахаров, М.А. Садовин // Мир измерений. 2013. Т. 10. С. 13-16.
2. **Сенюев И.В.** Развитие методов пирометрии применительно к аэродинамическому эксперименту: автореф. дис. ... канд. техн. наук. 05.07.01, ЦАГИ, Жуковский, 2020. 26 с.
3. **Быков А.А.** Применение акустооптической видеоспектрометрии для бесконтактного определения пространственного распределения температуры: дис ... канд. тех. наук: 05.11.13; НИУ МЭИ. Москва, 2021. 111 с.
4. **Поляков М.П., Батшев В.И., Мачихин А.С., Пожар В.Э.** Унифицированная оптическая система акустооптического видеоспектрометра видимого диапазона спектра // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 11. С. 62-70.
5. **Beliaeva A.S., Batshev V.I.** Computer modelling of acousto-optical diffraction in optical systems design // Proceedings of SPIE. 2020. Vol. 11548. P. 1154814.

Balashova A.M., Lapitsky K.M., Pechinskaya O.V.

*National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: almbalash@yandex.ru*

A MODEL OF A PYROMETER BASED ON AOTF FOR MEASURING THE COMBUSTION TEMPERATURE OF A GAS FLAME

ABSTRACT

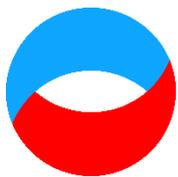
In modern scientific research and industry, there is a need to accurately measure the temperature of the object under study. For example, in the development and operation of aircraft engines, defectoscopy, in industrial equipment quality control tasks. The most popular when exposed to high temperatures are non-contact optical methods. This paper considers the problem of non-contact measurement of the flame temperature of a gas burner by the radiation of one of its components - water vapor. It is its groups of spectral lines groups that are convenient to register and are preferred using spectrum splitters in spectral ratio pyrometers and multi-spectral pyrometers. In the course of the study, a pyrometer model based on an acousto-optic filter of the near IR range was assembled and adjusted, allowing to measure the flame temperature by the spectrum of radiation of soot, which reduces the effect of soot particle radiation on the measurement results. This setup, assembled by the authors, allows recording a photo signal with a wavelength of 1000 to 1700 nm The radiation was recorded by using the multi-spectral pyrometry method, which allows measuring temperature without advance information on the spectral emissivity coefficient of the object.

As a result of the research, the spectral ranges in which the temperature of lamps and burner flames should be measured were determined. The temperatures of the lamp filament at various electrical capacities were obtained, and data were obtained on the temperatures of the gas burner at various fuel supply modes.

ACOUSTO-OPTICAL FILTER, MULTI-SPECTRAL PYROMETRY

Секция 9

Научная визуализация



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 004.62

Подвесовский А.Г., Филонов А.А., Захарова А.А.

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Россия,
117997, Москва, Профсоюзная ул., 65, E-mail: zaa@ipu.ru*

**ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ МОДЕЛИ В СИСТЕМАХ
ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ РАЗНОРОДНЫХ ГРУЗОВ С ПОМОЩЬЮ
БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

АННОТАЦИЯ

Задача формирования плана транспортировки разнородных грузов с помощью беспилотных летательных аппаратов относится к классу многопродуктовых задач оптимизации распределительного типа в сетевой постановке с учетом ряда дополнительных условий и ограничений. Построение оптимизационной модели для такой задачи требует учета и анализа множества разнородных параметров, которые целесообразно задавать в интерактивном режиме с использованием приемов и методов визуализации. Рассматривается один из типов задачи формирования плана транспортировки, и предлагается подход к построению визуальной модели с целью поддержки интерактивного задания ее параметров и отображения результатов оптимизации с использованием визуального интерфейса. В основе предлагаемого подхода лежит понятие метафоры визуализации, включающей в себя пространственную метафору и метафору представления. Обсуждаются структура и особенности метафоры представления для различных вариантов задания параметров задачи и этапов ее моделирования.

**БЕСПИЛОТНЫЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ, ПЛАН ТРАНСПОРТИРОВКИ ГРУЗОВ,
ЗАДАЧА О МАКСИМАЛЬНОМ ПОТОКЕ, ВИЗУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ, МЕТАФОРА
ВИЗУАЛИЗАЦИИ**

ВВЕДЕНИЕ

Практика использования специализированных беспилотных летательных аппаратов (БЛА) для транспортировки грузов имеет множество актуальных и востребованных приложений, среди которых доставка грузов первой необходимости в удаленные регионы, наземное сообщение с которыми затруднено или носит сезонный характер, в том числе в регионы, пострадавшие от стихийных бедствий; перевозка опасных грузов и грузов, чувствительных к условиям транспортировки; транспортировка семян, удобрений, образцов почвы или растений между удаленными полевыми станциями и лабораториями; перемещение грузов между складами и распределительными центрами и др. Таким образом, одним из актуальных направлений развития беспилотной авиации в настоящее время является создание роботизированных беспилотных авиатранспортных систем (БАТС) для применения в сфере грузоперевозок [1, 2]. Важная роль при этом принадлежит созданию методов и средств автоматизации управления БАТС [3]. Решение этих задач предполагает создание математического, информационного и программного обеспечения БАТС, включая системы хранения, обработки и анализа данных, средства автоматического управления, системы связи,

информационно-аналитические системы и системы поддержки принятия решений. Поддержка принятия решений требуется как при управлении исполнением полетных заданий, так и на этапе их планирования.

Планирование полетного задания для группы БЛА, осуществляющей транспортировку грузов, включает в себя ряд задач, среди которых можно выделить построение плана транспортировки, выбор БЛА с заданными характеристиками, формирование плана загрузки БЛА с учетом характеристик транспортируемых грузов и комплекса требований к условиям их транспортировки и др. [4]. Любая из этих задач требует учета и анализа множества данных, которые являются многомерными и могут различаться по формату, структуре и источникам получения. Так, при построении плана транспортировки грузов, оптимального по заданным целевым показателям, учитывается ряд параметров, описывающих состояние маршрутной сети, характеристики грузов, данные об их распределении в пунктах-источниках, а также текущем состоянии заказов на доставку с учетом их приоритетности. В свою очередь, информация о состоянии маршрутной сети должна включать данные о пропускной способности различных маршрутов и о затратах ресурсов при использовании на них определенных типов БЛА. К таким затратам могут относиться, например, время прохождения маршрута (включая время выполнения подготовительных и сопутствующих операций), стоимость транспортировки различных типов грузов и др.

Перечисленные особенности приводят к новым постановкам задач оптимизации плана транспортировки грузов, в которых необходимо учитывать одновременно несколько видов дополнительных условий и ограничений. В работах [5, 6] рассмотрены некоторые из этих задач, для них построены оптимизационные модели, и предложены алгоритмы нахождения оптимального плана. Вместе с тем, для обеспечения полноценной программной поддержки соответствующих моделей и алгоритмов важной задачей является создание визуальных интерфейсов, обеспечивающих интерактивную форму задания параметров оптимизационной модели и отображения результатов оптимизации, с использованием подходящих приемов и методов визуализации многомерных данных.

Вопросы построения визуальных моделей для задач оптимизации транспортировки грузов рассматривались, в частности, в работах [7, 8]. Вместе с тем, основное внимание в этих работах уделяется либо особенностям визуализации графовой структуры маршрутной сети (без учета многих перечисленных выше параметров, характеризующих оптимизационную модель в целом), либо имитационному моделированию уже построенных планов транспортировки. В данной работе предлагается способ построения визуальной модели задачи формирования плана транспортировки разнородных грузов с помощью БЛА для поддержки интерактивного задания ее параметров и отображения результатов оптимизации с помощью визуального интерфейса, в том числе в среде геоинформационных систем. В основе предлагаемого подхода лежат понятия метафоры визуализации [9] и когнитивной ясности получаемого с ее помощью визуального образа [10]. Построение визуальной модели будем рассматривать на примере формирования плана транспортировки разнородных грузов в условиях ограниченной пропускной способности маршрутной сети с учетом приоритетности задач доставки [5].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Задача формирования плана транспортировки грузов: формализованное описание и общие принципы задания и визуализации параметров

Рассматривается задача поиска оптимального плана транспортировки грузов между источниками (хабами) и стоками (пунктами потребления), с учетом наличия в маршрутной сети промежуточных пунктов, где может выполняться как техническое обслуживание БЛА, так и перераспределение грузов. Задача состоит в том, чтобы определить, какие маршруты, из числа доступных на текущий момент с учетом состояния маршрутной сети, следует

задействовать для транспортировки грузов, и какое количество единиц груза каждого типа подлежит транспортировке по выбранным маршрутам, так чтобы обеспечить выполнение текущих заявок на доставку. При этом учитывается не только возможный дефицит всех или некоторых видов груза, но также и ситуация, когда нельзя осуществить полную транспортировку всех грузов ввиду ограниченных пропускных способностей маршрутов.

Пусть $\Gamma = \langle A, W \rangle$ – ориентированный граф, задающий текущее состояние маршрутной сети, где A – множество вершин, соответствующих узлам сети, W – множество дуг, задающих коммуникации между узлами. Отсутствие дуги между парой узлов (i, j) , означает, что при текущем состоянии маршрутной сети прямой перелет БЛА из пункта i в пункт j невозможен.

Для каждого узла $i \in A$ можно выделить из множества A два ассоциированных с данным узлом подмножества:

- $A_i^{IN} = \{j \in A \mid (j, i) \in W\}$, содержащее узлы, связанные дугой с узлом i ;
- $A_i^{OUT} = \{j \in A \mid (i, j) \in W\}$, содержащее узлы, с которыми связан дугой узел i .

$G = \{G_1, G_2, \dots, G_p\}$ – множество грузов; $T = \{T_i^k \mid i \in A; k = 1, \dots, p\}$ – множество значений мощности узлов для каждого k -го типа груза, где мощность узла определяется следующим образом:

- если $T_i^k > 0$, то величина T_i^k характеризует запас груза G_k в i -м узле (узел является *источником* k -го груза);
- если $T_i^k < 0$, то величина $(-T_i^k)$ характеризует потребность груза G_k в i -м узле (узел является *стоком* k -го груза);
- если $T_i^k = 0$, то i -й узел является *транзитным* для k -го груза.

$C = \{c_{ij}^k \mid (i, j) \in W; k = 1, \dots, p\}$ – затраты на транспортировку единицы груза G_k по маршруту (i, j) , при этом полагается $c_{ii}^k = 0, \forall i \in A$. Если по маршруту (i, j) транспортировка груза G_k (для некоторого k) не допускается, то полагают $c_{ij}^k = \infty$ (на практике можно использовать число, на 1-2 порядка превышающее максимальное значение c_{ij}^k из имеющихся во множестве C). Соответствующие маршруты называют *запрещенными для k -го вида груза*.

$X = \{x_{ij}^k \mid (i, j) \in W; k = 1, \dots, p\}$ – количество единиц груза G_k , транспортируемых по дуге (i, j) , т.е. набор X задает *план транспортировки груза*.

$U = \{u_{ij} \mid (i, j) \in W\}$ – пропускные способности маршрутов. При этом, если пропускная способность маршрута (i, j) не ограничивается, то полагаем (формально) $u_{ij} = \infty$. Можно рассмотреть подмножество $W' \subseteq W$, включающее в себя только те дуги, для которых имеется ограничение по пропускной способности: $W' = \{(i, j) \in W \mid u_{ij} < \infty\}$.

Невозможность осуществить транспортировку всего предназначенного к доставке груза вследствие имеющихся ограничений на пропускные способности маршрутов и возможного дефицита некоторых видов груза означает, что следует строить план транспортировки, ориентированный на первоочередное выполнение наиболее приоритетных заявок, с максимизацией суммарного потока груза, прошедшего по сети.

Будем называть *потоком груза G_k* суммарный объем (количество единиц) данного груза, доставленный в узлы, являющиеся его стоками ($T_i^k < 0$):

$$H^k = \sum_{i \in A, T_i^k < 0} \left(\sum_{j \in A_i^{IN}} x_{ji}^k - \sum_{j \in A_i^{OUT}} x_{ij}^k \right),$$

а *общим потоком* – суммарный объем доставки всех видов грузов во все стоки.

Таким образом, получаем задачу, которая представляет собой расширение известной задачи о максимальном потоке [11], учитывающее разнородность грузов и произвольную структуру маршрутной сети:

$$H = \sum_{k=1}^p \sum_{i \in A, T_i^k < 0} \left(\sum_{j \in A_i^{IN}} x_{ji}^k - \sum_{j \in A_i^{OUT}} x_{ij}^k \right) \rightarrow \max, \quad (1)$$

при ограничениях

$$\begin{cases} \sum_{j \in A_i^{OUT}} x_{ij}^k - \sum_{j \in A_i^{IN}} x_{ji}^k \leq T_i^k, i \in A, T_i^k > 0; \\ \sum_{j \in A_i^{OUT}} x_{ij}^k - \sum_{j \in A_i^{IN}} x_{ji}^k \geq T_i^k, i \in A, T_i^k < 0; \\ \sum_{j \in A_i^{OUT}} x_{ij}^k - \sum_{j \in A_i^{IN}} x_{ji}^k = 0, i \in A, T_i^k = 0; \\ \sum_{k=1}^p x_{ij}^k \leq u_{ij}, (i, j) \in W'; \\ x_{ij}^k \geq 0, (i, j) \in W; k = 1, \dots, p. \end{cases} \quad (2)$$

В рассматриваемых условиях невозможности построения полного плана транспортировки могут возникать следующие типы задач, связанные с заданием приоритетности доставки грузов [5].

1. В первую очередь необходимо организовать доставку каждого груза в наиболее приоритетные для него стоки. Будем говорить, что данная задача соответствует схеме «*приоритет стока для груза*».
2. В первую очередь необходимо обеспечить каждый сток наиболее приоритетными для него грузами. Данную задачу будем называть соответствующей схеме «*приоритет груза для стока*».
3. В первую очередь необходимо удовлетворить потребности наиболее приоритетных стоков. Иными словами, имеет место комплексное требование первоочередного обеспечения приоритетных стоков всеми необходимыми для них грузами. Будем говорить, что в данном случае используется схема «*безусловный приоритет стока*».
4. В первую очередь необходимо обеспечить стоки наиболее приоритетными грузами. Здесь первоочередной задачей является транспортировка наиболее приоритетных грузов. Для данной схемы используем название «*безусловный приоритет груза*».

Механизмы учета приоритетности для каждой из перечисленных задач зависят от вида предпочтений. Будем далее рассматривать лексикографические предпочтения [12], основанные на жестком приоритете более важных заявок над менее важными, когда невыполнение более важной заявки не может быть компенсировано выполнением заявки, имеющей меньшую важность.

Таким образом, в процессе моделирования рассматриваемой задачи будут иметь место ряд этапов, требующих интерактивного задания и/или визуализации данных.

На начальном этапе в интерактивном режиме и с использованием приемов визуализации могут задаваться общие параметры, характеризующие постановку задачи:

- множество узлов A и дуг W маршрутной сети;
- множество грузов G ;
- наборы T значений мощности узлов для всех грузов, принадлежащих множеству G ;
- величины затрат C на транспортировку грузов по имеющимся маршрутам;
- значения U пропускных способности маршрутов.

Далее осуществляется выбор схемы приоритетности задач доставки и задание ее параметров, также с использованием различных приемов визуализации. Эти параметры дополняют или уточняют некоторые параметры, заданные на начальном этапе. Конкретный способ задания зависит от выбранной схемы:

- при использовании схемы «*приоритет стока для груза*» для каждого груза G_k выделяется подмножество $D^k = \{d_1^k, d_2^k, \dots, d_{q_k}^k\}$ узлов, являющихся стоками данного груза, которое упорядочивается по убыванию приоритетов;
- при использовании схемы «*приоритет груза для стока*» для каждого стока A_l выделяется подмножество $E^l = \{e_1^l, e_2^l, \dots, e_{m_l}^l\}$ грузов, в которых имеется потребность в стоке A_l , с упорядочением по убыванию их приоритетов для него;

- при использовании схемы «безусловный приоритет стока» выделяется множество $D = \{d_1, d_2, \dots, d_q\}$ всех узлов, являющихся стоками хотя бы одного вида груза, которое упорядочивается по убыванию приоритета обеспечения грузами;
- при использовании схемы «безусловный приоритет груза» выделяется множество грузов $G = \{G_1, G_2, \dots, G_p\}$ приоритета доставки.

Наконец, по результатам оптимизации необходимо выполнить визуализацию найденного оптимального плана транспортировки X .

На каждом из перечисленных этапов выполняется визуализация разного набора параметров, поэтому для каждого этапа требуется свой тип визуальной модели.

Общие принципы построения метафоры визуализации для задачи формирования плана транспортировки грузов

Подход к построению визуальной модели, основанный на понятии метафоры визуализации был предложен в [9] и получил развитие в ряде других работ, в том числе в [10] при решении задач визуализации графовых моделей.

Метафора визуализации представляет собой формализованное средство отображения характеристик данных исходной модели в пространство признаков визуальной модели. Она включает в себя совокупность принципов и правил, определяющих соответствие между элементами модели и визуальными образами, а также между их атрибутами и визуальными признаками. Метафора визуализации включает в себя две составляющие: пространственную метафору и метафору представления. *Пространственная метафора* определяет общие принципы переноса визуализируемого объекта в пространство визуальной модели. *Метафора представления*, применяемая в рамках выбранной пространственной метафоры, отвечает за доработку полученного визуального образа с целью выделения его составляющих, наиболее важных в контексте решаемой задачи. Ее целью является фокусирование внимания на содержательных аспектах визуального образа, требующих интерпретации.

Применительно к рассматриваемой задаче пространственная метафора задает расположение узлов графа маршрутной сети в пространстве карты территории. Для ее построения могут использоваться различные алгоритмы пространственного размещения графов [13]. Для полученного пространственного размещения далее строится метафора представления, формирующая визуальные образы узлов и дуг графа, соответствующих пунктам транспортной сети и маршрутам между ними. В рамках метафоры представления основная роль принадлежит сопоставлению атрибутов узлов и маршрутов и приемов визуализации.

В соответствии с метафорой представления, визуальный образ рассматриваемой задачи будет содержать ряд визуальных признаков, среди которых:

- для узла (помимо пространственного расположения, задаваемого пространственной метафорой) – форма, цвет, размер объекта, представляющего узел, а также дополнительные графические элементы, например, надписи, элементы инфографики;
- для маршрута между узлами – прежде всего цвет и толщина дуги, а также надписи.

Для построения метафоры представления необходимо обеспечить сопоставление между визуализируемыми параметрами (атрибутами модели) и перечисленными визуальными признаками. При этом, поскольку число визуализируемых параметров превышает допустимое число визуальных признаков, не приводящих к перегрузке визуального образа, то целесообразно говорить о выделении нескольких метафор представления, визуализирующих отдельные свойства задачи или этапы ее моделирования. При этом от выбора метафоры представления зависит степень когнитивной ясности визуального образа и удобство интерактивного задания параметров задачи формирования плана транспортировки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Метафора представления задачи формирования плана транспортировки грузов

Элементы задачи формирования плана транспортировки грузов представляют собой элементы графа – узлы и дуги между ними, сопровождаемые атрибутивной информацией. При этом узлы имеют географическую привязку и соответствуют точкам на карте.

Для визуализации узлов используется представление в виде иконок или геометрических примитивов, соединенных прямыми линиями. Цвет и толщина линий характеризуют свойства маршрутов. Рядом с узлами отображаются элементы инфографики, иллюстрирующие значения их мощности по разным видам груза.

Общая структура метафоры представления представлена в табл. 1. Данные параметры являются общими для любой схемы приоритизации и призваны максимально наглядно показать основные свойства конкретной постановки задачи.

Табл. 1. Общая структура метафоры представления для этапа задания постановки задачи

Атрибут	Область значений	Представление
Идентификатор узла	Строка	Круг с названием в виде буквы с цифрой на координатах узла
Мощность по типам грузов	Вектор целых чисел	Набор элементов инфографики, характеризующих запасы груза (зеленый цвет, положительное число) или потребность в нем (красный цвет, отрицательное число)
Затраты на транспортировку грузов для маршрута	Вектор целых чисел	Цвет дуги – чем ярче, тем затраты ниже относительно максимального значения
Пропускная способность маршрута для грузов	Вектор целых чисел	Толщина дуги – чем выше, тем выше пропускная способность

Атрибуты, зависящие от выбранной схемы приоритетности, представлены отдельно в табл. 2.

Табл. 2. Дополнительные атрибуты метафоры представления, зависящие от схемы приоритетности

Атрибут	Область значений	Представление
Приоритеты стоков для груза	Упорядоченное множество	Инфографика разных типов грузов упорядочивается сверху вниз по убыванию приоритета доставки в стоки
Приоритет грузов для стока	Упорядоченное множество	Инфографика разных типов грузов упорядочивается сверху вниз убыванию приоритета заявок на доставку отдельно для каждого узла
Безусловные приоритеты грузов	Упорядоченное множество	Инфографика разных типов грузов упорядочивается сверху вниз по убыванию приоритета обеспечения им стоков
Безусловные приоритеты стоков	Упорядоченное множество	Цвет заливки узла

Наконец, атрибуты, связанные с отображением результата оптимизации, представлены в табл. 3. Целью визуализации в данном случае является наглядное представление

сформированного плана транспортировки для выполнения первичного анализа и выявления особенностей, которые могут способствовать его улучшению (например, путем уточнения исходной постановки задачи).

Табл. 3. Структура метафоры представления для отображения плана транспортировки

Атрибут	Область значений	Представление
План транспортировки для маршрута	Вектор целых чисел	Набор чисел рядом с дугой – отображает объем каждого типа груза, перемещаемого по данному маршруту
Поток груза	Целое число	Толщина дуги – соответствует суммарному потоку груза, проходящему по маршруту
Степень неполноты выполнения заявок	Вектор целых чисел	Инфографика разных типов грузов – отображает объем заявок, оставшихся неудовлетворенными (отрицательное число) или избыток груза, оставшийся в источнике (положительное число)
Остаточные пропускные способности	Целое число	Цвет дуги – отображает разницу между суммарным потоком груза, прошедшим по маршруту, и пропускной способностью данного маршрута

Программная поддержка визуальных моделей

Для программной поддержки предложенного подхода к построению визуальных моделей был создан программный модуль, которая является частью программного комплекса моделирования задач планирования и оптимизации транспортировки грузов в беспилотных транспортных системах, выполняя роль подсистемы визуализации и интерактивного задания параметров оптимизационной модели. Непосредственно решение задачи оптимизации (1)-(2) выполняется посредством отдельного подключаемого модуля, в котором реализованы алгоритмы, описанные в [5].

Интерфейс модуля (на примере задания параметров оптимизационной задачи с использованием схемы «приоритет груза для стока») представлен на рис. 1.

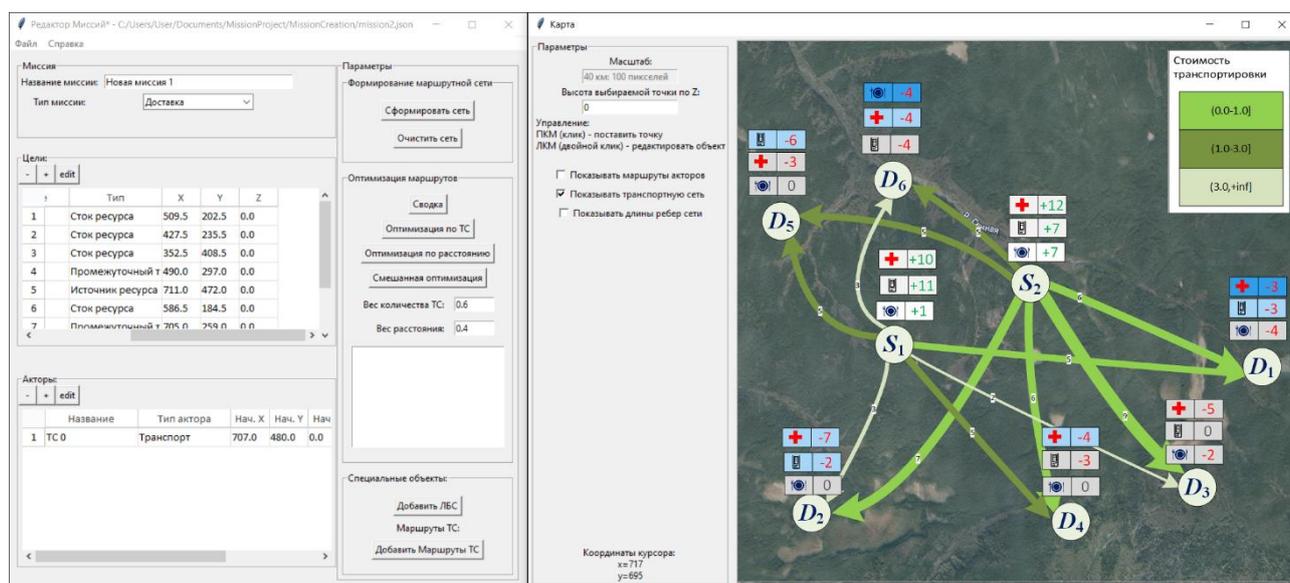


Рис. 1. Интерфейс программного модуля (показана визуальная модель оптимизационной задачи с использованием схемы «приоритет груза для стока»)

Для разработки программного модуля использовались платформа PyQt5, язык программирования Python и набор библиотек геоинформационной системы QGIS [14]. Модуль позволяет загружать заранее подготовленные данные, задающие информацию о состоянии маршрутной сети, задавать и редактировать в интерактивном режиме параметры, определяющие постановку задачи, и визуализировать его с применением рассмотренной метафоры. Кроме того, имеется возможность сохранения построенной модели, с целью обеспечения возможности повторного использования.

Экспериментальное исследование

Обратимся к рис. 1, на котором показана визуальная модель оптимизационной задачи с использованием схемы «приоритет груза для стока».

С помощью элементов инфографики показаны значения мощности узлов по каждому типу груза. Элементы упорядочены сверху вниз в порядке убывания приоритета заявок. Уровни приоритетов дополнительно показаны с помощью градиентной заливки из синего в серый. Так, для стока D_1 наибольший приоритет имеет доставка медикаментов, а для стока D_6 – доставка продуктов питания. Толщина стрелок задает пропускную способность соответствующих маршрутов, которая дополнительно отображается в виде числового значения. Цвет стрелки соответствует затратам на транспортировку для выбранного груза (на рис. 1 это медикаменты).

Пример визуализации плана транспортировки, полученного в результате решения соответствующей оптимизационной задачи, показан на рис. 2.

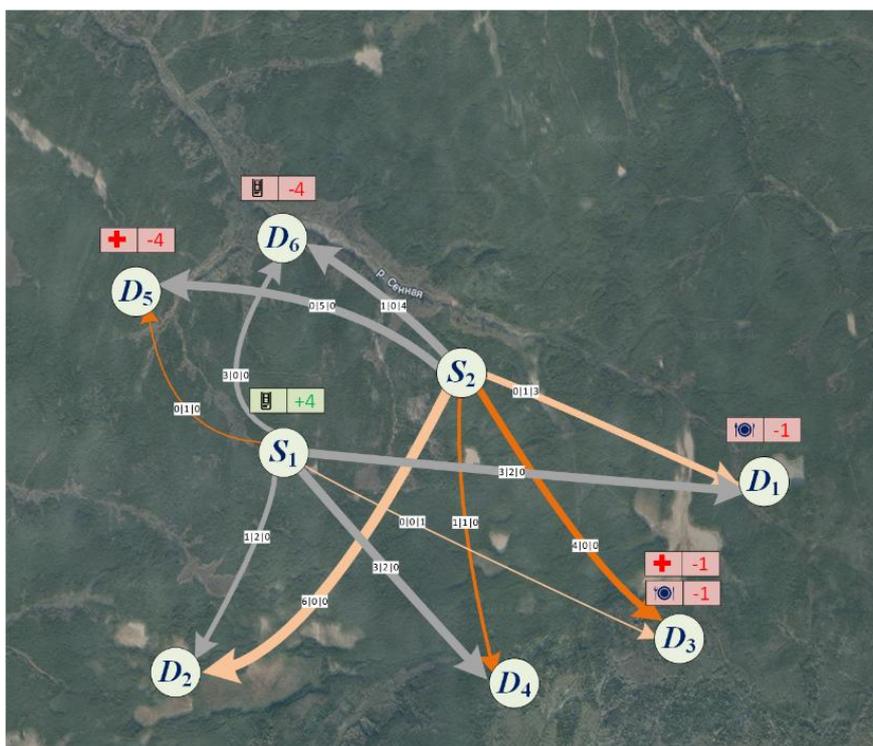


Рис. 2. Пример визуализации найденного плана транспортировки

В соответствии со структурой метафоры представления, описанной в табл. 3, элементы инфографика возле узлов отражают состояние маршрутной сети после реализации плана транспортировки, т.е. объемы невыполненных заявок, а также грузов, оставшихся в источниках. Толщина стрелок показывает суммарный поток грузов, прошедших по соответствующим маршрутам, а числовые значения потока каждого груза отражены в виде надписей на стрелках. Цвет стрелок показывает остаточные пропускные способности маршрутов.

Таким образом, данная метафора представления способствует упрощению визуального анализа результатов решения. Визуальная модель наглядно отражает особенности полученного плана транспортировки. В частности, можно заметить, что заявки некоторых стоков не были удовлетворены в связи с недостаточной пропускной способностью имеющихся маршрутов, что может свидетельствовать о необходимости их расширения – примером может являться недопоставка средств связи в сток D_6 , несмотря на то, что запас данного груза имеется в источнике S_1 . В то же время некоторые заявки стоков D_1 , D_3 и D_5 не были удовлетворены в полной мере, несмотря на наличие резервов пропускной способности маршрутов в эти узлы. Соответственно, эти недопоставки являются следствием дефицита указанных грузов в источниках.

Отметим также, что предложенный способ построения метафор представления отвечает принципам их построения, описанным в [10] и способствующим повышению их когнитивной ясности.

Так, соответствие *принципу частичной визуализации* проявляется в выборе различных метафор представления для визуализации параметров, задающих разные схемы приоритетности, а также для визуализации решения задачи. Благодаря этому визуализируются только те свойства модели, которые требуются для анализа на каждом конкретном этапе.

Соответствие *принципу инъективной визуализации* обусловлено тем, что различные атрибуты модели визуализируются по-разному. Так, в метафорах представления постановки и решения задачи используется тематически окрашенные стрелки, но поскольку этот прием используется для отображения разных свойств, цвет стрелок выбирается различным. При этом можно отметить сходство приемов визуализации близких понятий, например, толщина стрелок для отображения пропускной способности маршрутов для постановки задачи и для отображения фактического использования пропускной способности для ее решения.

Отсутствие в визуальных моделях лишних, не значимых атрибутов подтверждает соответствие *принципу сюръективной визуализации*.

Примером, подтверждающим соответствие *принципу подчинения*, может служить соответствие элементов инфографики, отражающих мощность по видам грузов, тем узлам, к которым они относятся.

Наконец, примером соответствия *принципу переструктурирования* может служить выделение остаточной пропускной способности маршрута как отдельного визуализируемого свойства, хотя, по сути, она является разностью пропускной способности маршрута и прошедшего по нему потока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование визуальных моделей для наглядного отображения множества разнородных параметров, характеризующих задачу формирования оптимального плана транспортировки грузов с помощью БЛА, обеспечивает интерактивность взаимодействия субъекта с оптимизационной моделью и в целом способствует повышению его ситуационной осведомленности субъекта при решении задач планирования полетных заданий. В работе предложен подход к построению визуальной модели для одного из типов задачи формирования плана транспортировки – максимизации потока грузов в условиях ограниченной пропускной способности маршрутной сети, где в качестве дополнительных условий выступали различные схемы приоритетности задач доставки грузов в стоки. В дальнейшем предполагается рассмотреть визуальные модели для других типов задач, например, задачи формирования плана транспортировки, оптимального по критерию минимума времени [6], или задачи максимизации потока груза в условиях ограничений времени транспортировки. Еще одним направлением дальнейших исследований является разработка визуальных моделей для задач оперативного мониторинга и управления исполнением полетных заданий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Матюха С.В.** Беспилотные авиационные системы в грузоперевозках // Транспортное дело России. 2022. № 1. С. 141-143.
2. **Воронов В.В.** Беспилотные авиасистемы для грузоперевозок: возможности и перспективы [Электронный ресурс] // Авиатранспортное обозрение. Деловой авиационный портал. Режим доступа: <http://www.ato.ru/content/bespilotnye-aviasistemy-dlya-gruzoperevozok-vozmozhnosti-i-perspektivy-1-ya-chast> (часть 1), <http://www.ato.ru/content/bespilotnye-aviasistemy-dlya-gruzoperevozok-ocenka-razrabotok-chast-2> (часть 2) (дата обращения 28.04.2025).
3. **Кутахов В.П., Смолин А.Л., Настас Г.Н.** К вопросу о создании беспилотной авиационной транспортной системы // Скоростной транспорт будущего: перспективы, проблемы, решения: Сб. докл. 1-й Междунар. науч.-техн. конф. М.: Изд-во «Перо», 2022. С. 177-180.
4. **Захарова А.А., Кутахов В.П., Мещеряков Р.В., Подвесовский А.Г., Смолин А.Л.** Моделирование задач транспортировки грузов в беспилотной авиационной транспортной системе // Авиакосмическое приборостроение. 2023. № 3. С. 3-15.
5. **Podvesovskii A., Zakharova A.** Optimization of heterogeneous cargo transportation using UAVs with different priority schemes for delivery tasks // Bolshakov, A.A. (eds) Cyber-Physical Systems. Studies in Systems, Decision and Control. Vol. 554. Springer, Cham. 2024. Pp. 165-177.
6. **Podvesovskii A., Meshcheryakov R., Zakharova A.** Optimization of heterogeneous cargo transportation plan in unmanned air transportation system by the criterion of minimum time // 17th International Conference on Management of Large-Scale System Development (MLSD), Moscow, Russian Federation, 2024. IEEE Catalog Number CFP24GAE-ART. Pp. 1-5.
7. **Абдаев Р.Б., Ветрова О.А.** Применение средств визуализации для задач оптимизации транспортной модели // Научная визуализация. 2023. Т. 15(2). С. 22-37.
8. **Deng Z., Chen H., Lu Q.-L. et.al.** Visual comparative analytics of multimodal transportation // Visual Informatics. 2025. Vol. 9 (1). Pp. 18-30.
9. **Захарова А.А., Шкляр А.В.** Метафоры визуализации // Научная визуализация. 2013. Т. 5(2). С. 16-24.
10. **Исаев Р.А., Подвесовский А.Г.** Визуализация графовых моделей: подход к построению метафор представления. Научная визуализация. 2021. Т. 13(4). С. 9-24.
11. **Корте Б., Фиген Й.** Комбинаторная оптимизация. Теория и алгоритмы / Пер. с англ. М.А. Бабенко. М.: МЦНМО, 2015. 720 с.
12. **Подиновский В.В.** Многокритериальные задачи принятия решений: теория и методы анализа. М.: Изд-во Юрайт, 2022. 486 с.
13. **Касьянов В., Касьянова Е.** Визуализация информации на основе графовых моделей // Научная визуализация. 2014. Т. 6 (1). С. 31-50.
14. **QGIS Documentation.** QGIS User Guide [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.qgis.org/ru/latest/> (дата обращения: 28.04.2025).

Podvesovskii A.G., Filonov A.A., Zakharova A.A.

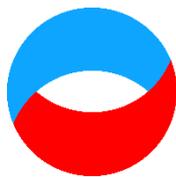
V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Russia,
117997, Moscow, Profsoyuznaya Str., 65, E-mail: zaa@ipu.ru

VISUALIZATION OF OPTIMIZATION MODEL PARAMETERS IN HETEROGENEOUS CARGO TRANSPORTATION PLANNING SYSTEMS USING UNMANNED AERIAL VEHICLES

ABSTRACT

The problem of forming a plan for heterogeneous cargo transportation using unmanned aerial vehicles belongs to the class of multi-product transshipment problems, considering a number of additional conditions and constraints. The construction of an optimization model for such a problem requires consideration and analysis of many heterogeneous parameters, which it is advisable to set in interactive mode using visualization techniques and methods. We consider one type of transportation plan formation problem and propose an approach to building a visual model in order to support interactive setting of its parameters and display of optimization results using a visual interface. The proposed approach is based on the notion of visualization metaphor, which includes spatial metaphor and representation metaphor. The structure and peculiarities of the representation metaphor for different variants of setting parameters of the problem and stages of its modeling are discussed.

UNMANNED AERIAL VEHICLE, CARGO TRANSPORTATION PLAN, MAXIMUM FLOW
PROBLEM, VISUAL MODEL, VISUALIZATION METAPHOR



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 535.8

Смирнов В.И.

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: smirnovvi-mpei@yandex.ru*

**МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ПОЛЯРИЗАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

АННОТАЦИЯ

В системах лазерной диагностики потоков жидкости и газа важное метрологическое значение могут иметь поляризационные характеристики зондирующего излучения. Исследована погрешность измерения поляризационных параметров Стокса лазерного излучения при регистрации излучения фотоприемником в схеме с поляризатором и фазовым компенсатором в режиме ограничения точности аддитивным и мультипликативным шумом в различном соотношении. В развитие базовых концепций, изложенных в работе [1], где дан анализ предельных погрешностей классических 6-ти точечных схем измерения [2,3], в данной работе рассмотрены представляющие существенный метрологический интерес 12-точечные схемы с равномерным и оптимальным выбором точек измерений на сфере Пуанкаре.

**ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ, ПАРАМЕТРЫ СТОКСА, СХЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ,
ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ**

ВВЕДЕНИЕ

Широкое применение поляризационных устройств в лазерной технике, в лазерных системах диагностики потоков жидкости и газа [4] делает актуальной задачу метрологического анализа поляризационных измерений. Целью работы является определение эффективности и предельной точности поляризационных измерений на основе теории информации и нелинейного параметрического оценивания. Состояние поляризации квазимонохроматической волны можно задавать разными способами. Во многих случаях удобно использовать параметры Стокса, которые имеют одинаковую размерность, являются действительными величинами, и имеют наглядную интерпретацию координат точки на сфере Пуанкаре.

ПЛАНЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Для целей данного исследования анализ поляризационных измерений целесообразно провести, используя схему регистрации с поляризатором и фазовым компенсатором, в которой можно менять угол поворота поляризатора θ и фазовую задержку ε , вносимую компенсатором. На вход поступает анализируемое излучение, на выходе измеряется число фотоотсчетов n за время регистрации для различного набора значений θ и ε .

Параметрической моделью задачи является функциональная зависимость выходной величины от факторов θ, ε и искомых параметров Стокса входного излучения. Такую модель нетрудно получить, используя формулу из [2]

$$I(\theta, \varepsilon) = I_{xx} \cos^2 \theta + I_{yy} \sin^2 \theta + I_{xy} e^{-i\varepsilon} \sin \theta \cos \theta + I_{yx} e^{i\varepsilon} \sin \theta \cos \theta,$$

которая выражает выходную интенсивность для произвольных факторов θ, ε через элементы матрицы когерентности \mathbf{J} квазимонохроматического излучения

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} I_{xx} & I_{xy} \\ I_{yx} & I_{yy} \end{pmatrix},$$

$$I_{xx} = \langle E_x E_x^* \rangle \quad I_{yy} = \langle E_y E_y^* \rangle \quad I_{xy} = \langle E_x E_y^* \rangle \quad I_{yx} = \langle E_y E_x^* \rangle,$$

где E_x, E_y – проекции светового вектора на оси координат, угловые скобки – знак статистического усреднения; звездочка – знак комплексного сопряжения.

Используя известную связь между параметрами Стокса и элементами матрицы когерентности

$$s_0 = I_{xx} + I_{yy} \quad s_1 = I_{xx} - I_{yy} \quad s_2 = I_{xy} + I_{yx} \quad s_3 = i(I_{xy} - I_{yx}),$$

для искомой модели найдем

$$I(\theta, \varepsilon; \mathbf{s}) = \frac{s_0}{2} + \frac{s_1}{2} \cos(2\theta) + \frac{s_2}{2} \sin(2\theta) \cos(\varepsilon) + \frac{s_3}{2} \sin(2\theta) \sin(\varepsilon). \quad (1)$$

Формула (1) задает 2-факторную 4-параметрическую модель. Факторы: θ – угол поворота анализатора, ε – сдвиг фаз, задаваемый компенсатором. Параметрами модели являются параметры Стокса, обозначенные вектором $\mathbf{s} = (s_0, s_1, s_2, s_3)$.

Качество оценок вектора параметров $\mathbf{s} = (s_0, s_1, s_2, s_3)$ удобно характеризовать дисперсионной матрицей, диагональные элементы которой дают дисперсии оценок параметров, а недиагональные элементы характеризуют взаимную коррелированность соответствующих оценок.

Согласно теореме Рао-Крамера [3] существует нижняя граница для дисперсионной матрицы оценок, называемая минимальной дисперсионной матричной границей (МДМГ). Она определяет теоретическую предельную точность совместного оценивания параметров, потенциально достижимую при заданной статистике погрешностей измерений, при полном использовании информации, полученной из эксперимента с учетом априорных данных.

Дисперсионная матричная граница оценок параметров Стокса определяется как матрица, обратная информационной матрице \mathbf{IM}

$$\mathbf{DS} = (\mathbf{IM})^{-1}. \quad (2)$$

В нашем случае согласно [3] в режиме ограничения мультипликативным дробовым шумом сигнала при выбранной нормировке

$$IM_{ij} = \sum_{k=0}^{m-1} \sum_{l=0}^{n-1} \frac{1}{I(\theta_k, \varepsilon_l; \mathbf{s})} \frac{\partial}{\partial s_i} [I(\theta_k, \varepsilon_l; \mathbf{s})] \frac{\partial}{\partial s_j} [I(\theta_k, \varepsilon_l; \mathbf{s})]. \quad (3)$$

Формула (3) позволяет рассчитать информационную матрицу для любого набора точек в плоскости (θ, ε) . Далее будем оценивать нормированные матрицы, приведенные к

единичному общему времени измерения T и единичной интенсивности ($s_0 = 1$) анализируемого излучения на входе измерителя.

В отличие от [1] рассмотрим два 12-точечных плана измерений. Оба плана предполагают измерения в 12-ти точках с разными параметрами θ , ε и представлены табл. 1 и 2.

Табл. 1. План А - 12-ти точечный равномерный

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
θ	0	$\pi/2$	π	0	$\pi/2$	π	$\pi/6$	$\pi/2 + \pi/6$	$\pi + \pi/6$	$0 + \pi/6$	$\pi/2 + \pi/6$	$\pi + \pi/6$
ε	0	0	0	$\pi/2$	$\pi/2$	$\pi/2$	0	0	0	$\pi/2$	$\pi/2$	$\pi/2$

Табл. 2. План Б - 12-ти точечный оптимальный

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
θ	0	$\pi/2$	$\pi/4$	$3\pi/4$	$\pi/4$	$3\pi/4$	$\pi/8$	$\pi/2 + \pi/8$	$\pi/4 + \pi/8$	$3\pi/4 + \pi/8$	$\pi/4$	$3\pi/4$
ε	0	0	0	0	$\pi/2$	$\pi/2$	0	0	0	0	$\pi/2$	$\pi/2$

В случае мультипликативного шума результаты зависят от координат точки на сфере Пуанкаре. Представим сферическую поверхность в декартовых прямоугольных координатах, где по оси абсцисс откладывается широта 2ψ , а по оси ординат – долгота 2χ . При таком представлении сферическая поверхность трансформируется в прямоугольник на плоскости, меридианы превращаются в параллельные вертикальные линии, а параллели растягиваются тем сильнее, чем ближе они к полюсам. Полюсные точки превращаются в горизонтальные линии.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Результаты можно представить в виде цветных карт, шкалы цветов которых показаны на рис. 1 и 2.



Рис. 1. 100-уровневая радужная шкала



Рис. 2. 2-уровневая шкала

Используя 100-уровневую радужную шкалу цветов (рис. 1), для измерений дисперсионных матричных границ по планам А и Б получим:

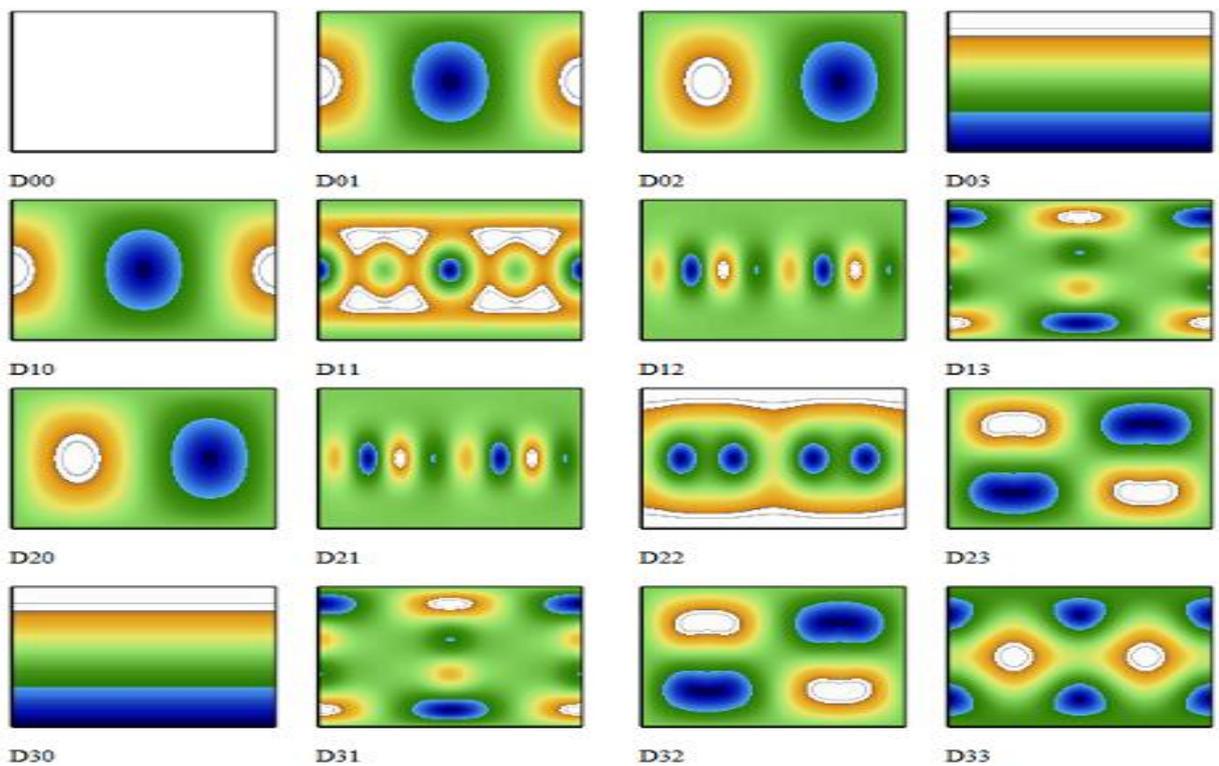


Рис. 3. План А – 12-ти точечный равномерный

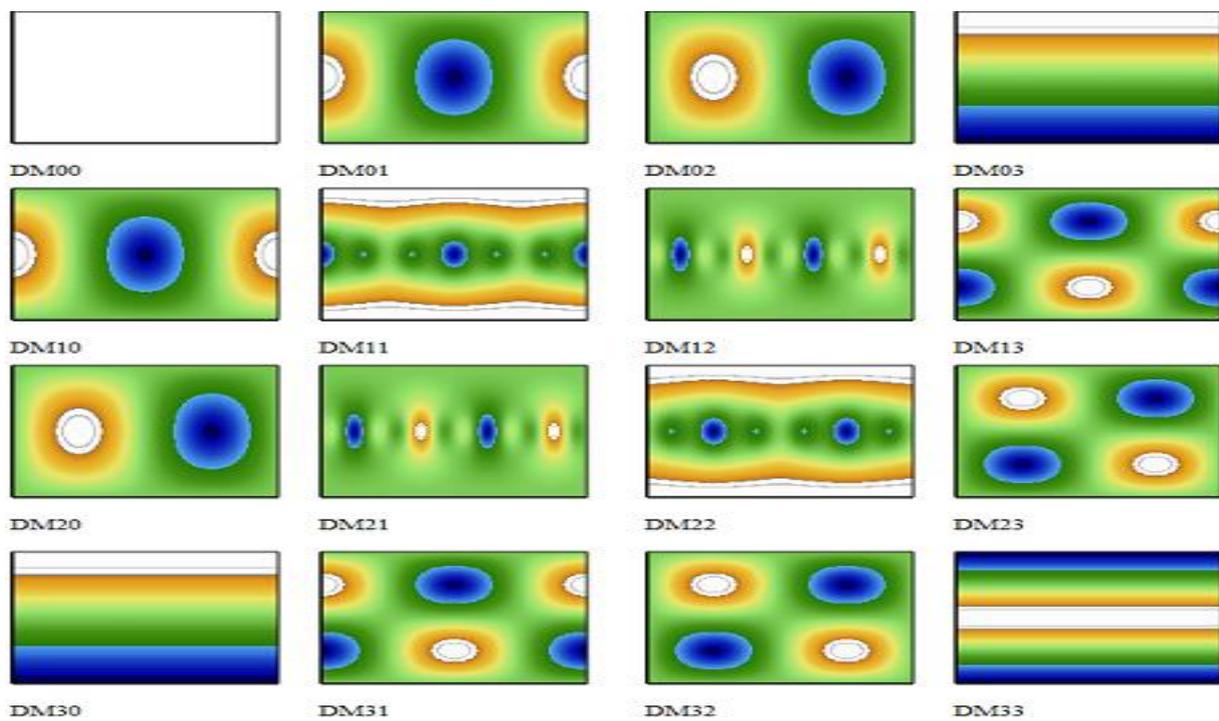


Рис. 4. План Б – 12-ти точечный оптимальный

На всех рисунках по вертикальной шкале по умолчанию имеем координаты долготы 2χ от -90° до $+90^\circ$, по горизонтальной шкале – координаты широты 2ψ от 0° до $+360^\circ$ точки на сфере Пуанкаре.

Числовой диапазон карт представлен табл. 3.

Табл. 3. Числовой диапазон карт

План А – равномерный		План Б – оптимальный [2]	
$\min(D00) = 2$	$\max(D00) = 2$	$\min(DM00) = 2$	$\max(DM00) = 2$
$\min(D01) = -2$	$\max(D01) = 2$	$\min(DM01) = -2$	$\max(DM01) = 2$
$\min(D02) = -2$	$\max(D02) = 2$	$\min(DM02) = -2$	$\max(DM02) = 2$
$\min(D03) = -2$	$\max(D03) = 2$	$\min(DM03) = -2$	$\max(DM03) = 2$
$\min(D11) = 2$	$\max(D11) = 3.375$	$\min(DM11) = 2$	$\max(DM11) = 6$
$\min(D12) = -0.783$	$\max(D12) = 0.783$	$\min(DM12) = -1$	$\max(DM12) = 1$
$\min(D13) = -0.783$	$\max(D13) = 0.783$	$\min(DM13) = -0.999$	$\max(DM13) = 0.999$
$\min(D22) = 2.275$	$\max(D22) = 8$	$\min(DM22) = 2$	$\max(DM22) = 6$
$\min(D23) = -1$	$\max(D23) = 1$	$\min(DM23) = -0.999$	$\max(DM23) = 0.999$
$\min(D33) = 2.275$	$\max(D33) = 8$	$\min(DM33) = 2$	$\max(DM33) = 6$

Используя 2-уровневую шкалу цветов (рис. 2), для разности дисперсионных матричных границ по планам А и Б получим:

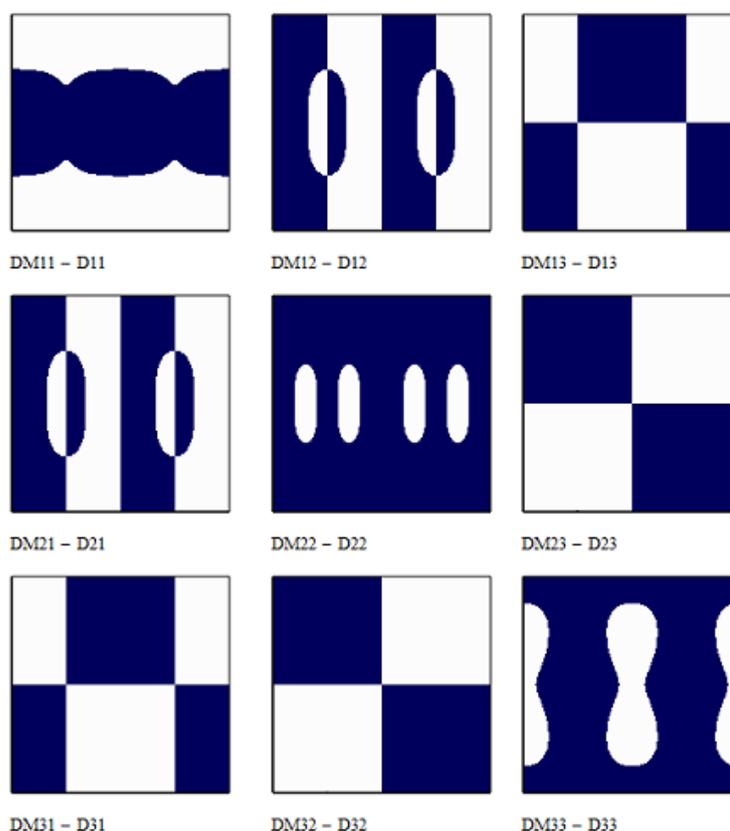
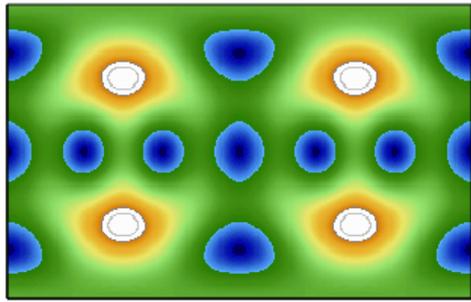


Рис. 5. Сравнение планов А и Б с использованием 2-уровневой шкалы цветов

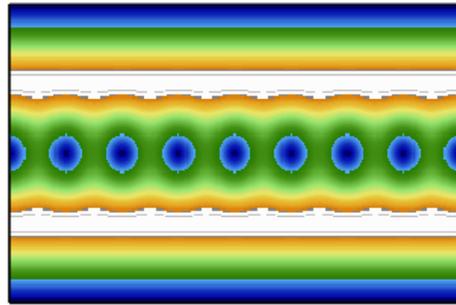
Светлые области на рис. 5 – это те области сферы Пуанкаре, где план А дает более точные оценки, чем план Б. Сравнение площадей темных и светлых участков показывает, что оба плана очень близки по эффективности.

Расчеты также показывают, что в условиях нормального аддитивного шума дисперсионные границы в рассматриваемом случае 12-точечных измерений не зависят от координат точки на сфере Пуанкаре и могут быть представлены теми же матрицам, что и в 6-ти точечном классическом варианте [5].

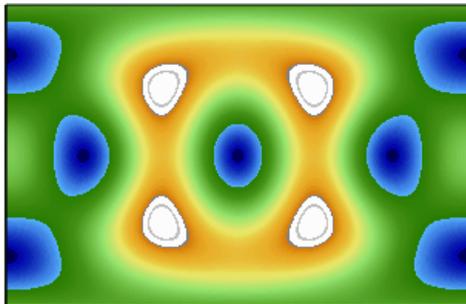
Приведем также примеры распределений определителя (детерминанта) дисперсионных матриц по сфере Пуанкаре (рис. 6).



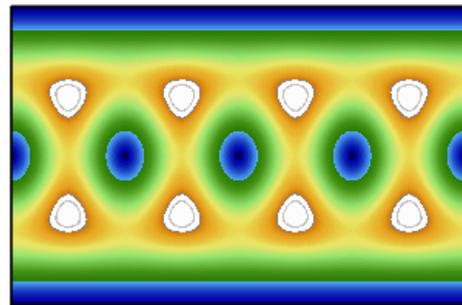
Ddeg-12p
(min = 0; max = 4.996; mean = 2.137)



DMdeg-12p
(min = 0; max = 3.351; mean = 1.783)



Ddeg-6p
(min = 0; max = 7.919; mean = 3.780)



DMdeg-6p
(min = 0; max = 3.997; mean = 2.037)

Рис. 6. Примеры распределений определителя дисперсионных матриц по сфере Пуанкаре

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование позволяет оценить предельную точность измерения поляризационных параметров Стокса лазерного излучения, определяемую квантовым шумом сигнала при регистрации излучения фотоприемником в схеме с поляризатором и фазовым компенсатором. Формулы для оптимальных оценок поляризационных параметров Стокса при аддитивно-мультипликативном шуме частично представлены в [6,7]. Примеры использования полученных результатов при диагностике турбулентности методами лазерной доплеровской и оптоволоконной анемометрии можно найти в [8].

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- IM** – информационная матрица;
- IN** – нормированная информационная матрица;
- DS** – нормированная дисперсионная матрица оценок параметров Стокса;
- J** – матрица когерентности;
- θ – угол поворота анализатора;
- ε – фазовый сдвиг, вносимый компенсатором;
- $\mathbf{s} = (s_0, s_1, s_2, s_3)$ – вектор параметров Стокса;
- ψ – угол наклона большой оси эллипса поляризации к оси X ;
- χ – угол: $\tan(\chi) = b/a$, b/a – отношение длин осей эллипса поляризации;
- δ – фазовый сдвиг поляризованной части световых колебаний вдоль осей X и Y .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Смирнов В.И.** Квантовые пределы точности измерений поляризационных характеристик лазерного излучения (параметрический подход) // Оптические методы исследования потоков: Труды XVII Международной научно-технической конференции, 26 – 30 июня 2023. С. 500-506.
3. **Бард Й.** Нелинейное оценивание параметров. М.: Статистика. 1979. 349 с.
4. **Ринкевичюс Б.С.** Лазерная доплеровская анемометрия. Русайнс, 2017. 191 с.
5. **Смирнов В.И.** Эффективные оценки параметров Стокса частично поляризованного излучения в условиях нормального аддитивного шума // Измерительная техника. №10. 2018. С. 35-40.
6. **Смирнов В.И.** Формулы для оптимальных оценок поляризационных параметров Стокса при аддитивно-мультипликативном шуме // Оптические методы исследования потоков: Труды XVI Международной научно-технической конференции, 28 июня – 02 июля 2021. С. 224-229.
7. **Smirnov V.I.** Visualization of the variance boundaries for the polarization parameters of light on the Poincare sphere // Scientific visualization. 2019. Vol. 11. № 5. Pp. 35-45.
8. **Smirnov V.I.** Computer visualization of turbulent parameter fields in a round jet based on laser doppler and fiber optics measurements // Scientific visualization. 2021. Vol. 13. № 3. Pp. 82-92.

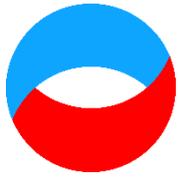
Smirnov V.I.

*National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: smirnovvi-mpei@yandex.ru*

METROLOGICAL ANALYSIS OF VARIOUS SCHEMES FOR MEASURING LASER RADIATION POLARIZATION PARAMETERS

In the laser diagnostics systems of liquid and gas flows, the polarization characteristics of the probing radiation can have an important metrological significance. The limiting minimum error of measuring the polarization parameters of the Stokes laser radiation when registering radiation by a photodetector in a circuit with a polarizer and a phase compensator in the mode of limiting accuracy by multiplicative shot noise of the signal is investigated. Following on from the basic concepts outlined in [1], which analyzes the limiting errors of classical 6-point measurement schemes [2,3], this paper considers 12-point schemes of significant metrological interest with a uniform and optimal choice of measurement points on the Poincare sphere.

POLARIZATION MEASUREMENTS, LIMITING ACCURACY, EFFECTIVE ESTIMATES, STOKES PARAMETERS



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 533.6

Бондарев А.Е., Кувшинников А.Е.

*ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Россия,
125047, Москва, пл. Миусская, 4, E-mail: bond@keldysh.ru; kuvsh90@yandex.ru*

**АНАЛИЗ СРАВНЕНИЯ ТОЧНОСТИ СОЛВЕРОВ В ЗАДАЧЕ О ПЕРЕСЕЧЕНИИ
КОСЫХ СКАЧКОВ**

АННОТАЦИЯ

Цель настоящей статьи – провести анализ точности различных солверов OpenFOAM при решении задачи о пересечении косых скачков, образованных в результате обтекания двойного клина. В рамках исследования сопоставляются результаты моделирования, полученные с использованием разных численных методов при вариации входных параметров, что соответствует методологии обобщенного вычислительного эксперимента. Результаты, полученные в табличном виде, визуализируются в качестве поверхностей ошибок. На основании проведенного анализа формулируются практические рекомендации по выбору оптимального солвера. Полученные результаты могут быть использованы как в фундаментальных исследованиях, так и при инженерных расчетах, требующих высокой достоверности моделирования сложных течений.

**OPENFOAM, ОБОБЩЕННЫЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ, ДВОЙНОЙ КЛИН,
КОСОЙ СКАЧОК**

ВВЕДЕНИЕ

С развитием вычислительных технологий и увеличением доступных вычислительных ресурсов задачи, ранее решаемые исключительно аналитическими или экспериментальными методами, всё чаще переходят в область численного моделирования. Это позволяет значительно расширить диапазон исследуемых параметров, ускорить процесс поиска оптимальных решений и снизить затраты на проведение дорогостоящих экспериментов. Тем не менее, точность и достоверность численных расчетов во многом зависят от используемых алгоритмов аппроксимации, выбора расчетной сетки и корректности реализации граничных условий.

Решение задач газовой динамики, связанных с пересечением косых скачков уплотнения, имеет ключевое значение для развития вычислительной аэродинамики и моделирования сложных течений. Косые скачки широко встречаются в сверхзвуковых потоках, в различных устройствах, где реализуются резкие перепады давления и скорости. Правильное численное воспроизведение этих явлений требует применения эффективных и точных методов решения уравнений Эйлера и Навье–Стокса. Одной из популярных платформ для численного моделирования таких задач является программный пакет OpenFOAM [1], предоставляющий богатый набор солверов и инструментов для решения уравнений газовой динамики.

Однако, несмотря на широкий выбор реализованных в OpenFOAM солверов, вопрос сравнения их точности в задачах, связанных с пересечением косых скачков, остается открытым. Сложность моделирования усугубляется наличием резких градиентов

параметров, возникающих на фронтах скачков, а также их взаимодействием, что требует от численных методов высокой разрешающей способности. Известно, что различные солверы могут по-разному справляться с этими трудностями, что напрямую влияет на достоверность получаемых результатов и возможность их использования в инженерной практике. OpenFOAM, как одна из наиболее гибких и активно развиваемых платформ с открытым исходным кодом, предоставляет исследователям широкие возможности для настройки численных схем и модификации алгоритмов под конкретные задачи. Однако обилие доступных солверов и настроек зачастую затрудняет выбор оптимального подхода, особенно для задач с высокой чувствительностью к численным ошибкам, таких как пересечение косых скачков. В этой связи актуальным становится проведение систематического сравнительного анализа различных солверов OpenFOAM с целью выявления их преимуществ и ограничений при решении задач соответствующего класса. Такой анализ позволит не только повысить достоверность расчетов, но и оптимизировать вычислительные ресурсы, что особенно важно при проведении масштабных или многопараметрических исследований.

ПРЕДЫДУЩИЕ РАБОТЫ

Данная работа является продолжением ряда работ авторов. В работах предыдущего периода рассматривались различные классы газодинамических задач, имеющих референтные решения. Все задачи рассматривались для сверхзвуковых течений.

Исследования, посвященные сравнительному анализу точности солверов при обтекании кругового конуса под углом атаки, представлены в работах [2].

Также рассматривались задачи образования косой ударной волны при падении сверхзвукового потока под определенным углом на пластину [3], задачи об образовании волны разрежения, образующейся при обтекании пластины под определенным углом [4], задачи обтекания конуса, имеющего сферическое затупление [5].

Все результаты получены с помощью построения обобщенного вычислительного эксперимента. Ключевые особенности и составляющие обобщенного вычислительного эксперимента подробно рассмотрены в работах [6-8].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОРГАНИЗАЦИЯ РАСЧЕТОВ

В данной работе для сравнения солверов используется двумерная невязкая задача образования установившегося течения, полученного при обтекании двойного клина с углами α и β сверхзвуковым потоком газа с числом Маха при нулевом угле атаки. Изменяемыми параметрами здесь служат число Маха и углы клина β . Диапазоны изменения варьируемых параметров и шаг изменения выбирались следующим образом: число Маха от 2 до 4 с шагом 0,5, углы двойного клина $\alpha/\beta = 5^\circ/10^\circ, 5^\circ/15^\circ, 5^\circ/20^\circ, 10^\circ/15^\circ, 10^\circ/20^\circ$. Общая схема течения представлена на рис. 1. Для расчета взята система уравнений Эйлера, замыкаемая уравнением состояния идеального газа. Также отметим, что у задачи существует аналитическое решение [8, 9].

В исследовании были рассмотрены четыре солвера: два стандартных – rhoCentralFoam и sonicFoam, а также два созданных сторонними авторами – pisoCentralFoam и QGDFoam. Последние разработаны специалистами Института системного программирования РАН и Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. Все сравниваемые солверы реализуют численные методы различной природы [10-14], то есть в работе не сравниваются различные программные реализации одного метода.

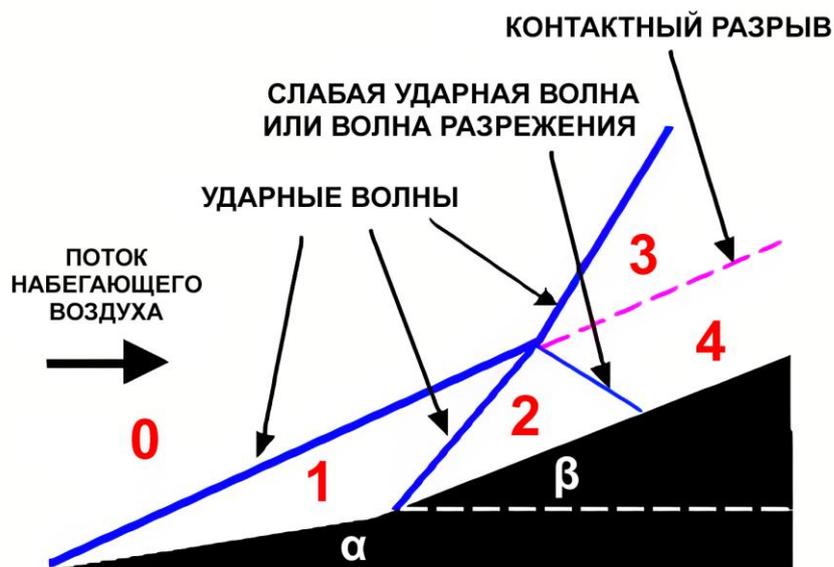


Рис. 1. Схема течения

Схема расчётной области для клина с углами 10° , 20° представлена на рис. 2. Стоит отметить, что на указанном изображении для наглядности сетка крупнее, чем в реальных расчётах.

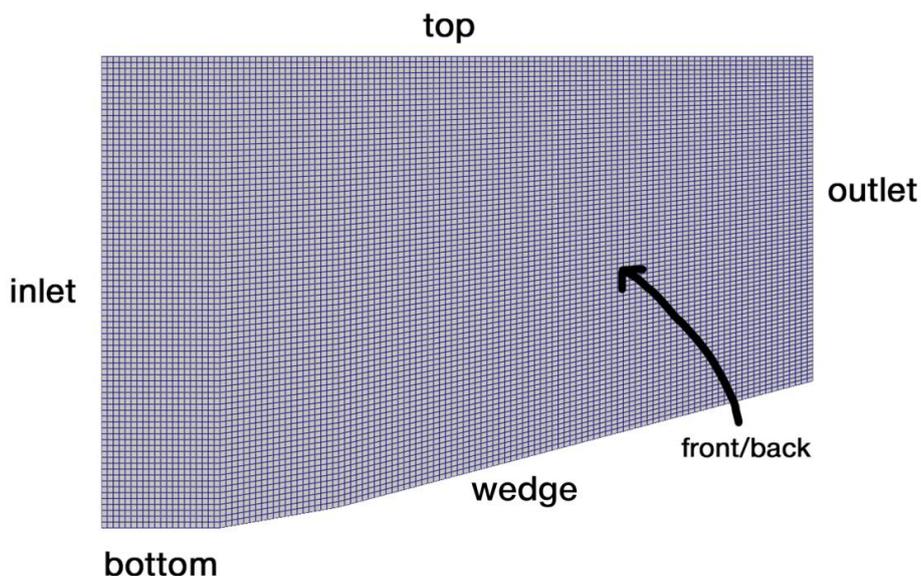


Рис. 2. Схема расчётной области

На входной границе «inlet» устанавливаются параметры невозмущённого набегающего потока: давление $P = 101325$ Па, температура $T = 300$ К, x -компонента скорости U_x варьируется в диапазоне от $694,5$ м/с (соответствует числу Маха $M = 2$) до 1389 м/с ($M = 4$), y -компонента скорости U_y принимается равной 0 м/с. На выходной границе («outlet»), а также на верхней («top») и нижней («bottom») границах для всех величин задаются условия нулевого градиента. Для границы клина («wedge») для давления и температуры задаётся условие нулевого градиента, а для скорости используется условие «slip», соответствующее условию непротекания в уравнениях Эйлера. На передней («front») и задней («back») границах применяется специальное граничное условие «empty», используемое в случаях, когда расчёты в данном направлении не выполняются. Число ячеек сетки – 60000 . Начальные условия соответствуют граничным на грани inlet, то есть в качестве начальных условий используются параметры набегающего потока.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Картинки течения представлены на рис. 3 и рис. 4 в виде распределения давления и плотности в расчетной области. Представленные распределения получены с помощью солвера rhoCentralFoam. Решение не разрушается ни для одного из солверов, что свидетельствует о высоких стабилизирующих свойствах всех солверов, участвующих в исследовании.

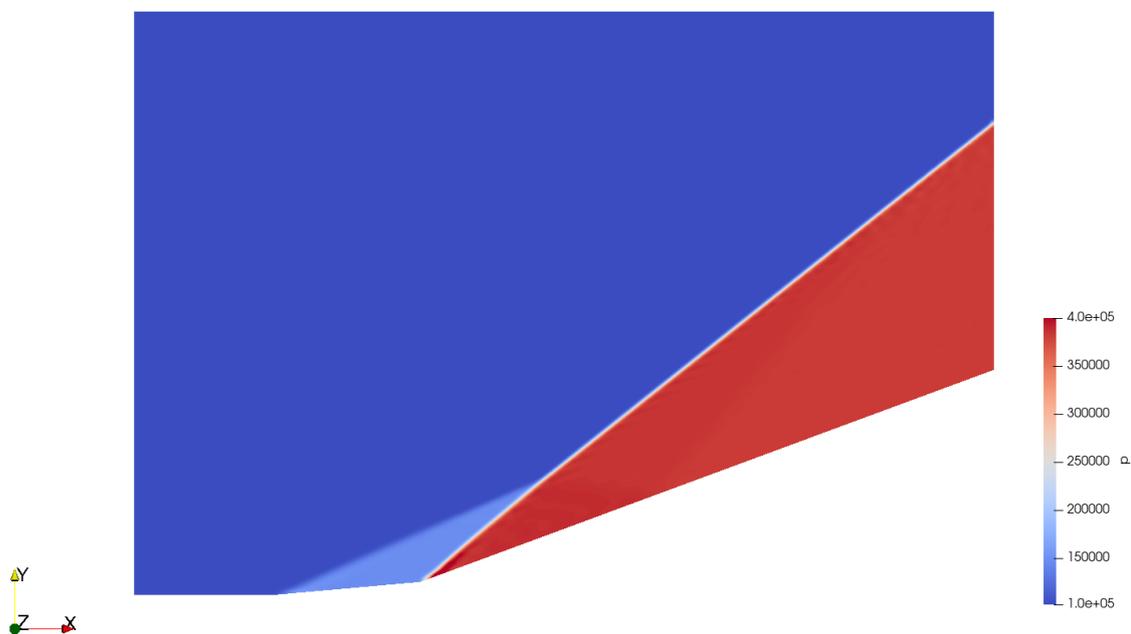


Рис. 3. Поле давления установившегося течения для солвера rhoCentralFoam, $\alpha = 5^\circ$, $\beta = 20^\circ$

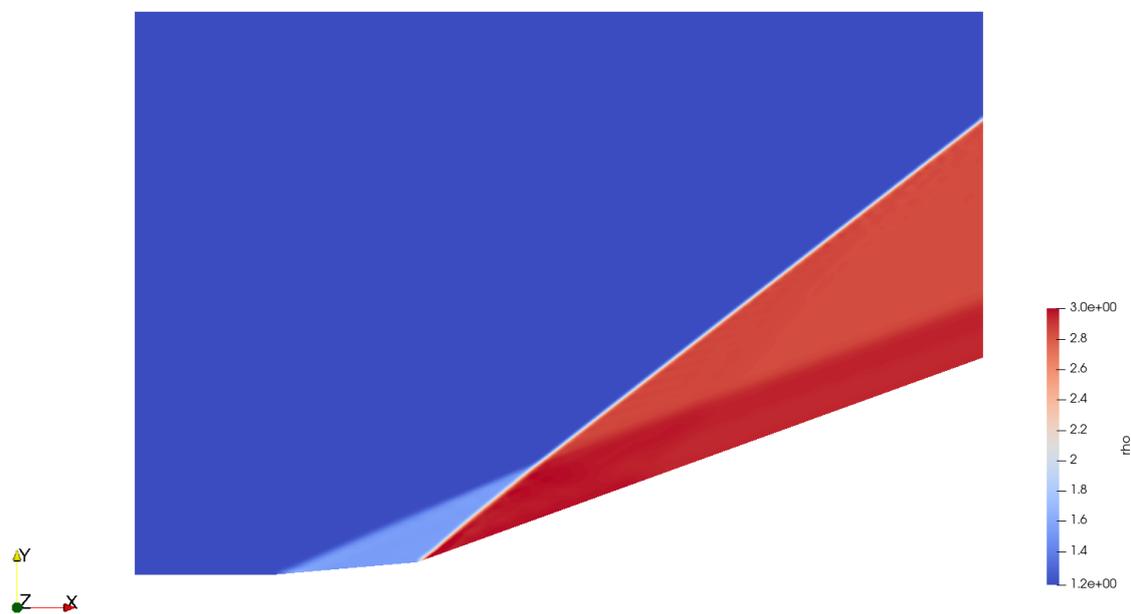


Рис. 4. Поле плотности установившегося течения для солвера rhoCentralFoam, $\alpha = 5^\circ$, $\beta = 20^\circ$

Построим оценки отклонения от точного решения для всей расчетной области в норме L_2 . Для этого определим относительную погрешность Err для нормы L_2 следующим образом

$$Err = \sqrt{\sum_m |y_m - y_m^{exact}|^2 S_m} / \sqrt{\sum_m |y_m^{exact}|^2 S_m}, \quad (1)$$

где u_m – модуль вектора скорости, V_m – объём ячейки. Значения u_m^{exact} получены интерполяцией табличного решения задачи. В анализе сравнительной точности участвовали солверы sonicFoam, QGDFoam, rhoCentralFoam и pisoCentralFoam. Для примера приведена табл. 1 с отклонениями для модуля скорости $M = 3$. В таблице для солверов используются сокращенные обозначения: rCF (rhoCentralFoam), pCF (pisoCentralFoam), sF (sonicFoam), QGDF (QGDFoam). Курсивом выделены наименьшие значения в каждой строке.

Табл. 1. Ошибки для $M = 3$

Углы α/β	<i>rCF</i>	<i>pCF</i>	<i>sF</i>	<i>qGDF</i>
5/10	<i>0,007526</i>	0,008085	0,011781	0,010022
5/15	<i>0,010309</i>	0,011139	0,016121	0,013198
5/20	<i>0,014396</i>	0,015329	0,024626	0,020177
10/15	<i>0,008496</i>	0,009762	0,013356	0,011141
10/20	<i>0,011707</i>	0,012401	0,019939	0,015437

Для анализа таблиц визуализируем данные в виде поверхностей ошибок. Результат представлен на рис. 5.

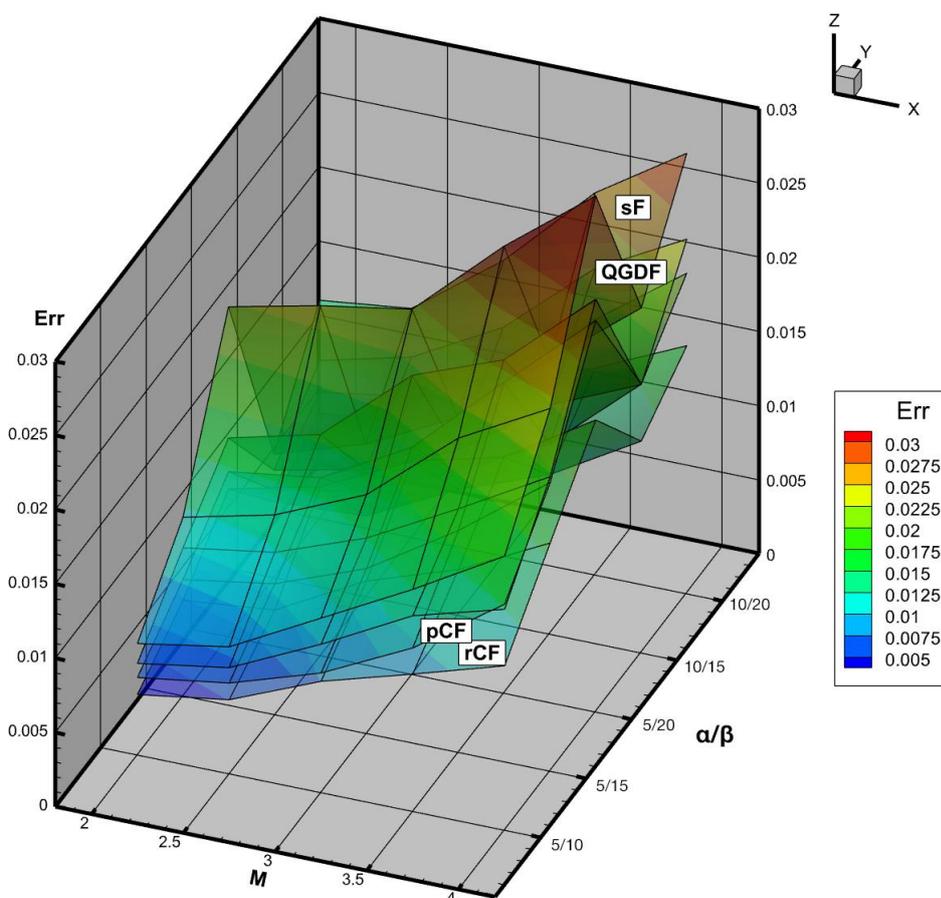


Рис. 5. Поверхности ошибок рассматриваемых солверов для модуля скорости

Анализ представленных таблиц показал, что для всех рассмотренных солверов ошибки увеличиваются как с ростом скорости набегающего потока, так и с увеличением углов двойного клина. Наименьшие значения ошибки во всех случаях демонстрирует солвер rhoCentralFoam, за ним следует pisoCentralFoam, чуть хуже – QGDFoam, а наибольшие ошибки стабильно показывает солвер sonicFoam. Разница между солверами становится особенно заметной при больших числах Маха и больших углах: например, для углов 5°, 20° и числа Маха 4 ошибка sF почти вдвое превышает ошибку rCF. Также стоит отметить, что ошибки для углов 10°, 15° лишь немного больше ошибок углов 5°, 10°, как и ошибки углов 10°, 15° по отношению к ошибкам углов 5°, 15°. Это верно для всех солверов. В будущем авторы надеются подробнее исследовать данное наблюдение, к примеру, для более высоких скоростей посчитать ошибку с большими углами клина.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволило комплексно оценить точность различных солверов OpenFOAM при решении актуальной задачи пересечения косых скачков, возникающих при обтекании двойного клина высокоскоростным потоком невязкого газа. Сравнительный анализ четырех солверов показал, что наименьшие значения численных ошибок по норме L_2 демонстрирует rhoCentralFoam, что делает его предпочтительным выбором для задач, требующих высокой точности в воспроизведении сложных газодинамических структур. Отмечено, что увеличение числа Маха и углов клина приводит к росту ошибок для всех решателей, однако различия между ними становятся особенно заметными при увеличении скорости набегающего потока. Представленные результаты позволяют рекомендовать использование rhoCentralFoam и pisoCentralFoam для инженерных расчетов, где критична достоверность воспроизводимых скачков. Полученные данные могут быть полезны как для специалистов, занимающихся фундаментальными исследованиями в области вычислительной газовой динамики, так и для инженеров, внедряющих численные методы в практику проектирования аэродинамических устройств.

Вычисления проведены с помощью гибридного суперкомпьютера K100, установленного в Суперкомпьютерном Центре коллективного пользования ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **OpenFOAM Foundation** [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://openfoam.org> (дата обращения 10.03.2025).
2. **Bondarev A. E., Kuvshinnikov A. E.** Analysis of the accuracy of OpenFOAM solvers for the problem of supersonic flow around a cone // ICCS 2018, Lecture Notes in Computer Science (LNCS). 2018. Vol. 10862. Pp. 221-230.
3. **Alekseev A.K., Bondarev A.E., Kuvshinnikov A.E.** Comparative analysis of the accuracy of OpenFOAM solvers for the oblique shock wave problem // *Matematica Montisnigri*. 2019. Vol. XLV. Pp. 95-105.
4. **Bondarev A.E., Kuvshinnikov A.E.** Analysis and Visualization of the Computational Experiments Results on the Comparative Assessment of OpenFOAM Solvers Accuracy for a Rarefaction Wave Problem // *Scientific Visualization*. 2021. Vol. 13. № 3. Pp. 34-46.
5. **Bondarev A.E., Kuvshinnikov A.E.** Integrating Scientific Visualization in the Assessment of Openfoam Solvers for the Flow Around a Spherically Blunted Cone // *Scientific Visualization*. 2024. Vol. 16. № 4. Pp. 25-36.
6. **Bondarev A.E.** On the Construction of the Generalized Numerical Experiment in Fluid Dynamics // *Mathematica Montisnigri*. 2018. Vol. XLII. Pp. 52-64.

7. **Bondarev A.E., Galaktionov V.A.** Generalized Computational Experiment and Visual Analysis of Multidimensional Data // *Scientific Visualization*. 2019. Vol. 11. № 4 Pp. 102-114.
8. **Alekseev A.K., Bondarev A.E., Galaktionov V.A., Kuvshinnikov A.E.** On the construction of a generalized computational experiment in verification problems // *Matematica Montisnigri*. 2020. Vol. XLVIII. Pp. 19–31.
9. **Арутюнян Г.М.** Отраженные ударные волны / Г.М. Арутюнян, Л.В. Карчевский. М.: Машгиз, 1973. 376 с.
10. **Anderson J.D.** Modern compressible flow: with historical perspective. McGraw-Hill Education, 2021. 778 p.
11. **Issa R.** Solution of the implicit discretized fluid flow equations by operator splitting // *J. Comput. Phys.* 1986. Vol. 62. № 1. Pp. 40-65.
12. **Kurganov A., Noelle S., Petrova G.** Semidiscrete central-upwind schemes for hyperbolic conservation laws and Hamilton–Jacobi equations // *SIAM J Sci Comput*. 2001. Vol. 23 Pp. 707-740.
13. **Kraposhin M., Bovtrikova A., Strijhak S.** Adaptation of Kurganov-Tadmor numerical scheme for applying in combination with the PISO method in numerical simulation of flows in a wide range of Mach numbers // *Procedia Computer Science*. 2015. Vol. 66. Pp. 43-52.
14. **Истомина М.А.** Истомина М.А. О реализации одномерного квазигазодинамического алгоритма в открытом программном комплексе OpenFOAM // *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша*. 2018. № 1. 19 с.

Bondarev A.E., Kuvshinnikov A.E.

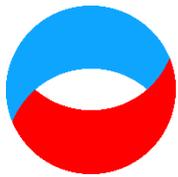
*Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Russia,
125047, Moscow, pl. Miusskaya, 4, E-mail: bond@keldysh.ru; kuvsh90@yandex.ru*

ANALYSIS OF THE COMPARISON OF SOLVER ACCURACY IN THE OBLIQUE SHOCK INTERSECTION PROBLEM

ABSTRACT

The aim of this article is to analyze the accuracy of various OpenFOAM solvers in solving the problem of intersecting oblique shocks formed as a result of flow around a double wedge. The study compares simulation results obtained using different numerical methods under varying input parameters, following the methodology of a generalized computational experiment. The results, presented in tabular form, are visualized as error surfaces. Based on the analysis, practical recommendations are made for selecting the optimal solver. The findings can be used both in fundamental research and in engineering calculations that require high reliability in modeling complex flows.

OPENFOAM, GENERALIZED COMPUTATIONAL EXPERIMENT, DOUBLE WEDGE, OBLIQUE SHOCK



*Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.*

УДК 519.714.2

Бондарева Н.А.

*ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Россия,
125047, Москва, Миусская пл., д.4, E-mail: nicibond9991@gmail.com*

ПОСТРОЕНИЕ МЕТОДОЛОГИЧЕСКОГО ГИБРИДНОГО ПОДХОДА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕНЕРАТИВНЫХ НЕЙРОСЕТЕЙ ПРИ СОЗДАНИИ 3D МОДЕЛЕЙ

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается актуальная научно-техническая проблема интеграции генеративных нейросетевых архитектур в процесс автоматизированного 3D-моделирования. Несмотря на значительный прогресс в данной области, существующие решения зачастую характеризуются недостаточной прозрачностью и ограниченными возможностями детерминированного контроля со стороны инженеров-проектировщиков. В связи с этим, предлагается концепция инновационного гибридного методологического подхода, основанного на синергетическом взаимодействии интеллектуальных систем обработки естественного языка и верифицированных инженерных программных комплексов. Целью предложенного подхода является существенное повышение эффективности и точности процесса проектирования посредством минимизации вероятности возникновения погрешностей и обеспечения возможности оперативной корректировки на всех этапах создания 3D-моделей. Методология базируется на интеграции возможностей ИИ в области семантического анализа и генерации вариативных проектных решений с существующими алгоритмами САД-моделирования. Представлены результаты экспериментальной верификации предложенной концепции, демонстрирующие значительное сокращение временных затрат на создание 3D-моделей по сравнению с традиционными методами, что свидетельствует о перспективности разработанного подхода для практического применения в инженерной деятельности.

**3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ, АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ (САПР),
КОНФЕРЕНЦИЯ, ГЕНЕРАТИВНЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ, АВТОСТЕРЕОСКОПИЧЕСКИЙ
МОНИТОР**

ВВЕДЕНИЕ

Нейрогенеративные сети в настоящее время активно внедряются в различные сферы человеческой деятельности и оказывают значительное влияние на рабочие процессы, демонстрируя вместе с тем впечатляющие возможности в создании новых данных, подобных тем, на которых они были обучены, от генерации реалистичных изображений и видео до создания музыки и написания текстов. Генеративные сети продемонстрировали свою способность к творчеству и инновациям, выходящим за рамки традиционных алгоритмов. В области дизайна, например, они используются для создания новых концепций продуктов, архитектурных проектов и модных коллекций [1-3].

Помимо сфер развлечений и медиа-индустрии, генеративные нейронные сети активно внедряются в высокотехнологичные отрасли, такие как банковский сектор, юриспруденция и промышленное производство. В медицине ведутся исследования по применению нейросетевых технологий для анализа медицинских изображений и разработки персонализированных планов лечения.

Однако, несмотря на впечатляющий потенциал, применение генеративных нейросетей в производственных задачах, особенно в автоматизированном проектировании (САПР), сталкивается с серьезными вызовами [4]. Хотя потенциально нейросети способны генерировать конструкторскую документацию и трехмерные модели, их "черный ящик" – непредсказуемость и непрозрачность процесса генерации – становится существенным и опасным ограничением.

В отличие от традиционных методов САПР, где каждый шаг проектирования контролируется и документируется, нейросети часто выдают результаты без ясного объяснения, как они были получены, что делает сложной валидацию результатов, поиск и исправление ошибок, а также внесение корректировок в процессе моделирования. Это затрудняет доверие к результатам и ограничивает возможности их использования в ответственных проектах, где требуется строгий контроль качества и соответствие стандартам. В результате, несмотря на потенциал к автоматизации и ускорению процесса проектирования, внедрение генеративных нейросетей в производственные процессы САПР требует решения проблемы "черного ящика" и разработки методов, обеспечивающих детерминированный контроль и понятность процесса генерации.

В рамках данного исследования предлагается концепция гибридного методологического подхода, призванного преодолеть указанные ограничения. В основе подхода лежит синергия обработки естественного языка (NLP) и верифицированных инженерных программных комплексов. Предполагается, что сочетание этих двух подходов позволит минимизировать вероятность возникновения погрешностей и неточностей в процессе проектирования, обеспечивая при этом необходимый уровень контроля со стороны специалистов.

Предлагаемая методология базируется на интеграции возможностей систем искусственного интеллекта в области обработки естественного языка и оперативного генерирования вариативных решений с существующими алгоритмами построения САД-моделей в отечественных системах автоматизированного проектирования, таких как КОМПАС-3D [5] и TeFlex [6].

Обоснованность предложенного подхода подтверждается тем, что исключительное использование нейросетевых технологий не обеспечивает гарантированного учета всех конструктивных особенностей и не предоставляет возможности мануальной корректировки выявленных несоответствий. В ходе экспериментальной верификации концепции была использована открытая программная платформа Blender, где посредством интеграции двух технологических подходов были синтезированы базовые трехмерные геометрические структуры: сфера, куб, конус и зубчатое колесо. Каждый геометрический объект характеризовался возможностью параметрической модификации.

Таким образом, данное исследование направлено на разработку и верификацию гибридного методологического подхода к автоматизированному проектированию, сочетающего возможности ИИ и традиционных САД-систем. Результаты исследования могут способствовать повышению эффективности и точности процесса проектирования, а также расширению возможностей контроля со стороны специалистов.

МЕТОДОЛОГИЯ

Предлагаемая методология представляет собой гибридный подход к автоматизированному 3D-моделированию, сочетающий обработку естественного языка (NLP) с использованием проверенных инженерных программных комплексов (САПР), например, КОМПАС-3D или TeFlex. Данный подход направлен на минимизацию ошибок и повышение

точности процесса моделирования по сравнению с использованием исключительно генеративных нейронных сетей. Ключевое преимущество заключается в проверке параметров скрипта, генерируемого ИИ, вместо проверки всей сгенерированной модели.

Вместо непосредственного использования нейросети для генерации 3D-модели, которое чревато скрытыми ошибками, применяется текстовый ИИ для создания управляющего скрипта на языке программирования, совместимом с выбранной САПР. Это позволяет сместить фокус контроля с проверки готовой модели на верификацию параметров, заданных в скрипте, обеспечивая более раннее выявление и исправление потенциальных ошибок. Итеративный характер процесса предполагает корректировку промпта и скрипта на основе анализа промежуточных результатов, что обеспечивает гибкость и высокую точность конечной 3D-модели.

В процессе исследования был составлен примерный алгоритм, позволяющий применить подобный подход на практике. Схема его представлена на рис. 1.

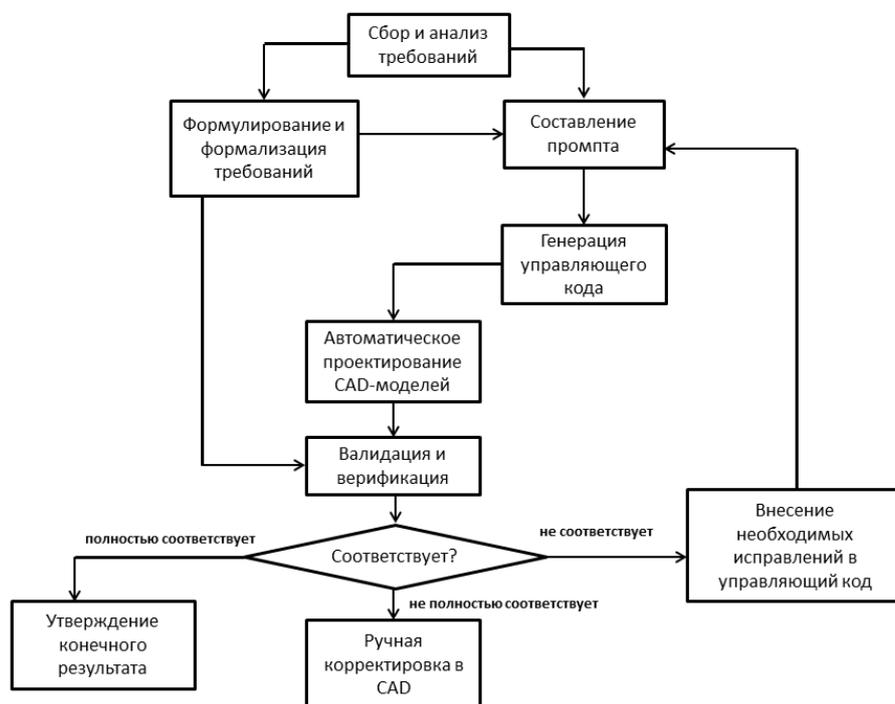


Рис. 1. Алгоритмическая схема описываемой методологии

- 1) Формулировка задачи: четкое определение требований к 3D-модели, включая функциональность, геометрические параметры и ограничения.
- 2) Составление промпта: формулировка текстового запроса (промпта) для текстового ИИ, описывающего желаемую 3D-деталь, учитывая результаты этапа 1.
- 3) Генерация скрипта: использование текстового ИИ для генерации управляющего кода (скрипта) на языке программирования, совместимом с выбранной САПР-системой (например, Python для Blender, языки программирования, поддерживаемые КОМПАС-3D или TeFlex).
- 4) Обработка скрипта в САПР: запуск сгенерированного скрипта в САПР-системе для автоматического построения 3D-модели.
- 5) Корректировка и валидация: анализ полученной 3D-модели специалистом. Внесение необходимых корректировок в промпт или скрипт на основе анализа результатов. Повторение этапов 3-5 до достижения удовлетворительного результата.
- 6) Сохранение модели: сохранение готовой 3D-модели в подходящем формате для дальнейшего использования (например, для стереоскопического отображения).

Данная методология предлагает компромисс между автоматизацией и контролируемостью процесса 3D-моделирования, сочетая преимущества ИИ и проверенных инженерных инструментов. В числе позитивных факторов можно перечислить такие, как сокращение времени моделирования за счет автоматизации процесса, однако в отличие от использования специальных нейронных сетей для 3D-моделирования здесь есть возможность контролировать процесс и сразу вносить необходимые корректировки. Также снижается порог входа для пользователей без глубоких знаний в программировании для выполнения однотипных производственных задач, вместе с тем ценность продвинутых специалистов только возрастает, так как задачи валидации и верификации требуют углубленных профессиональных знаний и большого опыта.

Однако использование такой методологии ставит новый ряд проблем, которые необходимо учитывать при работе. В их числе:

- зависимость от качества текстового ИИ и корректности промпта;
- необходимость базовых знаний в работе с выбранной САПР-системой;
- возможность ошибок в сгенерированном скрипте;
- ограниченность только текстовым описанием при формулировании промта, что создает неудобство для инженеров.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Следует отметить, что существует два подхода к 3D моделированию: ручное моделирование (Manual Modeling), которое позволяет создавать более уникальные и детализированные объекты, и скриптовое моделирование (Scripted Modeling), которое больше ориентировано на автоматизацию процесса моделирования и создание параметрических моделей. Скриптовое моделирование подходит для создания сложных структур или серии похожих объектов с варьирующимися параметрами, которые трудно смоделировать вручную.

Скриптовое моделирование применяется в следующих областях:

- создание параметрических моделей (детали машин, архитектурные элементы);
- генерация сложных структур и паттернов;
- автоматизация процесса моделирования;
- проекты, требующие высокой точности и воспроизводимости.

Скриптовое моделирование характеризуется необходимостью помимо навыков моделирования обладать также навыками программирования. Программирование такого скрипта требует знания основ синтаксиса и понимания алгоритмов построения объектов, также следует учитывать время отладки программы и тестирования её работы.

Простое задание вроде рисования примитивов может занять у начинающего программиста 1-2 часа на написание программы и её отладку. У профессионального разработчика с опытом написания скриптов на языках Python или JavaScript такое же простое задание может занять от 10 до 30 минут. Предложенный подход позволяет сократить время на создание отдельного скрипта и повысить эффективность работы.

В ходе экспериментальной верификации концепции была использована открытая программная платформа Blender [7], где посредством интеграции двух технологических подходов были синтезированы базовые трехмерные геометрические структуры: сфера, куб, конус и зубчатое колесо.

В качестве платформы для проведения предварительных экспериментов система Blender была выбрана благодаря следующим факторам:

- 1) открытый исходный код и свободная доступность: Использование Blender исключает лицензионные ограничения и обеспечивает неограниченный доступ к исходному коду;
- 2) поддержка скриптования на языке Python;
- 3) наличие развитого API и обширного сообщества: Хорошо документированный API и активное сообщество разработчиков Blender обеспечивают доступ к широкому

спектру инструментов и библиотек, что упрощает интеграцию с внешними системами и расширяет возможности проведения экспериментов;

- 4) Blender предоставляет инструменты для параметрического моделирования, что позволяет создавать 3D-модели с изменяемыми параметрами, задаваемыми через скрипты. Это существенно для проверки гипотезы о влиянии параметров, заданных текстовым ИИ, на характеристики генерируемых моделей;
- 5) Blender предоставляет широкий набор инструментов для последующего ручного редактирования и модификации 3D-моделей, что позволяет проводить анализ результатов и внести необходимые корректировки.

Был применен метод автоматизированного моделирования с использованием программирования, основанный на исполнении программного кода (скрипта). В рамках данного подхода, геометрическое моделирование осуществляется посредством автоматического выполнения программного кода (скрипта), генерируемого внешней системой. Этот подход демонстрирует высокую производительность при генерации примитивных геометрических форм и относительно простых составных объектов, геометрия которых полностью определяется набором входных параметров.

Также подобный подход позволяет легко варьировать заданные параметры в различных сочетаниях (рис. 2).

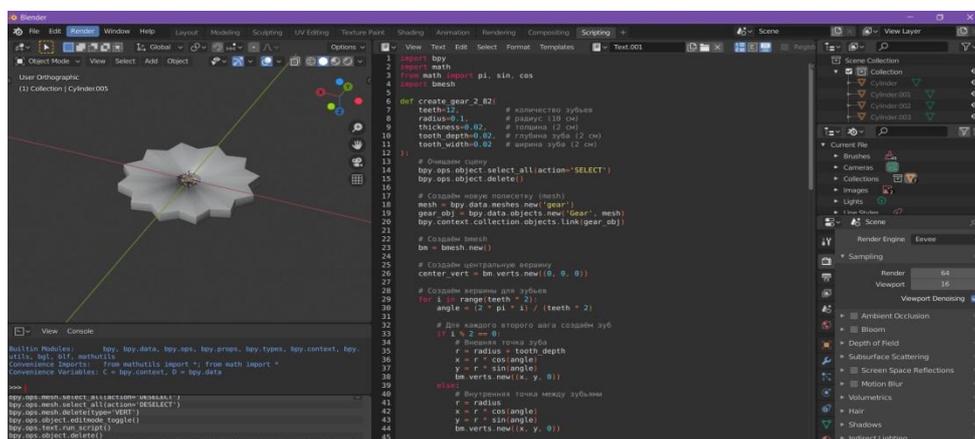


Рис. 2. Пример использования управляющего кода для моделирования для моделирования 3D фигуры (шестеренки)

Изначально фигура была задана описанием следующего набора параметров (табл.1):

Табл. 1. Набор формирующих параметров для 3D-модели зубчатой шестеренки

<pre>def create_gear_2_82(teeth=12, # количество зубьев radius=0.1, # радиус (10 см) thickness=0.02, # толщина (2 см) tooth_depth=0.02, # глубина зуба (2 см) tooth_width=0.02 # ширина зуба (2 см)</pre>
--

По результатам исполнения скрипта программой была сформирована модель шестеренки, представленная на рис. 3.

Данный подход обеспечивает возможность оперативной программной модификации сгенерированной 3D-модели. В качестве иллюстрации, на рис. 4 представлен пример параметрической модификации геометрии конуса (параметры приведены в табл. 2). Она заключается в выполнении операции булевого вычитания, в результате которой из исходного конуса удаляется сегмент, составляющий четверть его объема.

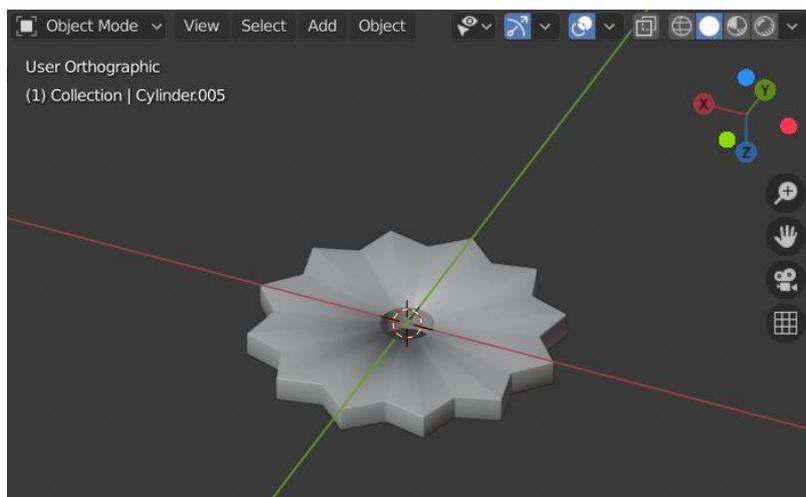


Рис. 3. Визуализация детали «шестеренка»

Табл. 2. Набор формирующих параметров для 3D-модели конуса

```
# Создание конуса
# Радиус основания = 0.1 метра (10 см)
# Глубина (высота) = 0.2 метра (20 см) - можно изменить по желанию
bpy.ops.mesh.primitive_cone_add(
    radius1=0.1, # радиус основания в метрах
    radius2=0, # радиус верхушки (0 для острого конуса)
    depth=0.2, # высота конуса
    location=(0, 0, 0.1) # расположение (подняли на половину высоты, чтобы основание
было на уровне сетки)
)
```

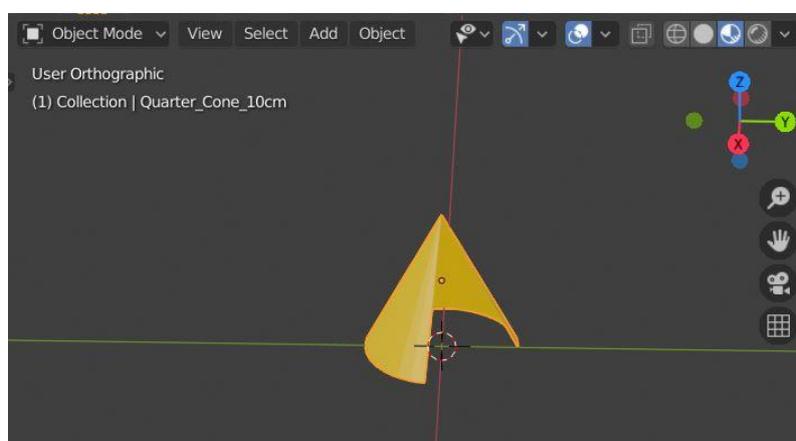


Рис. 4. Конус с вырезанным сегментом

ПЕРЕХОД К СТЕРЕО

Визуализация посредством стереоскопических технологий существенно усиливает для зрителя восприятие глубины и пространственных характеристик объекта, приближая его представление к реальному восприятию. Ключевое преимущество этого метода заключается в создании условий, максимально приближенных к естественному зрительному восприятию.

В рамках проекта, проводимого в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, исследуются методы создания стереоскопических представлений результатов научных исследований. Для экспериментов используются две стереоскопические системы: классическая установка и автостереоскопический монитор Dimenco, обеспечивающий просмотр стереоизображения без специальных очков. Автостереоскопический монитор позволяет формировать интегрированное изображение, включающее множество ракурсных проекций объекта, тем

самым расширяя диапазон углов обзора. Подробное описание технологии автостереоскопического отображения приведено в работе [8-9].

На рис. 5 представлен образец составного стереоскопического кадра, построенного по методу multi-view (справа) и отдельно увеличенное изображение, позволяющее рассмотреть детали (слева). Левое изображение носит чисто иллюстративный характер и не является частью стереокадра.

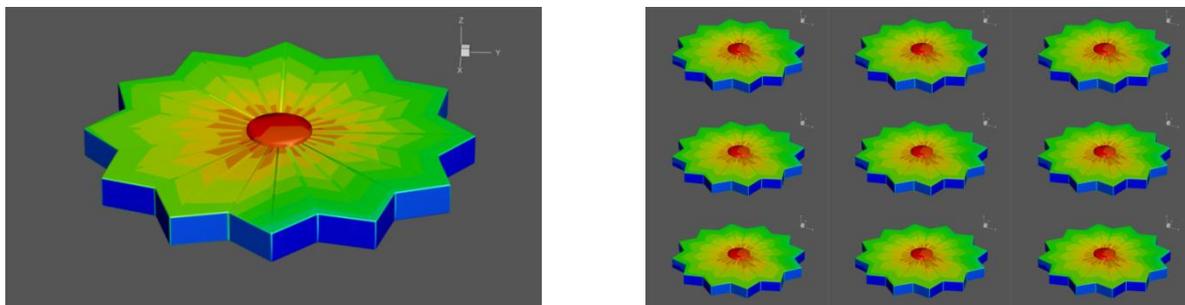


Рис. 5. Результаты гибридного моделирования шестеренки (основной кадр + представление multi-view)

Также в стереопредставлении была продемонстрирована модифицированная модель конуса с удаленным сегментом, составляющим четверть объема модели (рис. 6).

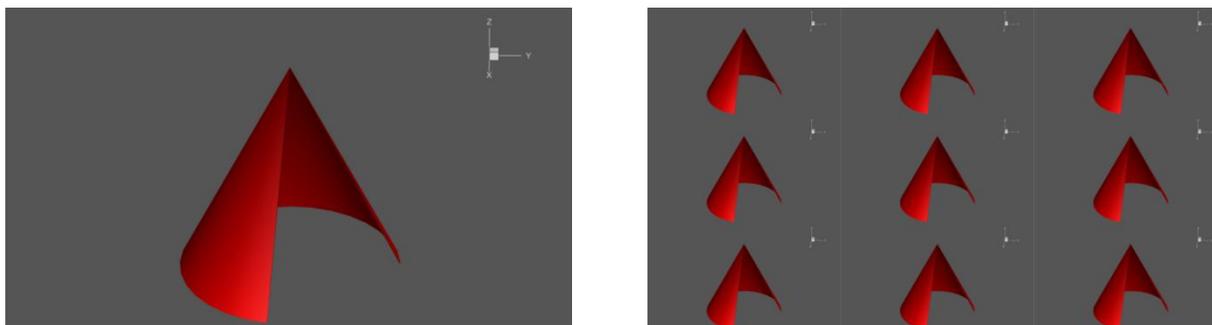


Рис. 6. Результаты гибридного моделирования конуса с вырезанным сегментом (основной кадр + представление multi-view)

Сложная геометрия 3D-моделей, характеризующаяся наличием криволинейных поверхностей, представляет значительный интерес для исследований стереоскопического восприятия, поскольку субъективное восприятие глубины и формы может варьироваться в широком диапазоне в зависимости от множества факторов, включая индивидуальные особенности зрительной системы и физические размеры объекта.

ОБСУЖДЕНИЕ

В данной работе был представлен новый гибридный подход к автоматизированному 3D-моделированию, сочетающий обработку естественного языка (NLP) и традиционные методы САПР. Такой подход, основанный на генерации скриптов с помощью ИИ и последующей их обработке в специализированном программном обеспечении, демонстрирует ряд преимуществ и недостатков, которые необходимо обсудить для оценки его практической применимости и перспектив дальнейшего развития.

С одной стороны, предложенный метод демонстрирует значительный потенциал для повышения эффективности и точности процесса 3D-моделирования. Автоматизация генерации скриптов на основе текстовых описаний существенно сокращает время, необходимое для создания базовых моделей, а возможность проверки параметров скрипта на ранних этапах позволяет минимизировать ошибки и повысить надежность конечного результата. Гибкость итеративного процесса, позволяющего корректировать как текстовые запросы, так и сгенерированный код, делает данный подход адаптируемым к различным

задачам и требованиям. Специалист может сосредоточиться на корректировке и улучшении модели, а не на рутинном создании базовой геометрии. По мере использования системы и корректировки результатов, можно обучать ИИ для улучшения качества генерируемых скриптов

Однако необходимо признать и определенные ограничения. Качество генерируемых скриптов напрямую зависит от качества текстового запроса (промпта), что требует от пользователя определенных навыков и понимания возможностей ИИ. Кроме того, необходимость ручной корректировки и валидации результатов ограничивает степень полной автоматизации процесса. Возможны также ошибки в сгенерированном коде, требующие вмешательства специалиста. Наконец, применимость данного подхода может быть ограничена возможностями используемых САПР-систем и языков программирования. Также на данном этапе существуют проблемы с масштабируемостью: подход может быть эффективен для создания отдельных деталей, но его возможности для сложных сборок и проектов могут быть ограничены.

Проведено сравнение предлагаемого гибридного подхода с существующими подходами к 3D-моделированию с использованием нейросетей, которые можно примерно разделить на несколько категорий.

- 1) Полностью генеративные модели [10]: эти модели, такие как PointNeRF, GAN-based модели (например, StyleGAN для 3D), используют нейронные сети для генерации 3D-моделей непосредственно из шума или латентного пространства. Среди их преимуществ высокая скорость генерации, возможность создания новых уникальных форм. Однако в их случае проблема "черного ящика" становится ярко выраженной. Трудно контролировать процесс генерации и вносить корректировки, поэтому качество моделей может быть непредсказуемым, и конечная пост-обработка может занять столько же времени, сколько и проектирование с нуля. Такой метод подходит для использования в областях, где не требуется точность и внимание к деталям.
- 2) Модели, основанные на преобразовании 2D в 3D [11]: эти модели используют нейронные сети для преобразования 2D-изображений (или множества изображений) в 3D-модели. Примеры включают в себя методы, основанные на многовидовых изображениях или на эскизах. Это дает возможность создания 3D-моделей из доступных 2D-данных (фотографий, рисунков). Однако качество 3D-моделей сильно зависит от качества и количества 2D-данных. Может быть сложно получить точную геометрию и детализацию. Проблема "черного ящика" также присутствует.

Предлагаемый гибридный подход занимает промежуточное положение между полностью генеративными моделями и скриптовым моделированием. Он использует текстовый ИИ для преобразования неформальных требований в параметры, которые затем используются для управления генерацией 3D-модели. После генерации модель может быть доработана вручную.

Существует ряд перспективных направлений для дальнейших исследований и улучшений. Вот некоторые из них:

- разработка специализированных текстовых ИИ для САПР;
- автоматизация промпт-инжиниринга: разработка алгоритмов, которые автоматически генерируют оптимальные промнты на основе заданных требований к 3D-модели;
- интеграция с базами знаний и онтологиями;
- разработка API для обмена данными между нейросетями и САПР-системами: создание стандартизированных API, которые позволяют легко интегрировать нейросети с существующими САПР-системами;
- интерактивное редактирование моделей: Разработка интерфейсов, которые позволяют специалистам интерактивно редактировать сгенерированные модели, используя инструменты САПР, и автоматически обновлять скрипты;

- интеграция с системами, распознающими чертежи: это позволит составлять смешанный промпт, основанный на графическом запросе и текстовом описании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассматривается гибридный подход к 3D-моделированию, сочетающий обработку естественного языка и традиционные методы САПР, который демонстрирует перспективное сочетание автоматизации и контролируемости. Описана методология подхода. Методология опробована на реальных задачах моделирования. Представлены результаты работ по построению на автостереоскопическом мониторе с помощью многовидового представления.

Несмотря на выявленные ограничения, связанные с качеством входных данных и необходимостью ручной корректировки, метод показал значительный потенциал для ускорения и повышения точности процесса создания 3D-моделей, особенно для параметрических задач. Дальнейшие исследования должны быть направлены на улучшение качества генерации скриптов, автоматизацию процесса валидации и расширение совместимости с различными САПР-системами. Полученные результаты открывают новые возможности для повышения эффективности и доступности 3D-моделирования для широкого круга пользователей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ho J., Jain A., Abbeel P.** Denoising diffusion probabilistic models // ArXiv preprint. 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.11239>.
2. **Meng C., He Y., Song Y., Song J., Wu J., Zhu J., Ermon S.** SDEdit: guided image synthesis and editing with stochastic differential equations // ArXiv preprint. 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.01073>.
3. **Radford A., Jong W.K., Hallacy C., Ramesh A., Goh G., Agarwal S., Sastry G., Askell A., Mishkin P., Clark J., Krueger G., Sutskever I.** Learning transferable visual models from natural language supervision. ArXiv preprint. 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.00020>.
4. **Бондарева Н.А.** Графические нейронные сети и проблемы верификации изображений // Труды 33-ой Международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению ГрафиКон 2023. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия, 19-21 сентября 2023 г. С. 317-327.
5. **КОМПАС-3D.** Российская импортнезависимая система трехмерного проектирования. URL: <https://kompas.ru/> (дата обращения 29.04.2025).
6. **T-FLEX.** CAD Российское инженерное ПО для 3D проектирования и разработки конструкторской документации URL: <https://www.tflexcad.ru/> (дата обращения 29.04.2025).
7. **Blender.** URL: <https://www.blender.org/> (дата обращения 29.04.2025).
8. **Andreev S.V., Bondareva N.A.** Constructing a representation of textual information in stereo presentations // Proceedings of the 28-th International Conference of Computer Graphics and Vision (GraphiCon-2018). TUSUR Publishing, Tomsk, 24–27 September 2018. Pp. 86-89.
9. **Andreev S.V., Bondareva N.A., Bondarev A.E.** Expansion of the functions of the multi-view stereomaker software for automatic construction of complex stereo images // Scientific Visualization. 2021. Vol. 13. № 2. Pp. 149-156.
10. **Masterpiece Studio.** URL: <https://masterpiecestudio.com/> (дата обращения 29.04.2025)
11. **Kaedim** AI-powered Art Outsourcing. URL: <https://www.kaedim3d.com/> (дата обращения 29.04.2025).

Bondareva N.A.

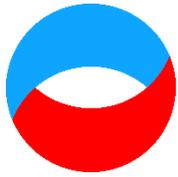
*Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Russia,
125047, Moscow, Miuskaya sq, 4, E-mail: nicibond9991@gmail.com*

DEVELOPING A HYBRID METHODOLOGICAL APPROACH FOR GENERATIVE NEURAL NETWORK-BASED 3D MODELING

ABSTRACT

This article addresses the relevant scientific and technical challenge of integrating generative neural network architectures into the automated 3D modeling process. Despite significant progress in this field, existing solutions are often characterized by insufficient transparency and limited deterministic control capabilities for design engineers. Therefore, an innovative hybrid methodological approach is proposed, based on the synergistic interaction of intelligent natural language processing (NLP) systems and verified engineering software suites. The objective of the proposed approach is to substantially enhance the efficiency and accuracy of the design process by minimizing the probability of errors and ensuring the possibility of rapid correction at all stages of 3D model creation. The methodology is based on the integration of AI capabilities in semantic analysis and the generation of variable design solutions with existing CAD modeling algorithms. The results of an experimental verification of the proposed concept are presented, demonstrating a significant reduction in the time required for 3D model creation compared to traditional methods, which indicates the promise of the developed approach for practical application in engineering activities.

3D MODELING, COMPUTER-AIDED DESIGN (CAD), CONFERENCE, GENERATIVE
NEURAL NETWORKS, AUTOSTEREOSCOPIC MONITOR



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 004.925.8

Конопацкий Е.В.¹, Кислицын Д.И.¹, Степура А.В.², Котова О.В.³

¹ Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Россия,
603000, Нижний Новгород, Ильинская ул., 65, E-mail: e.v.konopatskiy@mail.ru

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет, Россия,

129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, E-mail: stepuraAV@mgsu.ru

³ Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, Россия,
286123, Макеевка, Державина ул., 2, E-mail: o.v.kotova@donnasa.ru

**МЕТОД ПОИСКА ОПТИМАЛЬНЫХ УЗЛОВ АППРОКСИМАЦИИ НЕПРЕРЫВНЫХ
ФУНКЦИЙ С УЧЁТОМ НЕЛИНЕЙНОСТИ ПРОСТРАНСТВА**

АННОТАЦИЯ

Разработан метод поиска оптимальных узлов аппроксимации, который представлен в докладе на примере функции Рунге. В основе метода лежит применение интерполяционных алгебраических кривых, параметризованных в точечном исчислении, что позволяет свести задачу к минимизации целевой функции многих переменных, обеспечивающей наименьшее среднеквадратичное отклонение аппроксимирующей функции от исходной. В отличие от классических подходов, где коэффициенты интерполирующей функции определяются по фиксированным узлам, предлагаемый метод позволяет управлять расположением узлов интерполяции. Это достигается благодаря свойствам интерполяционных кривых, параметризованных в точечном исчислении, которые строятся на основе равномерного распределения параметра и сохраняют координаты узлов в своём уравнении, что и открывает возможности поиска их оптимального расположения. Результатом аппроксимации является алгебраическая кривая в параметрической форме, что позволяет снизить степень полинома за счёт нелинейности параметрического пространства. Например, для функции Рунге традиционный подход с узлами Чебышева требует использования полинома 19-й степени (20 узлов) для достижения среднеквадратичной ошибки 0,000111. В то же время предложенный метод обеспечивает ошибку 0,0000284 уже при 6 узлах, что на порядок точнее и позволяет заменить один полином высокой степени двумя полиномами 5-й степени (по каждой координате). Таким образом, метод демонстрирует значительное повышение эффективности аппроксимации за счёт оптимизации расположения узлов и параметрического представления кривой.

**АППРОКСИМАЦИЯ, ИНТЕРПОЛЯЦИОННАЯ КРИВАЯ, ТОЧЕЧНОЕ ИСЧИСЛЕНИЕ,
НЕЛИНЕЙНОЕ ПРОСТРАНСТВО, ФУНКЦИЯ РУНГЕ**

ВВЕДЕНИЕ

Интерполяция и аппроксимация являются ключевыми инструментами в научной визуализации и визуальной аналитике. Интерполяция активно применяется в следующих областях:

- визуализация полей различной природы [1, 2];

- ускоренный рендеринг сцен с использованием 3D-графики [3];
- сжатие текстур в современных вычислительных устройствах [4];
- анализ результатов параметрических расчётов в вычислительной аэрогазодинамике [5].

Аппроксимация, в свою очередь, широко используется:

- в численных методах решения дифференциальных уравнений [7-9];
- в инженерной геометрии и компьютерной графике [10];
- при моделировании капиллярных поверхностей и анализе их устойчивости [11];
- при обработке данных в вычислительной аэрогазодинамике [5, 12].

Среди разнообразия задач многомерной аппроксимации [13, 14], необходимо выделить класс задач, связанных с аппроксимацией непрерывных функций [15, 16], которая традиционно выполняется на равномерных сетках [17]. Однако такой подход ограничен, поскольку узлы интерполяции фиксируются заранее, что необходимо для вычисления коэффициентов аппроксимирующих функций.

В работе [13] предложен альтернативный метод построения интерполяционных кривых в точечном исчислении, позволяющий свободно выбирать узлы интерполяции. Этот подход открывает новые возможности для аппроксимации, в частности, позволяет сформулировать задачу поиска оптимальных узлов через минимизацию целевой функции. Ранее такая постановка задачи была невозможна из-за ограничений классических методов интерполяции.

Таким образом, развитие методов параметрической аппроксимации с оптимизацией узлов представляет значительный интерес для повышения точности и эффективности вычислений в различных приложениях.

Основное содержание доклада

Метод оптимального поиска узлов аппроксимации основан на использовании интерполяционных кривых, реализованных в точечном исчислении [13]. Основная идея определения таких кривых заключается в том, что вместо конкретных значений полиномиальных коэффициентов используются координатные векторы A_k , которые управляют формой алгебраической кривой

$$M = \sum_{k=0}^n A_{k+1} t^{n-k}, \quad (1)$$

где M – текущая точка дуги кривой, t – текущий параметр, который изменяется от 0 до 1, n – количество узлов интерполяции.

Произведём замену в уравнении (1) координатных векторов A_k на узлы интерполяционной кривой M_k . Для этого введём условие: $M = M_{k+1}$ при равномерном параметрическом распределении $t = k/n$. При этом учитываем, что крайние узлы интерполяции фиксированы: начальная точка кривой соответствует $A_1 = M_1$ при $t = 0$, а конечная – $A_n = M_n$ при $t = 1$. Данное преобразование позволяет получить конкретные значения параметра t в каждом узле интерполяции.

Далее формируется система линейных уравнений, решаемая методом Крамера относительно координатных векторов A_k , которые заменяются на узлы M_k . Полученные выражения для A_k подставляются в исходное точечное уравнение алгебраической кривой. В итоге получаем параметрическое точечное уравнение интерполяционной кривой, которое определяется набором узловых точек M_k и текущим параметром t

$$M = \sum_{k=0}^n M_{k+1} \phi_{k+1}(t), \quad (2)$$

где $\phi_{k+1}(t)$ – полиномиальные функции степени n , полученные в результате замены координатных векторов A_k на узлы интерполяционной кривой M_k .

Таким образом в уравнении интерполяционной кривой (2) сохраняется возможность управлением узлами интерполяции M_k . Переходя к системе параметрических уравнений, для двумерного пространства получим

$$\begin{cases} x = \sum_{k=0}^n x_{k+1} \phi_{k+1}(t) \\ y = \sum_{k=0}^n y_{k+1} \phi_{k+1}(t) \end{cases}, \quad (3)$$

где x_{k+1} и y_{k+1} – координаты узлов интерполяции M_{k+1} .

Полученная система параметрических уравнений (3) для алгебраической кривой, сохраняющая координаты интерполяционных узлов, позволяет сформулировать задачу оптимизации их расположения вдоль оси абсцисс для аппроксимации непрерывных функций. Для реализации этого подхода необходимо выполнить дискретизацию интерполяционной кривой, представив её в виде набора из m точек (где $m > n$).

В двумерном случае процесс дискретизации приводит к формированию двух отдельных функциональных массивов x_i и y_i от узлов интерполяции и текущего параметра с равномерным распределением значений $t_i = i/m$. Таким образом, для каждого конкретного значения t_i получим значения функций x_i и y_i , которые зависят только от узлов интерполяции M_k .

Целевая функция представляет собой сумму квадратов разности координат

$$\sum_{i=1}^m (f(x_i) - y_i)^2, \quad (4)$$

где $f(x_i)$ – это аппроксимируемая функция в качестве переменной, для которой используется массив значений, полученный на основе аппроксимирующей функции.

Определив минимум целевой функции (4), получим значения координат узлов интерполяционной кривой, оптимизированные по оси абсцисс, и итоговое уравнение интерполяционной кривой в векторной форме (2) или в виде системы однотипных параметрических уравнений (3).

Для проведения вычислительных экспериментов выбрана функция Рунге, которая определяется на отрезке $[-1, 1]$

$$f(x) = \frac{1}{1 + 25x^2}. \quad (5)$$

Для аппроксимации функции Рунге используется интерполяционная кривая в нелинейном двумерном пространстве, проходящая через 6 узлов интерполяции M_k , которая определяется следующим точечным уравнением и сводится к системе двух однотипных параметрических уравнений

$$M = \phi_1 M_1 + \phi_2 M_2 + \phi_3 M_3 + \phi_4 M_4 + \phi_5 M_5 + \phi_6 M_6$$

$$\Downarrow$$

$$\begin{cases} x = \phi_1 x_1 + \phi_2 x_2 + \phi_3 x_3 + \phi_4 x_4 + \phi_5 x_5 + \phi_6 x_6 \\ y = \phi_1 y_1 + \phi_2 y_2 + \phi_3 y_3 + \phi_4 y_4 + \phi_5 y_5 + \phi_6 y_6 \end{cases},$$
(6)

где x_j и y_j – координаты 6 узлов интерполяции ($j=1,2,\dots,6$), ϕ_j – функции от параметра t , которые вычисляются по следующим формулам

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \bar{t}^5 - \frac{77}{12} \bar{t}^4 t + \frac{269}{24} \bar{t}^3 t^2 - \frac{77}{12} \bar{t}^2 t^3 + \bar{t} t^4 \\ \phi_2 &= 25 \bar{t}^4 t - \frac{1450}{24} \bar{t}^3 t^2 + \frac{1850}{48} \bar{t}^2 t^3 - \frac{25}{4} \bar{t} t^4 \\ \phi_3 &= -25 \bar{t}^4 t + \frac{2950}{24} \bar{t}^3 t^2 - \frac{1150}{12} \bar{t}^2 t^3 + \frac{50}{3} \bar{t} t^4 \\ \phi_4 &= \frac{50}{3} \bar{t}^4 t - \frac{1150}{12} \bar{t}^3 t^2 + \frac{2950}{24} \bar{t}^2 t^3 - 25 \bar{t} t^4 \\ \phi_5 &= -\frac{25}{4} \bar{t}^4 t + \frac{1850}{48} \bar{t}^3 t^2 - \frac{1450}{24} \bar{t}^2 t^3 + 25 \bar{t} t^4 \\ \phi_6 &= \bar{t}^4 t - \frac{77}{12} \bar{t}^3 t^2 + \frac{269}{24} \bar{t}^2 t^3 - \frac{77}{12} \bar{t} t^4 + t^5 \end{aligned},$$
(7)

где $\bar{t} = 1-t$ – дополнение параметра t до 1.

Значения $f(x_i)$ вычисляются исходя из исходной функции Рунге (5)

$$f(x_i) = \frac{1}{1 + 25x_i^2}.$$
(8)

Далее составляем и определяем минимум целевой функции (4). Для проведения вычислительных экспериментов значение $m=100$.

Из 6 узлов интерполяции первый и последний уже определены исходя из условий: $x_1 = -1$, $x_6 = 1$. Остаётся вычислить координаты 4 узлов: x_2, x_3, x_4, x_5 , таким образом, чтобы отклонение аппроксимируемой функции Рунге (8) от аппроксимирующей функции (6) было минимальным. В результате были определены оптимальные координаты узлов аппроксимации функции Рунге по оси абсцисс

$$x_2 = -0.233198, x_3 = -0.06054, x_4 = 0.06054, x_5 = 0.233198.$$
(9)

Итоговые уравнения аппроксимирующей функции в нелинейном двухмерном пространстве представлены в виде следующей системы параметрических уравнений

$$\begin{cases} x = -1 + 22.886t^5 - 57.215t^4 + 57.076t^3 - 28.398t^2 + 7.652t \\ y = -9.964 \cdot 10^{-9} t^5 + 15.603t^4 - 31.206t^3 + 15.691t^2 - 0.088t + 0.038 \end{cases}.$$
(10)

Как видно из полученной системы уравнений (10), для аппроксимации функции Рунге (5) было использовано два полинома 5-й степени по каждой из осей координат. Выполним визуальное сравнение графика аппроксимируемой функции Рунге и аппроксимирующей алгебраической кривой 5-го порядка в нелинейном пространстве (рис. 1).

Для визуального сравнения полученных результатов приведём график функции Рунге, аппроксимированный полиномом Лагранжа с равномерным распределением узлов интерполяции (рис. 2а) и с использованием узлов Чебышева (рис. 2б), которые считаются оптимальными для аппроксимации функции Рунге. Как видно из сравнения рисунка 1 с рисунками 2а и 2б, существующие методы аппроксимации функции Рунге значительно уступают по точности предложенному методу поиска оптимальных узлов аппроксимации.

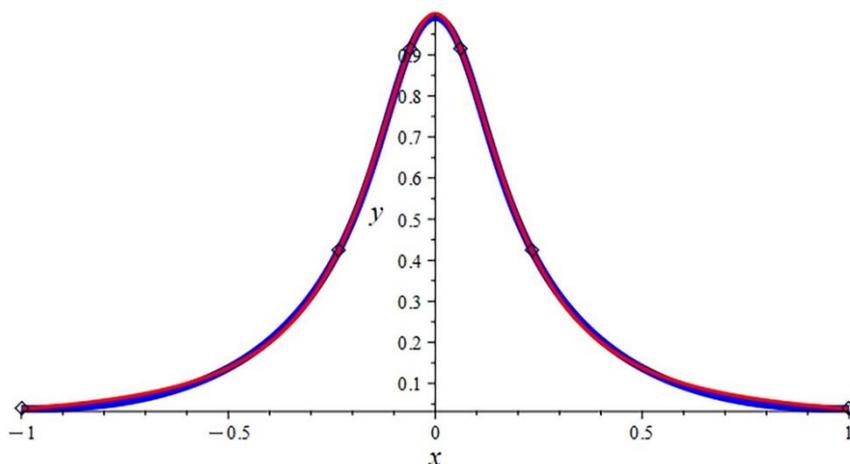


Рис. 1. Визуализация графика функции Рунге (красный), аппроксимированного алгебраической кривой 5-го порядка в нелинейном пространстве (синий)

Результаты численного моделирования демонстрируют высокую точность предложенного метода. Достигнуто значение среднеквадратичной ошибки (MSE) 0,0000284, что подтверждается визуальным сравнением графиков на рис. 1. Для сравнения, при использовании классического подхода с узлами Чебышева для достижения сопоставимой точности (MSE=0,0000253) требуется 23 узла интерполяции и полином 22-й степени.

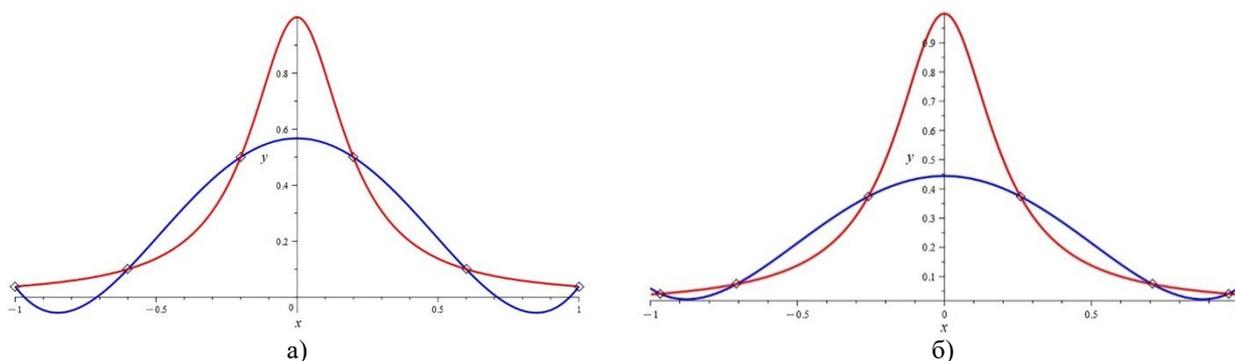


Рис. 2. Визуализация графика функции Рунге (красный), аппроксимированного полиномом Лагранжа: а) с равномерным распределением узлов интерполяции (синий); б) с использованием узлов Чебышева (синий)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод оптимизации расположения узлов аппроксимации обладает рядом преимуществ:

- высокая точность – обеспечивает низкую среднеквадратичную ошибку;

- устойчивость к увеличению числа узлов – адаптивно подстраивается под аппроксимируемую функцию, избегая осцилляций (что подтверждено на примере функции Рунге);
- снижение степени полиномов – позволяет достигать высокой точности без перехода к кусочно-заданным функциям.

Однако метод имеет и ограничения:

- зависимость от начального приближения при численной минимизации целевой функции;
- необходимость дальнейших исследований для повышения устойчивости алгоритма оптимизации.

Несмотря на это, метод демонстрирует универсальность и может применяться для аппроксимации произвольных непрерывных функций и обработки экспериментальных данных различной природы.

Перспективы развития метода включают:

- расширение на многомерный случай для моделирования сложных геометрических объектов и физических процессов;
- применение для описания анизотропных и изотропных сред [18];
- разработку более эффективных алгоритмов минимизации для задач высокой размерности;
- экспериментальное исследование возможностей метода для аппроксимации кусочно-непрерывных функций.

Таким образом, метод открывает новые возможности в геометрическом моделировании и вычислительных методах, предлагая альтернативу традиционным подходам к аппроксимации гладких функций.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 25-21-00003: <https://rscf.ru/project/25-21-00003/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Боярчук М.А., Журкин И.Г., Непоклонов В.Б.** Концепция графического метода отображения гравитационного поля Земли на плоскости // Научная визуализация. 2019. Т. 11. № 1. С. 70-79.
2. **Модяев А.Д., Леонова Н.М., Филатов А.С., Шабынин А.А.** Методика визуализации полей гамма-излучения в помещении // Научная визуализация. 2014. Т. 6. № 3. С. 87-95.
3. **Андреев С., Валиев И.** OpenGL визуализация в Inspirer2 с качеством метода трассировки лучей // Научная визуализация. 2012. Т. 4. № 3. С. 26-34.
4. **Paltashev T., Perminov I.** Texture Compression Techniques // Scientific Visualization. 2014. Vol. 6. No. 1. pp. 106-146.
5. **Алексеев А.К., Бондарев А.Е., Пятакова Ю.С.** О визуализации функций в многомерном пространстве с помощью канонического разложения // Научная визуализация. 2022. Т. 14. № 3. С. 73-91.
6. **Алексеев А.К., Бондарев А.Е., Пятакова Ю.С.** Об использовании канонического разложения для визуализации результатов параметрических расчетов // Научная визуализация. 2023. Т. 15. № 4. С. 12-23.
7. **Толок А.В., Толок Н.Б.** Функционально-воксельное моделирование задачи Коши // Научная визуализация. 2024. Т. 16. № 1. С. 105-111.
8. **Васильев А.Н., Лазовская Т.В., Тархов Д.А.** Аппроксимация функций Бесселя методом построения многослойных решений дифференциальных уравнений // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2020. Т. 16. № 2. С. 273-284.

9. **Конопатский Е.В., Voronova O.S., Shevchuk O.A., Bezditnyi A.A.** About one method of numeral decision of differential equalizations in partials using geometric interpolants // CEUR Workshop Proceedings, 2020. Vol. 2763. Pp. 213-219.
10. **Короткий В.А.** Незакономерные кривые в инженерной геометрии и компьютерной графике // Научная визуализация. 2022. Т. 14. № 1. С. 1-17.
11. **Klyachin A.A., Klyachin V.A., Grigorieva E.G.** Visualization of Stability and Calculation of the Shape of the Equilibrium capillary surface // Scientific Visualization. 2016. Vol. 8. № 2. Pp. 37-52.
12. **Алексеев А.К., Бондарев А.Е., Пятакова Ю.С.** Об использовании канонического разложения для визуализации результатов параметрических расчетов // Научная визуализация. 2023. Т. 15. № 4. С. 12-23.
13. **Конопацкий Е.В.** Аппроксимация геометрических объектов с помощью дуг кривых, проходящих через наперед заданные точки // Информационные технологии. 2019. Т. 25. № 1. С. 46-52.
14. **Конопатский Е.В., Bezditnyi A.A., Shevchuk O.A.** Modeling geometric varieties with given differential characteristics and its application // CEUR Workshop Proceedings, 2020. Vol. 2744.
15. **Та У.Т., Ngo H.H., Nguyen V.H.** A new computational method for determining parameters representing fundamental frequency contours of speech words // Journal of Information Hiding and Multimedia Signal Processing. 2020. Vol. 11. № 1. Pp. 1-13.
16. **Motoki M., Shintani H., Matsuo K., Martin T.** McGinnity Utilization of SAM-based network for developing function approximation // Journal of Digital Information Management. 2022. Vol. 20. № 4. Pp. 148-155.
17. **Рамазанов А.Р.К., Магомедова В.Г., Ибрагимова Б.М.** Рациональная аппроксимация непрерывных функций с интерполяцией на равномерных сетках узлов // Вестник Дагестанского государственного университета. 2012. № 1. С. 106-111.
18. **Конопатский Е.В., Bezditnyi A.A., Lagunova M.V., Naidysh A.V.** Principles of solid modelling in point calculus // IoP conference series: Journal of Physics: Conf. Series. 2021. Vol. 1901. P. 012063.

Konopatskiy E.V.¹, Kislitsyn D.I.¹, Stepura A.V.², Kotova O.V.³

¹ Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Russia, 603000, Nizhny Novgorod, Ilyinskaya st., 65, E-mail: e.v.konopatskiy@mail.ru

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavl highway, 26, E-mail: stepuraAV@mgsu.ru

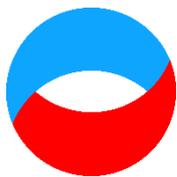
³ Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Russia, 286123, Makeyevka, Derzhavina st., 2, E-mail: o.v.kotova@donnasa.ru

METHOD OF SEARCHING OPTIMAL NODES OF APPROXIMATION CONTINUOUS FUNCTIONS TAKING INTO ACCOUNT NONLINEARITY OF SPACE

ABSTRACT

A method of searching optimal nodes of approximation is developed and presented in the paper using the example of Runge function. The method is based on the use of interpolation algebraic curves parameterized in point calculus, which allows to reduce the problem to minimization of the target function of many variables, providing the smallest standard deviation of the approximating function from the original one. Unlike classical approaches, where the coefficients of the interpolating function are determined by fixed nodes, the proposed method allows controlling the location of interpolation nodes. This is achieved due to the properties of interpolation curves parameterized in the point calculus, which are constructed on the basis of uniform distribution of the parameter and retain the coordinates of the nodes in their equation, which opens the possibility of finding their optimal location. The result of approximation is an algebraic curve in parametric form, which allows to reduce the degree of the polynomial due to the nonlinearity of the parametric space. For example, for the Runge function, the traditional approach with Chebyshev knots requires the use of a polynomial of degree 19 (20 knots) to achieve a RMS error of 0.000111. In contrast, the proposed method achieves an error of 0.0000284 already at 6 nodes, which is an order of magnitude more accurate and allows us to replace one high degree polynomial with two 5th degree polynomials (for each coordinate). Thus, the method demonstrates a significant improvement in approximation efficiency by optimizing the node locations and parametric representation of the curve.

APPROXIMATION, INTERPOLATION CURVE, POINT CALCULUS, NONLINEAR SPACE, RUNGE FUNCTION



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 535.314

Расковская И.Л., Павлов И.Н.

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: RaskovskayaIL@mpei.ru*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА, ОТРАЖЕННОГО ОТ НЕРОВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ НАЛИЧИИ ДИНАМИЧЕСКИХ НОРМАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

АННОТАЦИЯ

Разработана математическая модель волнового поля лазерного пучка, отраженного от неровной поверхности, при наличии ее динамических нормальных деформаций. Актуальность данной работы обусловлена тем, что в ряде задач снижения видности и предотвращения обнаружения объектов, необходимым является исследование волнового поля лазерного пучка, отраженного от неровной вибрирующей поверхности. Кроме того, параметры отраженного лазерного излучения необходимо регистрировать при измерении оптическими методами переменных деформаций элементов и узлов двигателей и энергетических установок, что является важной и актуальной задачей метрологического обеспечения при проведении их испытаний.

В представленной работе рассматривается совместное влияние неровностей поверхности и ее нормальных смещений на структуру волнового поля отраженного пучка. На основе разработанной аналитической модели проведено численное моделирование и проведено сравнение с экспериментальными данными.

**ЛАЗЕРНЫЙ ПУЧОК, ВОЛНОВОЕ ПОЛЕ, ОТРАЖЕНИЕ ОТ НЕРОВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ,
ДИНАМИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ,
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ

В ряде задач снижения видности и предотвращения обнаружения объектов специальной техники актуальным является исследование волнового поля лазерного пучка, отраженного от неровной вибрирующей поверхности. Кроме того, параметры отраженного лазерного излучения регистрируются при измерении оптическими методами переменных деформаций элементов и узлов двигателей и энергетических установок, что является важной и актуальной задачей метрологического обеспечения при проведении их испытаний [1-5].

В данной работе рассматривается совместное влияние неровностей поверхности и ее нормальных смещений на структуру волнового поля отраженного пучка. Для параметров пучка целесообразно использовать разработанные ранее лазерные методы диагностики акустических полей [6-8]. При применении лазерных методов различные аспекты эффектов, связанных с неровностью поверхности, представляют самостоятельный интерес и исследовались, например, в работе [9].

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО МЕТОДА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОТРАЖЕНИЯ ВОЛНОВОГО ПУЧКА

Лазерные пучки любого типа могут быть представлены в виде пространственного (углового) спектра [10]. Распространение каждой пространственной гармоники может рассматриваться независимо и в соответствии с принципом суперпозиции интегрироваться в точке наблюдения. Ниже рассмотрена математическая модель отражения гауссовского лазерного пучка, соответствующая такому подходу. Распространение каждой пространственной гармоники рассматривается в рамках геометрической оптики, поэтому данный подход является комбинированным.

Математическая модель и геометрические параметры задачи иллюстрируются рис. 1. В области $z \geq 0$ распространяется отраженный от шероховатой поверхности лазерный пучок, вектор K_a задает направление распространения возмущения вдоль поверхности. Лазерный пучок с эффективным радиусом w распространяется в плоскости XOZ , k – оптический волновой вектор, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, где λ – длина оптической волны в среде, α – угол, который ось пучка составляет с осью Z при $z = 0$. Далее, в соответствии с условиями измерений, будем предполагать $\sin \alpha \ll 1$.

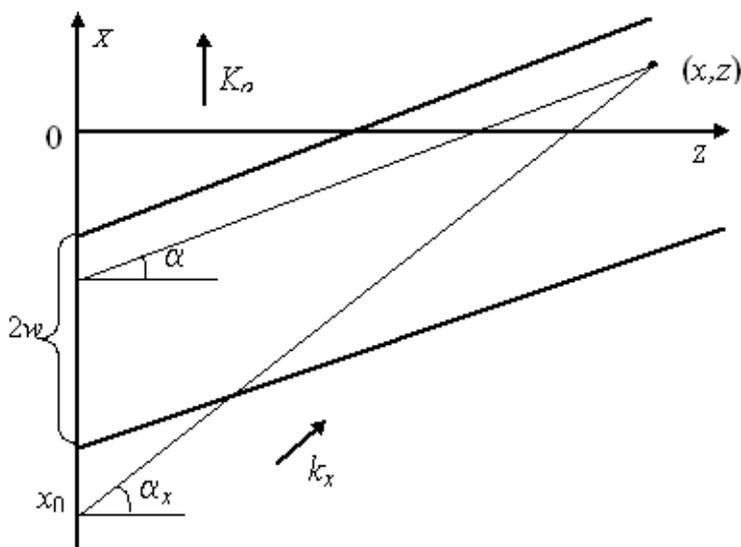


Рис. 1. Геометрические параметры задачи

Пусть $E(x, y, 0)$ — комплексная амплитуда поля пучка при $z = 0$, профиль которой при $z \geq 0$ может быть представлен в виде

$$h(x, y) = h_0(x, y) + \Delta h(x, y) \cos(\Omega t - K_a x), \quad (1)$$

где Δh – максимальное нормальное смещение поверхности, характеризующее вибрации в данной точке а h_0 – функция, характеризующая рельеф шероховатой поверхности. Требуется определить комплексную амплитуду пучка $E(x, y, z)$ в точке наблюдения $P(x, y, z)$.

Для решения поставленной задачи поле пучка представляется в виде пространственного спектра, а описание распространения каждой спектральной составляющей проводится в рамках приближения геометрической оптики с использованием метода возмущений эйконала и амплитуды [11]. Оптическое поле в точке наблюдения является суперпозицией парциальных волн, интерференция которых с учетом возмущений поверхности приводит к искажениям амплитуды и фазы пучка [12-13]. Использование понятия геометрических лучей для

парциальных волн накладывает следующее ограничение на дистанцию z при заданном значении длины волны λ и характерном размере неровностей поверхности a :

$$\frac{\lambda z}{a^2} \ll 1. \quad (2)$$

Комплексную амплитуду оптического поля при $z=0$ представляем в виде

$$E(x, y, 0) = \exp\{ikx \sin \alpha\} A(x, y, 0), \quad (3)$$

где $A(x, y, 0)$ - комплексная амплитуда при $\alpha = 0$. Разложим $E(x, y, 0)$ в спектр по плоским волнам с параметрами k_x и k_y

$$E(x, y, 0) = \exp\{ikx \sin \alpha\} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(k_x, k_y) \exp\{i(k_x x + k_y y)\} dk_x dk_y, \quad (4)$$

где $F(k_x, k_y)$ - комплексные амплитуды спектральных составляющих,

$$F(k_x, k_y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A(x, y, 0) \exp\{-i(k_x x + k_y y)\} dx dy, \quad (5)$$

а направление распространения соответствующих плоских волн характеризуется вектором с компонентами $(k_x + k \sin \alpha, k_y, \sqrt{k^2 - (k_x + k \sin \alpha)^2 - k_y^2})$. На рисунке 1 в плоскости XOZ изображен геометрооптический луч, образующий с осью OZ угол α_x и соответствующий парциальной плоской волне с параметрами

$$k_x = k \sin \alpha_x - k \sin \alpha, \quad k_y = 0. \quad (6)$$

В соответствии с [3] фаза каждой спектральной составляющей в точке наблюдения $P(x, y, z)$ может быть представлена в виде

$$\varphi(x, y, z, k_x, k_y) = (k_x + k \sin \alpha)x + k_y y + z \sqrt{k^2 - (k_x + k \sin \alpha)^2 - k_y^2} + \Delta\varphi \quad (7)$$

и определяется интегрированием вдоль соответствующего геометрооптического луча с учетом возмущения фазы при отражении от неровной поверхности. Первые три слагаемых в (25) соответствуют фазе парциальной волны для зеркальной поверхности, а последнее слагаемое определяет возмущение фазы $\Delta\varphi$ из-за неровностей и вибраций поверхности:

$$\Delta\varphi(x, y, z, k_x, k_y) = kf(x, y, z, k_x, k_y). \quad (8)$$

Функция $f(x, y, z, k_x, k_y)$, обозначаемая в дальнейшем для краткости f , определяется структурой конкретной поверхности.

Поле в точке наблюдения $E(x, y, z)$ представляет собой суперпозицию парциальных волн с учетом условий их распространения:

$$E(x, y, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{F(k_x, k_y)}{\sqrt{\gamma(k_x, k_y, x, y, z)}} \exp\{i[(k_x + k \sin \alpha)x + k_y y + z\sqrt{k^2 - (k_x + k \sin \alpha)^2 - k_y^2} + \Delta\phi]\} dk_x dk_y \quad (9)$$

где $\gamma(k_x, k_y, x, y, z)$ учитывает расходимость лучей в неоднородной среде и определяется на основании уравнений переноса [4] для каждой спектральной составляющей.

Для пучков с узким пространственным спектром $\left(\frac{\lambda}{w} \ll 1\right)$ возможны дальнейшие упрощения. С точностью до квадратичных членов разложения функций от k_x в показателе экспоненты представление для комплексной амплитуды лазерного пучка в точке наблюдения имеет вид:

$$E(x, y, z) = \frac{\exp\{i[kz \cos \alpha + kx \sin \alpha + \Delta\phi_0]\}}{\sqrt{\gamma(0, 0, x, y, z)}} A(x, y, z), \quad (10)$$

где

$$\Delta\phi_0 \equiv \Delta\phi_0(x, y, z) \equiv k \cdot f_0(x, y, z), \quad (11)$$

$$A(x, y, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(k_x, k_y) \exp\{i[k_x(x - z \operatorname{tg} \alpha + f') + k_y y - \frac{k_x^2}{2k}(z - kf'') - \frac{k_y^2}{2k}z]\} dk_x dk_y, \quad (12)$$

где f' и f'' частные производные по k_x .

Первый множитель в (10) соответствует полю плоской волны, распространяющейся под углом α к оси Z . Функция $\Delta\phi_0(x, y, z)$ в показателе экспоненты задает возмущение фазы вдоль луча, прошедшего в точку наблюдения (рис. 1), а функция расходимости $\gamma(0, 0, x, y, z)$, которая для заданной поверхности будет определена ниже, описывает эффекты, обусловленные различием условий отражения от поверхности в пределах сечения пучка.

Второй множитель $A(x, y, z)$ учитывает эффекты, связанные с пространственной ограниченностью пучка, т. е. его дифракцию, обусловленную наличием характерного размера w . Для получения удобного аналитического представления, описывающего эти эффекты, сравним (12) с выражением для комплексной амплитуды оптического поля $E^0(x, y, z)$ в точке наблюдения $P(x, y, z)$ для случая зеркальной поверхности.

$$E^0(x, y, z) = \exp\{i[kz \cos \alpha + kx \sin \alpha]\} A^0(x, y, z), \quad (13)$$

$$A^0(x, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(k_x, k_y) \exp\left\{i\left[k_x(x - z \operatorname{tg} \alpha) + k_y y - \frac{k_x^2}{2k}z - \frac{k_y^2}{2k}z\right]\right\} dk_x dk_y. \quad (14)$$

Если представление (14) допускает разделение переменных, например, для гауссовских пучков

$$A^0(x, y, z) = A_x^0(x, z) A_y^0(y, z), \quad (15)$$

то

$$A(x, y, z) = A_x^0(x + f', z - kf'') A_y^0(y, z). \quad (16)$$

Учитывая, что функция f и ее частные производные по k_x зависят от значений координат точки наблюдения $P(x, y, z)$ и вводя обозначения

$$\Delta x(x, y, z) = f', \quad \Delta z(x, y, z) = -kf'', \quad (17)$$

окончательно запишем (17) в виде:

$$E(x, y, z) = \frac{\exp\{i[kz \cos \alpha + kx \sin \alpha + \Delta \phi_0(x, y, z)]\}}{\sqrt{\gamma(x, y, z)}} A_x^0(x + \Delta x(x, y, z), z + \Delta z(x, y, z)) A_y^0(y, z). \quad (18)$$

Выражение (18) позволяет находить в точке наблюдения $P(x, y, z)$ комплексную амплитуду отраженного от неровной поверхности лазерного пучка, если известна его комплексная амплитуда при отражении от зеркальной поверхности, что осуществляется посредством формальной замены в функции A_x^0 координат $x \rightarrow x + \Delta x$ и $z \rightarrow z + \Delta z$, где функция $\Delta x = \Delta x(x, y, z)$ описывает искажения комплексной амплитуды пучка, связанные со смещением лучей по оси OX в пределах сечения пучка, а $\Delta z = \Delta z(x, y, z)$ задает изменение условий фокусировки и дифракционного расширения пучка. В дальнейшем, с учетом условий эксперимента, при наблюдении поля отраженного пучка на расстояниях порядка десятков сантиметров пренебрежем дифракционными эффектами, положив $\Delta z = 0$.

Определим выражения для $\Delta \phi_0(x, y, z)$, $\Delta x(x, y, z)$, $\gamma(x, y, z)$ и конкретизируем соотношение (18), предполагая, что рельеф поверхности задан одномерной функцией $h(x)$.

$$\Delta \phi_0(x) = \frac{kh(x)}{\cos \alpha}, \quad (19)$$

$$\Delta x(x) = z \frac{dh}{dx}, \quad (20)$$

$$\gamma(x, z) = \sqrt{1 - z \frac{d^2 h}{dx^2}}, \quad (21)$$

$$\Delta z = 0. \quad (22)$$

Соотношения (18)-(22) определяют оптическое поле отраженного лазерного пучка при наличии неровной вибрирующей поверхности, модель которой задается функцией (1).

Численное моделирование проведем для гауссовского пучка, амплитуда которого $A^0(x, y, z)$ в однородной среде определяется выражением

$$A^0(x, y, z) = \frac{A^0(0, 0, z_F)}{\sqrt{1 + D^2}} \exp\left\{-\frac{x^2 + y^2}{w^2(1 + D^2)}\right\}, \quad (23)$$

где, D – безразмерная дифракционная длина, z_F – координата перетяжки, R_0 – конфокальный параметр пучка:

$$D = \frac{(z - z_F)}{R_0}, R_0 = \frac{kw^2}{2}, \quad (24)$$

Пусть отражение пучка происходит в области перетяжки, тогда, подставляя в (18) выражения (19)-(22), получим

$$A(x, y, z) = \frac{A^0(0, 0, z_F)}{\sqrt{1 + D^2 - z \frac{d^2 h}{dx^2}}} \exp \left\{ - \frac{(x - z \frac{dh}{dx})^2 + y^2}{w^2 (1 + D^2)} \right\}. \quad (25)$$

Выражение (25) пригодно для моделирования поля волнового пучка в случае, когда не возникают области многолучевости и каустики, то есть для достаточно плавных функций уровня поверхности. При наличии областей многолучевости предпочтительнее использовать общее решение Кирхгофа для уравнения, применяемого для описания распространения волновых пучков

$$A(x, y, z) = \frac{1}{i\lambda} \iint A_0(\xi, \eta) \exp[ikh(\xi, \eta)] \frac{ze^{ik_0 R}}{R^2} d\xi d\eta. \quad (26)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Далее на рис. 2-4 и рис. 7-9 приведены результаты моделирования волнового поля гауссовского пучка, отраженного от неровной поверхности в отсутствие динамических деформаций. На рисунках везде по оси абсцисс – координата x мкм, по оси ординат интенсивность в относительных единицах (нормированная к максимальной интенсивности исходного пучка). Исходный (до отражения) радиус пучка в перетяжке 500 мкм. Расстояние до экрана $z = 100$ мм.

При описании параметров отражающей поверхности использованы термины: крупномасштабные неоднородности, если средняя протяженность неоднородности порядка сотен мкм и мелкомасштабные протяженностью до десяти мкм. Высота рельефа поверхности варьировалась от 0,4 до 6 мкм.

На рис. 2 представлена огибающая интенсивности отраженного пучка для практически зеркальной поверхности (средняя высота неоднородностей 0,4 мкм). При относительно небольшой высоте неровностей 1,7 мкм (рис. 3) огибающая интенсивности уже достаточно сильно изрезана,

Как следует из результатов моделирования, структура пучка практически разрушается уже при средней высоте неровностей поверхности более 2 мкм, крупномасштабные неоднородности приводят к сильной изрезанности огибающей пучка с небольшим (двух-трехкратным) увеличением его радиуса (рис. 4).

Для сравнения с результатами моделирования на рис. 5-6 представлены результаты экспериментальной регистрации огибающей пучка [14], отраженного соответственно от полированной и шероховатой металлических поверхностей. Интенсивность и размеры пучка представлены в относительных единицах. Сравнение рисунков 2-3 и 5-6 демонстрирует хорошее качественное совпадение характера искажений огибающей отраженного пучка. В силу случайного характера высоты и протяженности неоднородностей поверхности форма огибающей для разных экспериментальных реализаций различна и можно говорить лишь о качественном сравнении их с результатами моделирования.

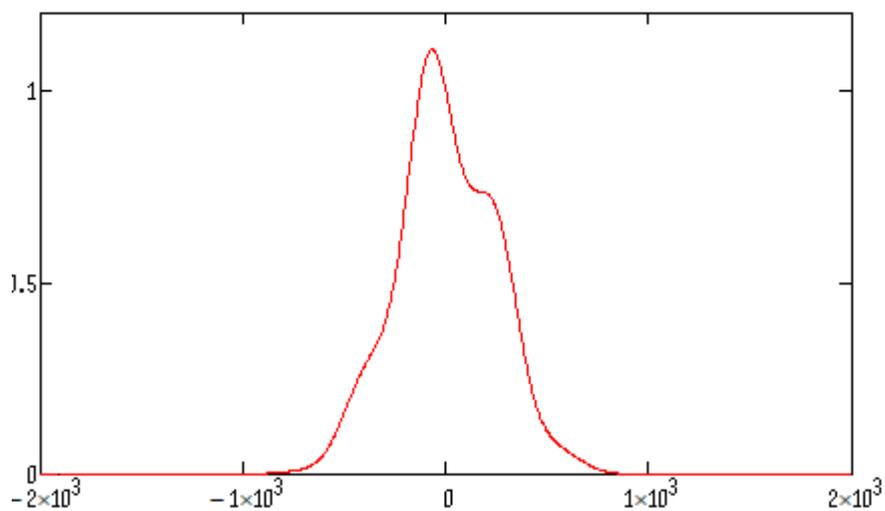


Рис. 2. Огибающая интенсивности отраженного пучка при практически зеркальной поверхности (высота неровностей 0,4 мкм). По оси абсцисс – ширина пучка в мкм

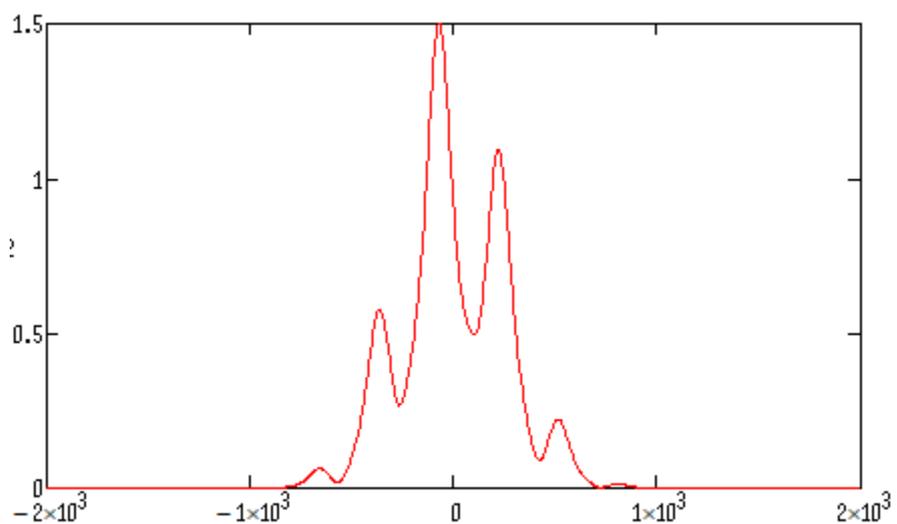


Рис. 3. Огибающая интенсивности отраженного пучка при высоте неровностей 1,7 мкм

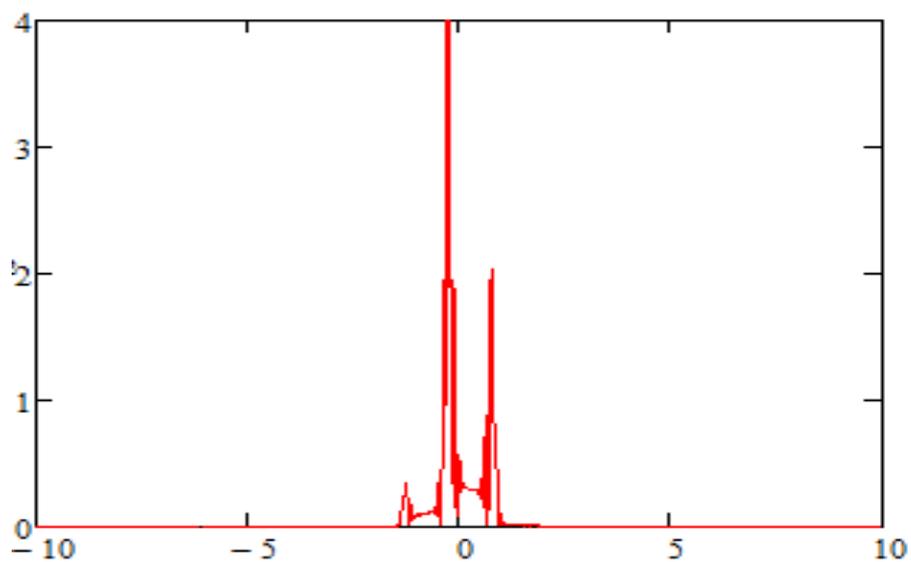


Рис. 4. Огибающая интенсивности отраженного пучка при высоте неровностей 3 мкм

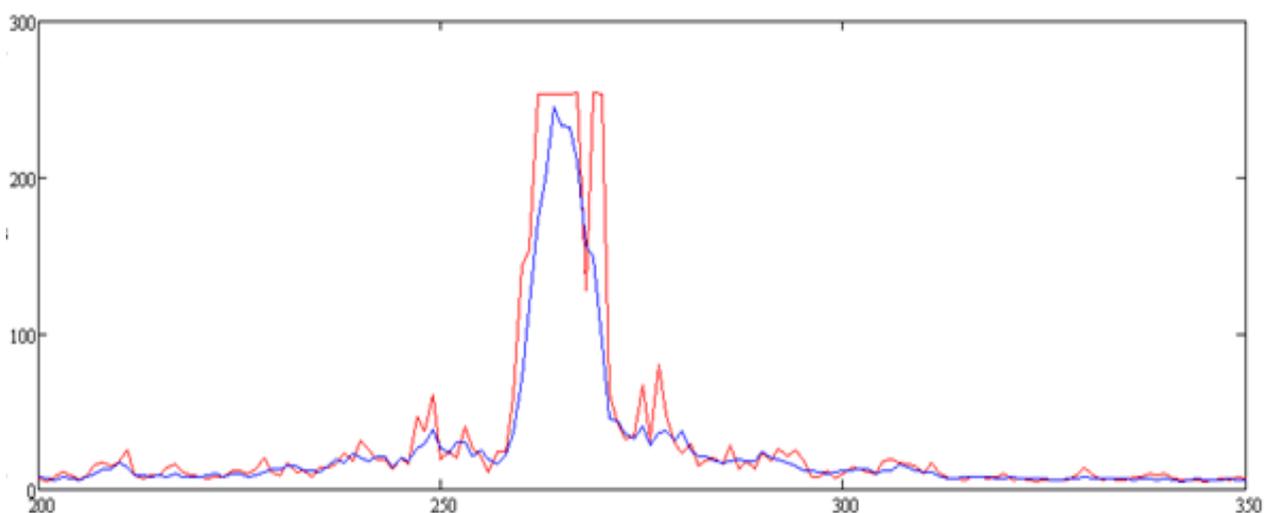


Рис. 5. Экспериментальная визуализация распределения интенсивности в сечении пучка, отраженного от полированной металлической поверхности. Красная кривая – график распределения интенсивности, построенный по одной реализации, синий – усредненный по 11 реализациям

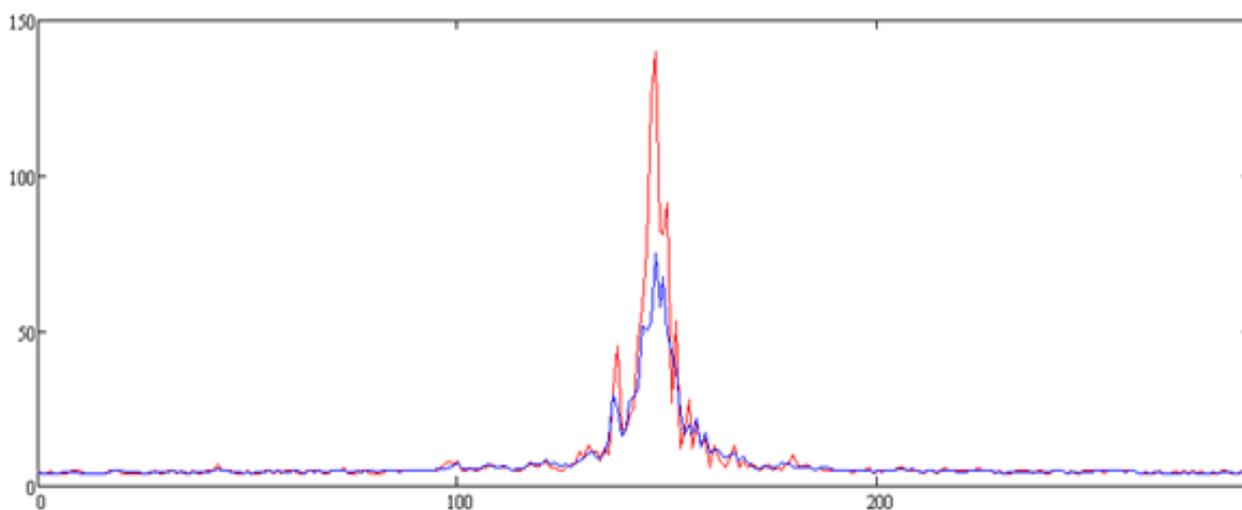


Рис. 6. Экспериментальная визуализация распределения в сечении пучка, отраженного от шероховатой металлической поверхности. Красная кривая – график распределения интенсивности, построенный по одной реализации, синий – усредненный по 7 реализациям

Наиболее существенное разрушение огибающей пучка (рис. 7-9) происходит при одновременном присутствии крупномасштабных и мелкомасштабных неоднородностей, при этом исчезает локализация пучка и происходит формирование спекл-структуры. Средняя высота неровностей при моделировании в пределах 1-4 мкм. Средняя высота мелкомасштабных неровностей для рисунка 7 равна 1 мкм, крупномасштабных, соответственно – 3 мкм. Для рис. 8 средняя высота мелкомасштабных неровностей – 2 мкм при прочих равных условиях. При увеличении высоты мелкомасштабных неоднородностей происходит расплывание пучка, а интенсивность в пиковых значениях падает (см. далее рис.9). На рис. 10 представлена экспериментальная визуализация распределения интенсивности в сечении пучка [14].

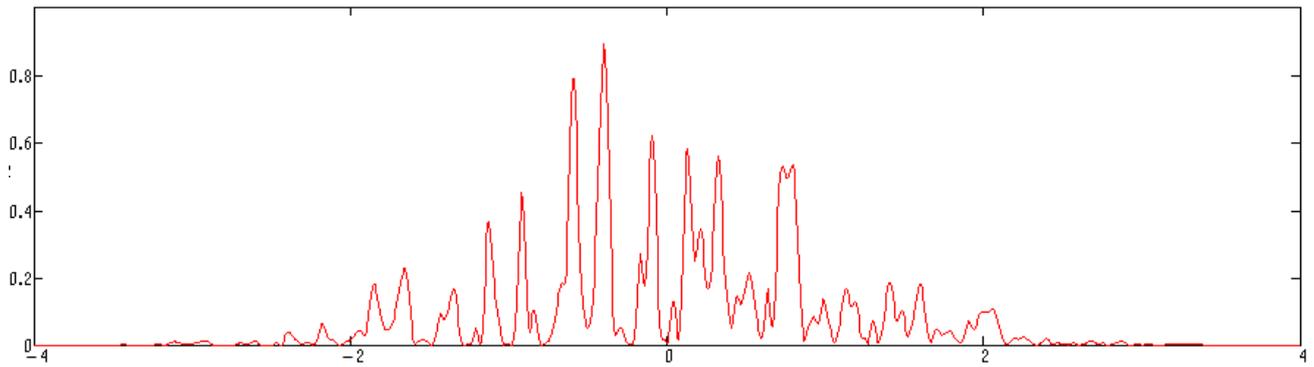


Рис. 7. Огибающая интенсивности отраженного пучка при наличии одновременно крупномасштабных (средняя высота 3 мкм, протяженность порядка 100 мкм) и мелкомасштабных (средняя высота 1 мкм, протяженность порядка 10 мкм) неровностей

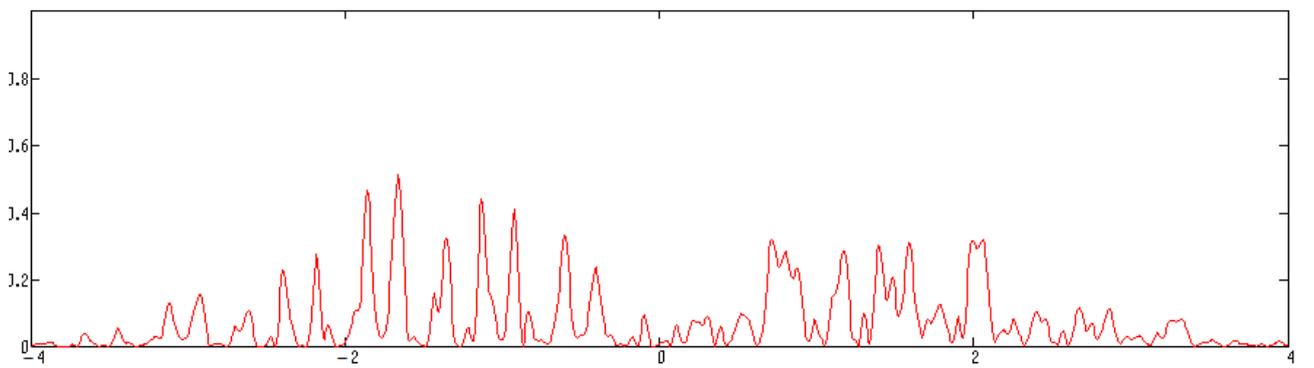


Рис. 8. Огибающая интенсивности отраженного пучка при наличии одновременно крупномасштабных (средняя высота 3 мкм, протяженность порядка 100 мкм) и мелкомасштабных (средняя высота 2 мкм, протяженность порядка 10 мкм) неровностей

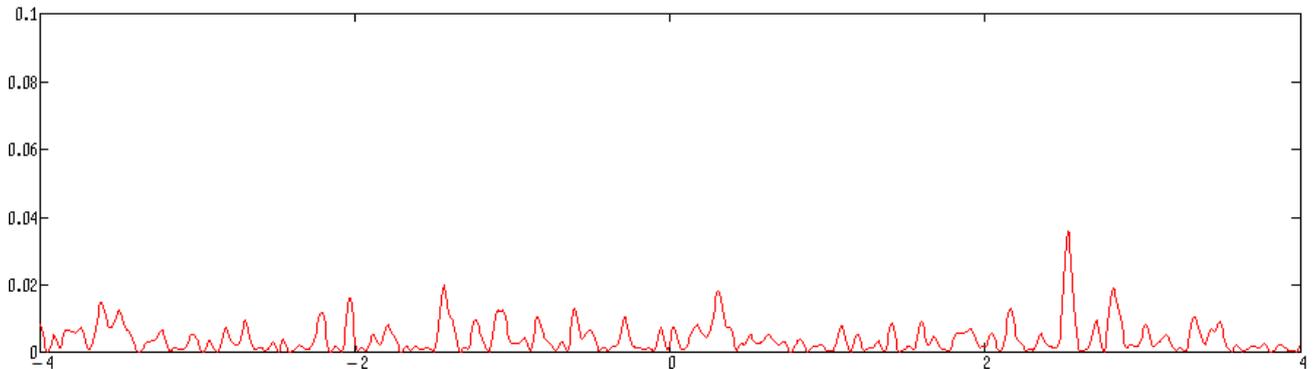


Рис. 9. Огибающая интенсивности отраженного пучка при наличии одновременно крупномасштабных (средняя высота 3 мкм, протяженность порядка 100 мкм) и мелкомасштабных (средняя высота 5 мкм, протяженность порядка 10 мкм) неровностей

Далее на рис. 11-16 приведены результаты моделирования волнового поля гауссовского пучка, отраженного от шероховатой поверхности с зеркальным участком в отсутствие и при наличии вибраций (нормальных деформаций) и результаты моделирования интерференционного поля при наличии двух зеркальных участков. На рисунках везде по оси абсцисс – координата x мкм, по оси ординат интенсивность в относительных единицах. Исходный (до отражения) радиус пучка в перетяжке 500 мкм.

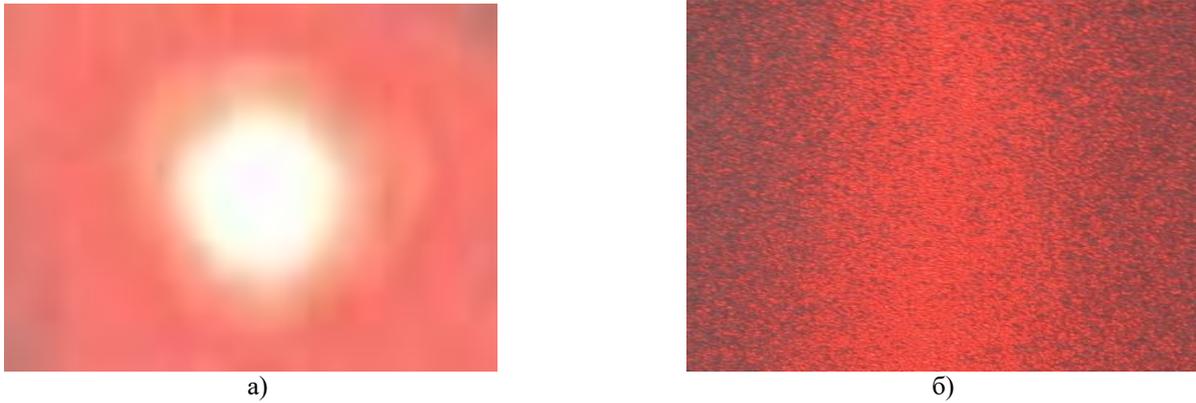


Рис. 10. Сечения отраженного лазерного пучка: а) от шлифованной поверхности металла, б) от шероховатой поверхности

Как следует из рис. 12, наличие малых вибраций, по порядку величины сравнимых со средним размером неровностей поверхности, приводит к дополнительному разрушению структуры пучка, за счет возмущений поверхности в области зеркального участка. Наибольшие искажения части пучка, отраженной от этого участка, возникают при прохождении возмущения через область его локализации (рис. 12в, 12г). В рассмотренном случае вклад в итоговую погрешность интерференционного метода измерения параметров продольных вибраций будет давать как дополнительный сдвиг интерференционных полос, обусловленный нормальным смещением поверхности, так и разрушение зеркальной составляющей с образованием в этой области новых спеклов.

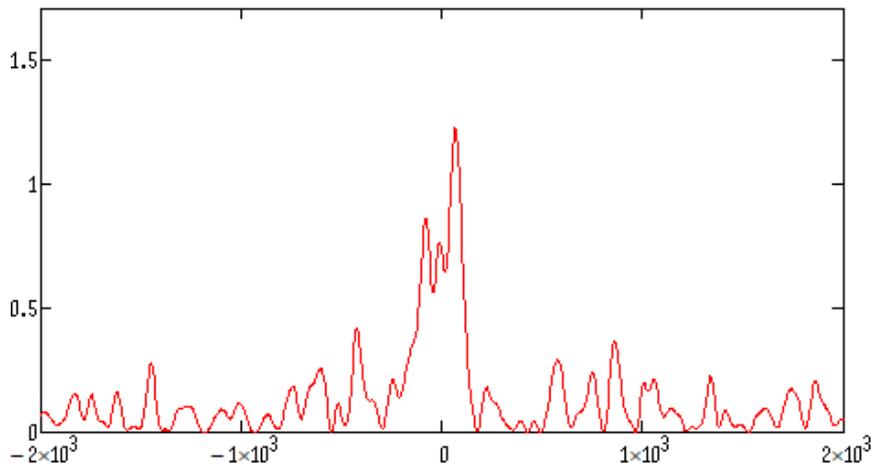


Рис. 11. Интенсивность волнового поля для пучка, отраженного от шероховатой поверхности с зеркальным участком в отсутствие вибраций. По оси абсцисс – координата x мкм, по оси ординат интенсивность в о.е. Исходный (до отражения) радиус пучка в перетяжке 500 мкм. Ширина зеркального участка 200 мкм.

Структура пучка при наличии нормального смещения много большего по сравнению со средней величиной неровности поверхности изменяется несущественно и практически совпадает с результатами, приведенными в [14]. В данном случае мелкомасштабный рельеф поверхности как бы накладывается на крупномасштабные смещения, вызванные вибрацией. Зеркальная компонента в данном случае сохраняется. Влияние нормальных вибраций в данном случае проявляется при формировании интерференционной картины от двух зеркальных участков (рис. 4-7) за счет появления дополнительных фазовых сдвигов из-за смещения поверхности.

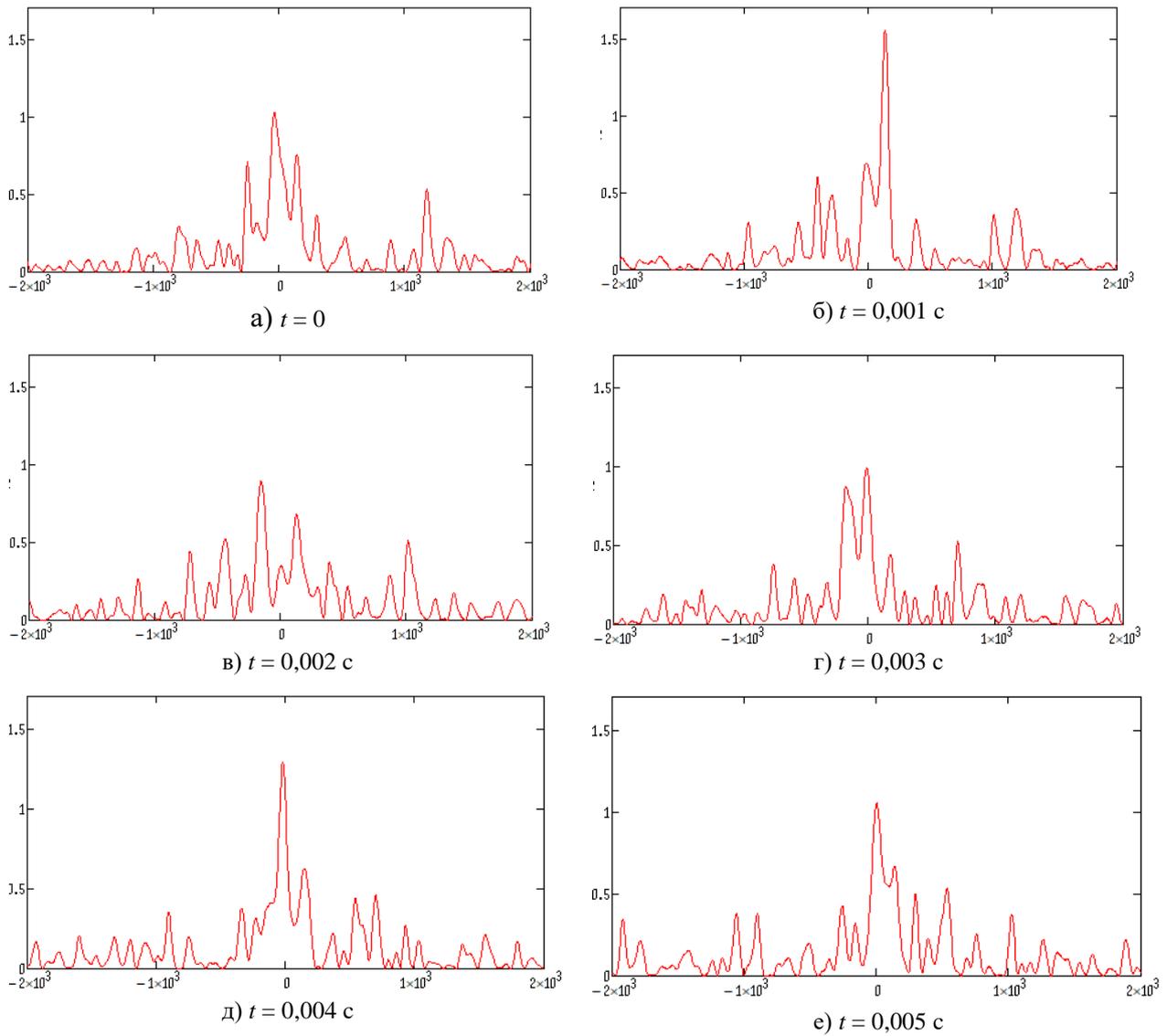


Рис. 12. Интенсивность волнового поля в последовательные моменты времени t для пучка, отраженного от шероховатой поверхности со средней высотой неровностей 2 мкм и зеркальным участком шириной 200 мкм при наличии вибраций с частотой 100 Гц и амплитудой 4 мкм

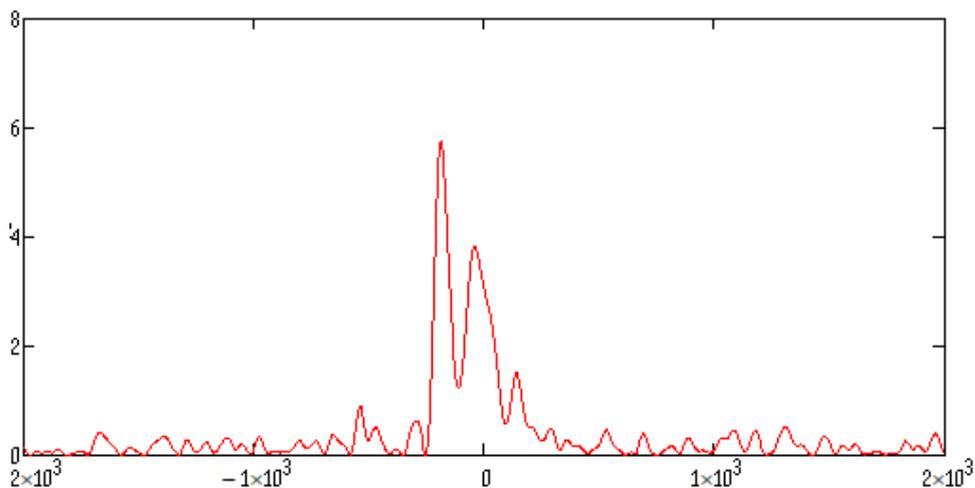


Рис. 13. Интерференция от двух зеркальных участков, расположенных на расстоянии 0,2 мм друг от друга в отсутствие нормального смещения поверхности

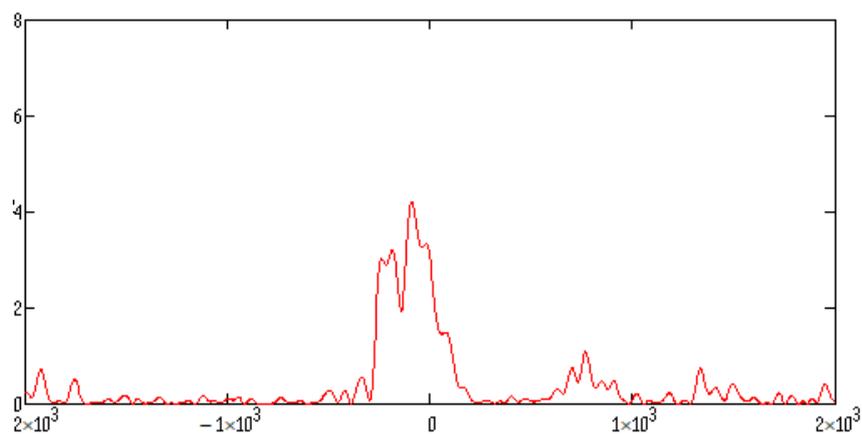


Рис. 14. Интерференция от двух зеркальных участков, расположенных на расстоянии 0,2 мм друг от друга при наличии поперечного смещения, в пять раз превышающего среднюю величину (2 мкм) неровности поверхности (при $t = 0$)

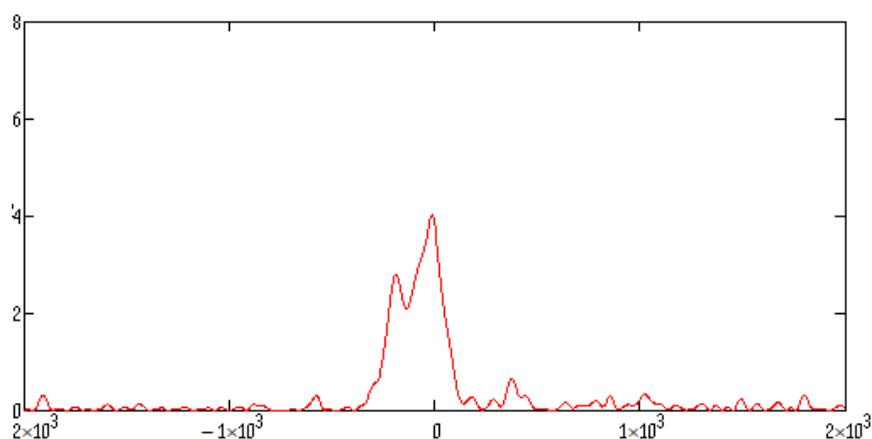


Рис. 15. Интерференция от двух зеркальных участков, расположенных на расстоянии 0,2 мм друг от друга при наличии поперечного смещения в десять раз превышающего среднюю величину (2 мкм) неровности поверхности (при $t = 0$)

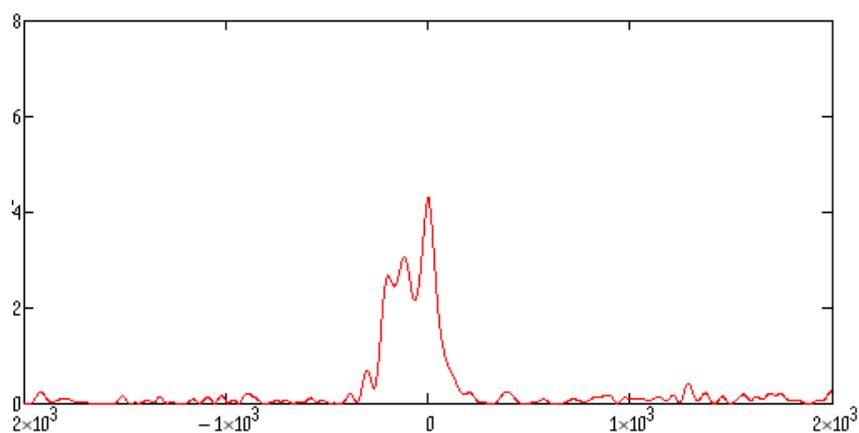


Рис. 16. Интерференция от двух зеркальных участков, расположенных на расстоянии 0,2 мм друг от друга при наличии поперечного смещения в десять раз превышающего среднюю величину (2 мкм) неровности поверхности (при $t = 0,004$ с)

Из сравнения рис. 14-16 с рис. 13 следует, что несмотря на несущественные изменения интенсивности зеркальной компоненты пучка от одного участка при крупномасштабных вибрациях, интерференционная картина от двух участков претерпевает заметные изменения, проявляющиеся как ухудшение видности и сдвиги максимумов интенсивности.

На рис. 17 представлена визуализация сечения отраженного пучка в эксперименте, соответствующем условиям моделирования при частоте вибраций 100 Гц. Как видно из рисунков, отражение пучка в данном случае сопровождается появлением спекл-структуры [15], что дополнительно снижает возможность уверенной регистрации отраженной компоненты.

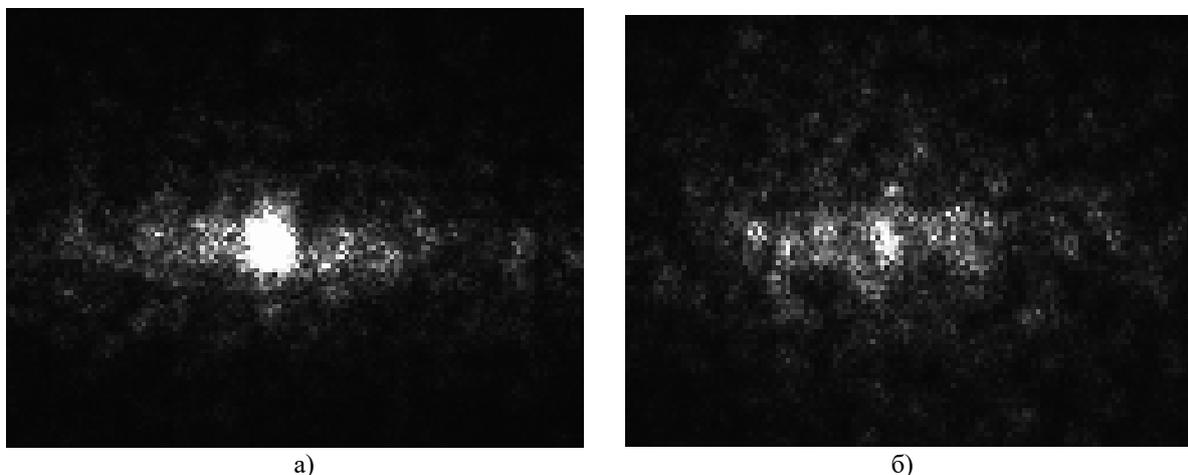


Рис. 17. Экспериментальные изображения сечения пучка, отраженного от металлической поверхности при наличии вибраций частотой 100 Гц для а) полированной поверхности, б) шероховатой поверхности

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная в работе аналитическая математическая модель отражения гауссовского лазерного пучка от поверхностей с разными типами рельефа в том числе при наличии динамических деформаций (вибраций) позволяет проводить численное моделирование профиля интенсивности отраженного пучка в его сечении. На основе проведенного моделирования было выявлено, что при наличии крупномасштабных (протяженных) неоднородностей высотой порядка нескольких микрометров отражение пучка происходит практически зеркально с некоторым увеличением его ширины и с сохранением в целом формы огибающей.

При наличии одновременно крупномасштабных и мелкомасштабных неоднородностей происходит существенное разрушение огибающей пучка, практически отсутствует его локализация и формируется спекл структура в отраженном излучении.

Искусственное добавление на поверхность зеркально отражающих участков, даже меньших по размеру, чем радиус пучка, приводит снова к появлению зеркальной компоненты со слабым искажением огибающей, однако при наличии нескольких таких участков из-за интерференции по определенным направлениям обзора отраженная компонента может быть близка к нулю.

Наличие динамических нормальных деформаций поверхности (вибраций) дает картину близкую к рассмотренной при наличии одновременно крупномасштабных и мелкомасштабных неоднородностей, то есть наблюдается фактически разрушение структуры пучка, тем не менее добавление на поверхность малых зеркальных участков восстанавливает локализацию пучка, отраженного нормально от поверхности.

Проведенный анализ позволяет делать выводы относительно выбора типа поверхности объекта для снижения его заметности при лазерной подсветке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гречихин В.А.** Оценка относительной амплитуды вибро смещения в лазерном доплеровском виброметре // Автометрия. 2012. Т. 48. № 3. С. 33-38.

2. **Гречихин В.А., Кугук Ю.Н., Толкачев А.В.** Метод оценки пространственного сдвига объекта с использованием высокоскоростной видеокамеры // Измерительная техника. 2017. № 11. С. 32-35.
3. **Гречихин В.А., Хренникова Т.А.** Потенциальная точность оценки информационного параметра сигнала гомодинного лазерного доплеровского виброметра // Автометрия. 2018. Т. 54. № 1. С. 17-23.
4. **Гречихин В.А., Титов Д.А.** Квазиоптимальная нелинейная фильтрация сигнала лазерного доплеровского виброметра // Автометрия. 2014. Т. 50. № 5. С. 99-107.
5. **Качанов В.К. и др.** Ультразвуковая диагностика структуры металла на основе использования метода временной декорреляции сигналов акустической эмиссии, возникающей при кинетическом индентировании // Дефектоскопия. 2008. № 11. С. 47-66.
- [1] 6. **Grechikhin V.A., Raskovskaya I.L., Runkevichyus B.S.** Influence of the acousto-optic effect on measurement error of particle vibration velocity in using the laser doppler anemometer // Автометрия. 2000. № 5. С. 92-101.
7. **Гречихин В.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В.** Исследование акустооптического эффекта в области интерференции лазерных пучков // Квантовая электроника. 2003. № 8. С. 742.
8. **Расковская И.Л.** Распространение лазерного пучка в среде с акустической волной. Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49. № 11. С. 1382-1389.
- [2] 9. **Павлов И.Н., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С.** Восстановление профиля поверхности капли жидкости на основе послойного лазерного зондирования // ПЖТФ. 2017. Т. 43. № 13. С. 19-25.
10. **Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П.** Теория волн. М.: Наука, 1979. 384 с.
11. **Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И.** Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. 304 с.
12. **Расковская И.Л.** Лазерная рефракционная томография фазовых объектов // Квантовая электроника. 2013. Т.43. №6. С. 554-562.
13. **Евтихиева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С.** Лазерная рефрактография. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 176 с.
14. **Павлов И.Н., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С.** Влияние спекл-структуры рассеянного лазерного излучения на погрешность измерения вибросмещения шероховатой поверхности // Труды Международной конференции по компьютерной графике и зрению "Графикон". 2019. № 29. С. 82-86.
15. **Базылев Н.Б., Фомин Н.А.** Количественная визуализация течений, основанная на спекл-технологиях. Минск: Белорусская наука, 2017. 425 с.

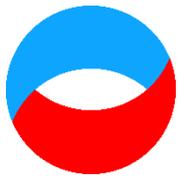
Raskovskaya I.L., Pavlov I.N.

*National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: RaskovskayaIL@mpei.ru*

**SIMULATION OF THE WAVE FIELD OF A LASER BEAM REFLECTED FROM
AN UNEVEN SURFACE IN THE PRESENCE OF DYNAMIC NORMAL
DEFORMATIONS**

A mathematical model of the wave field of a laser beam reflected from an uneven surface in the presence of its dynamic normal deformations has been developed. The relevance of this work is due to the fact that in a number of tasks to reduce poverty and prevent the detection of objects, it is necessary to study the wave field of a laser beam reflected from an uneven vibrating surface. In addition, the parameters of reflected laser radiation must be recorded when measuring variable deformations of elements and assemblies of engines and power plants using optical methods, which is an important and urgent task of metrological support during their testing. In this paper, the combined effect of surface irregularities and its normal displacements on the structure of the reflected beam wave field is considered. Based on the developed analytical model, numerical modeling was carried out and a comparison with experimental data was carried out.

**LASER BEAM, WAVE FIELD, REFLECTION FROM AN UNEVEN SURFACE, DYNAMIC
SURFACE DEFORMATIONS, MATHEMATICAL MODEL, NUMERICAL MODELING**



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 533.6.011

Попович С.С.¹, Знаменская И.А.², Козлов П.В.¹, Загайнов И.А.¹

¹ НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия,
119192, Москва, Мичуринский пр., 1, E-mail: pss@imec.msu.ru
² Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия,
119191, Москва, Ленинские горы, 1, E-mail: znamen@phys.msu.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С ТУРБУЛЕНТНЫМ
ПОГРАНИЧНЫМ СЛОЕМ НА ПЛАСТИНЕ**

АННОТАЦИЯ

В работе исследуется поле скорости в области взаимодействия падающей ударной волны с пограничным слоем на пластине. Исследования проводились на сверхзвуковой аэродинамической установке периодического действия с закрытой рабочей частью и регулируемым сверхзвуковым соплом. Размеры рабочей секции: длина – 200 мм, ширина – 70 мм, высота – 98 мм. Число Рейнольдса, рассчитанное по длине нарастания динамического пограничного слоя от критического сечения сопла, составляло не менее 20 миллионов на срезе сопла, что свидетельствует о турбулентном режиме течения. Ударная волна генерировалась клином, установленным на расстоянии 20 мм от верхней стенки. Установка оснащена оптическими кварцевыми боковыми окнами и прозрачными верхней и нижней стенкой из оргстекла, что позволяет использовать панорамные методы визуализации. Распределение продольной и поперечной составляющей скорости потока в области взаимодействия падающей ударной волны с плоской стенкой определялось с помощью метода PIV. В качестве трассеров использовались аэрозольные частицы DEHS после генератора аэрозоля Scitek.

АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА, УДАРНАЯ ВОЛНА, ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ, PIV

ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие ударных волн с пограничным слоем на поверхностях различных типов – классическая задача газодинамики. Исследования в этой области ведутся на протяжении более 60 лет. Однако до сих пор нерешенными остаются многие вопросы. Как отмечалось в обзорных статьях [1-4], среди них – определение положения и величины пиковых тепловых и динамических нагрузок, возникающих в области падения ударной волны на поверхность. Согласно работам [5-7], дальнейший прогресс в моделировании данного взаимодействия невозможен без получения достоверных экспериментальных данных по распределению газодинамических параметров в области падающих и взаимодействующих ударных волн. В то же время за последние годы удалось достичь больших успехов в предсказании с помощью CFD-моделей закономерностей газодинамики и теплообмена в ламинарном пограничном слое. Определенные трудности возникают при моделировании отрыва турбулентного пограничного слоя и расчете обтекания поверхностей сложной формы [8].

Использование при исследовании высокоскоростных потоков панорамных (полевых) методов измерений, в отличие от традиционных (термоанемометр, лазерная доплеровская

анемометрия и др.), обладает рядом преимуществ [9-13]. Например, они позволяют измерять мгновенные распределения физических величин, выявлять в потоке когерентные структуры, исследовать нестационарные потоки и быстропротекающие процессы. Наиболее известным среди панорамных методов является анемометрия по изображениям частиц PIV (Particle Image Velocimetry).

Целью данной работы является отработка использования метода PIV на задаче взаимодействия падающей ударной волны с турбулентным пограничным слоем на пластине.

МЕТОДОЛОГИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились на сверхзвуковой аэродинамической установке периодического действия с закрытой рабочей частью и регулируемым сверхзвуковым соплом (рис. 1) [14-16]. Размеры рабочей секции: длина – 200 мм, ширина – 70 мм, высота – 98 мм. Число Рейнольдса, рассчитанное по длине нарастания динамического пограничного слоя от критического сечения сопла, составляло не менее $2 \cdot 10^7$ на срезе сопла, что свидетельствует о турбулентном режиме течения. Толщина пограничного слоя в начале рабочей секции на верхней и нижней стенках составляла около 6 мм. Установка оснащена оптическими кварцевыми боковыми окнами и прозрачными верхней и нижней стенкой из оргстекла, что позволяет использовать панорамные методы визуализации.

В данном исследовании число Маха потока на срезе сопла составляло $M_\infty = 2,74$. Размеры критического сечения сопла в данном исследовании составили 70x29 мм. На верхней стенке рабочей части аэродинамической установки перед пластиной устанавливался генератор ударной волны – стальной клин с углом раскрытия 12° (рис. 1). Полное давление в форкамере составило 532 кПа, полная температура – 295,4 К.

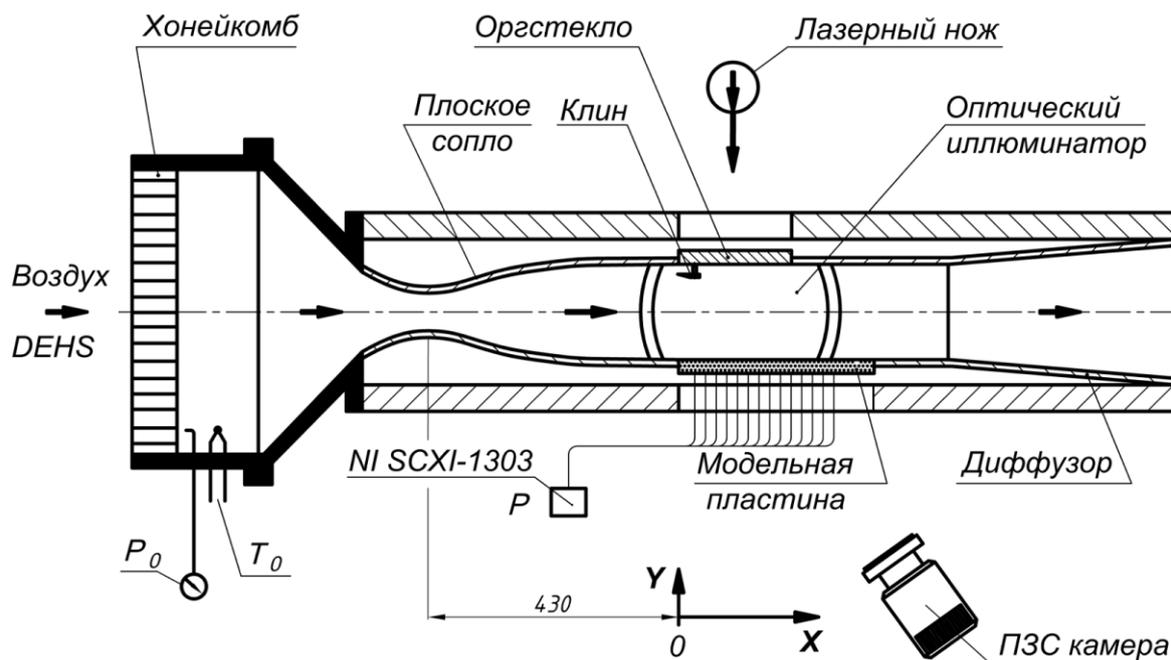


Рис. 1. Схема сверхзвуковой аэродинамической установки периодического действия

При использовании боковых иллюминаторов из оптического стекла и прозрачной верхней стенки из оргстекла можно проводить исследования методом PIV. Стенд оборудован двумерной двухкомпонентной системой анемометрии по изображениям частиц 2D2C-PIV. Система PIV включала в себя: генератора аэрозоля Scitek с жидкостью DEHS, систему освещения потока на основе двойного импульсного Nd:YAG лазера Beamtech с длиной волны 532 нм, цифровую ПЗС-камеру с кадровой частотой на полном разрешении до 15 Гц и синхронизирующий процессор Polis SP-10.0ПС [17]. Лазерный луч с помощью объектива

разворачивался в плоскость и позволял создавать лазерный нож по центральной линии модели вдоль распространения потока. Камера устанавливалась сбоку от рабочей части установки и через иллюминатор фиксировала положение трассеров в моменты подсветки лазером.

На рис. 2 показан результат кросс-корреляционной обработки серии полученных в эксперименте парных изображений. Методика PIV позволяет получить распределение скорости потока в измерительной области, а также визуализировать структуры. На визуализации видны падающая и отраженная ударная волна, а также отрывная область. За падающей ударной волной виден характерный поворот потока и выпрямление после отраженной волны. Скорость потока за падающей ударной волной уменьшается с 630 м/с в набегающем потоке до 540 м/с.

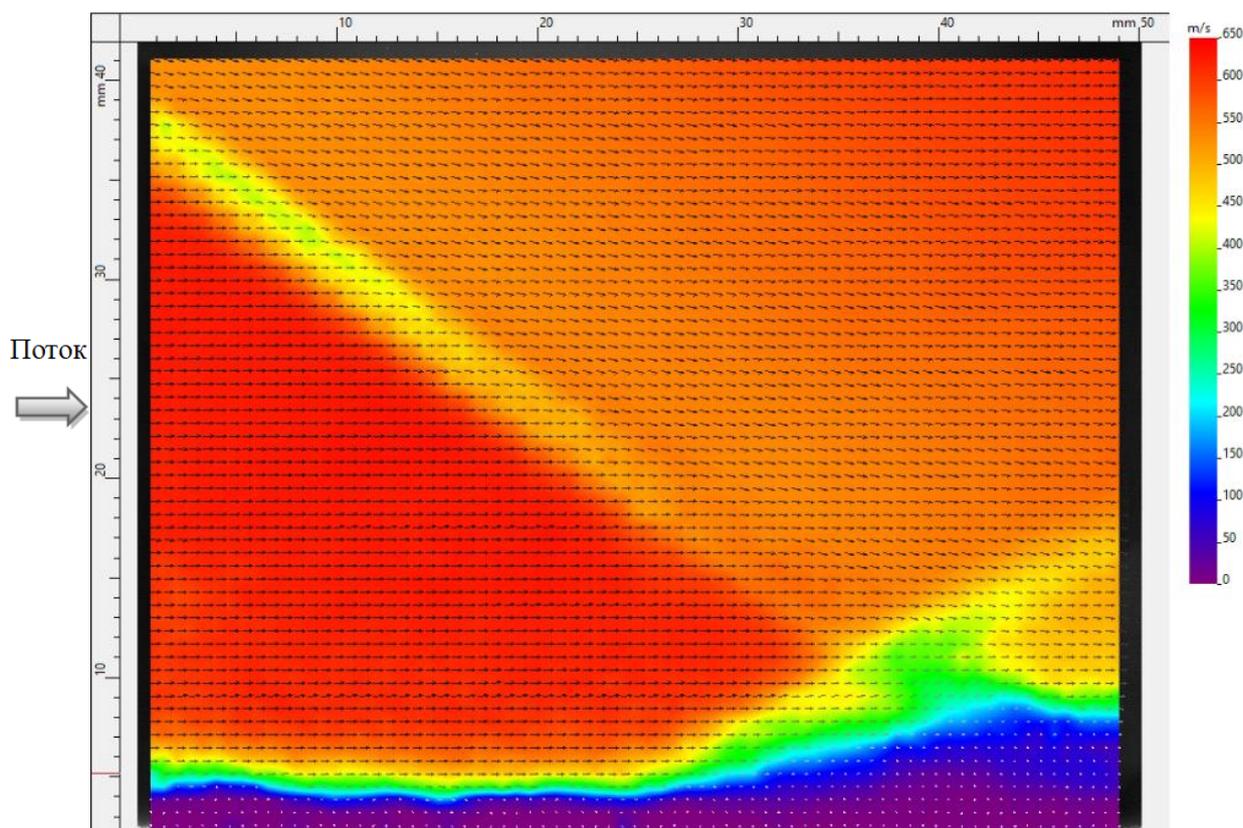


Рис. 2. PIV-визуализация области взаимодействия падающей ударной волны с пограничным слоем

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты экспериментального исследования взаимодействия искусственно инициированной ударной волны с турбулентным пограничным слоем на плоской стенке, обтекаемой сверхзвуковым потоком воздуха с числом Маха $M_\infty=2,74$. Ударная волна инициировалась клином – генератором скачка уплотнения с углом раствора 12 градусов. Картина течения в области взаимодействия ударной волны с пограничным слоем визуализирована с помощью метода PIV.

Работа выполняется при поддержке гранта Российского научного фонда №23-19-00096.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

2D2C PIV – двумерная двухкомпонентная система анемометрии по изображениям частиц;

DEHS – жидкость для генерации аэрозоля;
ПЗС – прибор с зарядовой связью;
 M – число Маха, -;
 P – давление, Па;
 T – температура, К;
 X, Y – координаты, м.
Индексы:
0 – параметр торможения;
 ∞ – параметр в набегающем потоке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Dolling D.S.** Fifty years of shock-wave/boundary-layer interaction research: what next? // AIAA J. 2001. Vol. 39. № 8. Pp. 1517-1531.
2. **Gaitonde D.V.** Progress in shock wave/boundary layer interaction // Prog. Aerosp. Sci. 2015. № 72. Pp. 80-99.
3. **Huang W., Wu H., Yang Y.-g., Yan L., Li S.-b.** Recent advances in the shock wave/boundary layer interaction and its control in internal and external flows // Acta Astronautica. 2020. № 174. Pp. 103-122.
4. **Леонтьев А.И., Лущик В.Г., Макарова М.С., Попович С.С.** Коэффициент восстановления температуры в сжимаемом турбулентном пограничном слое // Теплофизика высоких температур. 2022. Т. 60. № 3. С. 455-480.
5. **Knight D.D., Degrez G.** Shock wave boundary layer interactions in high Mach number flows. A critical survey of current numerical prediction capabilities // Advisory Rept. 319, AGARD. 1998. № 2. Pp. 1-35.
6. **Knight D.D., Yan H., Panaras A.G., Zheltovodov A.A.** Advances in CFD prediction of shock wave turbulent boundary layer interactions // Prog. Aerosp. Sci. 2003. № 39. Pp. 121-184.
7. **Doerffer P., Hirsch C., Dussauge J.-P., Babinsky H., Barakos G.N.** Bump at a Wall (George Barakos). Unsteady Effects of Shock Wave Induced Separation. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011. Pp. 13-53.
8. **Neumann R.D., Freeman D.C.** Experimental measurement of aerodynamic heating about complex shapes at supersonic Mach numbers // J. Spacecr. Rockets. 2012. № 49. Pp. 1080-1087.
9. **Бильский А.В., Гобызов О.А., Маркович Д.М.** История и тенденции развития метода анемометрии по изображениям частиц для аэродинамического эксперимента (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 2020. Т. 27. № 1. С. 1-24.
10. **Знаменская И.А.** Методы панорамной визуализации и цифрового анализа теплофизических полей. Обзор // Научная визуализация. 2023. Т. 13. № 3. С. 125-158.
11. **Humble R.W., Scarano F., van Oudheusden B.W.** Experimental study of an incident shock wave/turbulent boundary layer interaction using PIV // AIAA. 2006. № 2006-3361. Pp. 1-16.
12. **Scarano F.** Overview of PIV in supersonic flows. In A. Schroeder, C.E. Willert (Eds.). Particle Image Velocimetry, Topics in Applied Physics. 2008. Vol. 112. Pp. 445-463.
13. **Гобызов О.А., Ложкин Ю.А., Ганиев Ю.Х., Красенков Г.И., Ларионов М.А., Надеждин А.Е., Филиппов П.С., Филиппов С.Е.** Опыт применения метода PIV для исследования структуры течения в сверхзвуковых аэродинамических трубах // Оптические методы исследования потоков: Тез. докл. 12-й Межд. конф. М.: МЭИ, 2013. 13 с.
14. **Popovich S.S., Zditovets A.G., Kiselev N.A., Vinogradov U.A.** Experimental study of aerodynamic heating in the region of an incident shock wave boundary layer interaction // Acta Astronautica. 2025. Vol. 229. Pp. 804-813.

15. Козлов П.В., Попович С.С., Здитовец А.Г., Загайнов И.А. Экспериментальное исследование тепловых потоков в газодинамических установках непрерывного и кратковременного действия // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2024. Т. 25. № 6. С. 1-13.
16. Popovich S.S. Aerodynamic cooling of the wall in the trace of a supersonic flow behind a backward-facing ledge // Fluid Dynamics. 2022. Vol. 57. № 1. Pp. 57-64.
17. Ахметбеков Е.К., Бильский А.В., Маркович Д.М., Маслов А.А., Поливанов П.А., Цырюльников И.С., Ярославцев М.И. Применение лазерного измерительного комплекса «Полис» для измерений полей скоростей в сверхзвуковом потоке в аэродинамических трубах // Теплофизика и аэромеханика. 2009. Т. 16. № 3. С. 343-352.

Popovich S.S.¹, Znamenskaya I.A.¹, Kozlov P.V.¹, Zagainov I.A.¹

¹ Lomonosov Moscow State University Institute of Mechanics, Russia, 119192, Moscow, Michurinsky Prospect, 1, E-mail: pss@imec.msu.ru

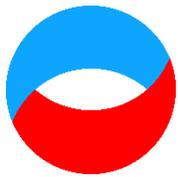
² Lomonosov Moscow State University Faculty of Physics, Russia, 119191, Moscow, Leninskiye gory, 1, E-mail: znamen@phys.msu.ru

INVESTIGATION OF THE SHOCK WAVE TURBULENT BOUNDARY LAYER INTERACTION FOR THE FLAT PLATE FLOW

ABSTRACT

The velocity field of an incident shock wave boundary layer interaction region for a flat plate flow is investigated. The research was carried out on a supersonic wind tunnel of periodic action with a closed working part and an adjustable supersonic nozzle. Dimensions of the working section: length – 200 mm, width – 70 mm, height – 98 mm. The Reynolds number, calculated from the length of the dynamic boundary layer from the nozzle throttle was at least 20 million at the nozzle exit section, which indicates a turbulent flow regime. The shock wave was generated by a wedge mounted at a distance of 20 mm from the upper wall. The thickness of the boundary layer at the beginning of the working section on the upper and lower walls was about 6 mm. The wind tunnel is equipped with optical quartz side windows and transparent upper and lower plexiglass sections, which allows the use of panoramic visualization methods. The distribution of the longitudinal and transverse components of the flow velocity in the interaction region of the incident shock wave with a flat plate was determined using the PIV method. DEHS aerosol particles after the Scitek aerosol generator were used as tracers.

WIND TUNNEL, SHOCK WAVE, BOUNDARY LAYER, PIV



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 533.6.011

Попович С.С., Здитовец А.Г., Виноградов Ю.А.

*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия,
119192, Москва, Мичуринский пр., 1, E-mail: pss@imec.msu.ru*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДРОБЛЕНИЯ КАПЕЛЬ ВОДЫ ПРИ ТЕЧЕНИИ
ВОЗДУШНО-КАПЕЛЬНОГО ПОТОКА ЧЕРЕЗ СОПЛО ЛАВАЛЯ**

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты экспериментального исследования течения воздушно-капельного потока в плоском сверхзвуковом сопле аэродинамической установки непрерывного действия. Капли подавались в поток с помощью форсунок мелкодисперсного распыла, установленных в форкамере. Рабочая часть аэродинамической установки имеет прямоугольное поперечное сечение с размерами 70×98 мм. Число Маха на срезе сопла изменялось в диапазоне 2,0-3,0 за счет механизма поджатия критического сечения сопла, давление торможения в форкамере – 450-550 кПа, температура торможения – 288-298 К. Начальная концентрация дисперсной (жидкой) фазы в потоке и начальное распределение размеров капель варьировались изменением перепада давления на форсунке. При исследовании динамики дробления капель в критическом сечении сопла использовался теневой лазерный метод SSP (shadow photography), включающий в себя: систему освещения потока на основе двойного импульсного Nd:YAG лазера Beamtch с длиной волны 532 нм, 7-суставную оптическую руку для доставки лазерного излучения, светорассеивающий экран для создания фоновой подсветки со спиртовым раствором люминофора родамина, цифровую ПЗС-камеру с кадровой частотой на полном разрешении до 15 Гц, объектив-микроскоп Infinity K2 DistaMax и синхронизирующий процессор Polis SP-10.0ПС. Получена серия снимков мгновенного состояния воздушно-капельного потока в области критического сечения и в расширяющейся части сопла.

**АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА, СВЕРХЗВУКОВОЙ ПОТОК, ТЕНЕВОЙ МЕТОД,
ДРОБЛЕНИЕ КАПЕЛЬ ВОДЫ**

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что при расширении исходно сжатого газа в канале его термодинамическая температура снижается за счет перехода внутренней энергии газа в кинетическую энергию потока. Возникает вопрос: возможно ли создать в потоке такие условия, при которых температура обтекаемой стенки была бы близка к минимальной температуре в системе – термодинамической температуре потока. Решение данной задачи возможно через использование свойств газочапельных потоков с малой массовой концентрацией (до 1%) жидкой фазы. В таком случае жидкая фаза практически не влияет на свойства несущего потока, при этом капли могут охлаждаться до термодинамической температуры потока [1, 2]. Организовав выпадение охлажденных капель на стенку, возможно добиться снижения температуры поверхности.

В результате ранее проведенных экспериментальных исследований [3-7] создана и отлажена система подготовки и впрыска жидкости в сверхзвуковой поток через одно- и многофорсуночную систему в форкамере аэродинамической установки. Проведена серия тепловизионных измерений темпа охлаждения пластины, обтекаемой сверхзвуковым воздушным и воздушно-капельным потоками. Обнаружены эффекты образования ледяных наростов на обтекаемой стенке со снижением температуры на $10-13^{\circ}\text{C}$ по сравнению с однофазным потоком. Визуализация картины течения показала преимущественную фокусировку частиц в центральной части канала после прохождения сопла. Опробован метод аэродинамической фокусировки частиц вдоль фронта скачка уплотнения при установке перед моделью клина-генератора скачка уплотнения. При варьировании чисел Маха набегающего потока обнаружен режим максимального снижения температуры всей поверхности обтекаемой пластины при числах Маха меньших 2,5, в то время как для больших чисел Маха наблюдалось охлаждение только передней кромки пластины. Целью настоящей работы является исследование динамики распада капель и гистограмм распределения капель по размерам в критическом сечении и в расширяющейся части сверхзвукового сопла в диапазоне чисел Маха на срезе $M_{\infty} = 2,0-3,0$.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования проводились на сверхзвуковой аэродинамической установке непрерывного действия АР-2 (рис. 1). Рабочий канал установки имеет прямоугольное поперечное сечение с размерами 70×98 мм. Сопло образовано двумя плоскими гибкими пластинами, обеспечивающими возможность работы на числах Маха от 2,0 до 3,0 за счет поджатия критического сечения с помощью электропривода.

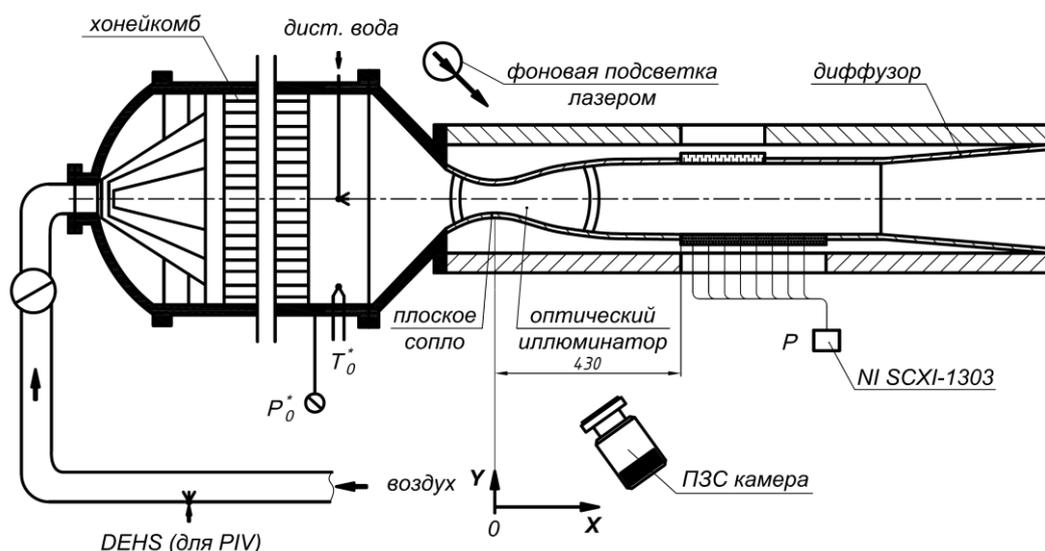


Рис. 1. Схема проведения экспериментального исследования: T_0^* – полная температура набегающего потока, К; P_0^* – полное давление в форкамере, Па; P – статическое давление на стенке, Па

В центральной части форкамеры на расстоянии 300 мм от начала зоны сужения размещались центробежные форсунки. Средний размер водных капель в создаваемом форсункой спрее (по информации производителя Lechler) – от 60 до 110 мкм при изменении перепада давления от 1000 до 300 кПа, соответственно. Подвод дистиллированной воды к форсунке производился через отдельную систему, состоящую из бака с дистиллированной водой под давлением (давление воды в баке нагнеталось и поддерживалось на заданном уровне пневматической системой), расходомерного устройства и соединительных трубок. На боковых стенках рабочей части трубы смонтированы иллюминаторы с оптическими стеклами для визуализации картины течения с помощью прибора Теплера и цифровой камеры

машинного зрения. При исследовании распределения капель по размерам в сверхзвуковом потоке использовался теневой лазерный метод SSP (shadow photography) [8-10], включающий в себя: систему освещения потока на основе двойного импульсного Nd:YAG лазера Beamtech с длиной волны 532 нм, цифровую ПЗС-камеру с кадровой частотой на полном разрешении до 15 Гц и синхронизирующий процессор Polis SP-10.0ПС.

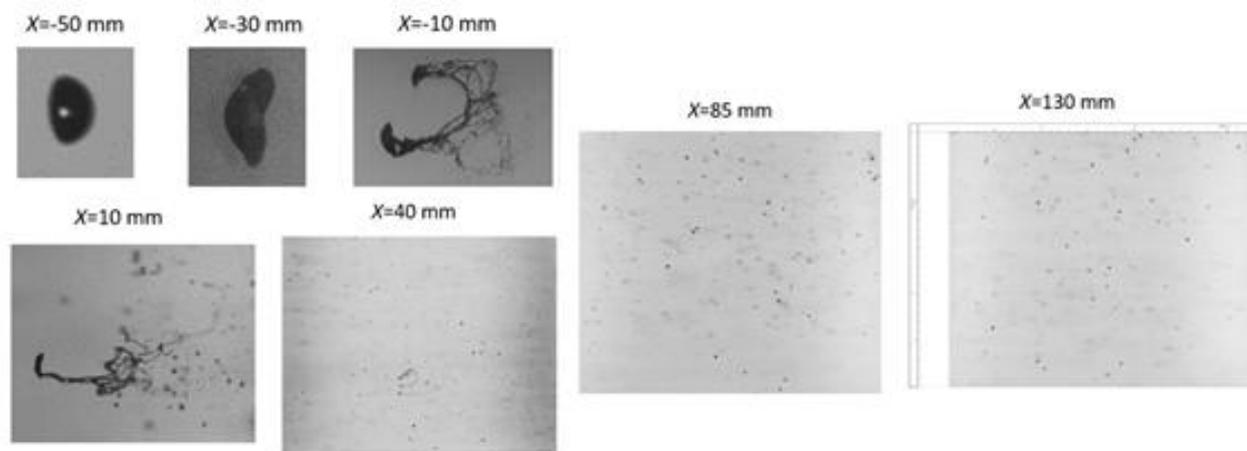


Рис. 2. SSP визуализация процесса дробления капель воды при течении через сопло Лавалья ($X=0$ мм соответствует критическому сечению сопла)

Предварительно была проведена серия измерений распределения водных капель по размерам при распыле воды центробежной форсункой в атмосферу. Проведено сравнение полученных гистограмм с данными производителя форсунки Lechler. Так, например, при перепаде давления 900 кПа среднезауэровский диаметр капель при распыле в атмосферу составил около 70 мкм, а по данным производителя – 66 мкм.

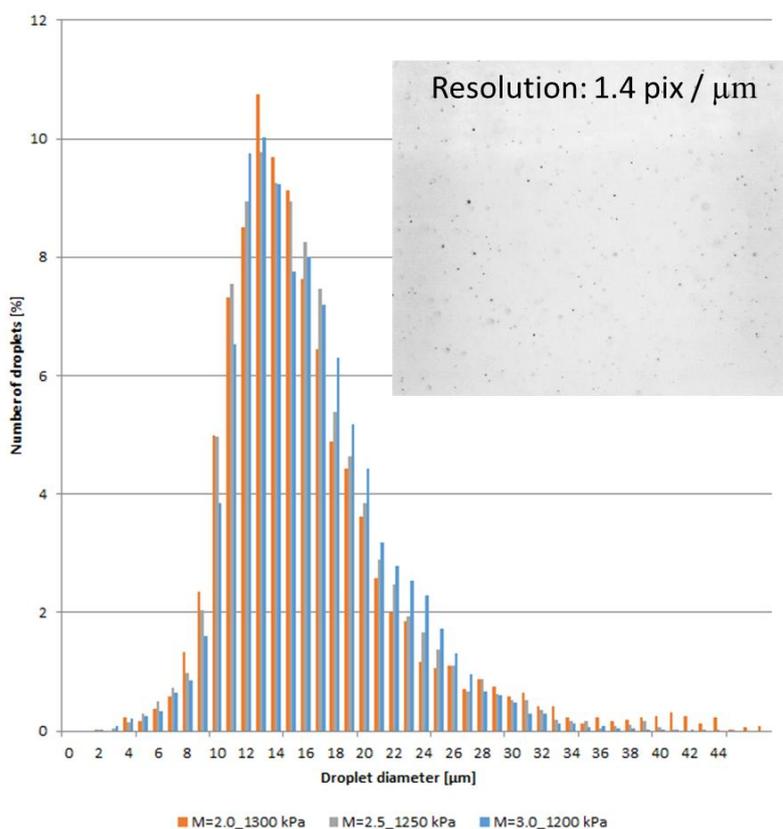


Рис. 3. Распределение капель воды по диаметру в сверхзвуковом потоке при числе Маха M_0 и перепаде давления на форсунке ΔP : $M_0=2.0$, $\Delta P=1300$ кПа; $M_0=2.5$, $\Delta P=1250$ кПа; $M_0=3.0$, $\Delta P=1200$ кПа

Получена серия снимков мгновенного состояния воздушно-капельного потока в области критического сечения и в расширяющейся части сопла (рис. 2). Методом SSP получено нормальное распределение капель по размерам с характерным средним диаметром по Заутеру порядка 20 мкм на срезе сопла (рис. 3). При этом средний диаметр капель и распределение по размерам практически не зависели от перепада давления на форсунке в исследуемом широком диапазоне от 200 до 1300 кПа и изменении числа Маха в диапазоне от 2,0 до 3,0.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование газодинамики течения воздушно-капельного потока в плоском сверхзвуковом сопле. Методом SSP установлен среднезаутеровский диаметр капель на срезе сопла ≈ 20 мкм. Получена серия снимков мгновенного состояния воздушно-капельного потока в области критического сечения и в расширяющейся части сопла. Средний диаметр капель и гистограммы распределения по размерам мало менялись при увеличении перепада давления на форсунке вплоть до 1300 кПа и изменении числа Маха в широком диапазоне от 2,0 до 3,0.

Работа выполняется в рамках госбюджетной тематики МГУ имени М.В. Ломоносова (№АААА-А19-119012990115-5).

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

SCXI – модульная система согласования сигналов измерительных приборов;

SSP – теневой лазерный метод;

ПЗС – прибор с зарядовой связью;

M – число Маха, -;

P – давление, Па;

T – температура, К;

X, Y – координаты, м.

Индексы:

0 – параметр торможения;

∞ – параметр в набегающем потоке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леонтьев А.И., Лущик В.Г., Макарова М.С., Попович С.С. Коэффициент восстановления температуры в сжимаемом турбулентном пограничном слое // Теплофизика высоких температур. 2022. Т. 60. № 3. С. 455-480
2. Леонтьев А.И., Осипцов А.Н., Рыбдылова О.Д. Пограничный слой на плоской пластине в сверхзвуковом газокапельном потоке. Влияние испаряющихся капель на температуру адиабатической стенки // Теплофизика высоких температур. 2015. Т. 53. №6. С. 910-917.
3. Попович С.С., Здитовец А.Г., Киселёв Н.А., Виноградов Ю.А., Медвецкая Н.В. Измерение адиабатной температуры стенки плоской пластины, обтекаемой сверхзвуковым воздушно-капельным потоком // Известия РАН. МЖГ. 2020. №5. С. 130-136.
4. Popovich S.S., Zditovets A.G., Kiselev N.A., Vinogradov U.A. Supersonic flow adiabatic wall temperature influenced by admixture of finely divided water droplets // Proceedings of the 15th International conference on heat transfer, fluid mechanics and thermodynamics (HEFAT). 2021. Pp. 2079-2084.
5. Попович С.С., Леонтьев А.И., Здитовец А.Г., Киселёв Н.А., Виноградов Ю.А. Экспериментальное исследование обтекания пластины сверхзвуковым потоком воздуха с примесью мелкодисперсных водных // Материалы Восьмой Российской

- национальной конференции по теплообмену. Издательство МЭИ, 2022. Т. 1. С. 428-431.
6. **Попович С.С., Виноградов Ю.А., Здитовец А.Г.** Экспериментальное исследование термогазодинамики течения воздушно-капельного потока в плоском сверхзвуковом сопле // XIII Всероссийский Съезд по теоретической и прикладной механике: Сборник тезисов докладов. В 4-х томах, Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2023. С. 1051-1052.
 7. **Попович С.С., Здитовец А.Г., Киселев Н.А., Виноградов Ю.А.** Экспериментальное исследование дисперсности распыла капель воды форсункой // Современные проблемы теплофизики и энергетики: Материалы IV международной конференции, М.: МЭИ (НИУ), 2024. С. 111-112.
 8. **Gobyzov O., Lozhkin Y., Ryabov M., Markovich D.** Experimental study of submillimeter droplets dynamics and breakup in continuous supersonic flow terminated by shock wave // EPJ Web of Conferences. 2016. Vol. 114. №. 02031.
 9. **Бильский А.В., Гобызов О.А., Маркович Д.М.** История и тенденции развития метода анемометрии по изображениям частиц для аэродинамического эксперимента (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 2020. Т. 27. № 1. С. 1-24.
 10. **Знаменская И.А.** Методы панорамной визуализации и цифрового анализа теплофизических полей. Обзор // Научная визуализация. 2023. Т. 13. № 3. С. 125-158.

Popovich S.S., Zditovets A.G., Vinogradov U.A.

*Lomonosov Moscow State University Institute of Mechanics, Russia,
119192, Moscow, Michurinsky Prospect, 1, E-mail: pss@imec.msu.ru*

INVESTIGATION OF THE WATER DROPLETS BREAKUP PROCESS IN THE LAVAL NOZZLE AIR-DROPLET FLOW

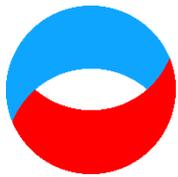
ABSTRACT

The results of an experimental study of an air-droplet the flow in a flat supersonic Laval nozzle of a periodic-acting wind tunnel are presented. The droplets were fed into the flow using fine spray nozzles installed in the pre-chamber. The working part of the wind tunnel has a rectangular cross-section with dimensions of 70x98 mm. The Mach number at the nozzle exit varied in the range 2.0-3.0 due to the mechanism of compression of the nozzle critical section, the total pressure in the pre-chamber was 450-550 kPa, and the total temperature was 288-298 K. The initial concentration of the dispersed (liquid) phase in the flow and the initial droplet size distribution were varied by changing the pressure drop at the spray nozzles. When studying the dynamics of droplet crushing in the critical section of the nozzle, the SSP (shadow photography) laser method was used, which includes: a flow illumination system based on a Beamtech dual-pulse Nd:YAG laser with a wavelength of 532 nm, a 7-joint optical arm for delivering laser radiation, a light-scattering screen for creating a backlight with alcohol solution of rhodamine phosphor, a digital CCD camera with a frame rate at full resolution up to 15 Hz, an Infinity K2 DistaMax microscope lens and the Polis SP-10.0PS synchronization processor. A series of snapshots of the instantaneous state of the air droplet flow in the critical section area and in the expanding part of the Laval nozzle were obtained.

WIND TUNNEL, SHADOW METHOD, SUPERSONIC FLOW, WATER BREAKUP PROCESS

Секция 10

Оптические методы в биомедицине и экологии



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 535.4

Будников А.А., Наумов А.А., Платонов Д.М., Паршин В.А.

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: budnikovaa@mpei.ru*

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ЛАЗЕРНОЙ ДИФРАКТОМЕТРИИ ЭРИТРОЦИТОВ

АННОТАЦИЯ

Распределение эритроцитов по размерам, описываемое кривой Прайса-Джонса, является важной характеристикой состояния крови и может служить диагностическим индикатором при сердечно-сосудистых и иных заболеваниях. В связи с актуальностью разработки доступных методов экспресс-анализа параметров крови, в данной работе исследуется возможность создания устройства лазерной дифрактометрии эритроцитов. Представлены этапы разработки оптико-электронного комплекса для измерения параметров крови, а также методика регистрации и анализа дифракционных картин, полученных при рассеянии лазерного излучения на эритроцитах. Особенностью разрабатываемой системы является прямая регистрация дифракционной картины матрицей. Определены направления для дальнейшей оптимизации комплекса и алгоритмов анализа для повышения точности и адаптации устройства к клиническому применению и индивидуальному мониторингу.

ЛАЗЕРНАЯ ДИФРАКТОМЕТРИЯ, ЭРИТРОЦИТЫ, ДИФРАКЦИОННАЯ КАРТИНА, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО РАЗМЕРАМ, ВЛАЖНЫЙ МАЗОК КРОВИ

ВВЕДЕНИЕ

Данная работа направлена на решение задачи получения и обработки изображений дифракционных картин в рамках разработки оптико-электронного измерительного комплекса для дифрактометрического анализа ансамблей эритроцитов. Исследования в данной области ведутся на протяжении последних 15 лет научной группой из «Международного лазерного центра» МГУ им. М.В. Ломоносова. В работе [1] представлено теоретическое описание методик получения и анализа дифракционных картин на мазке крови. Актуальной задачей является создание экспериментального макета установки, обеспечивающего корректную регистрацию дифракционных картин рассеянного ансамблями эритроцитов излучения и быструю обработку получаемых данных с определением искомым параметров клеток. При этом особое внимание уделяется анализу возможностей применения цифровой фотокамеры для регистрации дифракционных картин и исследованию влияния её характеристик на точность измерений.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки доступных и эффективных методов анализа параметров крови, в частности, деформированности эритроцитов, которая является ключевым показателем их функциональной активности. Этот параметр определяет эффективность кислородного обмена и способность клеток перемещаться по микрососудам, а его снижение служит индикатором ряда патологических состояний организма. В этой связи создание недорогих отечественных оптико-электронных

измерительных систем для анализа характеристик эритроцитов представляет значительный научный и практический интерес. Один из перспективных подходов заключается в использовании дифракционных методов, позволяющих оценивать распределение клеток по размерам и их деформационную лабильность. Применение недорогой фотокамеры без объектива для регистрации дифракционных картин, формируемых при прохождении излучения через влажный мазок крови, обеспечивает простоту реализации и возможность быстрой обработки данных. Такие системы могут стать важным инструментом медицинской диагностики, способствуя раннему выявлению нарушений кровообращения и других патологий, связанных с изменением свойств эритроцитов.

Лазерная дифрактометрия характеристик ансамблей эритроцитов основана на измерении параметров дифракционной картины лазерного излучения, рассеянного на влажном мазке крови. Теория расчета характеристик ансамблей эритроцитов по дифракционной картине изложена в [2, 3] и других аналогичных работах тех же авторов. Однако, методика подразумевает достаточно точное измерение распределения интенсивности дифракционной картины, что на текущий момент в полной мере не реализовано. Для этого необходимо создать оптическую систему, позволяющую варьировать пространственные и энергетические параметры зондирующего и рассеянного излучения, а также определить наиболее оптимальные параметры съемки дифракционных картин, проецируемых непосредственно на матрицу.

В настоящий момент существует ряд анализаторов размеров и прочих параметров микро- и наночастиц, в основе работы которых лежит использование явлений дифракции и рассеяния света. Примерами таких комплексов являются Ласка-ТД, ProSizer и Photocor [4]. В то же время по-прежнему актуально развитие методик исследования мелкодисперсных систем оптическими методами [5, 6]. Однако, подобные методики ориентированы на работу с другого рода частицами и не позволяют измерить те параметры, которые необходимы для анализа деформируемости эритроцитов и измерения ширины их распределения по размерам. Существуют также микроскопические методы и автоматические анализаторы крови, которые, с одной стороны, позволяют измерить необходимые характеристики и параметры крови, но, с другой стороны, подразумевают использование преимущественно зарубежного и дорогостоящего оборудования.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА

В исследованиях Никитина С.Ю., Приезжева А.В. и других [2], были выделены ключевые методы анализа крови, их принципы, преимущества и трудности реализации. Эктацитометрия и дифрактометрия представляют собой анализ крови, предназначенный для измерения деформируемости эритроцитов, т.е. способности клеток крови изменять свою форму под действием внешних сил. В системе кровообращения человека важную роль играют реологические свойства крови. К числу основных реологических параметров относят деформируемость и агрегационную способность эритроцитов [3]. На реологию крови влияет и распределение эритроцитов по размерам. О его важности говорит, в частности, тот факт, что ширина распределения эритроцитов по размерам является надежным предиктором смертности в общей популяции взрослых в возрасте от 45 лет и старше [7, 8]. При некоторых заболеваниях в крови человека присутствуют эритроциты, обладающие повышенной жесткостью. При сердечно-сосудистых и ряде других заболеваний наблюдается увеличение ширины распределения эритроцитов по объему (RDW), что можно использовать в диагностике. Нарушение деформируемости эритроцитов приводит к ухудшению их проходимости через капиллярное русло и, как следствие, к снижению кислородного снабжения тканей. Данный феномен наблюдается при серповидноклеточной анемии, тропической малярии и наследственном сфероцитозе [9], а также может быть сопряжен с развитием осложнений при сахарном диабете, ишемической болезни сердца и цереброваскулярных заболеваниях [10]. В связи с этим, актуальным направлением исследований является количественная оценка

деформируемости эритроцитов [11, 12] и изучение факторов, определяющих ее изменение [13-15].

Идея метода лазерной дифрактометрии заключается в определении параметров ансамбля частиц с помощью дифракционной картины. Распределение эритроцитов по размерам определяют посредством анализа характеристик дифракционной картины, формируемой при рассеянии лазерного излучения на ансамбле эритроцитов. Подобного рода измерения могут быть осуществлены как на сухих мазках крови, так и на суспензии эритроцитов. Однако для их практической реализации необходимо решить ряд проблем, таких как приготовление качественных мазков крови, фотометрия дифракционных картин, подавление спекл-структуры дифракционных картин, создание специальных алгоритмов обработки данных. Среди преимуществ метода лазерной дифрактометрии можно упомянуть высокую скорость анализа, высокую точность и неинвазивность, поскольку метод не требует разрушения образца. Недостатком является то, что концентрация частиц в образце может влиять на точность результатов.

Дифракционная картина, соответствующая рассеянию лазерного пучка на влажном мазке эритроцитов, имеет яркое круглое пятно в центре и чередующиеся темные и светлые кольца по мере удаления от центра. Это напоминает картину рассеяния плоской волны на круглом отверстии, картину Эйри. Форма эритроцита представляет собой двояковыпуклый диск переменного диаметра. Однако моделирование рассеяния на объектах подобной формы является сложной задачей, поэтому моделирование дифракции на элементах крови начинается с простых форм, например, сферических частиц. В статье [16] предложена аналитическая модель рассеяния света на неоднородном ансамбле плоских эллиптических дисков, моделирующих эритроциты. Применение данной модели позволило авторам найти приближённое соотношение между видностью дифракционной картины и дисперсией размеров частиц [17]. Более точные модели используют современные численные методы, такие как дискретно-дипольное приближение [18], метод граничных элементов [19] и метод интегральных уравнений [20].

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальная установка

Для регистрации дифракционных картин, получаемых путём прохождения лазерного излучения через образец крови, была создана экспериментальная установка. Оптическая схема, представленная на рис. 1., включает в себя гелий-неоновый лазер, поляризационную призму Глана-Томпсона и нейтральный фильтр для ослабления интенсивности лазерного пучка, двояковыпуклую линзу, вертикальное крепление для образца крови, экран для наблюдения дифракционной картины и фотокамеру. Все элементы установки закреплены на массивном рельсе, что минимизирует влияние внешних механических воздействий. Камера установлена отдельно на некотором удалении от экрана и тоже жёстко закреплена.

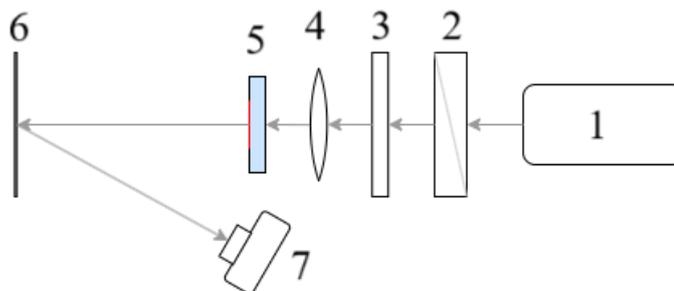


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – He-Ne лазер; 2 – поляризатор; 3 – фильтр; 4 – линза; 5 – образец; 6 – экран; 7 – камера

Управление интенсивностью лазерного излучения было необходимо, чтобы не повредить фоточувствительные элементы матрицы камеры в случае выхода за динамический диапазон. Дифракционная картина, образованная рассеянным на образце излучением, попадала на лист белой бумаги в плоскости регистрации, выполняющий роль экрана. Регистрация производилась с помощью цифровой камеры Nikon 1J5, направленной под углом 30° к главной оптической оси. Такое расположение элементов, наличие экрана, а также неоднородность расположения эритроцитов в мазке крови приводило к образованию спекл-структур. Далее были предприняты попытки минимизировать их влияние в процессе обработки данных. Образец крови был закреплён на вертикальной стойке, из-за чего эритроциты обладали большей подвижностью, находясь под влиянием гравитационных сил.

Постепенное решение возникших проблем привело к созданию новой экспериментальной установки вертикального типа (см. рис. 2.), где, во-первых, мазок крови располагался параллельно поверхности земли, во-вторых, дифракционные картины регистрировались напрямую матрицей цифровой камеры для получения наиболее корректных данных, полученных во время дифракции на образце.

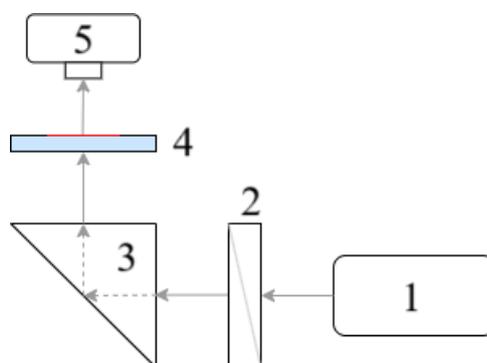


Рис. 2. Схема экспериментальной установки вертикального типа:
1 – He-Ne лазер; 2 – поляризатор; 3 – поворотная призма; 4 – образец; 5 – камера

Ослабленное с помощью поляризатора излучение попадало на поворотную призму, работающую на принципе полного внутреннего отражения, для перенаправления пучка вдоль вертикальной оптической оси. Далее на пути излучения находится образец, закрепленный в специально разработанном кейсе. Рассеянное на образце излучение попадает на матрицу цифровой камеры. В новой конфигурации на том же массивном рельсе установлен гелий-неоновый лазер и поляризационная призма, а прочие элементы закреплены на вертикальной стойке.

Подготовка образца

Подготовка влажного мазка крови является важным этапом в исследованиях реологических свойств крови. Правильная подготовка мазка позволяет получить качественный образец, который подходит для анализа с помощью различных методов, включая лазерную дифрактометрию. К подготовке влажного мазка крови предъявляются следующие основные требования. Мазок должен быть однородным по толщине и содержанию клеток. Мазок не должен содержать артефактов, которые способны исказить результаты анализа. Клетки крови должны быть жизнеспособными, чтобы обеспечить точность результатов анализа.

Используемый в настоящей работе алгоритм подготовки образца подразумевал взятие пробы самостоятельно в домашних условиях. В первую очередь производилась дезинфекция инструментов и поверхностей, соприкасающихся с кровью. После этого производится забор крови из пальца пациента с помощью скарификатора. Кровь разводится в фосфатно-буферном растворе, заранее приготовленном из сухого буфера и дистиллированной воды, в концентрации 1 к 100. Это предотвращает свертывание крови и сохраняет эритроциты в

жизнеспособном состоянии. Разведённая кровь наносится на предметное стекло, равномерно распределяется по его поверхности, сверху ставится ещё одно предметное либо покрывное стекло.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Дифракционная картина, полученная на установке первого типа путём рассеяния лазерного излучения на мазке крови, представлена на рис. 3. Обработка производилась в среде MathCad. Изображение формата bmp было переведено в режим оттенков серого. Однако визуальной четкости изображения мешало наличие в центре картины яркого пятна от первичного лазерного излучения, которое в некотором роде препятствует получению информации об уровне яркости в близлежащих областях картины. Для обеспечения информативности изображения был использован фильтр Гаусса с параметром $\gamma = 0,04$. Этот параметр обратно пропорционален стандартному отклонению σ , определяющему ширину гауссова фильтра, и, следовательно, степень размытия. После фильтрации на изображении более явно видны дифракционные кольца.

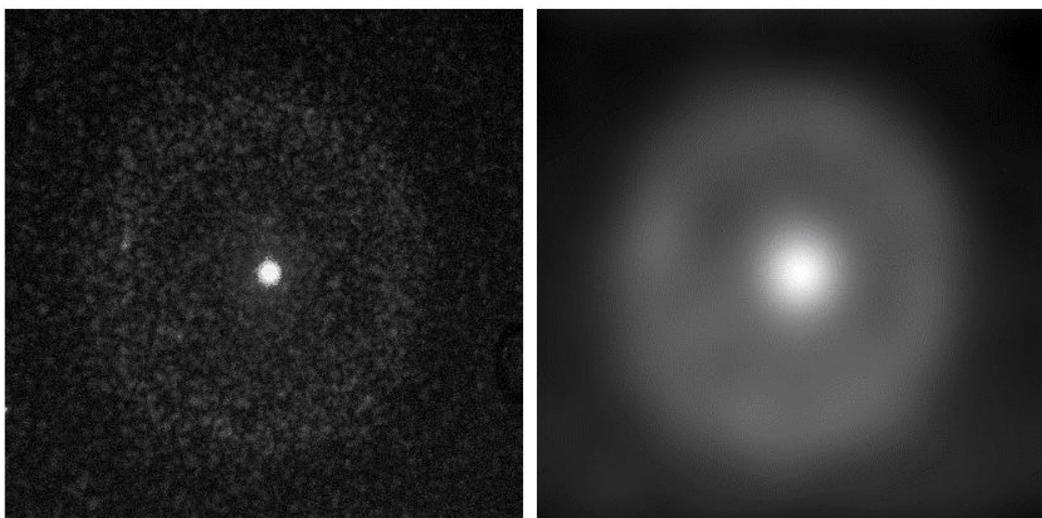


Рис. 3. Дифракционная картина на ансамбле эритроцитов до и после фильтрации

Дифракционная картина должна регистрироваться в дальней зоне, чтобы её характеристики могли быть описаны с использованием приближения Фраунгофера. В то же время, на большом удалении от образца линейные размеры дифракционной картины значительно увеличиваются за счет достаточно большого угла расходимости дифрагированного излучения. Так как площадь матрицы не превышает $1,2 \text{ см}^2$, необходимо располагать камеру на расстоянии не более 3 см от образца. Таким образом, наблюдать дифракционные картины непосредственно на матрице в данной конфигурации установки без использования вспомогательных элементов невозможно. В будущем мы планируем разработать оптическую систему для фокусировки лазерного пучка сначала на образце, а после его прохождения и на матрице камеры. Это накладывает определенные ограничения, поскольку фокусное расстояние линз должно быть мало. Кроме того, на качество дифракционных картин влияет неоднородность расположения кровяных клеток, отсутствие монослоя эритроцитов. Эту проблему можно решить использованием альбумина, белка плазмы крови, благодаря которому эритроциты оседали бы на поверхности стекла.

Были проведены измерения, где в качестве образца была использована «сушёная» человеческая кровь, предназначенная для микроскопии. Визуальные наблюдения однозначно подтвердили наличие видимой дифракционной картины. При попытках поместить изображение в плоскость матрицы в схему была добавлена собирающая линза с фокусным расстоянием 25 мм, помещенная сразу за образцом. Она позволяет сфокусировать пучок на

матрице камеры. Итоговое изображение представлено на рис. 4. Для первичной обработки данных результатов была написана новая программа на языке Python, которая производила гауссову фильтрацию так же с параметром $\gamma = 0,04$. Лучи-сателлиты выше центра картины порождены переотражениями на поворотной призме.

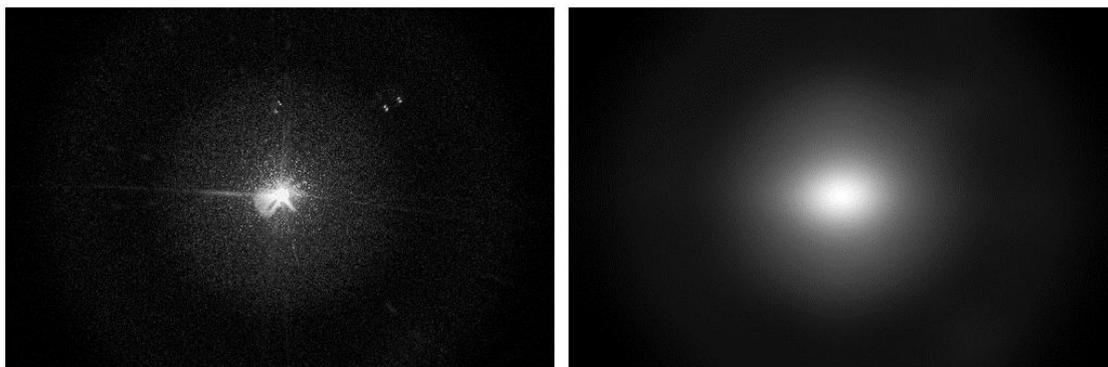


Рис. 4. Дифракционная картина на «сушёной» крови

Есть основания полагать, что матрица коммерческой цифровой камеры Nikon 1J5, как и прочих подобных устройств, не обладает линейной чувствительностью. Следовательно, получаемый разными фоточувствительными элементами матрицы сигнал может нелинейно изменяться с изменением интенсивности излучения. Таким образом, этот сигнал не вполне отражает реальное распределение интенсивности лазерного излучения в плоскости регистрации. Для получения наиболее достоверной информации о реальном сигнале матрица камеры была предварительно откалибрована с использованием фотодиода ФД-24К.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе мы создали экспериментальную установку для лазерной дифрактометрии мазка крови. Эксперименты продемонстрировали возможность получения более качественных дифракционных картин при минимизации влияния сил тяжести на образец. При создании установки вертикального типа мы столкнулись со сложностями регистрации дифракционных картин матрицей камеры в виду несоответствия линейных размеров матрицы с размерами изображения. Кроме того, изображения получаются зашумленными из-за неоднородности ансамбля эритроцитов. Достаточно чётко нам представляются дальнейшие шаги по улучшению работы установки. Среди них разработка системы линз для фокусировки дифракционной картины на матрицу, использование альбумина для создания эффекта прилипания эритроцитов к поверхности предметного стекла.

Авторы благодарны сотрудникам «Международного лазерного центра» МГУ им. М.В. Ломоносова Никитину С.Ю., Цыброву Е.Г. и Лебедевой М.С. за методическую помощь, а также доценту кафедры физики НИУ «МЭИ» Печинской О.В. за помощь при подборе компонентов для установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Никитин С.Ю., Устинов В.Д., Шишкин С.Д.** Алгоритм полосовой точки для измерения параметров дифракционной картины в лазерной эктацитометрии эритроцитов // Квантовая электроника. 2021. Т. 51. №. 4. С. 353-358.
2. **Никитин С.Ю. и др.** О возможности измерения асимметрии распределения эритроцитов по размерам методом лазерной дифрактометрии мазка крови // Квантовая электроника. 2022. Т. 52. №. 7. С. 664-670.

3. **Никитин С.Ю. и др.** Улучшенный алгоритм обработки данных для лазерной эктацитометрии эритроцитов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика. 2017. Т. 17. №. 3. С. 150-157.
4. **Дешабо В.А., Косов В.И., Юдин Д.И. и др.** Конструкция и метрологические характеристики отечественных анализаторов Фотокор для измерения размеров и дзета-потенциала нанодисперсных систем // Альманах современной метрологии. 2023. № 1(33). С. 293-302.
5. **Sapronov M.V., Skornyakova N.M., Usmanova S.S.** Development of optical diagnostic method for colloidal solutions based on elastic light scattering // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2127. P. 012059.
6. **Сапронов М.В., Скорнякова Н.М., Усманова Ш.Ш. и др.** Исследование наночастиц в растворах оптически прозрачных жидкостей методом статического рассеяния света // Оптические методы исследования потоков: Труды 17-й Межд. конф. М.: НТЦ УП РАН, 2023. С. 699-709.
7. **Patel K.V., Ferrucci L., Ershler W.B. et al.** Red blood cell distribution width and the risk of death in middle-aged and older adults // Archives of internal medicine. 2009. Vol. 169. №. 5. Pp. 515-523.
8. **Patel K.V., Semba R.D., Ferrucci L. et al.** Red cell distribution width and mortality in older adults: a meta-analysis // Journals of Gerontology Series A: Biomedical Sciences and Medical Sciences. 2010. Vol. 65. № 3. Pp. 258-265.
9. **Da Costa L. et al.** Hereditary spherocytosis, elliptocytosis, and other red cell membrane disorders // Blood reviews. 2013. Vol. 27. № 4. Pp. 167-178.
10. **Toth K., Kesmarky G., Alexy T.** Clinical significance of hemorheological alterations // Handbook of Hemorheology and Hemodynamics. Amsterdam: IOS Press, 2007. Pp. 392-432.
11. **Зинчук В.В.** Деформируемость эритроцитов: физиологические аспекты // Успехи физиол. наук. 2001. Т. 32 № 3. С. 64-76.
12. **Huisjes R., Bogdanova A., van Solinge W.W. et al.** Squeezing for life – properties of red blood cell deformability // Front. Physiol. 2018. Vol. 9. P. 656.
13. **Muravyov A.V., Tikhomirova I.A.** Role molecular signaling pathways in changes of red blood cell deformability // Clinical Hemorheology and Microcirculation. 2013. Vol. 53. №. 1-2. Pp. 45-59.
14. **Semenov A.N. et al.** The effects of different signaling pathways in adenylyl cyclase stimulation on red blood cells deformability // Frontiers in Physiology. 2019. Vol. 10. P. 923.
15. **Kim Y., Kim K., Park Y.** Measurement techniques for red blood cell deformability: recent advances // Blood Cell An Overview of Studies in Hematology. 2012. Vol. 10. Pp. 167-194.
16. **Nikitin S.Yu., Priezhev A.V., Lugovtsov A.E.** Laser diffraction by the erythrocytes and deformability measurements // Advanced optical flow cytometry: methods and disease diagnoses. Weinheim: Wiley-VCH Verlag Gmbh & Co. 2011. Pp. 133-153.
17. **Nikitin S. Yu., Lugovtsov A.E., Priezhev A.V., Ustinov V.D.** Relation between the diffraction pattern visibility and dispersion of particle sizes in an ektacytometer // Quantum Electronics. 2011. Vol. 41. № 9. Pp. 843-846.
18. **Yurkin M.A. et al.** Experimental and theoretical study of light scattering by individual mature red blood cells by use of scanning flow cytometry and a discrete dipole approximation // Applied Optics. 2005. Vol. 44. № 25. Pp. 5249-5256.
19. **Constantinides G.N. et al.** Computation of light scattering by axisymmetric nonspherical particles and comparison with experimental results // Applied optics. 1998. Vol. 37. №. 31. Pp. 7310-7319.
20. **Ergul O., Arslan-Ergul A., Gurel L.J.** Computational study of scattering from healthy and diseased red blood cells // Journal of Biomedical Optics. 2010. Vol. 15. № 4. P. 045004.

Budnikov A.A., Naumov A.A., Platonov D.M., Parshin V.A.

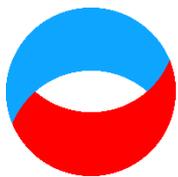
*National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: budnikovaa@mpei.ru*

LASER DIFFRACTOMETRY OF ERYTHROCYTES - IMPLEMENTATION OF METHOD

ABSTRACT

The size distribution of red blood cells, described by the Price-Jones curve, is an important indicator of blood condition and can serve as a diagnostic tool for cardiovascular and other diseases. Due to the need to develop affordable methods for rapid analysis of blood parameters, this paper considers the possibility of creating a device for laser diffractometry of red blood cells. The paper presents the stages of development of an optoelectronic complex for measuring blood parameters, as well as a method for recording and analyzing diffraction patterns obtained by scattering laser radiation on red blood cells. A special feature of the system being developed is the direct registration of the diffraction pattern by the matrix. The directions of further optimization of the complex and analysis algorithms have been identified in order to increase the accuracy and adapt the device for clinical use and individual monitoring.

LASER DIFFRACTOMETRY, ERYTHROCYTES, DIFFRACTION PATTERN, SIZE DISTRIBUTION, BLOOD SAMPLE



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 535.4

Лебедева М.С.¹, Цыбров Е.Г.², Никитин С.Ю.¹

¹ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Физический факультет, Россия,*

119991, Москва, ул. Ленинские горы, 1 стр. 2, E-mail: 2mary.lebedeva@gmail.com

² *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, факультет Вычислительной математики и кибернетики, Россия,*

119991, Москва, ул. Колмогорова, 1 стр. 52, E-mail: tsybrovevgeniy@yandex.ru

**ЭРИТРОЦИТЫ В СДВИГОВОМ ПОТОКЕ И НА МАЗКЕ КРОВИ: АНАЛИЗ
МЕТОДАМИ МИКРОСКОПИИ И ЛАЗЕРНОЙ ДИФРАКТОМЕТРИИ**

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена измерению геометрических характеристик эритроцитов на мазке крови и в сдвиговом потоке. Методами микроскопии и лазерной дифрактометрии мы измерили средний диаметр эритроцитов, а также параметр, характеризующий разброс по размерам и асимметрию формы эритроцитов. Для анализов мы использовали влажные мазки крови, на которых эритроциты сохраняют свои естественные формы.

ЭРИТРОЦИТЫ, МИКРОСКОПИЯ, ЛАЗЕРНАЯ ДИФРАКТОМЕТРИЯ, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭРИТРОЦИТОВ ПО РАЗМЕРАМ, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭРИТРОЦИТОВ ПО ФОРМАМ, ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ, РЕОЛОГИЯ

ВВЕДЕНИЕ

К числу важных диагностических параметров крови относят средний размер красных клеток крови (эритроцитов) и ширину их распределения по размерам. Прямое измерение этих параметров возможно, например, с помощью счетчика Коултэра или методом микроскопии. Еще одна возможность – лазерная дифрактометрия. Этот метод позволяет проводить измерения быстро и не требует сложной аппаратуры. В лазерной дифрактометрии информация о геометрических параметрах эритроцитов извлекается из картины рассеяния лазерного пучка на мазке крови или суспензии эритроцитов. При этом необходимы специальные алгоритмы обработки данных и высокое качество дифракционных картин. В настоящей работе мы провели дифрактометрию образцов крови трех молодых здоровых доноров (22-27 лет). Оценку точности измерений провели методом микроскопии.

Другим важным параметром красных клеток является их способность к деформациям. Ранее нами была рассмотрена возможность исследования деформируемости эритроцитов при помощи дискового лазерного эктацитомера [1]. Однако здесь, как и в случае работы с мазками крови, также требуется высокое качество дифракционных картин и проверка получаемых результатов прямым способом – при помощи микроскопии.

ПРИГОТОВЛЕНИЕ МАЗКА КРОВИ

Для анализа мы использовали влажные мазки крови, где эритроциты сохраняют свои естественные формы. Протокол приготовления мазка следующий. Несколько микролитров цельной венозной крови разводим в растворе PBS в соотношении 1:200. Изготавливаем стеклянные кюветы, куда будем заливать полученную суспензию клеток: предметное стекло покрываем тонким слоем человеческого альбумина в концентрации 10 мг на 1 мл, затем на двусторонний скотч толщиной порядка 100 мкм приклеиваем покровное стекло. Раствор с кровью заливаем в кювету, на несколько минут (2-3) оставляем в покое в горизонтальном положении, чтобы клетки осели на дно кюветы, образуя разреженный монослой. Вид кюветы с раствором крови (влажный мазок крови) показан на рис. 1.

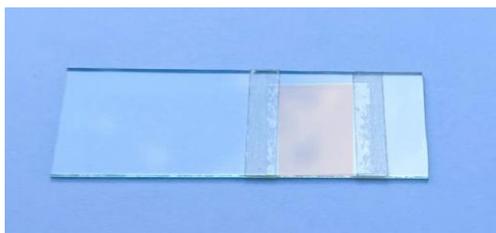
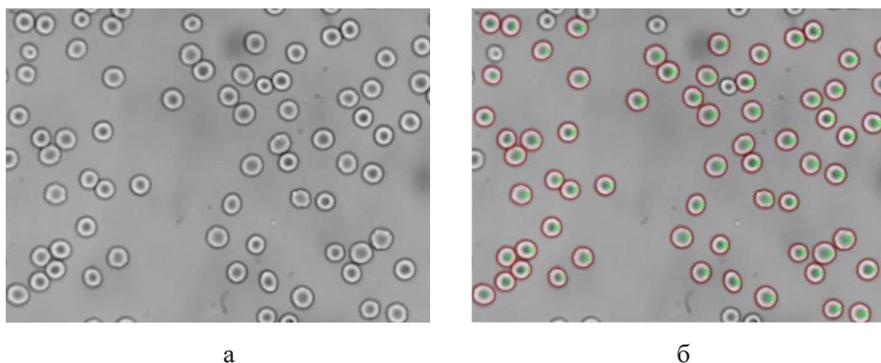


Рис. 1. Влажный мазок крови

Для измерений мы использовали образцы крови трех молодых здоровых доноров в возрасте 22-27 лет. Всего провели анализ восьми мазков крови: трех мазков от Донора 1, трех мазков от Донора 2 и двух мазков от Донора 3.

МИКРОСКОПИЯ МАЗКА КРОВИ

Вид мазка крови под микроскопом показан на рис. 2а. С помощью компьютерной программы, разработанной в нашей лаборатории и реализованной на языке MATLAB, мы выделяем контуры эритроцитов (рис. 2б). Как при измерении методом оптической микроскопии, так и при использовании метода лазерной дифрактометрии, исходим из представления эритроцита как плоского эллиптического диска с осями a и b .



а

б

Рис. 2. Влажный мазок крови:

а – вид мазка под микроскопом, б – контуры эритроцитов, определенные при помощи компьютерной программы

Для набора статистики производилось фотографирование не менее 15-20 разных мест влажного мазка крови под микроскопом. Таким образом, общее количество обработанных клеток на одного донора за одну серию экспериментов составляло от 500 до 3 000. Для каждого эритроцита вычислялся большой диаметр a и малый диаметр b , что проиллюстрировано на рис. 3а. Крупнее формы эритроцитов («слепки» клеток) на мазке крови показаны на рис. 3б.

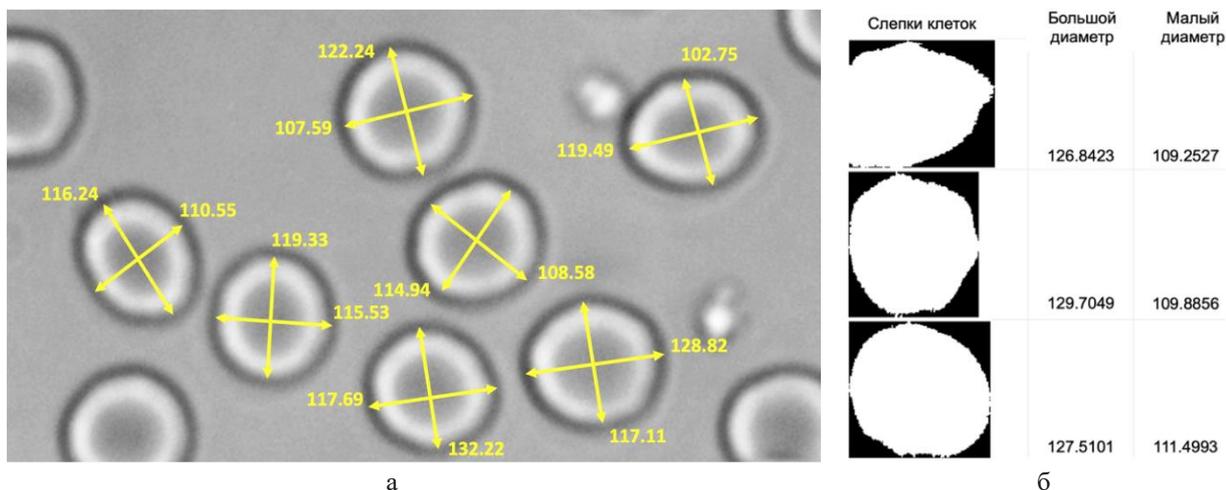


Рис. 3. Определение размеров эритроцитов:

а – иллюстрация размеров в пикселях, б – контуры эритроцитов на мазке крови, определенные при помощи компьютерной программы, «слепки» клеток

ЛАЗЕРНАЯ ДИФРАКТОМЕТРИЯ МАЗКА КРОВИ

Получение дифракционных картин

Просвечивая лазерным пучком мазок крови, можно наблюдать картину рассеяния света (дифракционную картину), которая несет в себе информацию о размерах и формах эритроцитов. Схема экспериментальной установки показана на рис. 4а. Она включает в себя лазер, мазок крови, экран наблюдения и фотоаппарат. Вид наблюдаемой дифракционной картины показан на рис. 4б. Цифровая фотография дифракционной картины передается в компьютер, где обрабатывается с помощью специального алгоритма, разработанного в нашей лаборатории. Во всех опытах по дифрактометрии мы использовали лазер с длиной волны $\lambda = 635$ нм, для анализа использовали фотографии дифракционных картин, сделанные с выдержкой $\tau = 1/4$ с, ISO=500.

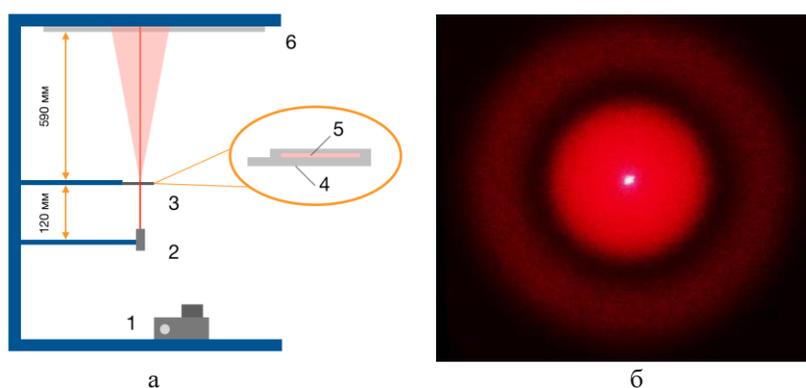


Рис. 4. Схема дифрактометра:

а – экспериментальная установка: 1 – фотоаппарат, 2 – лазер, 3 – влажный мазок крови, 4 – стеклянная кювета, 5 – суспензия эритроцитов, б – экран наблюдения; б – вид наблюдаемой дифракционной картины

Обработка дифракционных картин

Дифракционные картины на экране наблюдения обладают пятнистой структурой (спекл-структурой), которая не несет в себе полезной информации и препятствует применению алгоритмов обработки данных. Для подавления спекл-структуры мы проводили сглаживание распределения интенсивности света на экране наблюдения медианным фильтром размером в 5 пикселей. При этом значение интенсивности света в каждой точке дифракционной картины

заменялось средним значением интенсивности по малой окрестности этой точки. Для более полного сглаживания через центр дифракционной картины проводили несколько секущих линий, идущих в разных направлениях. Распределение интенсивности света на каждой линии аппроксимировали с помощью полинома максимального правдоподобия (полином девятой степени), после чего проводили усреднение распределения по всем секущим линиям. Пример сглаженной дифракционной картины и секущие линии показаны на рис. 5.

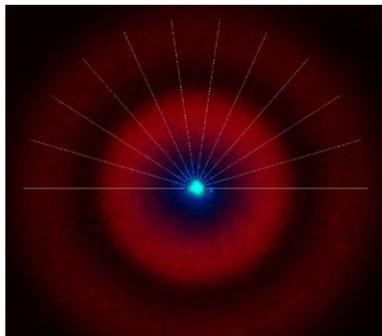


Рис. 5. Картина рассеяния лазерного пучка на мазке крови и секущие линии

Наконец, для уменьшения влияния шумов мы проводили вычитание фона дифракционной картины. Для этого на той же экспериментальной установке делали фотографии фона от лазера в условиях отсутствия эритроцитов в кювете. Вычисленное таким образом угловое распределение интенсивности света вычитали из распределения, полученного для кюветы с эритроцитами. В итоге получали гладкое угловое распределение интенсивности света на дифракционной картине $I = I(\theta)$, пригодное для дальнейшего анализа. Пример такого распределения показан на рис. 6.

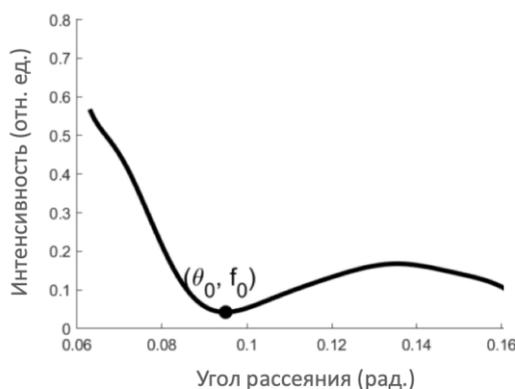


Рис. 6. Пример сглаженного углового распределения интенсивности света на дифракционной картине

Отметим, что по сравнению с работой [2] принятая здесь обработка дифракционной картины позволила существенно повысить точность измерения углового распределения интенсивности света.

Анализ распределения $I(\theta)$ позволяет определить средний диаметр эритроцитов D_0 , а также комбинированный параметр σ , учитывающий разброс по размерам и асимметрию формы эритроцитов.

ИЗМЕРЯЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЭРИТРОЦИТОВ

Средний диаметр

Средний диаметр эритроцита на мазке крови можно измерить с помощью микроскопа. Алгоритм измерения выражается формулой

$$D_{mic} = \frac{1}{2} \langle a + b \rangle.$$

Здесь a и b – максимальный и минимальный диаметры эритроцита на мазке крови (см. рис. 3а), угловые скобки обозначают усреднение по ансамблю эритроцитов.

Этот же параметр можно определить методом лазерной дифрактометрии по формуле [3]

$$D_0 = 1,22 \frac{\lambda}{\theta_0}.$$

Здесь λ – длина волны лазера, θ_0 – угол, под которым виден минимум интенсивности света на дифракционной картине. Результаты измерения углов θ_0 для образцов крови трех доноров приведены в табл. 1. Там же представлены значения среднего диаметра эритроцитов, найденные методом микроскопии (D_{mic}) и методом дифрактометрии (D_0).

Табл. 1. Размеры эритроцитов в образцах крови

Параметр	Донор 1	Донор 2	Донор 3
θ_0 (рад)	$0,0985 \pm 0,0007$	$0,0980 \pm 0,0005$	$0,0970 \pm 0,0007$
D_0 (мкм)	$7,87 \pm 0,06$	$7,90 \pm 0,05$	$7,99 \pm 0,06$
D_{mic} (мкм)	$7,93 \pm 0,02$	$7,84 \pm 0,03$	$7,86 \pm 0,01$

Сравнение этих данных показывает, что методом лазерной дифрактометрии диаметры эритроцитов определены с погрешностью, не превышающей 2%.

Разброс эритроцитов по размерам. Асимметрия формы эритроцита

Разброс эритроцитов по размерам (диаметрам) определяем формулой

$$\sigma_1^2 = \frac{\langle (a + b)^2 \rangle}{\langle a + b \rangle^2} - 1.$$

Асимметрию формы эритроцита характеризуем параметром

$$\sigma_2^2 = \left\langle \left(\frac{a - b}{a + b} \right)^2 \right\rangle.$$

Здесь по-прежнему a и b – максимальный и минимальный диаметры эритроцита на мазке крови (см. рис. 3а), угловые скобки обозначают усреднение по ансамблю эритроцитов.

Оба параметра σ_1 и σ_2 безразмерны, их удобно выражать в процентах. Экспериментально эти параметры можно измерить с помощью микроскопа. Теория показывает, что методом лазерной дифрактометрии нельзя измерить параметры σ_1 и σ_2 по отдельности, но можно измерить комбинированный параметр

$$\sigma^2 = \sigma_1^2 + \frac{1}{2} \sigma_2^2,$$

учитывающий разброс по размерам и асимметрию формы эритроцитов. Параметр σ также безразмерен, и его удобно выражать в процентах. Алгоритм измерения параметра σ методом лазерной дифрактометрии выражается формулой [4]

$$\sigma^2 = \frac{1 - v}{76}.$$

Здесь v – видность дифракционной картины, определяемая формулой

$$v = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}},$$

I_{max} – интенсивность света в первом максимуме, I_{min} – интенсивность света в первом минимуме углового распределения интенсивности света на экране наблюдения (см. рис. 6).

КАЛИБРОВКА ЛАЗЕРНОГО ДИФРАКТОМЕТРА

Наши предварительные оценки показали, что точность измерения параметра σ методом лазерной дифрактометрии недостаточна. Чтобы повысить точность мы провели калибровку дифрактометра, используя данные микроскопии мазков крови. С помощью микроскопа измерили параметр σ и определили теоретическое значение видности дифракционной картины по формуле

$$v_{mic} = 1 - 76\sigma^2.$$

Затем ввели аппаратное число дифрактометра, определив его формулой

$$n_a = \left\langle \frac{v_{mic}}{v} \right\rangle,$$

где угловые скобки обозначают усреднение по всем мазкам крови. Для условий наших экспериментов это число оказалось равным

$$n_a = 1,7.$$

Это значение было определено эмпирически. После этого алгоритм измерения параметра σ представили в виде

$$\sigma_{dif}^2 = \frac{1 - n_a v}{76}$$

Результаты измерения видности дифракционной картины для образцов крови трех доноров представлены в табл. 2. Там же представлены результаты измерения параметров $\sigma_1, \sigma_2, \sigma$ методом микроскопии и параметра σ методом лазерной дифрактометрии. Сравнение этих данных показывает, что комбинированный параметр σ , учитывающий разброс по размерам и асимметрию формы эритроцитов был измерен методом лазерной дифрактометрии с погрешностью, не превышающей 7,9 %. При этом сам параметр σ для образцов крови трех доноров лежал в области $5,72 \leq \sigma \leq 7,36$.

Табл. 2. Разброс по размерам и асимметрия форм эритроцитов

Параметр	Донор 1	Донор 2	Донор 3
v	$0,352 \pm 0,016$	$0,416 \pm 0,020$	$0,418 \pm 0,013$
σ_1 (%)	$4,8 \pm 0,2$	$4,9 \pm 0,2$	$4,4 \pm 0,2$
σ_2 (%)	$7,9 \pm 0,6$	$6,1 \pm 0,1$	$5,2 \pm 0,2$
σ (%)	$7,36 \pm 0,50$	$6,49 \pm 0,20$	$5,72 \pm 0,20$
σ_{dif} (%)	$7,27 \pm 1,00$	$6,21 \pm 1,50$	$6,17 \pm 0,90$

ЭРИТРОЦИТЫ В СДВИГОВОМ ПОТОКЕ

Фотография эритроцитов в сдвиговом потоке, полученная с помощью микроскопа, представлена на рис. 7а. Для получения такого изображения была использована проточная кювета, схема которой показана на рис. 7б.

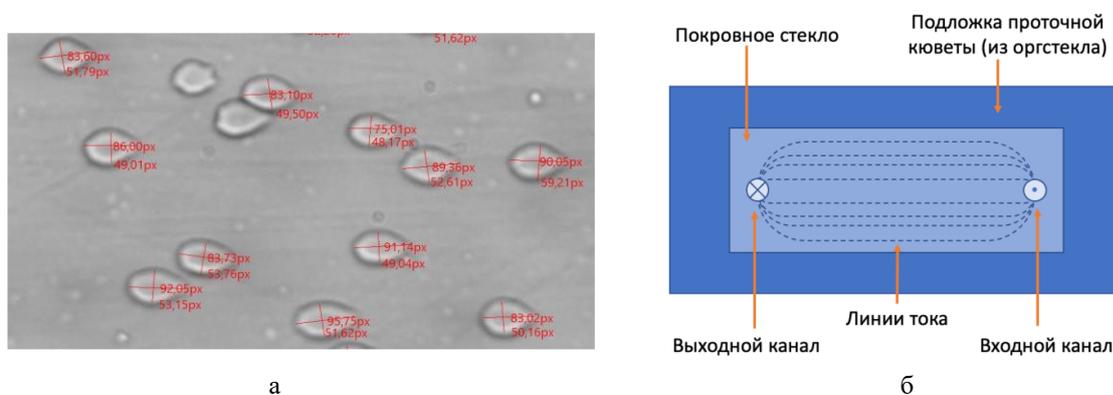


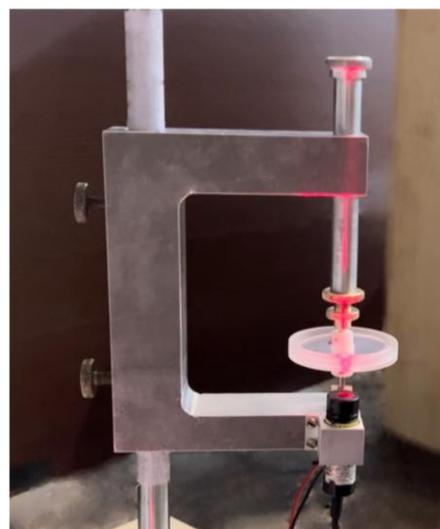
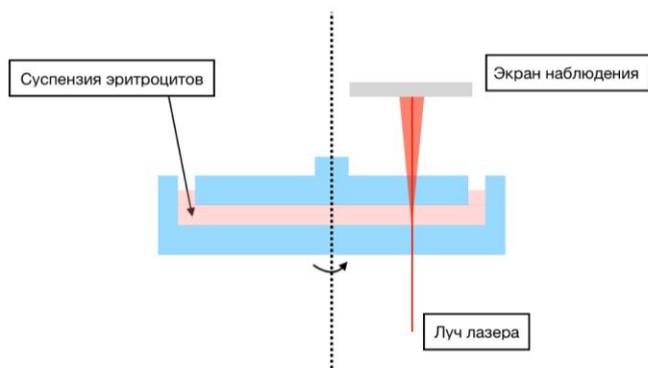
Рис. 7. Эритроциты в сдвиговом потоке:

а – микроскопическое изображение деформированных в потоке эритроцитов, размеры клеток указаны в пикселях, б – схема проточной кюветы

Каждый эритроцит прикрепляется в одной-двух точках ко дну проточной кюветы. Поток жидкости вытягивает эритроциты в направлении потока. Величина вытягивания служит мерой способности эритроцита к деформации [5]. В работе [6] с помощью подобной системы («камера Муравьёва») было измерено распределение эритроцитов по деформируемости. Отметим, что наблюдение деформации эритроцитов в сдвиговом потоке возможно и для движущихся эритроцитов [7]. Однако этот метод, получивший название реоскопия, труден в реализации и пока на практике не используется.

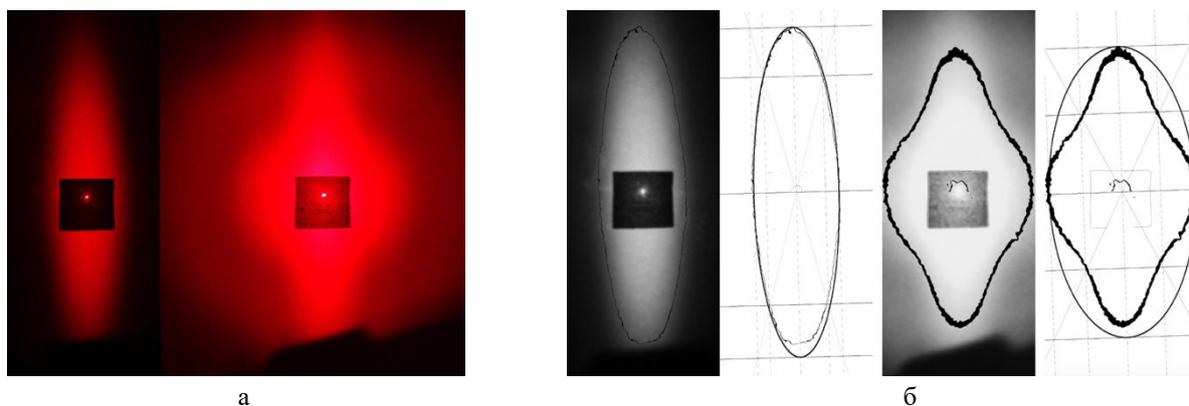
ЛАЗЕРНАЯ ЭКТАЦИТОМЕТРИЯ ЭРИТРОЦИТОВ

Для измерения деформируемости эритроцитов в работе [8] был предложен метод дифрактометрии эритроцитов в сдвиговом потоке – эктацитометрия. В настоящее время есть коммерческие приборы, работающие на этом принципе, в частности, LORRCA и Rheoscan [9]. С помощью этих приборов измеряют среднюю деформируемость эритроцитов в образце крови. В работах [10-12] предложены алгоритмы обработки данных лазерной эктацитометрии, позволяющие измерять характеристики распределения эритроцитов по деформируемости – ширину и асимметрию распределения. Для проверки этой возможности мы построили дисковый лазерный эктациометр эритроцитов, схема которого показана на рис. 8а. На рис. 8б показан внешний вид этого прибора.



а б
Рис. 8. Дискацитометр эритроцитов:
а – схема эктацитометра, б – внешний вид установки

На рис. 9а показаны примеры дифракционных картин для образца крови одного донора в случае естественной деформируемости эритроцитов и при наличии доли (50%) фиксированных глутаровым альдегидом эритроцитов. На рис. 9б показаны линии изоинтенсивности (линии, на которых значение интенсивности в дифракционной картине имеет постоянное значение) для этих образцов.



а б
Рис. 9. Дифракционные картины от деформированных эритроцитов:
а – фотографии дифракционных картин в случае естественной деформируемости образца и при наличии доли фиксированных клеток (50%), б – линии изоинтенсивности в этих картинах

Алгоритмы обработки данных лазерной эктацитометрии строятся на основе анализа геометрических параметров линии изоинтенсивности – координат полярных и характеристических точек, кривизны линии в полярных точках и т.п.

С помощью собранной установки мы провели опыты по лазерной эктацитометрии образцов крови молодых здоровых доноров. Нам пока не удалось достичь воспроизводимости данных по определению параметров ширины и асимметрии распределения эритроцитов по деформируемости. Для повышения надежности и точности измерений необходимо повышать качество дифракционных картин. Разработка методики проведения эксперимента на данный момент ведется также при помощи исследования влияния различных факторов (величины выдержки съемки, оптической схемы установки и др.) в случае работы с влажными мазками крови. Кроме того, целесообразна калибровка лазерного эктацитометра методом прямого наблюдения эритроцитов в сдвиговом потоке, как показано на рис. 7.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассеяние лазерного пучка на эритроцитах в сдвиговом потоке и на мазке крови позволяет измерять характеристики, связанные с размерами и формами клеток крови, а также их способностью изменять свою форму под действием внешних сил. Эти характеристики играют важную роль в системе кровообращения, особенно в той ее части, где эритроциты проходят через тончайшие кровеносные сосуды – капилляры [13-16]. В опытах по рассеянию лазерного пучка на мазке крови (дифрактометрия) мы измерили средний диаметр эритроцитов с погрешностью менее 2%, а также комбинированный параметр, учитывающий разброс по размерам и асимметрию формы эритроцитов с погрешностью менее 8%. В опытах по рассеянию лазерного пучка на эритроцитах в сдвиговом потоке (эктацитометрия) мы получили дифракционные картины, пригодные для измерения средней деформируемости эритроцитов, а также разброса эритроцитов по деформируемости. Полученные данные указывают на необходимость повышения качества дифракционных картин. Кроме того, целесообразна калибровка эктацитометра на основе прямых измерений форм эритроцитов в сдвиговом потоке с помощью микроскопа. Исследования в этом направлении продолжаются.

Авторы благодарны Павлу Мольдону и Юлии Романовой за помощь в работе.

Работа выполнена при финансовой поддержке стипендиального гранта фонда «БАЗИС» №23-2-2-36-1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лебедева М.С., Цыбров Е.Г., Никитин С.Ю.** Измерение ширины распределения эритроцитов по деформируемости методом лазерной эктацитометрии // Оптические методы исследования потоков: Труды 17-й Межд. конф. М.: МЭИ, 2023. С. 595-600.
2. **Юрчук Ю.С., Устинов В.Д., Никитин С.Ю., Приезжев А.В.** Рассеяние лазерного пучка на влажном мазке крови и измерение распределения эритроцитов по размерам // Квантовая электроника. 2016. т. 46. № 6. С. 515-520.
3. **Nikitin S.Yu., Tsybrov E.G, Lebedeva M.S., Lugovtsov A.E., Priezzhev A.V.** Possibility of measuring of erythrocyte size distribution parameters by laser diffractometry of a blood smear // Journal of Biomedical Photonics & Engineering. 2024. P. 040302.
4. **Никитин С.Ю., Устинов В.Д., Цыбров Е.Г., Лебедева М.С.** Рассеяние лазерного пучка на ансамбле асимметричных эритроцитов // Оптика и спектроскопия. 2021. Т. 129. № 7. С. 961-971.
5. **Муравьев А.В., Михайлов П.В., Тихомирова И.А.** Микроциркуляция и гемореология: точки взаимодействия // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2017. Т. 16. № 2. С. 90-100.
6. **Ладынин А.И., Муравьев А.В., Луговцов А.Е. Приезжев А.В.** Деформируемость и агрегация эритроцитов в проточной камере: исследование с применением нейронных сетей // Физиология и патология кровообращения: Тез. докл. 8-й Всеросс. шк.-конф. М.: МГУ, 2025. С. 60.
7. **Dobbe J. G.G., Hardeman M.R., Streekstra G.J., Strackee J., Ince C., Grimbergen C.A.** Analyzing red blood cell-deformability distributions // Blood Cells, Molecules, and Diseases. 2002. Vol. 28. № 3. Pp. 373-384.
8. **Bessis M., Mohandas N.** A diffractometric method for the measurement of cellular deformability // Blood Cells. 1975. Vol. 1. Pp. 307-313.

9. **Baskurt O.K., Hardeman M.R., Uyuklu M., Ulker P., Cengiz M., Nemeth N., Shin S., Alexy T., Meiselman H.J.** Comparison of three commercially available ektacytometers with different shearing geometries // *Biorheology*. 2009. Vol. 46. № 3. Pp. 251-264.
10. **Никитин С.Ю., Устинов В.Д.** Алгоритм характеристической точки в лазерной эктацитометрии эритроцитов // *Квантовая электроника*. 2018. Т. 48. № 1. С. 70-74.
11. **Никитин С.Ю., Устинов В.Д., Шишкин С.Д., Лебедева М.С.** Алгоритм кривизны линии в лазерной эктацитометрии эритроцитов // *Квантовая электроника*. 2020. Т. 50. № 9. С. 888-894.
12. **Ustinov V.D., Tsybrov E.G., Nikitin S.Yu.** Estimating of fraction of weakly deformable erythrocytes in a blood sample based on the method of laser ektacytometry and a database of simulated diffraction patterns // *Journal of Biomedical Photonics & Engineering*. 2023. P. 030303.
13. **Patel K.V., Semba R.D., Ferrucci L., Newman A.B., Fried L.P., Wallace R.B. et al.** Red cell distribution width and mortality in older adults: a meta-analysis // *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*. 2010. Vol. 65A. № 3. Pp. 258-265
14. **Каранадзе Н.А., Беграмбекова Ю.Л., Борисов Е.Н., Орлова Я.А.** Ширина распределения эритроцитов как предиктор низкой толерантности к физической нагрузке у пациентов с хронической сердечной недостаточностью // *Кардиология*. 2022. Т. 62. № 4. С. 30-35.
15. **Зинчук В.В.** Деформируемость эритроцитов: физиологические аспекты // *Успехи физиологических наук*. 2001. Т. 32. № 3. С. 64-76.
16. **Prudinnik D.S., Kussanova A., Vorobjev I.A., Tikhonov A., Ataulakhanov F.I., Barteneva N.S.** Deformability of heterogeneous red blood cells in aging and related pathologies // *Aging and disease*. 2025. Vol. 16. № 3. Pp. 1-23.

Lebedeva M.S.¹, Tsybrov E.G.², Nikitin S.Yu.¹

¹ *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Russia,
11991, Moscow, Leninskie Gory st., 1-2, E-mail: 2mary.lebedeva@gmail.com*

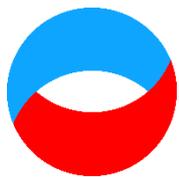
² *Lomonosov Moscow State University,
Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Russia,
11991, Moscow, Kolmogorova st., 1-52, E-mail: tsybrovevgeniy@yandex.ru*

ERYTHROCYTES IN SHEAR FLOW AND ON A BLOOD SMEAR: ANALYSIS BY MICROSCOPY AND LASER DIFFRACTOMETRY

ABSTRACT

The work is devoted to measuring the geometric characteristics of erythrocytes on a blood smear and in a shear flow. The average diameter of erythrocytes, as well as a parameter characterizing the spread in size and asymmetry of the shape of erythrocytes were measured by us using microscopy and laser diffractometry. Wet blood smears, on which erythrocytes retain their natural shapes, were used for the analysis.

ERYTHROCYTES, MICROSCOPY, LASER DIFFRACTOMETRY, ERYTHROCYTE SIZE DISTRIBUTION, ERYTHROCYTE SHAPE DISTRIBUTION, DEFORMABILITY, RHEOLOGY



УДК 543.424.2:616-71

Горбачева П.В., Матвеева И.А.

*Самарский национальный исследовательский университет, Россия,
443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34, E-mail: polinag63@mail.ru*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ РАННЕЙ ДИАГНОСТИКИ МИЕЛОМЫ ПРИ ПОМОЩИ РАМАНОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

АННОТАЦИЯ

В медицине все чаще используются оптические методы исследования крови, среди которых рамановская спектроскопия. К преимуществам этого метода относятся возможность анализа небольших объемов образца, отсутствие разрушения материала и высокая скорость получения результатов.

В работе проведено исследование сыворотки крови у пациентов с миеломной болезнью и без нее. В качестве метода регистрации рамановского сигнала использовался метод поверхностно-усиленного рамановского рассеяния (SERS), позволяющий усилить полезный сигнал на несколько порядков путём модификации поверхности подложки. Среди построенных моделей классификации наибольшую эффективность показали модели на основе k ближайших соседей и случайного леса (ROC AUC > 0,9).

Анализ рамановских спектров сыворотки крови с привлечением методов машинного обучения позволил выделить ключевые спектральные полосы, которые могут указывать на наличие определенных химических веществ в крови человека, ассоциированных с миеломной болезнью.

**РАМАНОВСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ, МИЕЛОМНАЯ БОЛЕЗНЬ, СЫВОРОТКА КРОВИ,
МЕТОД РАЗРЕШЕНИЯ МНОГОМЕРНЫХ КРИВЫХ, МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ

Анализ крови на ранних стадиях заболеваний имеет огромное значение для диагностики и предупреждения развития различных заболеваний. Кровь является информативной средой, отражающей состояние всего организма, и анализ ее состава может предоставить ценную информацию о физиологических и патологических процессах [1].

Наиболее распространенным методом анализа крови является биохимический анализ, но он имеет ряд недостатков: неполнота информации, влияние внешних факторов, ограничения в ранней диагностике заболеваний, дорогостоящее оборудование, длительность и сложность анализа. В медицине все чаще используются оптические методы исследования крови человека, в частности рамановская спектроскопия. К преимуществам данного метода можно отнести то, что возможно изучение небольшого количества анализируемого вещества, исследование проводится без разрушения образца, а также рамановская спектроскопия обладает высоким быстродействием [2, 3]. Поверхностно-усиленное рамановское рассеяние (SERS) особенно интересно тем, что позволяет усилить сигнал рамановского рассеяния на несколько порядков путём модификации поверхности, на которой находится исследуемый образец вещества [4].

Внедрение жидкостной биопсии с применением рамановской спектроскопии в клиническую практику может привести к выявлению рака на ранней стадии, возможности мониторинга реакции пациента на лечение, а также обнаружению рецидивов для принятия своевременных мер.

Сравнительный анализ рамановских спектров злокачественных и доброкачественных новообразований позволяет определить конкретные биохимические составы крови. В работе были исследованы образцы с миеломной болезнью и без нее. Миелома – это избыток измененных плазмочитов – клеток, которые производят антитела, защищающие организм от бактерий и вирусов. Эти плазмочиты вытесняют нормальные клетки крови и накапливаются в костном мозге, формируя опухоль, повреждающую кости и почки, нарушающую работу иммунной системы.

В процессе развития патологического новообразования происходит изменение химических компонентов в организме человека, что приводит к изменению рамановских спектров. Это дает возможность определить стадию заболевания и оценить изменения в составе крови по изменению регистрируемых спектров. Данная идея рассматривалась в работе [5], где изучалась возможность применения метода разрешения многомерных кривых с использованием метода чередующихся наименьших квадратов для анализа образцов сыворотки крови. В исследованиях [6, 7] были изучены аналогичные методы машинного обучения для классификации спектров рамановского рассеяния кожи, что подтверждает актуальность поиска новых методов анализа спектральных данных.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Все рамановские спектры были сняты при помощи установки, расположенной на рис. 1. Экспериментальная установка для рамановского анализа плазмы крови человека включает в себя систему спектрометрии EnSpectr R785, микроскоп ADF U300. Фокус возбуждающего излучения и сбор рассеянного излучения производится благодаря 50x Objective LMPlan. Стимуляция снятых спектров осуществляется лазерным модулем с длиной волны 785 нм.

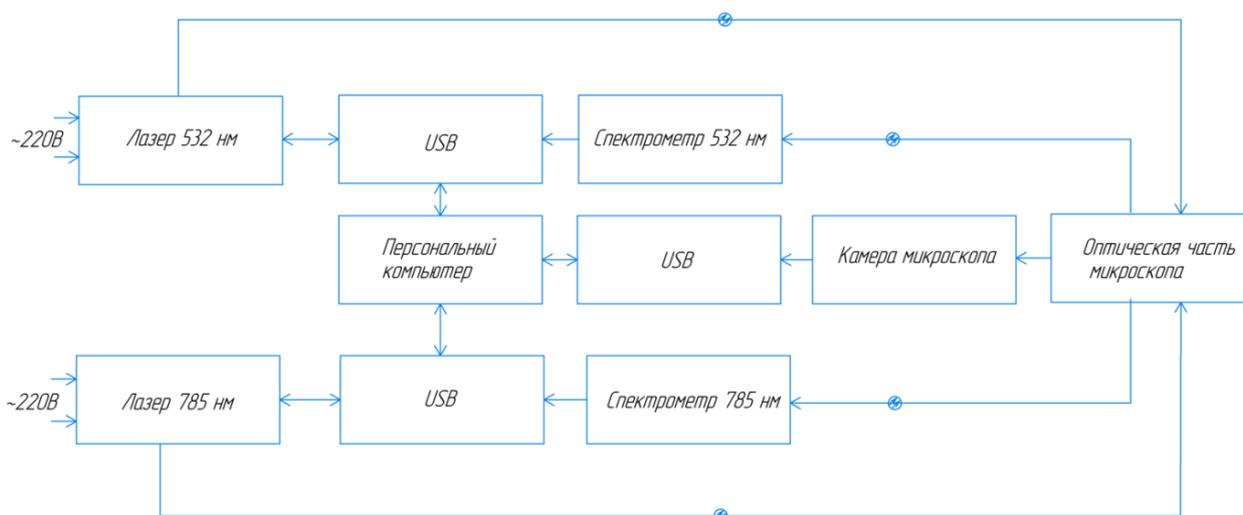


Рис. 1. Структурная схема рамановского спектрометра

Время экспозиции исследования спектров – от 6 до 16 секунд, диапазон измерений составляет $450-1663 \text{ см}^{-1}$. В работе исследовалась сыворотка крови людей с миеломной болезнью и без нее. Всего зарегистрирован 141 спектр с длиной волны 785 нм, где 72 спектра – образцы сыворотки с миеломой и 69 спектров – без.

Коллоид серебра для SERS подложки получили методом химического восстановления, технология которого подробно описана в [8]. Все растворы используемых веществ были

приготовлены на дистиллированной воде. Первым этапом эксперимента стал нагрев 20 мл дистиллированной воды до кипения. К этому раствору добавили 3 мл 1,8% раствора AgNO_3 и 6 мл 1% раствора тринатрийцитрата ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$). Далее общий раствор нагрели до 95°C до образования желто-зеленого цвета (в течение примерно 20 минут). После раствор остудили до комнатной температуры. Полученный коллоид серебра был залит на подложку из алюминиевой фольги. Подложка с раствором была использована только после полного высыхания раствора на ней.

Отбор проб проводился в Самарской областной клинической больнице им. В.Д. Середавина. Пациенты сдавали кровь натощак. Образцы были помещены в герметичные контейнеры с последующим их замораживанием при температуре -16°C . Перед тем, как снимать спектры сыворотки крови, образцы размораживались при комнатной температуре. Пробы откапывались объемом 1,5 мкл и проходили сушку в течение 30 минут на алюминиевой подложке с нанесенным на нее высохшим раствором коллоидного серебра. Непосредственно перед регистрацией спектральных характеристик тестируемого образца сыворотки осуществлялась предварительная регистрация окружающего фонового сигнала. После этого фон автоматически вычитался из последующих записанных спектров сыворотки с помощью алгоритма, встроенного в программу EnSpectr. Спектр рамановского рассеяния был зарегистрирован в трех крайних точках.

Спектры были подвергнуты предварительной обработке путем сглаживания и коррекции базовой линии для удаления шума и фона флуоресценции. Перед анализом необработанные спектральные данные сглаживались фильтром Савицкого-Голея. Фильтр был применен с шириной окна фильтра 15, полиномом 3 порядка, используемым для сглаживания, и производной 0 порядка. Суть данного вида фильтрации заключается в подборе полинома к короткому сегменту точек данных и вычислении производной этой функции в центральной точке сегмента. Сглаживание позволило удалить шум и выбросы из заданного набора экспериментальных данных.

Коррекция базовой линии основана на алгоритме асимметричного сглаживания по методу наименьших квадратов ($\lambda = 107$, $p = 0,01$). Алгоритм включает в себя вычисление аппроксимации полинома методом наименьших квадратов для описания базовой линии спектра и последующее вычитание этой функции из спектра. На рис. 2 представлены усредненные спектры сыворотки крови с миеломой и без нее.

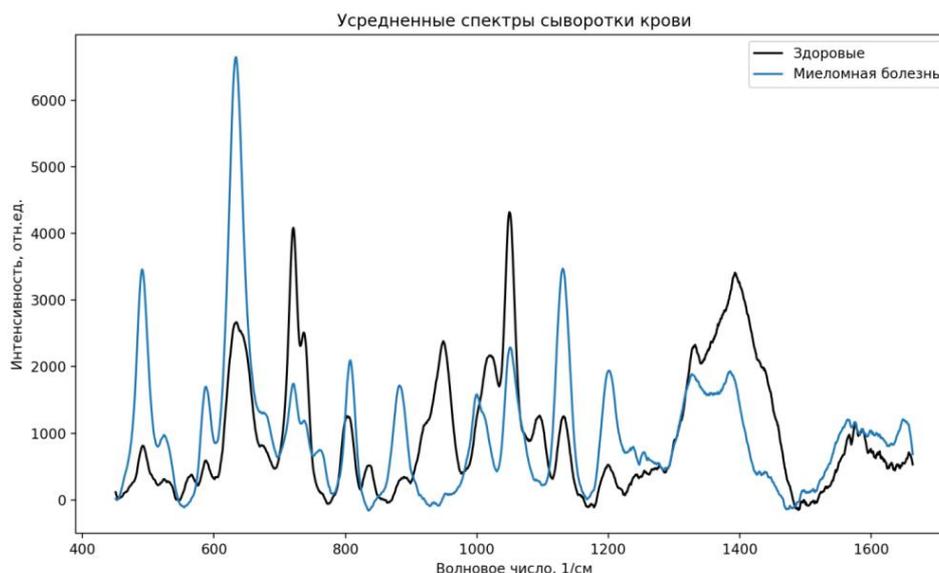


Рис. 2. Усредненные спектры сыворотки крови с миеломой и без нее

В данной работе для изучения спектров сыворотки крови применяется метод разрешения многомерных кривых с применением метода частичных наименьших квадратов (MCR-ALS). Основное преимущество MCR-анализа – это возможность интерпретации компонентов, на

которые разделены исходные спектры рамановского рассеяния. В результате MCR-анализа получают спектры веществ, содержащиеся в анализируемом образце, и их вклад в спектр рамановского рассеяния света, который напрямую связан с реальными концентрациями изучаемых веществ. Метод обладает некоторыми ограничениями – трудность несмешивания веществ со схожими спектрами комбинационного рассеяния, когда вещество не содержит уникальных пиков комбинационного рассеяния света в спектре. Кроме того, задачей исследования является выбор оптимального количества компонентов, на которые будут разделены спектры.

Принцип MCR заключается в следующем. Предполагается, что существует смесь компонентов A . Каждый отдельный компонент называют «чистым компонентом». Каждый чистый компонент имеет спектр, который может быть представлен в виде вектора столбца s_i размером J , представляющий число значений в каждом спектре (которое соответствует числу длин волн или волновых чисел).

Спектр будет линейной комбинацией спектров чистых компонентов при смешивании компонентов в одну смесь и получении спектра данной смеси. Данное рассуждение записывается следующим образом:

$$d = c_1 s_1^T + c_2 s_2^T + \dots + c_A s_A^T, \quad (1)$$

где d – вектор спектральных значений, которые представляют спектр смеси (J); c_1, c_2, \dots, c_A – концентрации чистых компонентов в смеси; и s_1, s_2, \dots, s_A – спектры чистых компонентов.

Уравнение может быть записано в более компактном виде:

$$D = CS^T, \quad (2)$$

где C – матрица концентраций чистых компонентов в смеси, а S – матрица спектров чистых компонентов.

Задача метода MCR состоит в том, чтобы получить C и S , зная D . Данное выражение не имеет уникального решения. Фактически невозможно получить C и S точно, так как полученное является оценкой, и возможно переписать уравнение следующим образом:

$$D = CS^T + E, \quad (3)$$

где E – матрица ошибок [9].

Для всех последующих методов анализа исходными данными являлись концентрации чистых компонентов, полученные после MCR-ALS. При исследовании метода разрешения многомерных кривых было выявлено, что наиболее эффективно разложение на 5 чистых компонентов, так как при большем количестве компоненты начинают дублировать друг друга.

Анализ был выполнен с использованием языка программирования Python в среде разработки PyCharm. Бинарная классификация проводилась для двух случаев: люди с миеломной болезнью и без нее.

Анализ данных проводился с помощью следующих методов машинного обучения: логистическая регрессия, k -ближайших соседей, дискриминантный анализ методом частичных наименьших квадратов и алгоритм случайного леса. В качестве признаков классификации выступили концентрации компонентов сыворотки, выделенные с помощью метода разрешения многомерных кривых с применением метода частичных наименьших квадратов. Обучающая и тестовая выборки делились в соотношении 70 к 30, модели сравнивались по ROC-кривым и площадям под ними.

На основе обученной модели было создано приложение для идентификации миеломной болезни. При загрузке спектра образца крови программа выдает диагноз (болен/здоров), используя один из предложенных методов машинного обучения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При сравнении двух усредненных спектров сыворотки крови людей с миеломной болезнью и без нее были выявлены некоторые отличия в интенсивности спектральных линий. Полосы с максимумом пика 492 см^{-1} (дисульфидное растяжение в белках фосфатидилсерина) и 633 см^{-1} (L-тирозин, лактоза) обладают большей интенсивностью у больных миеломой. Спектральная линия с пиком 721 см^{-1} , соответствующим гипоксантину и фосфатидилсерину, наиболее выражена у здоровых людей. Миеломной болезни оказались характерны более интенсивные пики с волновым числом 1132 см^{-1} (аскорбиновая кислота, L-серин) и 1201 см^{-1} (L-триптофан, фенилаланин) [10].

При исследовании метода разрешения многомерных кривых для анализа компонентов сыворотки крови было выявлено, что наиболее эффективно разложение на 5 чистых компонентов, так как при большем количестве компоненты начинают дублировать друг друга. По результатам MCR – анализа выявлены пики, характерные людям с миеломной болезнью, которых нет в спектрах людей без миеломы. В табл. 1 представлены значения спектральных линий и соответствующие им химические соединения.

Табл. 1. Спектральные линии, характерные миеломе

Рамановские пики, см ⁻¹	Химические соединения
851	кератин
1254	тимин, цитозин
1269	коллаген, эластин, кератин
1387	меланин

Также были выявлены пики, которые есть в спектрах людей без миеломной болезни, но отсутствуют в спектрах больных людей. Данные по ним приведены в табл. 2.

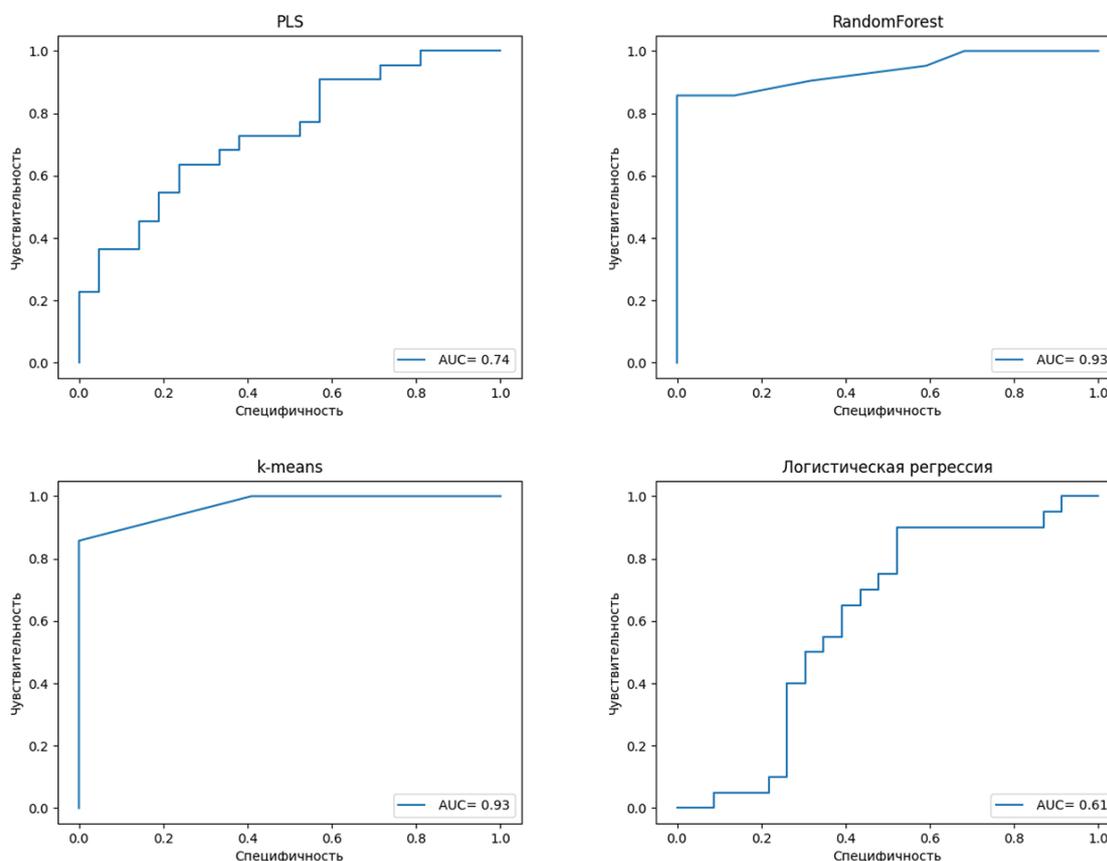


Рис. 3. ROC-кривые для методов, используемых в работе

Табл. 2. Спектральные линии, не характерные миеломе

Рамановские пики, см ⁻¹	Химические соединения
835	тирозин
951	холестерин
1280	фосфолипиды
1400	коллаген, фосфолипиды

На рис. 3 приведены ROC-кривые для каждого метода. По результатам анализа данных рамановских спектров сыворотки крови на основе методов машинного обучения можно сделать вывод о том, что модели *k*-means и RandomForest являются хорошими, так как их показатель AUC > 0,9. Методы PLS (AUC = 0,74) и логистической регрессии (AUC = 0,61) для данной выборки данных менее предпочтительны. Это может быть из-за того, что признаки не были независимыми, или объем выборки был недостаточным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была исследована возможность применения усиленной рамановской спектроскопии для исследования сыворотки крови пациентов, страдающих миеломной болезнью. Также были разработаны алгоритмы анализа данных жидкостной биопсии на основе методов машинного обучения, и мини-приложение для идентификации рамановских спектров крови.

Полученные результаты могут быть использованы в медицине при диагностике миеломной болезни, анализируя большие объемы данных за короткое время, предсказывая вероятность развития заболевания, тем самым, оптимизируя работу сферы здравоохранения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ингерлейб М.Б.** Анализы. Полный справочник // М.Б. Ингерлейб. Астрель, Москва, 2011. 246 с.
2. **Айрапетян В.С., Мухаметова О.В.** Экспресс анализ крови методом ИК-спектроскопии / В.С. Айрапетян, // Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий. 2012. №4 (20). С. 115-119.
3. **Горская Н.И.** Оптические исследования крови в видимом спектральном диапазоне / Успехи современного естествознания. 2007. № 12-1. С. 48.
4. **Schlücker S.** Surface-enhanced Raman spectroscopy: concepts and chemical applications // *Angew. Chem.* 2014. Vol. 53(19). Pp. 4756-4795.
5. **Пименова И.А., Братченко Л.А., Матвеева И.А.** Анализ Рамановских спектров сыворотки крови методом разрешения многомерных кривых // X Международная конференция и молодёжная школа «Информационные технологии и нанотехнологии». 2024. Т. 5. С. 52572.
6. **Томникова К.Е., Матвеева И.А.** Методы машинного обучения для классификации спектров рамановского рассеяния кожи // 2024 10-я Международная конференция по информационным технологиям и нанотехнологиям, ITNT 2024. С. 52552.
7. **Bratchenko I.A., Bratchenko L.A., Moryatov A.A., Khristoforova Y.A., Artemyev D.N., Myakinin O.O., Orlov A.E., Kozlov S.V., Zakharov V.P.** In vivo diagnosis of skin cancer with a portable Raman spectroscopic device // *Experimental Dermatology.* 2021. Vol. 30(5). Pp. 652-663.
8. **Al-Sammarraie S.Z., Bratchenko L.A., Typikova E.N., Zakharov V.P., Bratchenko I.A., Lebedev P.A.** Silver nanoparticles-based substrate for blood serum analysis under 785 nm laser excitation // *JBPE.* 2022. №1. P. 010301.

9. **Matveeva I.A., Bratchenko I., Khristoforova Y.** Multivariate curve resolution alternating least squares analysis of in vivo skin Raman spectra // *Sensors*. 2022. Vol. 22. № 24. P. 9588.
10. **Feng X., Moy A.J., Nguyen H.T.M., et al.** Raman active components of skin cancer // *Biomedical Optics Express*. 2017. Vol. 8(6). Pp. 2835-2850.

Gorbacheva P.V., Matveeva I.A.

*Samara National Research University, Russia,
443086, Samara, Moskovskoye shosse, 34, E-mail: polinag63@mail.ru*

USING MACHINE LEARNING METHODS FOR EARLY DIAGNOSIS OF MYELOMA USING RAMAN SPECTROSCOPY

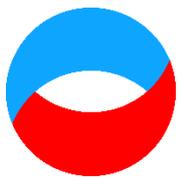
ABSTRACT

Optical methods of blood research are increasingly used in medicine, including Raman spectroscopy. The advantages of this method include the ability to analyze small sample volumes, the absence of material destruction, and high speed of obtaining results.

In this work, we studied the blood serum of patients with and without myeloma. Surface enhanced Raman spectroscopy (SERS) was used as a method for registering the Raman signal, which allows amplifying the useful signal by several orders of magnitude by modifying the substrate surface. Among the constructed classification models, the most effective were those based on k-nearest neighbors and random forest (ROC AUC > 0,9).

Analysis of the Raman spectra of blood serum using machine learning methods made it possible to identify key spectral bands that may indicate the presence of certain chemicals in human blood associated with myeloma.

RAMAN SPECTROSCOPY, MYELOMA DISEASE, BLOOD SERUM, MULTIVARIATE CURVE RESOLUTION, MACHINE LEARNING



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 004.891.3; 616-71

Томникова К.Е., Матвеева И.А.

*Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва, Россия,
443086, Самара, Московское шоссе 34, E-mail: ksetomnikova@yandex.ru*

**АНСАМБЛЕВЫЙ АЛГОРИТМ НА ОСНОВЕ СТЕКИНГА ДЛЯ АНАЛИЗА
РАМАНОВСКИХ СПЕКТРОВ НОВООБРАЗОВАНИЙ КОЖИ**

АННОТАЦИЯ

Заболевания кожи широко распространены как в Российской Федерации, так и во всем мире. Для диагностики таких заболеваний удобно использовать оптические методы, например, рамановскую спектроскопию. Однако спектры рамановского рассеяния кожи очень сложно идентифицировать, поскольку в них содержится большое количество информации о химическом составе кожи. В данном исследовании для сокращения объема данных и выделения информативных признаков используется метод разрешения многомерных кривых. С его помощью из рамановских спектров выделены тридцать компонент, относительный вклад которых в общий спектр далее используется в качестве признаков в моделях классификации. В качестве метода построения модели классификации используется ансамблевый алгоритм на основе стекинга нескольких алгоритмов машинного обучения. Построены модели бинарной классификации для трех случаев: доброкачественные новообразования против злокачественных новообразований; злокачественная меланома против пигментного невуса и злокачественная меланома против пигментного невуса и себорейного кератоза. ROC AUC полученных моделей составляет от $0,78 \pm 0,10$ до $0,80 \pm 0,08$. Результаты исследования подтверждают эффективность применения ансамблевого алгоритма для задачи идентификации рамановских спектров новообразований кожи.

НОВООБРАЗОВАНИЯ КОЖИ, РАМАНОВСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ, МНОГОМЕРНОЕ РАЗРЕШЕНИЕ КРИВЫХ, КЛАССИФИКАЦИЯ, СЛУЧАЙНЫЙ ЛЕС, АНСАМБЛЬ, СТЕКИНГ, ВЫДЕЛЕНИЕ ПРИЗНАКОВ

ВВЕДЕНИЕ

Заболевания кожи остаются значительной проблемой как для российского здравоохранения, так и для всемирного. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), на 2020 год приходится около 1,2 млн новых случаев немеланомных опухолей кожи [1], а всего в 2020 году было зарегистрировано более 1,5 миллиона новых случаев рака кожи. А злокачественная меланома остается одним из самых агрессивных видов рака. Для решения данной проблемы, актуальной является своевременная диагностика кожных заболеваний.

На сегодняшний день «золотым стандартом» диагностики заболеваний кожи, является гистологический анализ. Однако, он имеет ряд серьезных недостатков, связанных с инвазивностью процедуры и её дороговизной. Среди новых методов анализа биологических тканей и жидкостей лидирующие позиции занимает рамановская спектроскопия [2]. В отличие от гистологического анализа рамановская спектроскопия проводится быстрее, неинвазивно и является более дешевой.

Несмотря на достижения в техническом оснащении, анализ экспериментальных спектров рамановского рассеяния света по-прежнему остается сложной задачей. Причина этого заключается в том, что рамановские спектры несут в себе очень большое количество информации о химических веществах, которые содержатся в исследуемом образце, а также могут содержать паразитные сигналы, обусловленные оптической системой [3].

Всё большую популярность для анализа рамановских спектров набирают методы искусственного интеллекта. Они открывают новые перспективы в обработке и интерпретации данных [4]. Целью работы является разработка ансамблевого алгоритма идентификации рамановских спектров новообразований кожи путем объединения нескольких алгоритмов машинного обучения с помощью метода стекинга.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальные рамановские спектры

Рамановские спектры новообразований кожи регистрировались с использованием портативной спектроскопической установки, которая включает в себя термостабилизированный лазерный диодный модуль LML-785.0RB-04 в качестве источника возбуждения (центральная длина волны $785 \pm 0,1$ нм) и спектрометр QE 65 Pro (OceanOptics, Inc., Данидин, Флорида, США) с ПЗС-детектором, работающим при -15 °C [3]. Регистрация спектров проводилась со спектральным разрешением $0,2$ нм в диапазоне от 860 до 922 нм.

Блок питания подключен к сети, при этом связан с персональным компьютером, это необходимо для управления мощностью лазера. Лазерный свет по оптоволокну передается в оптическую схему (рамановский пробник), после чего попадает на кожу пациента. С помощью рамановского спектрометра, также по оптоволокну происходит регистрация спектров. По USB спектры передаются на компьютер. Для того, чтобы спектрометр работал корректно и его характеристики были стабильны, необходимо поддерживать температуру, не допуская перегрева. Для этого используется блок охлаждения спектрометра, которой управляется с помощью компьютера.

Все измерения спектров *in vivo* проводились со временем накопления сигнала 60 с. В этом случае SNR зарегистрированных спектров комбинационного рассеяния света равен 3 в соответствии с методологией оценки SNR, описанной в [3]. Плотность мощности лазера на коже составляла около $0,3$ Вт/см², что не превышает максимально допустимый предел воздействия ANSI в $1,63$ Вт/см² и не причиняет никакого вреда коже или дискомфорта пациентам. Рамановский спектр каждого новообразования измерялся от приблизительно определенной центральной точки области новообразования. Область, представляющая интерес для спектральной регистрации, была определена врачом-онкологом на основании дерматоскопических снимков. Новообразования локализованы в разных частях тела. Размеры новообразований варьировались от $0,3$ до 5 см.

Зарегистрированные рамановские спектры были подвергнуты предварительной обработке следующим образом. Сначала спектры были обрезаны в диапазоне от 860 до 920 нм, что соответствует 1114 - 1874 см⁻¹. Затем произведено удаление базовой линии с помощью асимметричных наименьших квадратов ($\lambda = 6$, $p = 0,1$, число итераций равно 10) и сглаживание методом Савицкого-Голея (порядок производной равен 0 , ширина окна равна 15 , порядок полинома равен 1) с использованием пакета *baseline* программного обеспечения RStudio [5].

Исследование *in vivo* проводилось в Самарском областном клиническом онкологическом диспансере. В исследовании приняли участие более 500 пациентов. Для каждого пациента регистрировали спектр с участка с заболеванием. В общей сложности в работе использовано 615 спектров с различными заболеваниями кожи (доброкачественными и злокачественными новообразованиями). В дополнение к спектрам рамановского рассеяния света получена информация о фактических диагнозах для каждого пациента. Эти диагнозы были поставлены врачами Самарского областного клинического онкологического диспансера на основе

результатов гистологического анализа. Все исследования проводились на пациентах старше 18 лет. Информированное согласие было получено от всех пациентов перед исследованием. Исследования были одобрены Комитетом по этике Самарского государственного медицинского университета (Самара, Россия).

В соответствии с результатами гистологического анализа в анализируемую группу вошли 26 дерматофибром, 40 гемангиом, 113 себорейных кератозов, 122 базальноклеточной карциномы, 12 плоскоклеточных карцином, 70 злокачественных меланом, 170 пигментных невусов и 62 папилломы.

Выделение признаков

Для сокращения размерности рамановских спектров нередко используют метод главных компонент (РСА). Это способ снижения размерности данных с потерей наименьшего объема информации. Он основан на линейной алгебре и математической статистике. Суть метода заключается в том, чтобы найти новые признаки (главные компоненты), которые максимально коррелируют с исходными данными и при этом ортогональны друг другу. Эти главные компоненты формируют новый базис в пространстве признаков, исключая лишнюю информацию и снижая размерность. В своем исследовании Павлов В.Н. и др. [6] использовали метод РСА совместно с нейронными сетями для диагностики злокачественных опухолей, при этом удалось добиться точности от 97,5% до 98%. В исследовании Ромашкина И.Д. и др. [7] метод РСА используется для идентификации образцов биологических тканей с микрокистозными компонентами, обширными участками некрозов, фокусами свежих кровоизлияний.

Однако несмотря на улучшение показателей эффективности анализа рамановских спектров, главные компоненты, полученные в результате РСА, сложны для интерпретации, поскольку не имеют физического или химического смысла. В данном исследовании в качестве метода для сокращения данных и выделения физически интерпретируемых признаков предлагается использовать метод разрешения многомерных кривых (MCR). Это метод многомерного анализа данных, который позволяет разделить сложные смеси на составляющие компоненты и отлично подходит для сокращения медицинских данных, так как каждая компонента соответствует конкретному химическому веществу или группе веществ [8].

Каждый чистый компонент имеет спектр, который может быть представлен в виде векторного столбца s_i с размером J , который представляет собой количество значений в каждом спектре (соответствующее количеству длин волн или волновых чисел). Если смешать компоненты в одну смесь и взять спектр этой смеси, спектр будет просто линейной комбинацией спектров чистых компонентов. Это можно представить в виде уравнения:

$$D = CS^T,$$

где C – матрица концентраций чистых компонентов в смеси, а S – матрица спектров чистых компонентов.

Задача метода MCR состоит в том, чтобы получить C и S , зная D . Это не тривиальная задача, поскольку приведенное выше выражение не имеет уникального решения.

В ходе исследования спектры рамановского рассеяния делились на 30 компонент, и оценивались их относительные концентрации в исследуемом образце. Информация о концентрациях далее использовалась в качестве признаков классификации [9]. Для реализации метода использовалась программа MCR-ALS GUI v4c, разработанная Dr. András Gorzsás [10].

Разработка классификаторов

В этом исследовании изучались следующие случаи классификации:

- доброкачественные новообразования против злокачественных новообразований (случай 1);

- злокачественная меланома против пигментного невуса (случай 2);
- злокачественная меланома против пигментного невуса и себорейного кератоза (случай 3).

Сначала для каждого случая были разработаны модели на основе алгоритмов случайного леса, градиентного бустинга и многослойного перцептрона. В качестве признаков классификации использовались относительные концентрации 30 компонент, полученных в результате метода MCR.

Для разработки каждой модели классификации использовался следующий алгоритм. Сначала запускалась модель с гиперпараметрами по умолчанию. Затем с помощью метода GridSerch() находилась оптимальная комбинация гиперпараметров. В завершение строилась модель с найденными оптимальными гиперпараметрами.

Для случайного леса подбирались такие гиперпараметры, как `n_estimators` – число «деревьев», `max_depth` – максимальная глубина «деревьев», `min_samples_split` – минимальное число объектов, необходимое для расщепления узла, `min_samples_leaf` – минимальное число объектов в «листьях». Значения полученных гиперпараметров для случайного леса представлены в табл. 1.

Табл. 1. Гиперпараметры алгоритма случайного леса

Гиперпараметр	Случай 1	Случай 2	Случай 3
<code>n_estimators</code>	100	100	775
<code>max_depth</code>	25	13	25
<code>min_samples_split</code>	2	26	2
<code>min_samples_leaf</code>	2	2	2

В качестве гиперпараметров градиентного бустинга были выбраны `n_estimators` – количество «деревьев», `max_depth` – максимальная глубина «деревьев», `num_leaves` – количество «листьев» в «дереве», `learning_rate` – скорость обучения модели. Результаты выполнения команды GridSerch() для градиентного бустинга представлены в табл. 2.

Табл. 2. Гиперпараметры алгоритма градиентного бустинга

Гиперпараметр	Случай 1	Случай 2	Случай 3
<code>n_estimators</code>	100	1050	100
<code>max_depth</code>	1	1	1
<code>num_leaves</code>	2	2	2
<code>learning_rate</code>	0,0001	0,1	0,0001

Для разработки многослойного использовались гиперпараметры: `hidden_layer_sizes` – количество нейронов в каждом скрытом слое, `activation` – функция активации для скрытых слоев, `max_iter` – максимальное количество итераций обучения, `solver` – алгоритм для оптимизации весов. В табл. 3 представлены, найденные гиперпараметры для многослойного перцептрона.

Табл. 3. Гиперпараметры алгоритма многослойного перцептрона

Гиперпараметр	Случай 1	Случай 2	Случай 3
<code>hidden_layer_sizes</code>	100,50	100,	100,
<code>activation</code>	logistic	logistic	logistic
<code>max_iter</code>	400	300	300
<code>solver</code>	sgd	adam	sgd

Далее модели случайного леса, градиентного бустинга и многослойного объединялись в один ансамблевый алгоритм методом стекинга. Главное преимущество стекинга заключается в том, что этот метод может использовать в качестве базовых алгоритмов модели из разных

семейств, а результаты базовых алгоритмов объединяются в один с помощью обучаемой метамодели, а не с помощью какого-либо обычного способа агрегации (суммирования или усреднения). Для реализации стекинга использовался метод `StackingClassifier()`, в качестве метамодели использовалась логистическая регрессия.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1-3 изображены ROC-кривые ансамблевого алгоритма для разных случаев классификации в сравнении с алгоритмом случайного леса, который давал наилучшие результаты при его одиночном использовании.

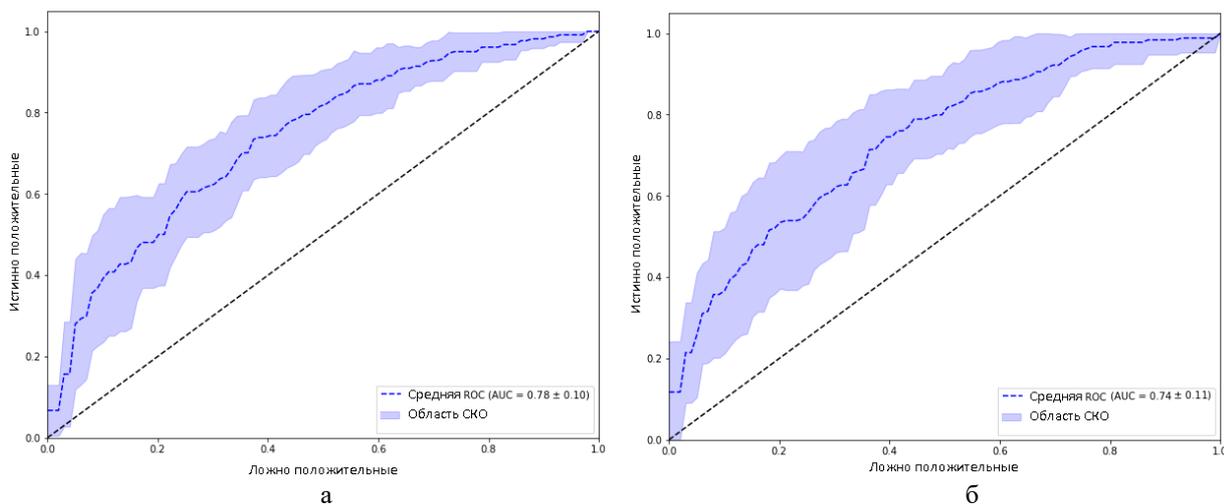


Рис. 1. ROC-кривые для случая классификации доброкачественных и злокачественных новообразований: а – ансамблевый алгоритм, б – случайный лес

Из рис. 1-3, видно, что помимо увеличения показателя ROC AUC в каждом случае уменьшается область средноквадратичного отклонения. Это говорит о том, что по сравнению с отдельно взятыми методами машинного обучения модели ансамблевого алгоритма ведут себя более стабильно, поскольку компенсируются недостатки отдельных моделей. Дисперсия модели уменьшается.

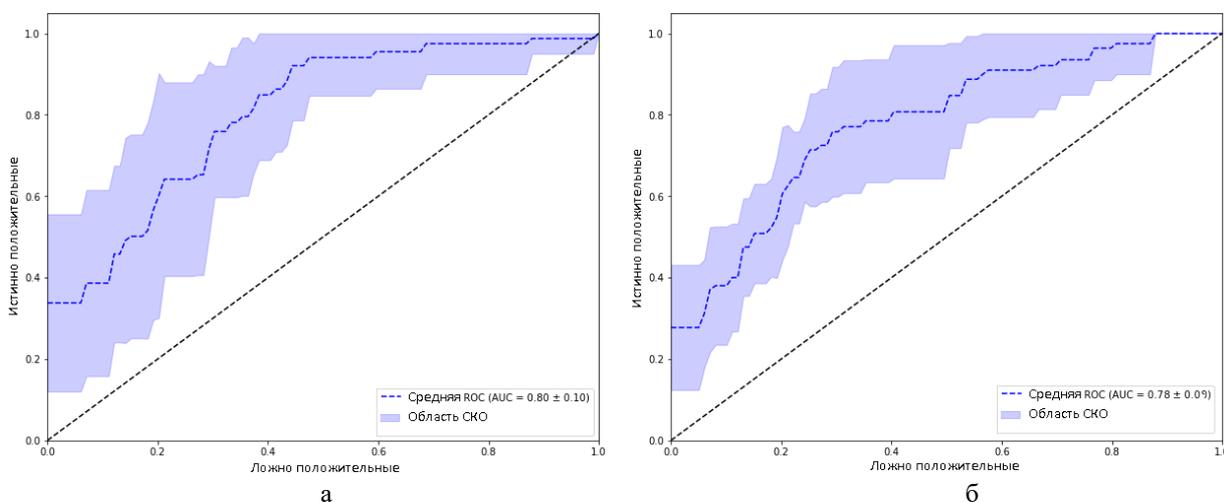


Рис. 2. ROC-кривые для случая классификации злокачественной меланомы и пигментного невуса: а – ансамблевый алгоритм, б – случайный лес

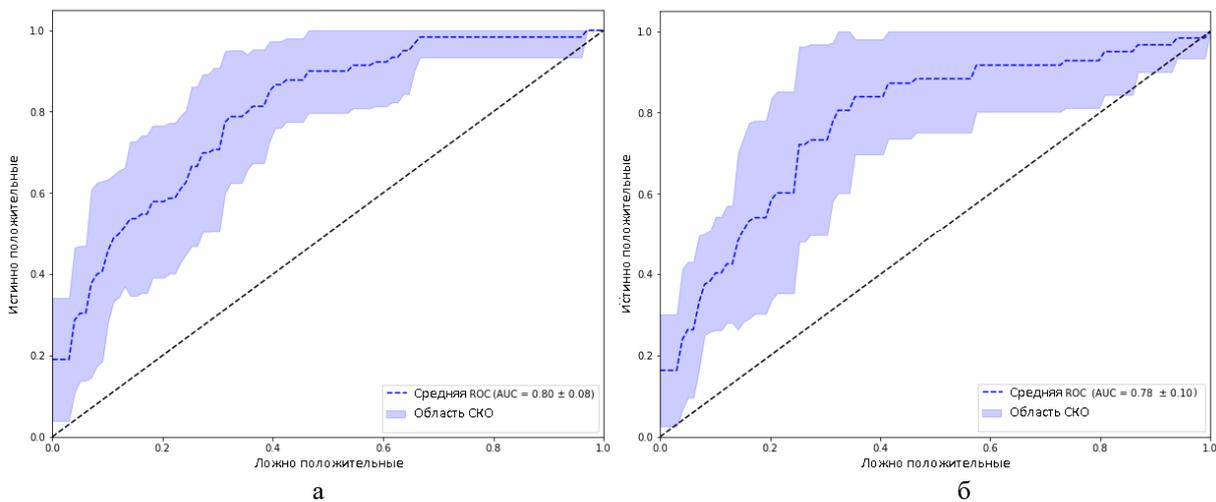


Рис. 3. ROC-кривые для случая классификации злокачественной меланомы и группы пигментного невуса и себорейного кератоза: а – ансамблевый алгоритм, б – случайный лес

В табл. 4 приведены значения ROC AUC для каждого случая при классификации случайным лесом и ансамблевым методом.

Табл. 4. Сводная таблица значений ROC AUC

	Случайный лес	Ансамблевый алгоритм
Доброкачественные vs. злокачественные	0,74 ± 0,11	0,78 ± 0,10
Злокачественная меланوما vs. пигментный невус	0,78 ± 0,09	0,80 ± 0,10
Злокачественная меланوما vs. пигментный невус и себорейный кератоз	0,78 ± 0,09	0,80 ± 0,08

Качество диагностики новообразований кожи путем визуального осмотра во многом зависит от уровня квалификации и профессионального опыта врача. Врач верно определяет злокачественную меланому только в 40-80% случаев (в зависимости от квалификации) [11, 12]. Исходя из этого, в качестве критерия хорошей первичной диагностики кожных заболеваний разрабатываемым методом, выбран порог ROC AUC в 0,7. Результаты разработки полностью удовлетворяют этому критерию: во всех случаях ROC AUC превышает порог в 0,7.

По сравнению с отдельно взятой моделью случайного леса в первом случае показатель ROC AUC увеличился на 0,04 и составил 0,78±0,10. Во втором и третьем случаях этот показатель стал лучше на 0,02 и равен 0,80±0,10 и 0,80±0,08, соответственно.

Более того, представленный метод рамановской спектроскопии в совокупности с ансамблевым алгоритмом анализа сопоставим с качеством диагностики врачами при использовании метода дерматоскопии. Так, в исследовании Н.А. Haenssle [12] средняя чувствительность и специфичность 58 дерматологов для классификации 100 поражений кожи составила 86,6% (±9,3%) и 71,3% (±11,2%), что соответствует точности диагностики (доле верно определенных диагнозов) 79% (±0,06%).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы разработан ансамблевый метод на основе стекинга для классификации рамановских спектров новообразований кожи. Предложенный подход к идентификации новообразований кожи может быть применен в системах для скрининга населения как быстрый и достаточно точный метод анализа новообразований кожи, а также может быть применен в отдаленных регионах, где не хватает высококвалифицированных

врачей-онкологов. Метод не требует повреждения тканей, что позволяет проводить исследования без риска для пациента. Рамановская спектроскопия не требует введения контрастных веществ или других маркеров, что упрощает процедуру, снижает риск аллергических реакций и уменьшает стоимость исследования. Кроме того, метод позволяет получать информацию о составе биологических тканей в режиме реального времени, что значительно сокращает время диагностики. Перечисленные преимущества рамановской спектроскопии и разработанного ансамблевого алгоритма для классификации зарегистрированных данных выдвигают такой метод на лидирующие позиции среди новых методов диагностики новообразований кожи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ferlay J., Colombet M., Soerjomataram I., et al.** Cancer statistics for the year 2020: An overview // *International journal of cancer*. 2021. Vol. 149. № 4. Pp. 778-789.
2. **Наумик А.В.** Спектроскопия комбинационного рассеяния света в микробиологической диагностике: достижения, преимущества, перспективы // *Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии*. 2013. № 4. С. 100-110.
3. **Bratchenko I.A., Bratchenko L.A., Moryatov A.A., Khristoforova Y.A., Artemyev D.N., Myakinin O.O., Orlov A.E., Kozlov S.V., Zakharov V.P.** In vivo diagnosis of skin cancer with a portable Raman spectroscopic device // *Experimental Dermatology*. 2021. Vol. 30(5). Pp. 652-663.
4. **Qi Y., Liu Y., Luo J.** Recent application of Raman spectroscopy in tumor diagnosis: from conventional methods to artificial intelligence fusion // *PhotonIX*. 2032. Vol. 4. № 1. P. 22.
5. **The comprehensive R archive network**. Available online: <https://cran.r-project.org> (accessed on 5 June 2022).
6. **Павлов В.Н. и др.** Использование интеллектуальных методов обработки данных раман-спектроскопии для диагностики злокачественных опухолей // *Медицинский вестник Башкортостана*. 2018. Т. 13. № 3(75). С. 43-47.
7. **Романишкин И.Д. и др.** Спектроскопия спонтанного комбинационного рассеяния для ex vivo диагностики внутричерепных опухолей // *Biomedical Photonics*. 2020. Т. 9. № 3. С. 4-12.
8. **Matveeva I.A., Komlev A.I., Kaganov O.I., Moryatov A.A., Zakharov V.P.** Multidimensional analysis of dermoscopic images and spectral information for the diagnosis of skin tumors // *Journal of Biomedical Photonics & Engineering*. 2024. Vol. 10. Pp. 58-66.
9. **Tomnikova K.E., Matveeva I.A.** Application of multivariate curve resolution analysis and multilayer perceptron for classification of Raman spectra of the skin // *2024 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)*, IEEE, 2024. Pp. 1-5.
10. **Dr. András Gorzsás.** User Manual MCR-ALS GUI v4c // *Vibrational Spectroscopy Core Facility, Department of Chemistry, Umeå University, SE-90187 Umeå, Sweden*, 2016.
11. **Haensle H.A., Fink C., Schneiderbauer R., et al.** Man against machine: diagnostic performance of a deep learning convolutional neural network for dermoscopic melanoma recognition in comparison to 58 dermatologists // *Annals of oncology*. 2018. Vol. 29. № 8. Pp. 1836-1842.
12. **Eikje N.S., Aizawa K., Ozaki Y.** Vibrational spectroscopy for molecular characterisation and diagnosis of benign, premalignant and malignant skin tumours // *Biotechnology annual review*. 2005. Vol. 11. Pp. 191-225.

Tomnikova K.E, Matveeva I.A.

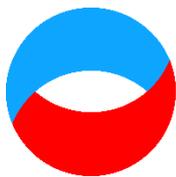
*Samara National Research University, Russia,
34 Moskovskoe shosse, Samara, 443086, E-mail: ksetomnikova@yandex.ru*

STACKING-BASED ENSEMBLE ALGORITHM FOR SKIN NEOPLASM RAMAN SPECTRA ANALYSIS

ABSTRACT

Skin diseases are widespread both in the Russian Federation and worldwide. Optical methods, such as Raman spectroscopy, are convenient for diagnosing such diseases. However, skin Raman spectra are very difficult to identify because they contain a large amount of information about the chemical composition of the skin. In this study, a multivariate curve resolution method is used to reduce the amount of data and extract informative features. With its help, thirty components are extracted from the Raman spectra, the relative contribution of which to the overall spectrum is then used as features in classification models. An ensemble algorithm based on stacking several machine learning algorithms is used as a method for constructing a classification model. Binary classification models are constructed for three cases: benign versus malignant tumors; malignant melanoma versus pigmented nevus and malignant melanoma versus pigmented nevus and seborrheic keratosis. ROC AUC of the obtained models ranges from 0.78 ± 0.10 to 0.80 ± 0.08 . The results of the study confirm the effectiveness of the ensemble algorithm for the problem of identifying Raman spectra of skin neoplasms.

SKIN NEOPLASMS, RAMAN SPECTROSCOPY, MULTIVARIATE CURVE RESOLUTION, CLASSIFICATION, RANDOM FOREST, ENSEMBLE, STACKING, FEATURE EXTRACTION



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 004.891.3:543.424.2:616-71

Пименова И.А., Матвеева И.А.

*Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева, Россия,
443086, Самара, ул. Московское шоссе, 34, E-mail: pimenova.0312@list.ru*

**КОМПОНЕНТНЫЙ АНАЛИЗ РАМАНОВСКИХ СПЕКТРОВ СЫВОРОТКИ КРОВИ
МЕТОДОМ РАЗРЕШЕНИЯ МНОГОМЕРНЫХ КРИВЫХ**

АННОТАЦИЯ

Данная работа посвящена исследованию применения рамановской спектроскопии в сочетании с методами машинного обучения для диагностики хронической сердечной недостаточности (ХСН) на основе спектральных данных сыворотки крови.

Основной целью исследования является разработка эффективного подхода, который сочетает преимущества рамановской спектроскопии с интеллектуальными методами обработки данных для создания автоматизированной системы диагностики ХСН. Для выделения информативных признаков из спектральных данных сыворотки крови был использован метод разрешения многомерных кривых (MCR-ALS), который позволяет снизить размерность данных, сохраняя ключевые компоненты спектров и предотвращая потерю информации.

В качестве классификаторов в работе применялись модели логистической регрессии, метод опорных векторов, случайный лес и градиентный бустинг. Для улучшения качества модели был использован метод стекинга, который объединяет результаты базовых моделей, применяя логистическую регрессию как мета-классификатор.

Результаты показали, что предложенный подход имеет высокую эффективность в классификации пациентов с ХСН, а также продемонстрировал значительные улучшения при добавлении клинических данных, что подтверждает важность комплексного анализа данных.

**ЧЕРЕДУЮЩИЕСЯ НАИМЕНЬШИЕ КВАДРАТЫ, МЕТОД РАЗРЕШЕНИЯ
МНОГОМЕРНЫХ КРИВЫХ, РАМАНОВСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ, СЫВОРОТКА КРОВИ,
ХРОНИЧЕСКАЯ СЕРДЕЧНАЯ НЕДОСТАТОЧНОСТЬ, МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ

Сердечно-сосудистые заболевания занимают ведущее место среди причин смертности и инвалидности во всем мире, что подчеркивает важность их диагностики для системы здравоохранения. Однако диагностика сердечно-сосудистых заболеваний зачастую связана с необходимостью использования сложных и дорогостоящих методов, что ограничивает ее широкое применение, особенно в рамках скрининговых программ и регулярных медицинских осмотров.

Методы биохимического анализа крови применяют для количественного определения концентрации ее компонентов, ферментов и гормонов, а также выявления их отклонений от нормы [1].

Повышение прогностической значимости анализа крови возможно при изучении комплекса изменений компонентного состава крови [2]. Перспективным методом для достижения этой цели является рамановская спектроскопия. Это неинвазивный оптический метод, который использует взаимодействие света с молекулами для получения информации об их структуре и состоянии. В основе этого метода лежит эффект комбинационного рассеяния света, который заключается в изменении частоты и интенсивности рассеянного света при взаимодействии со спектрально активными молекулами. В результате анализа может быть получена информация о колебательном и вращательном состояниях молекул, а также о химической структуре и конформации образца.

Рамановская спектроскопия позволяет анализировать особенности исследуемого объекта на молекулярном уровне [3]. В последние годы рамановская спектроскопия открывает новые перспективы для анализа крови. Этот метод позволяет получать спектральную информацию о молекулярном составе сложных биологических образцов, включая сыворотку крови, что делает его мощным инструментом для выявления биохимических изменений, связанных с сердечно-сосудистыми заболеваниями. Следует отметить, что при анализе многокомпонентных биологических тканей методами рамановской спектроскопии полученные спектральные характеристики представляют собой суперпозицию спектрального вклада всех компонентов, входящих в исследуемый образец. Поэтому одной из актуальных задач современной спектроскопии является поиск методов анализа и интерпретации спектральных характеристик биологических тканей и жидкостей.

Еще одной важной тенденцией является развитие методов интеллектуального анализа данных, включая машинное обучение и системы поддержки принятия решений [4]. Эти технологии позволяют обрабатывать сложные и многомерные данные, что значительно повышает эффективность диагностики. Их интеграция с рамановской спектроскопией создает уникальные возможности для автоматизации процесса анализа и минимизации влияния человеческого фактора. Такие подходы могут обеспечить доступность диагностики для широких слоев населения, способствуя раннему выявлению патологий и предотвращению их прогрессирования.

Целью данного исследования является оценка эффективности использования метода разрешения многомерных кривых с использованием метода чередующихся наименьших квадратов (MCR-ALS) для оптимизации интеллектуального анализа спектральных данных сыворотки крови. MCR – это двусторонний метод анализа данных, который может работать с многоуровневыми структурами данных. Чтобы применить MCR к многокомпонентной системе, необходимы два требования: структурированные данные в виде двусторонней матрицы данных и возможность объяснения данных с помощью билинейной модели с ограниченным числом компонентов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В этой работе анализируются *in vitro* рамановские спектры сыворотки крови 229 пациентов, среди которых 189 – пациенты с хронической сердечной недостаточностью (ХСН), 40 – контрольная группа (добровольцы без сердечной недостаточности). Образцы сыворотки крови отбирали у больного утром натощак и помещали в стерильные пробирки с последующим замораживанием при температуре -16°C . Непосредственно перед спектральным анализом образцы размораживали при комнатной температуре.

Запись рамановских спектров проводилась по технологии SERS, подробно описанной в [5]. Каждый образец сыворотки объемом 1,5 мкл наносили на алюминиевую фольгу со слоем серебряных структур и сушили в течение 30 минут. Анализ спектральных характеристик сыворотки крови проводили с помощью экспериментального стенда, состоящего из спектрометрической системы (EnSpectr R785, Спектр-М, г. Черноголовка, Россия) и микроскопа (ADF U300, ADF, Китай). Спектры возбуждались в ближнем инфракрасном диапазоне с помощью лазерного модуля с центральной длиной волны 785 нм. Объектив

LMPlan с увеличением 50х использовался для фокусировки излучения на образце и сбора рассеянного излучения. Диаметр лазерного пятна в фокусе составлял 5 мкм. Сыворотку человека анализировали при мощности лазера 10 мВт. Спектры записывались при времени экспозиции 4 секунды по 4 раза. Далее спектры подвергались предварительной обработке, описанной в [7].

В этой работе для анализа спектров применяется метод разрешения многомерных кривых с использованием метода чередующихся наименьших квадратов (MCR-ALS), уже показавший свою эффективность в выделении биохимических компонентов кожи [7]. Основная идея MCR состоит в том, чтобы разложить матрицу рамановских спектров на две матрицы, одна из которых представляет собой профили концентраций для каждого компонента, а вторая – матрицу спектров этих компонентов [8].

В данном подходе концентрации каждого отдельного компонента, выделенные в исследуемых образцах, служат в качестве признаков для последующей классификации. К профилям полученных концентраций компонентов были применены следующие алгоритмы машинного обучения: логистическая регрессия, метод опорных векторов (SVM), случайный лес и градиентный бустинг. Для повышения качества итоговой модели и объединения преимуществ различных методов был применен метод стекинга, при котором базовые модели формировали мета-признаки, которые затем подавались на вход финальной модели — модели логистической регрессии. Такой подход позволяет учитывать особенности каждого алгоритма, улучшая обобщающую способность классификации.

Помимо профилей концентраций, в качестве дополнительных признаков для классификации использовались клинические данные пациентов: систолическое артериальное давление, диастолическое артериальное давление, конечный систолический размер, общий билирубин, гематокрит.

Для проверки стабильности моделей классификации была проведена 5-фолдовая кросс-валидация. Используемые методы машинного обучения и ROC-кривые реализованы на языке программирования Python.

Предложенный метод сочетает рамановскую спектроскопию с интеллектуальным анализом данных, обеспечивая высокую точность диагностики ХСН и демонстрируя перспективность данного подхода для внедрения в клиническую практику.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Полученные в ходе исследования ROC-кривые представлены на рис. 1-2, где показано использование различных моделей машинного обучения для классификации данных с применением метода MCR-ALS и без него.

В результате, площадь под ROC-кривой при сокращении числа признаков классификации методом MCR-ALS и использования базовой модели логистической регрессии составила $0,65 \pm 0,07$ (validation accuracy: $0,83 \pm 0,05$), метод опорных векторов показал площадь под ROC-кривой на уровне $0,64 \pm 0,13$ (validation accuracy: $0,83 \pm 0,05$), случайный лес $0,70 \pm 0,13$ (validation accuracy: $0,83 \pm 0,06$), градиентный бустинг $0,64 \pm 0,19$ (validation accuracy: $0,81 \pm 0,09$).

Площадь под ROC-кривой для случая обучения на полном наборе спектральных данных и использования базовой модели логистической регрессии составила $0,74 \pm 0,11$ (validation accuracy: $0,82 \pm 0,05$), метод опорных векторов показал площадь под ROC-кривой на уровне $0,67 \pm 0,11$ (validation accuracy: $0,82 \pm 0,06$), случайный лес $0,61 \pm 0,08$ (validation accuracy: $0,80 \pm 0,07$), градиентный бустинг $0,70 \pm 0,17$ (validation accuracy: $0,76 \pm 0,05$).

Применение метода MCR-ALS позволило уменьшить объем входных данных, не снижая качества классификации. Однако вычислительная сложность обработки данных значительно возросла, что подтверждает целесообразность использования метода MCR-ALS в задачах диагностической классификации.

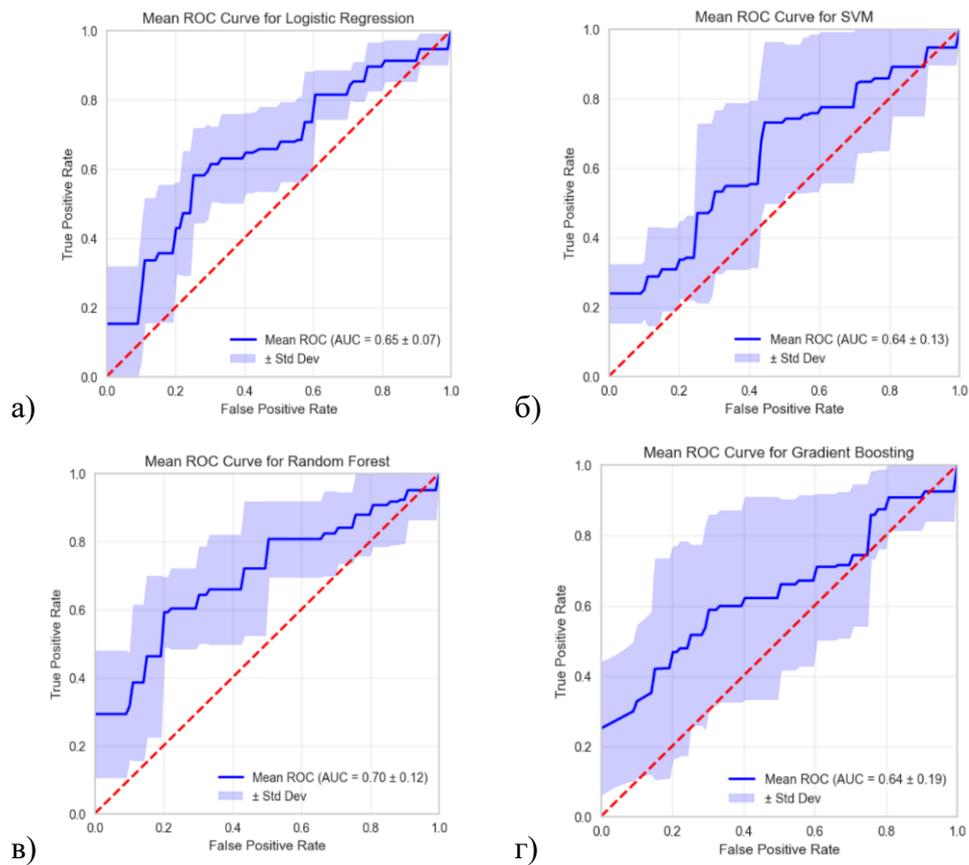


Рис. 1. ROC-кривые для случая классификации здоровых людей и пациентов с ХСН с применением MCR-ALS: а – логистическая регрессия, б – метод опорных векторов, в – случайный лес, г – градиентный бустинг

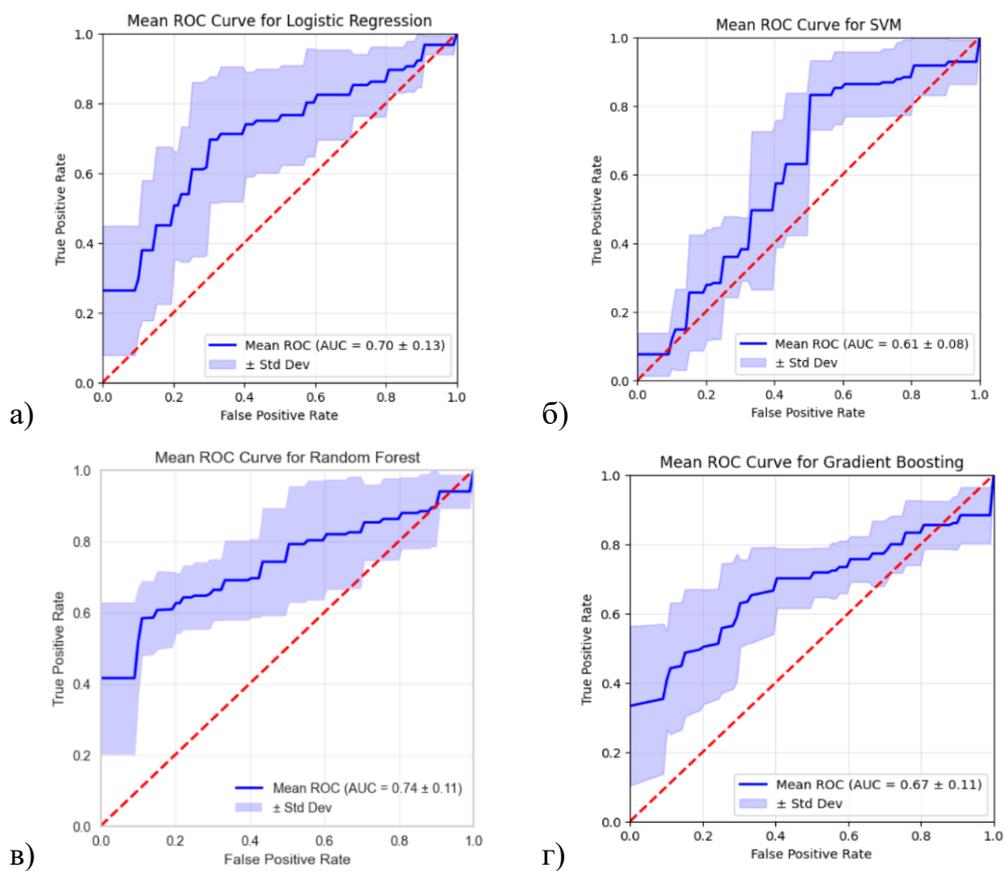


Рис. 2. ROC-кривые для случая классификации здоровых людей и пациентов с ХСН без сокращения признаков: а – логистическая регрессия, б – метод опорных векторов, в – случайный лес, г – градиентный бустинг

Ниже (рис. 3) представлены ROC-кривые для моделей, использующих метод стекинга. В данном случае также применен MCR-ALS для сокращения признаков.

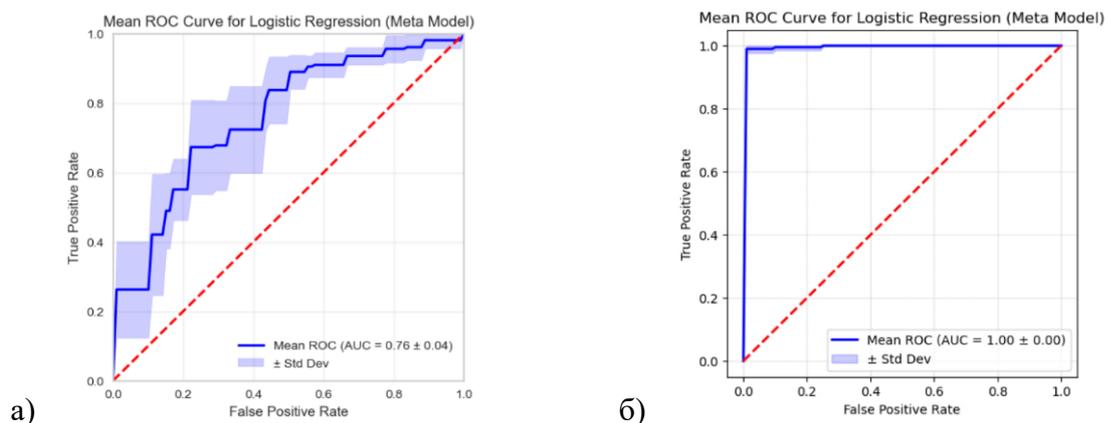


Рис. 3. ROC-кривые для случая классификации здоровых людей и пациентов с хронической сердечной недостаточностью: а – в качестве признаков взяты только концентрации компонент, б – в качестве признаков взяты концентрации компонент и клинические данные

Для модели стекинга площадь под ROC-кривой составила $0,72 \pm 0,04$ (validation accuracy: $0,83 \pm 0,03$).

Добавление в пространство признаков клинических данных пациентов значительно улучшило показатели обучения модели. Площадь под ROC-кривой составила $1,00 \pm 0,00$ (validation accuracy: $0,85\% \pm 0,01$). Это свидетельствует о высокой прогностической ценности сочетания спектрального анализа и клинических данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе показано, что применение рамановской спектроскопии в сочетании с методами машинного обучения представляет собой перспективное направление для диагностики хронической сердечной недостаточности (ХСН). Интеграция спектрального анализа с интеллектуальными методами обработки данных обеспечивает возможность раннего выявления ХСН, что способствует улучшению качества диагностики и лечению пациентов.

Метод разрешения многомерных кривых (MCR-ALS), использованный для оптимизации анализа спектральных данных сыворотки крови, продемонстрировал высокую эффективность в снижении размерности данных без потери ключевых информационных признаков. Это позволило не только уменьшить вычислительные затраты, но и упростить интерпретацию данных, что является важным фактором для применения данной методики в клинической практике.

Результаты классификации, полученные с использованием различных моделей машинного обучения, продемонстрировали удовлетворительные показатели точности. Внедрение метода стекинга, объединяющего результаты нескольких моделей, позволило дополнительно повысить качество классификации, что также подчеркивает важность комплексного подхода в анализе данных.

Добавление клинических данных значительно улучшило результаты классификации ($AUC = 1,00$), что подтверждает необходимость интеграции медицинских данных для повышения точности диагностики.

Таким образом, результаты исследования подтверждают, что рамановская спектроскопия в сочетании с методами машинного обучения является многообещающим инструментом для диагностики ХСН. В дальнейшем планируется расширение базы данных и исследование влияния дополнительных биомаркеров на результаты классификации. Такие

подходы могут значительно улучшить раннее выявление сердечно-сосудистых заболеваний, что окажет положительное влияние на уровень здравоохранения и качество жизни пациентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Glick D.** Methods of biochemical analysis / D. Glick (ed.). New York: John Wiley & Sons, 2009. 527 p.
2. **Atkins C.G., Buckley K., Blades M.W., Turner R.F.** Raman spectroscopy of blood and blood components // *Applied spectroscopy*. 2017. Vol. 71. № 5. Pp. 767-793.
3. **Kuhar N., Sil S., Verma T., Umopathy S.** Challenges in application of Raman spectroscopy to biology and materials // *RSC advances*. 2018. Vol. 8. № 46. Pp. 25888-25908.
4. **Liu J., Osadchy M., Ashton L., Foster M., Solomon C.J., Gibson S.J.** Deep convolutional neural networks for Raman spectrum recognition: a unified solution // *Analyst*. 2017. Vol. 142. Pp. 4067-4074.
5. **Al-Sammarraie S.Z., Bratchenko L.A., Typikova E.N., Lebedev P.A., Zakharov V.P., Bratchenko I.A.** Silver nanoparticles-based substrate for blood serum analysis under 785 nm laser excitation // *J-BPE*. 2022. Vol. 8. № 1. P. 010301.
6. **Khristoforova Y.A., Bratchenko L.A., Skuratova M.A., Lebedeva E.A., Lebedev P.A., Bratchenko I.A.** Raman spectroscopy in chronic heart failure diagnosis based on human skin analysis // *Journal of biophotonics*. 2023. P. e202300016.
7. **Matveeva I., Bratchenko I., Khristoforova Y., Bratchenko L., Moryatov A., Kozlov S., Kaganov O., Zakharov V.** Multivariate curve resolution alternating least squares analysis of in vivo skin Raman spectra // *Sensors*. 2022. Vol. 22. № 24. P. 9588.
8. **Jaumot J., de Juan A., Tauler R.** MCR-ALS GUI 2.0: New features and applications // *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2015. Vol. 140. Pp. 1-12.
9. **Yue X., Li H., Tang J., Liu J., Jiao J.** Rapid and label-free screening of echinococcosis serum profiles through surface-enhanced Raman spectroscopy // *Analytical and bioanalytical chemistry*. 2020. Vol. 412. Pp. 279–288.
10. **Wang J., Lin D., Lin J., Yu Y., Huang Z., Chen Y., Lin J., Feng S., Li B., Liu N., Chen R.** Label-free detection of serum proteins using surface-enhanced Raman spectroscopy for colorectal cancer screening // *Journal of biomedical optics*. 2014. Vol. 19. № 8. Pp. 087003-087003.
11. **Matveeva I.A., Komlev A.I., Kaganov O.I. et al.** Multidimensional analysis of dermoscopic images and spectral information for the diagnosis of skin tumors // *Journal of Biomedical Photonics and Engineering*. 2024. Vol. 10. № 1. P. 1.

Pimenova I.A., Matveeva I.A.

*Samara National Research University, Russia,
443086, Samara, Moskovskoye shosse, 34, E-mail: pimenova.0312@list.ru*

COMPONENT ANALYSIS OF RAMAN SPECTRA OF BLOOD SERUM USING MULTIVARIATE CURVE RESOLUTION METHOD

ABSTRACT

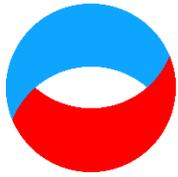
This work is devoted to the study of the use of Raman spectroscopy in combination with machine learning methods for the diagnosis of chronic heart failure (CHF) based on spectral blood serum data.

The main purpose of the research is to develop an effective approach that combines the advantages of Raman spectroscopy with intelligent data processing methods to create an automated heart failure diagnostic system. To isolate informative features from the spectral data of blood serum, the multidimensional curve resolution method (MCR-ALS) was used, which reduces the dimensionality of the data, preserving the key components of the spectra and preventing information loss.

Logistic regression models, the method of support vectors, random forest and gradient boosting were used as classifiers in the work. To improve the quality of the model, the stacking method was used, which combines the results of the basic models using logistic regression as a meta-classifier.

The results showed that the proposed approach is highly effective in classifying patients with CHF, and also demonstrated significant improvements when adding clinical data, which confirms the importance of comprehensive data analysis.

**ALTERNATING LEAST SQUARES, MULTIDIMENSIONAL CURVE RESOLUTION
METHOD, RAMAN SPECTROSCOPY, BLOOD SERUM, CHRONIC HEART FAILURE,
MACHINE LEARNING**



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 616.211-002

Деревесникова Д.А.¹, Гурьева А.В.¹, Мачихин А.С.¹, Ян С.², Еремеева К.В.²,
Свистушкин В.М.²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук (НТЦ УП РАН), Россия, 117342, Москва, ул. Бутлерова, 15, E-mail: pr@ntcip.ru

² Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), Россия, 119991, Москва, ул. Трубецкая, д. 8, стр. 2, E-mail: rectorat@staff.sechenov.ru

**НЕИНВАЗИВНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ КРОВИ
СЛИЗИСТОЙ НОСОВОЙ ПОЛОСТИ**

АННОТАЦИЯ

В современной медицине востребованы безопасные и надежные неинвазивные диагностические методы, в том числе для выявления и контроля терапии заболеваний носовой полости. Существующие подходы к решению такой задачи ограничены низкой информативностью, чувствительностью к условиям съемки или инвазивным характером. В настоящей работе предложено проводить оценку состояния тканей носовой полости на основе количественного анализа микроциркуляции крови с помощью методов фотоплетизмографии и видеокапилляроскопии. Разработана установка для регистрации изображений слизистой и алгоритм их обработки для получения сигнала фотоплетизмограммы. Предложена методика проведения исследования, включающая провокационный тест, а также введены количественные показатели для оценки состояния микроциркуляции. Предложенный подход успешно апробирован в ходе оценки моделирования и эффективности лечения медикаментозного ринита у кроликов. Развитие метода может быть полезно в решении исследовательских и клинических задач оториноларингологии.

**ВИДЕОКАПИЛЛЯРОСКОПИЯ, НЕИНВАЗИВНАЯ ДИАГНОСТИКА,
ОТОРИНОЛАРИНГОЛОГИЯ, МИКРОЦИРКУЛЯЦИЯ КРОВИ, СЛИЗИСТАЯ,
ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА**

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в клинической практике отмечается устойчивый рост потребности в разработке неинвазивных диагностических методов, сочетающих высокую информативность с минимальным вмешательством в физиологические процессы [1]. Данная проблема актуальна также и в отоларингологии.

Большинство распространенных заболеваний носовой полости, таких как риниты и синуситы различной этиологии, сопровождаются нарушением микроциркуляции крови в ткани [2]. Однако существующие методы не позволяют проводить количественную оценку изменений в динамике. Разработка новых неинвазивных методов оценки микроциркуляции слизистой оболочки, основанных на визуализации и программной обработке данных, является

перспективным направлением для фундаментальных исследований и совершенствования клинической диагностики.

Материалы и методы

Экспериментальная установка

Система регистрации разработана на основе жесткого эндоскопа и встроенном в него волоконном кабеле, передающим излучение подсветки (ООО «НПП СиМТ», ЭЖ.2,1.175.0, Россия), подключенной к стандартному галогенному источнику излучения. Эндоскоп имеет следующие конструктивные особенности: увеличение 1,3×, рабочая длина зонда 175 мм, диаметр зонда 2,1 мм.

Изображение исследуемой области формировалось оптической системой эндоскопа и заоккулярным объективом с фокусным расстоянием 50 мм (ООО «НПП СиМТ», АВ-ОМ-50, Россия) в плоскости сенсора цифровой цветной видеокамеры (The Imaging Source DFK 33UX273, Германия, АЦП 12 бит, размер пикселя 3,45 мкм × 3,45 мкм, разрешение 1440×1080 пикселей). Исследуемая область освещалась посредством полулунного отверстия, расположенного на дистальном конце зонда. Фокусировка оптической системы регулировалась с помощью диоптрийного кольца эндоскопа. Корпус эндоскопа закреплялся в механизме перемещения, с помощью которого осуществлялось более точное наведение на область исследования.

Передача данных от камеры осуществляется через интерфейс USB 3.0 на персональный компьютер для последующей обработки. Использование данного типа интерфейса обеспечивает высокую точность и скорость передачи данных.

Экспериментальные животные

Для проведения экспериментальных исследований были выбраны условно здоровые кролики породы советская шиншилла, всего 12 животных. Животным был индуцирован медикаментозный ринит, после чего особи были распределены на контрольную и три терапевтические группы по три особи в каждой. Первая терапевтическая группа получала терапию декспантенолом, вторая – мометазоном, третьей группе была назначена комбинированная схема лечения с использованием обоих препаратов.

Протокол эксперимента

Эндоскопический зонд аккуратно позиционировали на слизистой носовой полости, избегая участков с пигментацией, для оптимальной визуализации сосудистой сети. С целью минимизации влияния внешней компрессии на гемодинамику [1, 3-5] обеспечивался контакт дистального конца эндоскопа с поверхностью слизистой с незначительным давлением. Для каждого измерения в течение 25 секунд регистрировали последовательность изображений с частотой кадров 60 Гц, размер изображения составлял 1280×1024 пикселей. В ходе измерений животное находилось под действием анестезии, регистрация кадров начиналась через 5 минут после введения анестетика.

Данные регистрировались в трех сериях: до, сразу после, и через 5 минут после холодовой пробы (воздействие несколькими каплями холодной воды). Температура воды поддерживалась постоянной в течение всего эксперимента. Количественная оценка основывалась на отношении амплитуд фотоплетизмограммы (ФПГ) до и после пробы (показатель R). Статистический анализ проводился в MATLAB ($p < 0,05$).

Алгоритм цифровой обработки данных

Для оценки кровотока разработан алгоритм, анализирующий динамику изменения интенсивности пикселей изображения, соответствующих проекции кровеносных сосудов верхней поверхности слизистой на приемник излучения. Алгоритм включает предварительную обработку (повышение резкости и удаление высокочастотного пространственного шума на изображениях) и частотно-временной анализ для выделения сигнала, связанного с колебаниями кровотока (микроциркуляторные процессы), на фоне

временных шумов и артефактов. Итогом работы алгоритма является визуализация сосудистого рисунка и график ФПГ, отражающий перфузию тканей [6-8].

Алгоритм начинается с выделения зеленого канала (G) из RGB-изображений, поскольку зеленое излучение является пиком поглощения для гемоглобина [9, 10] и обеспечивает высокий контраст сосудистых структур с большой глубиной проникновения [11, 12]. Затем вручную выделяется область интереса, исключая артефакты. После этого вычисляется среднее значение интенсивности пикселей в выделенной области, что позволяет перейти от двумерных изображений к одномерному временному ряду, отражающему динамику интенсивности.

Ключевым этапом является частотный анализ с использованием Фурье-преобразования. Учитывая частоту сердечных сокращений кроликов (2-5 Гц) и возможный диапазон для капиллярного кровотока [13] из спектра выделяется диапазон 1-7 Гц с последующим обратным преобразованием Фурье.

Количественная оценка перфузии осуществляется через анализ амплитуды ФПГ сигнала [14, 15], с расчетом стандартного отклонения по формуле:

$$A_{std}(t) = \sqrt{\left(\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{n=1}^{n=N} \left(I_{ppg}(t) - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{n=N} I_{ppg}(t)\right)^2\right)}, \quad (1)$$

где N – количество изображений в серии, полученных при регистрации сигнала, $I_{ppg}(t)$ – значения интенсивности пикселей ФПГ сигнала в зависимости от времени.

Алгоритм построения сосудистой карты также включает этапы предобработки и частотно-временного анализа. После выделения значений интенсивности пикселей, соответствующих зеленому каналу следует этап, на котором производится масштабирование интенсивности пикселей в диапазоне от 0 до 1 для повышения контрастности. Затем применяется сглаживание по Гауссу ($\sigma = 20$) для устранения низкочастотных шумов и компенсации неравномерности освещения. Далее используется алгоритм стабилизации GeFolki [16] для компенсации искажений изображения, вызванных мышечными сокращениями.

Затем выполняется устранение постоянной составляющей сигнала (вычитание среднего значения интенсивности пикселей за 5 секунд) для исключения фоновых компонент, не связанных с пульсацией кровотока, и частотная фильтрация (выделение диапазона физиологически значимых частот) для снижения уровня шумов. Завершающим этапом является расчет среднеквадратического отклонения значений интенсивности пикселей, что обеспечивает улучшение визуализации сосудистого рисунка за счет большего разброса значений в областях, соответствующих кровеносным сосудам.

Результаты и обсуждение

В ходе исследования влияния назальных лекарственных средств на микроциркуляцию слизистой оболочки носовой полости при терапии ринита с использованием экспериментальной установки и разработанного метода были получены следующие данные.

Результаты апробации разработанного диагностического метода и алгоритма обработки данных представлены на рис. 1, где отображены: изображение сосудистой сети (исходное состояние и после обработки) и ФПГ сигнал (до и после обработки). Визуализация сосудистого рисунка и количественное представление кровотока в виде ФПГ обеспечивают комплексную оценку микроциркуляторного русла слизистой.

Анализ обработанных данных выявил значимые различия ($p < 0,05$) в показателе R , характеризующем соотношении амплитуд ФПГ (до/после холодового воздействия) между группами "Здоровые" и "Без лечения", что демонстрирует возможность различить реакцию

микроциркуляции крови с помощью ФПГ. Количественные результаты обработки представлены в табл. 1. Они позволяют провести сравнительную оценку исследуемых показателей в различных группах наблюдения.

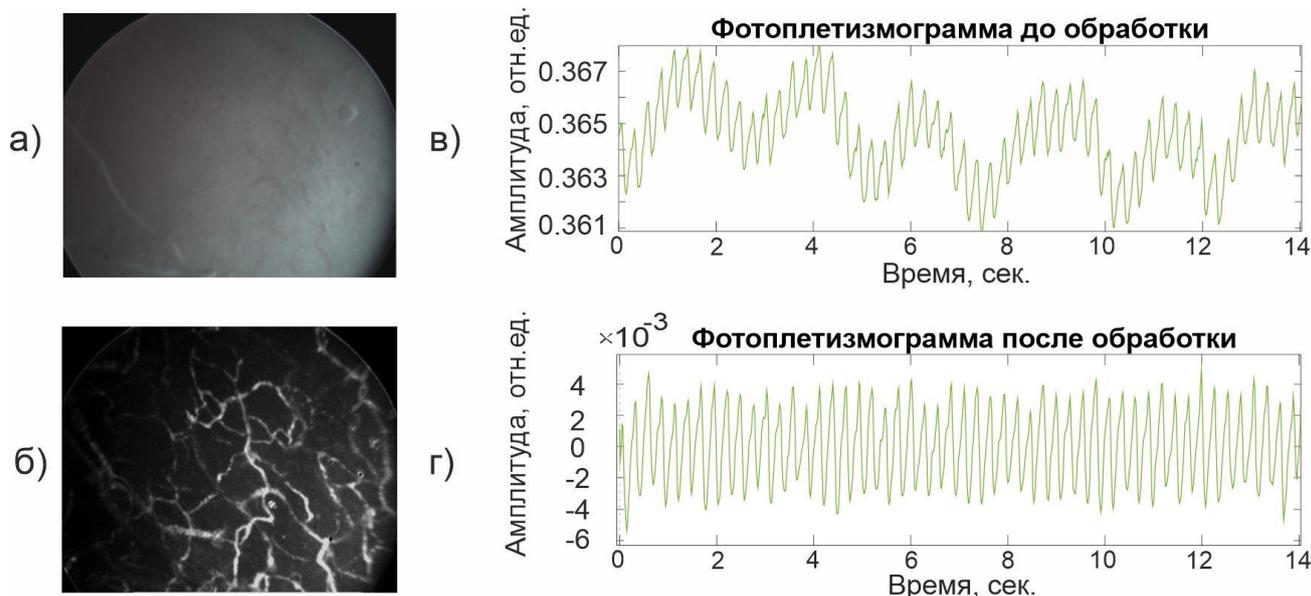


Рис. 1. Результаты обработки изображений, полученных методом видеокапилляроскопии: а – изображение исследуемой области в исходном состоянии, б – изображение исследуемой области после применения алгоритма обработки, в – сигнал ФПГ, полученный до применения алгоритма обработки, г – сигнал ФПГ, полученный после применения алгоритма обработки

Значимое различие также установлено между группой “Пантенол” и группами “Здоровые” и “Без лечения”, что может указывать на неполное восстановление микроциркуляции. Группа “Мометазон” не показала значимых различий ни с “Здоровыми”, ни с группой “Без лечения”, что может быть связано с высокой вариабельностью данных. Отличия выявлены между группами “Без лечения” и “Комбинация”, при отсутствии различий между группами “Здоровые” и “Комбинация”, что свидетельствует о наиболее эффективном восстановлении микроциркуляции в группе “Комбинация”.

Результаты подтверждают перспективность видеокапилляроскопии для мониторинга микроциркуляции при выборе лечения медикаментозного ринита.

Табл. 1. Значения отношения амплитуд ФПГ до и после провокационного воздействия в исследуемых группах

Группа	Отношение амплитуд фотоплетизмограммы до и после провокационного воздействия				
	Медианное	Минимальное	Максимальное	Граница доверительного интервала (75%)	
				Нижняя	Верхняя
«Здоровые»	1,48	1,07	2,18	1,25	1,88
«Без лечения»	0,76	0,67	0,97	0,72	0,89
«Пантенол»	1,35	0,74	1,55	0,98	1,48
«Мометазон»	0,87	0,42	2,46	0,55	2,11
«Комбинация»	1,07	0,84	1,38	0,89	1,24

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный метод оценки микроциркуляции слизистой оболочки носа на основе фотоплетизмографии и видеокапилляроскопии обеспечивает неинвазивный и количественный анализ состояния тканей. Экспериментальная апробация показала чувствительность подхода к изменениям микроциркуляции крови при формировании и терапии медикаментозного

ринита. Дальнейшее развитие метода предполагает расширение выборки клинических исследований и выработки устойчивых количественных критериев нарушений в тканях, совершенствование алгоритмов обработки данных и модификацию аппаратного обеспечения для возможности проведения рутинных измерений в условиях клиники в оториноларингологии. Внедрение объективного, количественного метода анализа может повысить надежности диагностики и мониторинга лечения заболеваний носовой полости.

Исследование выполнено в рамках Государственного задания НТЦ УП РАН (FFNS-2025-0008). Результаты работы получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования НТЦ УП РАН [<http://ckp.ntcup.ru>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bashkatov A.N., Berezin K.V., Dvoretzkiy K.N., Chernavina M.L., Genina E.A., Genin V.D., Kochubey V.I., Lazareva E.N., Pravdin A.B., Shvachkina M.E., Timoshina P.A., Tuchina D.K., Yakovlev D.D., Yakovlev D.A., Yanina I.Y., Zhernovaya O.S., Tuchin V.V.** Measurement of tissue optical properties in the context of tissue optical clearing // *Journal of Biomedical Optics*. 2018. Vol. 23. № 9. P. 091416.
2. **Choi B.M., Park C., Lee Y.H., Shin H., Lee S.H., Jeong S., Noh G.J., Lee B.** Development of a new analgesic index using nasal photoplethysmography // *Anaesthesia*. 2018. Vol. 73. № 9. Pp. 1123-1130.
3. **Chan E.K., Sorg B., Protsenko D., O'Neil M., Motamedi M., Welch A.J.** Effects of compression on soft tissue optical properties // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 1996. Vol. 2. № 4. Pp. 943-950.
4. **Teng X.F., Zhang Y.T.** The effect of contacting force on photoplethysmographic signals // *Physiological Measurement*. 2004. Vol. 25. № 5. Pp. 1323-1335.
5. **Li C., Xia H., Zhou Y., Li S., Liu R., Chen W., Jiang J.** Study on the influence of contact pressure on diffuse spectroscopy measurement of in vivo tissue // *Infrared Physics & Technology*. 2021. Vol. 114. P. 103669.
6. **Machikhin A.S., Volkov M.V., Khokhlov D.D., Lovchikova E.D., Potemkin A.V., Danilycheva I.V., Dorofeeva I.V., Shulzhenko A.E.** Exoscope-based videocapillaroscopy system for in vivo skin microcirculation imaging of various body areas // *Biomedical Optics Express*. 2021. Vol. 12. № 8. Pp. 4627-4636.
7. **Volkov M.V., Machikhin A.S., Lovchikova E.D., Khokhlov D.D., Balandin I.A., Potemkin A.V., Galanova V.S., Danilycheva I.V., Dorofeeva I.V.** Study of the cold test effect on microcirculation by video capillaroscopy // *Scientific Visualization*. 2021. Vol. 13. № 3. Pp. 58-65.
8. **Volkov M.V., Margaryants N.B., Potemkin A.V., Volynsky M.A., Gurov I.P., Mamontov O.V., Kamshilin A.A.** Video capillaroscopy clarifies mechanism of the photoplethysmographic waveform appearance // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. № 1. P. 13298.
9. **Tuchin, V. V., Maksimova, I. L., Zimnyakov, D. A., Kon, I. L., Mavlyutov, A. H., Mishin, A. A.** Light propagation in tissues with controlled optical properties. *Journal of biomedical optics*. 1997. Vol. 2. № 4. Pp. 401-417.
10. **Setchfield K., Gorman A., Simpson A.H.R.W., Somekh M.G., Wright A.J.** Relevance and utility of the in-vivo and ex-vivo optical properties of the skin reported in the literature: a review [Invited] // *Biomedical Optics Express*. 2023. Vol. 14. № 7. P. 3555.
11. **Anderson R.R., Parrish J.A.** The optics of human skin // *Journal of Investigative Dermatology*. 1981. Vol. 77. № 1. Pp. 13-19.
12. **Volkov M.V., Margaryants N.B., Potemkin A.V., Machikhin A.S., Khokhlov D.D., Batshev V.I., Danilycheva I.V., Danilychev M.V.** Blood vessel visualization method in

- human skin based on video recording of blood flow using a laparoscope // Journal of Communications Technology and Electronics. 2020. Vol. 65. № 7. Pp. 806-814.
13. **Kamal A.A.R., Harness J.B., Irving G., Mearns A.J.** Skin photoplethysmography — a review // Computer Methods and Programs in Biomedicine. 1989. Vol. 28. № 4. Pp. 257-269.
 14. **Levy J., Álvarez D., Rosenberg A.A., Alexandrovich A., Del Campo F., Behar J.A.** Digital oximetry biomarkers for assessing respiratory function: standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use // NPJ digital medicine. 2021. Vol. 4. № 1. P. 1.
 15. **Dremin V., Kozlov I., Volkov M., Margaryants N., Potemkin A., Zherebtsov E., Dunaev A., Gurov I.** Dynamic evaluation of blood flow microcirculation by combined use of the laser Doppler flowmetry and high-speed videocapillaroscopy methods // Journal of Biophotonics. 2019. Vol. 12. № 6. P. e201800317.
 16. **Plyer A., Colin-Koeniguer E., Weissgerber F.** A new coregistration algorithm for recent applications on urban SAR images // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2015. Vol. 12. № 11. Pp. 2198-2202.

Derevesnikova D.A.¹, Guryleva A.V.¹, Machikhin A.S.¹, Yan S.², Ereemeeva K.V.²,
Svistushkin V.M.²

¹ *Federal State Budgetary Institution of Science Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences (STC UI RAS), Russia, 117342, Moscow, Butlerova St., 15, E-mail: np@ntcup.ru*

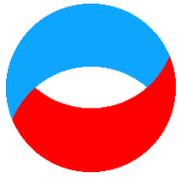
² *First Moscow State Medical University named after I.M. Sechenov (Sechenov University), Russia, 119991, Moscow, 8, Bldg. 2, Trubetskaya St., E-mail: rectorat@staff.sechenov.ru*

NON-INVASIVE DIAGNOSTICS OF NASAL MUCOSA MICROCIRCULATION PARAMETERS IN OTOLARYNGOLOGY APPLICATIONS

ABSTRACT

Safe and reliable non-invasive diagnostic methods are in demand in modern medicine, including for the detection and control of therapy of diseases of the nasal cavity. Existing approaches to solving this problem are limited by low information content, sensitivity to shooting conditions, or invasive nature. In this paper, it is proposed to evaluate the condition of the tissues of the nasal cavity based on a quantitative analysis of blood microcirculation using photoplethysmography and videocapillaroscopy. An installation for recording mucosal images and an algorithm for processing them to obtain a photoplethysmogram signal has been developed. A research methodology is proposed, including a provocative test, and quantitative indicators are introduced to assess the state of microcirculation. The proposed approach has been successfully tested in the course of evaluating the modeling and effectiveness of treatment of drug-induced rhinitis in rabbits. The development of the method can be useful in solving research and clinical problems of otorhinolaryngology.

**VIDEO CAPILLAROSCOPY, NONINVASIVE DIAGNOSTICS, OTORHINOLARYNGOLOGY,
BLOOD MICROCIRCULATION, MUCOSA, OPTICAL SYSTEM**



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 534.6

Зыкова Л.А., Титов С.А., Бурлаков А.Б., Богаченков А.Н.

*Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Россия,
117342, Москва, Бутлерова ул., 15, E-mail: np@ntcup.ru*

**ДИНАМИЧЕСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ КАМЕР СЕРДЦА РЫБ НА ЛИЧИНОЧНОЙ
СТАДИИ РАЗВИТИЯ**

АННОТАЦИЯ

Рыба Danio rerio является важной модельной системой для исследования сердечной деятельности. В данной работе представлен комбинированный стенд, объединяющий акустическую и оптическую микроскопию, для неинвазивной визуализации in vivo сердца личинок данио рерио и измерения параметров движения крови и границ сердца. Разработанная установка позволяет одновременно регистрировать ультразвуковые и оптические данные бьющегося сердца, что дает возможность анализировать динамику сердечных сокращений и детально изучать морфологию и функциональные особенности сердца. Изменение оптической интенсивности во времени используется для расчета ритма сердечных сокращений и синхронизации асинхронно записанных ультразвуковых данных. Показано, что с помощью постобработки ультразвуковых сигналов удалось получить пространственно-временное распределение скорости кровотока, а также определить границы камер сердца, их смещение и размеры. Полученные результаты могут быть применены для разработки новых методов диагностики в области исследования сердца.

АКУСТИЧЕСКАЯ МИКРОСКОПИЯ, УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ, DANIO RERIO, ДИНАМИКА СЕРДЦА, ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

ВВЕДЕНИЕ

Современные биомедицинские исследования демонстрируют интерес к разработке методов визуализации, позволяющих обеспечить одновременный анализ структурных и функциональных характеристик изучаемых биологических объектов. Большую актуальность такие разработки приобретают в кардиологических исследованиях малых организмов. В работах [1, 2] представлен комбинированный стенд, который сочетает возможности акустической и оптической микроскопии для неинвазивного исследования сердечной деятельности малых организмов. Разработанный подход заключается в одновременной регистрации и последующей интеграции данных акустической и оптической микроскопии. Применение данного подхода к исследованию личинок *Danio rerio* продемонстрировало его эффективность для получения комплексной информации о работе сердца, сочетающей морфологические и функциональные параметры.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальная установка

Для визуализации сердца рыб *Danio rerio* использовалась комбинированная установка, схема которой показана на рис. 1. В ходе эксперимента исследования проводились на личинках рыб *Danio rerio* на стадии 72 часа после оплодотворения. Для обеспечения иммобилизации объекта исследования во время измерений использовалась иммерсионная ячейка 2, заполненная водным раствором анестетика (метансульфоната трикаина, TMS, MS-222) в концентрации 0,168 мг/мл. Такая концентрация MS-222 эффективно обездвиживает образец без влияния на его жизненные функции [3].

Разработанная экспериментальная установка состояла из двух основных модулей: акустического (АМ) и оптического (ОМ). Ультразвуковое исследование рыб *Danio rerio* проводилось с использованием акустического микроскопа. В установке использовался акустический блок 3, состоящий из акустической линзы и преобразователя с центральной частотой 75 МГц, обеспечивающий пространственное разрешение 20 мкм. Глубина резкости акустической линзы составляла приблизительно 100 мкм, что позволяло исследовать личинок рыб данио с размерами сердца до 300 мкм. Преобразователь, возбуждаемый электрическим сигналом с помощью генератора 4, излучал ультразвуковые волны, которые проходили внутрь объекта и отражались от его внутренних структур, и принимал рассеянные образцом эхосигналы. Принятые сигналы преобразовывались в электрический сигнал, передавались в электронный блок для обработки и последующего сохранения в компьютере. Формирование ультразвуковых изображений осуществлялось за счет механического перемещения преобразователя относительно объекта с помощью линейных трансляторов 5 для сканирования вдоль осей x , y с точностью позиционирования 2 мкм и вдоль оси z для обеспечения точного позиционирования и фокусировки на исследуемом объекте.

Оптический модуль на базе инвертированного микроскопа (Альтами МЕТ 1С) позволял получать сигнал сердечного ритма на основе видео данных, записанных цифровой камерой 6 (TheImagingSource, DZK 33UX250) с частотой кадров до 75 кадров в секунду. Оптический микроскоп обеспечивал точное позиционирование объекта, визуальный контроль состояния организма, и служил источником дополнительной информации при интерпретации ультразвуковых данных. Сочетание акустического и оптического методов визуализации обеспечило более точный анализ живых организмов при исследовании работы сердца [3, 4].

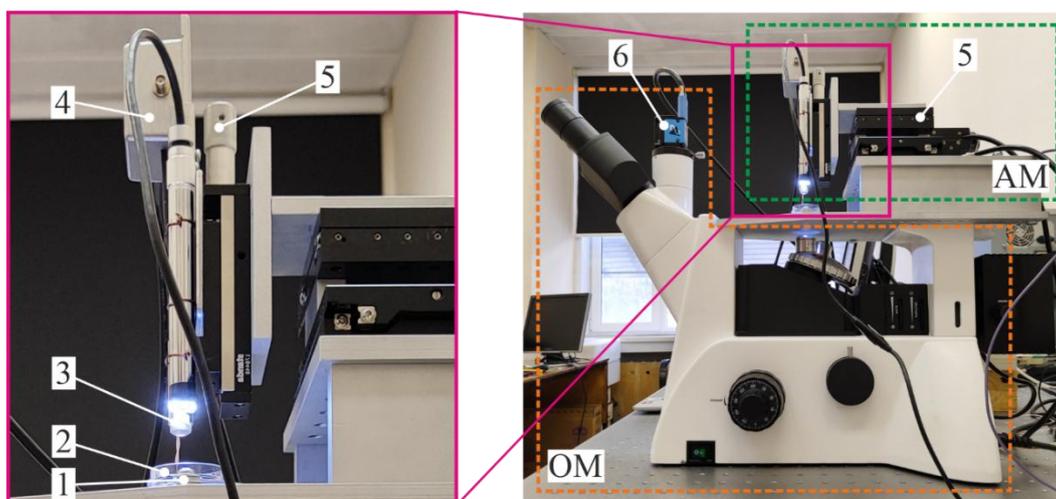


Рис. 1. Фотография комбинированного стенда: 1 – исследуемый объект; 2 – иммерсионная ячейка с водой; 3 – акустический блок, состоящий из ультразвукового преобразователя и акустической линзы; 4 – генератор зондирующих сигналов; 5 – линейные трансляторы; 6 – цифровая видеокамера; АМ – акустический микроскоп; ОМ – оптический микроскоп

Регистрация данных

Исследования рыбы *Danio rerio* на личиночной стадии развития проводилась с помощью комбинированного стенда, принцип работы которого состоял в синхронной регистрации оптических и ультразвуковых данных. Серия оптических изображений, полученных на основе видеоданных, была записана с помощью цифровой камеры, на которых выбиралась область регистрации сигнала фотоплетизмографии (ФПГ). Сигнал ФПГ, рассчитанный методом суммирования интенсивности в области сердца, использовался для синхронизации фаз сердечного ритма с ультразвуковыми сигналами.

Одновременно с оптическими видеоданными производилась запись ультразвуковых изображений в виде функции пространственных координат и времени $u(z, T, x)$ и $u(z, T, y)$, где плоскость сканирования (x, y) совпадала с плоскостью оптических изображений, а координата z была перпендикулярна ей. Ультразвуковые М-сканы $u(z, T)$ записывались в некотором положении x в течение нескольких секунд и охватывали несколько периодов сердечной деятельности, после чего данные усекались во времени для совмещения их начала с определенной фазой сердца, определенной по видеоданным [5, 6]. На рис. 2а представлен пример М-скана в виде полутонового изображения, измеренного при $x = 140$ мкм и демонстрирующего сердечный цикл с периодом $T_0 = 288$ мс.

Анализ зарегистрированных данных выявил наличие нескольких типов реакций. К ним относятся стационарные отклики E, обусловленные отражением от внешней поверхности организма, отклики F, вызванные рассеянием волн на движущихся элементах крови, и отклики W, возникающие при отражении ультразвука от внутренних стенок сердца.

Обработка данных сонографии

Для анализа морфологии сердца применялся комплексный подход обработки пространственно-временных М-сканов. Первичная обработка подразумевала низкочастотную фильтрацию сигналов $u_{LN}(z, T)$ с целью выделения откликов, связанных со стенками камер сердца, и подавления эхо-сигналов от элементов крови. Учитывая частоту дискретизации 5 кГц, частота среза фильтра (-3 дБ) была установлена на уровне $f_c = 50$ Гц.

Однако данный метод не позволяет полностью устранить отклики от нестационарных сигналов крови. Для повышения точности оценки геометрических параметров сердца осуществлялась дополнительная обработка низкочастотных ультразвуковых данных с использованием метода синхронного накопления. Данный метод позволил усилить повторяющиеся сигналы, которые соответствуют медленно движущимся элементам, путем их суммирования, и снизить влияние асинхронных реакций от элементов крови.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты обработки ультразвуковых М-сканов представлен на рис. 2б для положения $x = 140$ мкм. На рисунке показано, что эхо-сигналы, вызванные движущимися клетками крови, были подавлены, что позволило повысить различимость откликов от границ сердечных камер. Низкочастотные ультразвуковые М-сканы позволили определить положение стенок и оценить размеры камер сердца.

Объект исследования был ориентирован таким образом, что предсердие располагалось ближе к ультразвуковому преобразователю. В результате была визуализирована анатомическая структура сердца: верхняя стенка предсердия, область атриовентрикулярного клапана, разделяющего сердечные камеры и нижняя стенка желудочка. Отклики от стенок сердца демонстрируют двойственную структуру, соответствующую границам камер сердца. Пары кривых ($h_{11}-h_{12}$, $h_{21}-h_{22}$ и $h_{31}-h_{32}$) определяют внешний и внутренний контур предсердия, зоны клапана и желудочка соответственно. Было выявлено, что толщина стенок на протяжении одного сердечного цикла оставалась стабильной и находилась в пределах

20-30 мкм. В то же время, размеры предсердия (h_{21} - h_{12}) и желудочка (h_{22} - h_{31}) изменялись более существенно в зависимости от фазы сердечного цикла. Вертикальный размер предсердия (h_a) увеличивался до 80 мкм в фазу диастолы в интервале времени $T = (150-250)$ мс, тогда как размер желудочка (h_v) уменьшался в течение этой фазы до 60 мкм. Полученные количественные результаты согласуются с известными параметрами сердца рыб *Danio rerio* на личиночной стадии развития [7].

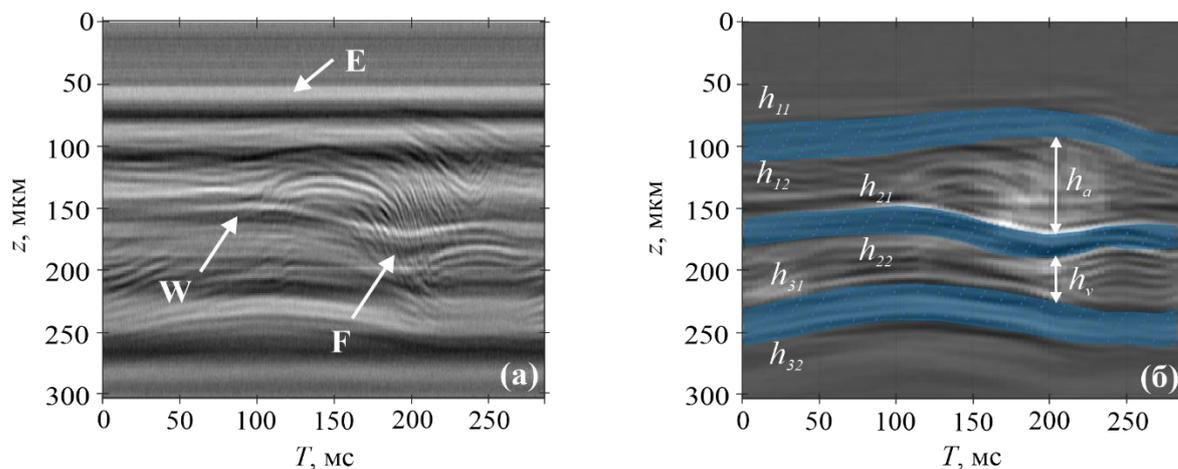


Рис. 2. Исходный М-скан $u(z, T)$, измеренных при $x = 140$ мкм (а) и М-скан $u_{LH}(z, T)$ после применения низкочастотной фильтрации (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках работы был разработан комбинированный стенд, объединяющий оптические и акустические методы визуализации, что позволило осуществлять неинвазивные исследования сердца на одном организме. На примере личинок *Danio rerio* показана эффективность стенда для визуализации сердечных структур. Применение многоступенчатой обработки полученных пространственно-временных М-сканов дала возможность определить положение стенок и оценить размеры камер сердца в течение сердечного цикла. Экспериментальные данные показали, что размеры камер сердца рыбы *Danio rerio* изменялись в течение времени и в зависимости от фаз сердечного ритма. Было установлено, что вертикальные размеры предсердия и желудочка личинки *Danio rerio* находились в диапазоне от 60 до 90 мкм и согласовались с известными характеристиками сердца данного вида.

Работа выполнена в рамках государственного задания FFNS-2025-0008.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Titov S.A., Burlakov A.B., and Bogachenkov A.N.** Sonography of the heart of Weatherfish *misgurnus fossilis* at the prelarval stage of development // *Acoust. Phys.* 2021. Vol. 67. № 5. Pp. 562-570.
2. **Burlakov A.B., Titov S.A., Bogachenkov A.N.** Application of acoustic microscopy for visualization of structural displacement during the development of fish embryos // *Journal of Communications Technology and Electronics.* 2022. Vol. 67. № 4. Pp. 456-462.
3. **Titov S.A., Zykova L.A., Burlakov A.B., Huang C.C., Bogachenkov A.N.** High-frequency ultrasound echocardiography of heart activity of *Danio rerio* embryo // *2022 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), 2022.* Pp. 1-4.
4. **Titov S.A., Zykova L.A., Burlakov A.B., Huang C.C.** Estimation of blood flow velocity in the heart of *Danio rerio* embryo using correlation of ultrasonic signals // *2022*

- International Conference on Information, Control and Communication Technologies (ICCT), 2022. Pp. 1-4.
5. **Machikhin A.S., Titov S.A., Huang C.C., Guryleva A.V., Burlakov A.B., Zykova L.A., Bukova V.I.** Combined optical and acoustic microscopy for noninvasive cardiovascular studies using zebrafish model // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2025. Vol. 74. Pp. 1-13.
 6. **Zykova L.A., Burlakov A.B., Titov S.A., Bogachenkov A.N.** Study of the movement of the Danio rerio heart walls using a multimodal setup // 2024 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), 2024. Pp. 1-4.
 7. **Kaveh A., Bruton F.A., Buckley C., Oremek M.E.M., Tucker C.S., Mullins J.J., Taylor J.M., Rossi A.G., Denvir M.A.** Live imaging of heart injury in larval zebrafish reveals a multi-stage model of neutrophil and macrophage migration // Frontiers in Cell and Developmental Biology. 2020. Vol. 8.

Zykova, L.A., Titov, S.A., Burlakov, A.B., Bogacheykov A.N.

*Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation
of Russian Academy of Sciences, Russia,
117342, Moscow, Butlerova st., 15, E-mail: np@ntcup.ru*

DINAMIC VISUALIZATION OF FISH HEART CHAMBERS AT THE LARVAL STAGE OF DEVELOPMENT

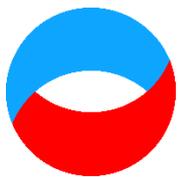
ABSTRACT

The fish Danio rerio is an important model system for studying cardiac activity. In this paper, a combined setup combining acoustic and optical microscopy for noninvasive in vivo visualization of the zebrafish larval heart and measuring blood flow parameters and heart boundaries is presented. The developed setup allows simultaneous recording of ultrasound and optical data of the beating heart, which makes it possible to analyze the dynamics of heart contractions and study in detail the morphology and functional features of the heart. Changes in optical intensity over time are used to calculate the heart rhythm and synchronize asynchronously recorded ultrasound data. It is shown that post-processing of ultrasound signals made it possible to obtain the spatio-temporal distribution of blood flow velocity, as well as to determine the boundaries of the heart chambers, their displacement and size. The results obtained can be used to develop new diagnostic methods in the field of heart research.

ACOUSTIC MICROSCOPY, ULTRASOUND IMAGING, DANIO RERIO, HEART DYNAMICS, DIGITAL IMAGING

Секция 11

Научная молодежная школа



УДК 535.31

Лёвин Д.С., Павлов И.Н.

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: liovin.danila@mail.ru*

ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНОЙ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ РЕФРАКТОГРАФИИ

АННОТАЦИЯ

Данная работа посвящена исследованию многослойной жидкости в виде нескольких диффузионных слоёв, которые послойно создаются в неподвижной прозрачной ёмкости. В качестве жидкостей были подобраны солевые растворы с различной концентрацией и собрана экспериментальная установка.

Для полученных картин была подобрана теоретическая зависимость показателя преломления от координаты. Сравнение рассчитанной рефрактограммы с экспериментальной показало высокую степень сходства.

ЛАЗЕРНАЯ РЕФРАКТОГРАФИЯ, ДИФфуЗИОННЫЙ СЛОЙ, МНОГОСЛОЙНАЯ СРЕДА, НЕОДНОРОДНЫЕ СРЕДЫ

ВВЕДЕНИЕ

Наряду с традиционными рефракционными методами, активно развиваются новые лазерные методы исследования. Это стало возможным благодаря внедрению лазерных технологий и усовершенствованию цифровых алгоритмов обработки изображений. Появление новых, более компактных и мощных полупроводниковых лазеров в сочетании с дифракционными оптическими элементами, которые позволяют создавать структурированное лазерное излучение, значительно расширило возможности оптических методов исследования неоднородных сред. Это способствовало активному применению оптических методов для анализа различного вида неоднородностей и их параметров. Например, для измерения скорости потока часто прибегают к использованию лазерной доплеровской анемометрии [1]. Если кроме скорости потока требуется знать информацию о размере частиц, то существует метод фазово-доплеровской анемометрии. Методом лазерной анемометрии по изображениям частиц можно получить визуальную информацию о структуре потока, вихрях, пограничных слоях и других особенностях течения [2]. Для анализа температурных неоднородностей часто прибегают к методу инфракрасной термографии [3]. Для бесконтактного определения давления все чаще используются оптические датчики, основанные на изменении оптических свойств материала под воздействием давления [4]. Оптическая спектроскопия применяется для диагностики химического состава и концентрации веществ [5]. Задачу определения показателя преломления можно решить с помощью различных теневых методов и их модификаций [6-7]. Однако градиент показателя преломления в жидкостях существенно больше, чем в газах при одинаковых градиентах температур. Это ограничивает область применения многих вышеперечисленных методов. В условиях сильной рефракции, возникающей при исследовании неоднородных жидких сред, традиционные методы могут

быть неэффективны. В таких случаях, для анализа неоднородностей перспективным подходом является использование лазерной рефрактографии (ЛР) [8].

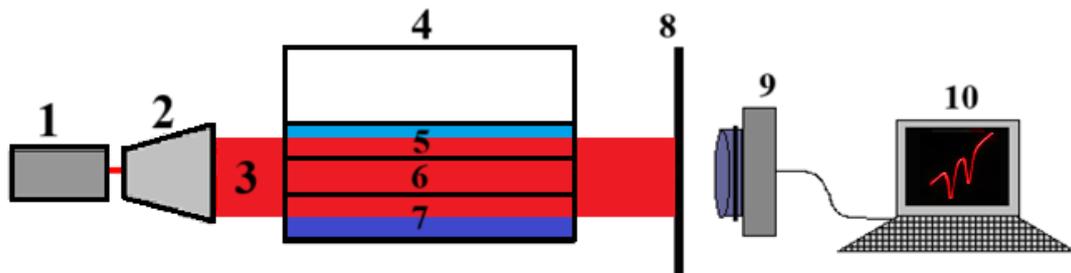
ЛАЗЕРНАЯ РЕФРАКТОГРАФИЯ

Принцип метода ЛР состоит в зондировании прозрачной среды структурированным лазерным излучением (СЛИ). В отличие от традиционных методов, ЛР позволяет визуализировать и количественно анализировать распределение показателя преломления в режиме реального времени, не внося значительных возмущений в исследуемую среду. СЛИ создается с помощью дифракционных оптических элементов (ДОЭ), которые формируют лазерный пучок определенной формы [9]. Выбор типа СЛИ зависит от геометрии исследуемой неоднородности и поставленных задач. Например, плоское СЛИ хорошо подходит для исследования плоскостных сред, а цилиндрическое – для анализа объектов с цилиндрической симметрией. Проходя через оптически неоднородную среду, СЛИ преломляется в соответствии с законами геометрической оптики, причем степень отклонения лучей зависит от градиента показателя преломления [10]. Этот эффект позволяет «визуализировать» распределение показателя преломления. Далее, рефракционная картина СЛИ (рефрактограмма) регистрируется с помощью цифровой камеры и обрабатывается на компьютере с использованием специализированного программного обеспечения. Компьютерная обработка включает в себя фильтрацию шумов, выделение характерных особенностей рефрактограммы. Для получения распределения показателя преломления подбирается теоретическая модель, описывающая его профиль в исследуемой среде (например, экспоненциальная, тангенциальная или другая подходящая функция). На основе этой модели рассчитывается теоретическая рефрактограмма, которая сравнивается с экспериментальной [11].

Для изучения многослойной жидкости была собрана специальная установка, схема которой изображена на рис. 1. В качестве источника излучения использовался полупроводниковый лазер с длиной волны излучения 670 нм. Так как данный тип лазеров обладает большим углом расходимости пучка, то для получения широкой нерасходящейся лазерной плоскости 3, ширина которой постоянна, необходимо применение телескопической системы 2, которая состоит из двух цилиндрических линз, короткофокусной и длиннофокусной. Плоскость распространяется без отклонений до момента попадания в стеклянную кювету 4, которая зафиксирована на специальной скамье с возможностью регулировки высоты. Проходя через многослойную среду, состоящую из верхнего слоя чистой воды 5, солевого раствора 6 с концентрацией 2% и солевого раствора 7 с концентрацией 4%, плоскость преломляется. В местах пересечения лазерной плоскости и диффузионного слоя, плоскость искажается вследствие градиента показателя преломления, из-за чего приобретает характерные прогибы. На выходе из кюветы плоскость попадает на экран 8, который зафиксирован на скамье с возможностью регулировки расстояния между стенкой кюветы и самим экраном. Получившаяся рефрактограмма регистрируется с помощью цифровой видеокамеры 9 и обрабатывается на компьютере 10.

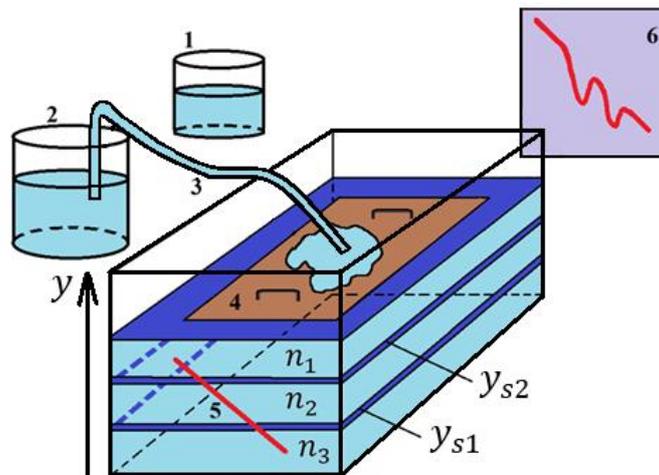
МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ МНОГОСЛОЙНОЙ СРЕДЫ

Для создания многослойной среды использовалась специальная установка, схема которой изображена на рис. 2. Для проведения эксперимента была подготовлена стеклянная кювета, дощечка, несколько тар для хранения растворов, чистая вода и мягкая капиллярная трубка для постепенного создания слоёв. Также проводилось предварительное смачивание деревянной поверхности, чтобы не допустить возникновения пузырьков.



1 – лазер; 2 – оптическая система формирования лазерной плоскости;
 3 – лазерная плоскость; 4 – кювета; 5 – чистая вода; 6 – раствор соли 2%;
 7 – раствор соли 4%; 8 – экран; 9 – цифровая видеокамера; 10 – система обработки
 Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования многослойной жидкости методом лазерной рефрактографии

Вначале в кювету заливался четырехпроцентный раствор соли, имеющий наибольшую плотность и показатель преломления n_3 . Затем на поверхность жидкости аккуратно опускалась предварительно смоченная дощечка 4. Чтобы не допустить интенсивного перемешивания растворов и обеспечить однородность формируемого слоя использовалась капиллярная трубка 3, которая позволила регулировать толщину струи. С её помощью, следя за тем, чтобы жидкость переливалась равномерно по всей поверхности дощечки, из емкости 2, содержащей двухпроцентный раствор соли с показателем преломления n_2 , осторожно переливали жидкость. В результате формировался диффузионный слой y_{s1} . Процедура повторялась для создания второго диффузионного слоя y_{s2} , только теперь в качестве жидкости использовали чистую воду n_1 из емкости 1. В итоге, в системе формировались два диффузионных слоя с различной плотностью.



1 – тара с двухпроцентным раствором соли, 2 – тара с чистой водой, 3 – мягкий шланг, 4 – дощечка,
 5 – лазерная плоскость, 6 – экран

Рис. 2. Схема экспериментальной установки для создания многослойной жидкости

ПОДБОР МОДЕЛИ ДИФфуЗИОННОГО СЛОЯ

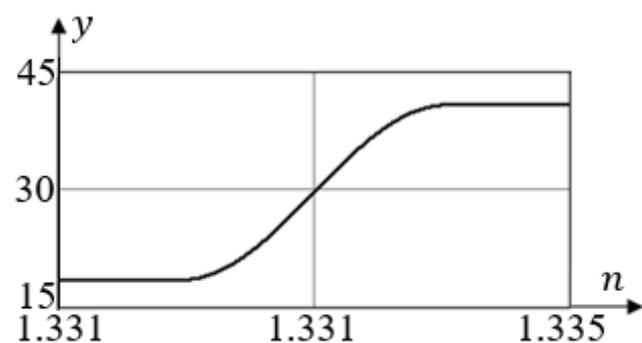
Рассмотрим более подробно модель распределения показателя преломления в диффузионном слое [12-13]. Для различных жидкостей моделируется переходный слой, который может описываться различными зависимостями показателя преломления от координаты, например, синусоидальной (1), тангенциальной (2) и экспоненциальной (3):

$$\left\{ \begin{array}{l} n(y) = \frac{n_1 + n_2}{2} + \frac{n_1 - n_2}{2} \cdot \sin\left(\frac{y - y_s}{h}\right) \text{ для } y_1 < y < y_2, \\ n(x) = n_1 \text{ для } y \leq y_1, \\ n(x) = n_2 \text{ для } y \geq y_2, \end{array} \right. \quad (1)$$

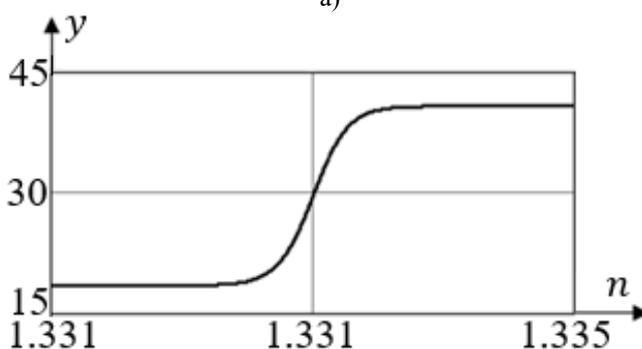
$$n(y) = \frac{n_1 + n_2}{2} + \frac{n_1 - n_2}{2} \cdot \text{th} \left(\frac{y - y_s}{h} \right), \quad (2)$$

$$n(y) = \frac{n_1 + n_2}{2} + \frac{n_1 - n_2}{2} \cdot \exp \left(\frac{y - y_s}{h} \right), \quad (3)$$

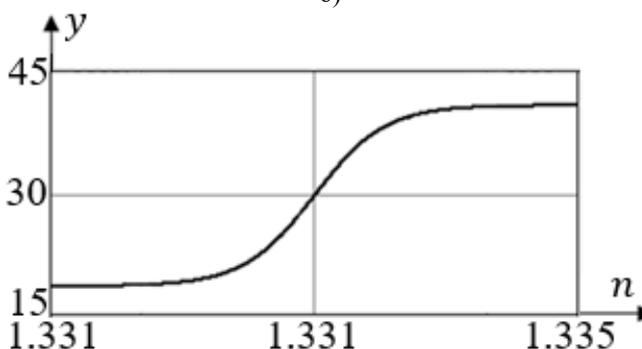
где h – характерная полуширина слоя, x_1 – нижняя граница слоя, x_2 – верхняя граница слоя. Границы y_1 и y_2 для синусоидальной зависимости определяются исходя из заданной модели показателя преломления (1) следующим образом: на нижней границе слоя $n(y_1) = n_1$, а на верхней границе слоя $n(y_2) = n_2$. Границы для тангенциальной экспоненциальной зависимости определяются по уровню отклонения производной показателя преломления от нуля на значение $10^{-5} \frac{1}{\text{м}}$. Выбор границ обусловлен тем, что за их пределами показатель преломления меняется незначительно, и лучи практически перестают испытывать рефракцию. На рис. 3 показаны зависимости показателя преломления слоя от координаты для различных моделей. Выбор конкретной модели в дальнейшем осуществлялся на основе полученных экспериментальных данных.



а)



б)



в)

а – синусоидальная, б – гиперболический тангенс, в - экспоненциальная

Рис. 3. Модели показателей преломления слоя [12-13]

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты эксперимента представлены на рис. 4. Как можно видеть на изображениях, при попадании лазерной плоскости в слоисто-неоднородную среду, происходит её искажение в местах резкого изменения показателя преломления. С течением времени слои диффундируют друг в друга и градиент показателя преломления уменьшается, что можно наблюдать по изменению высоты и ширины прогиба на лазерной плоскости.

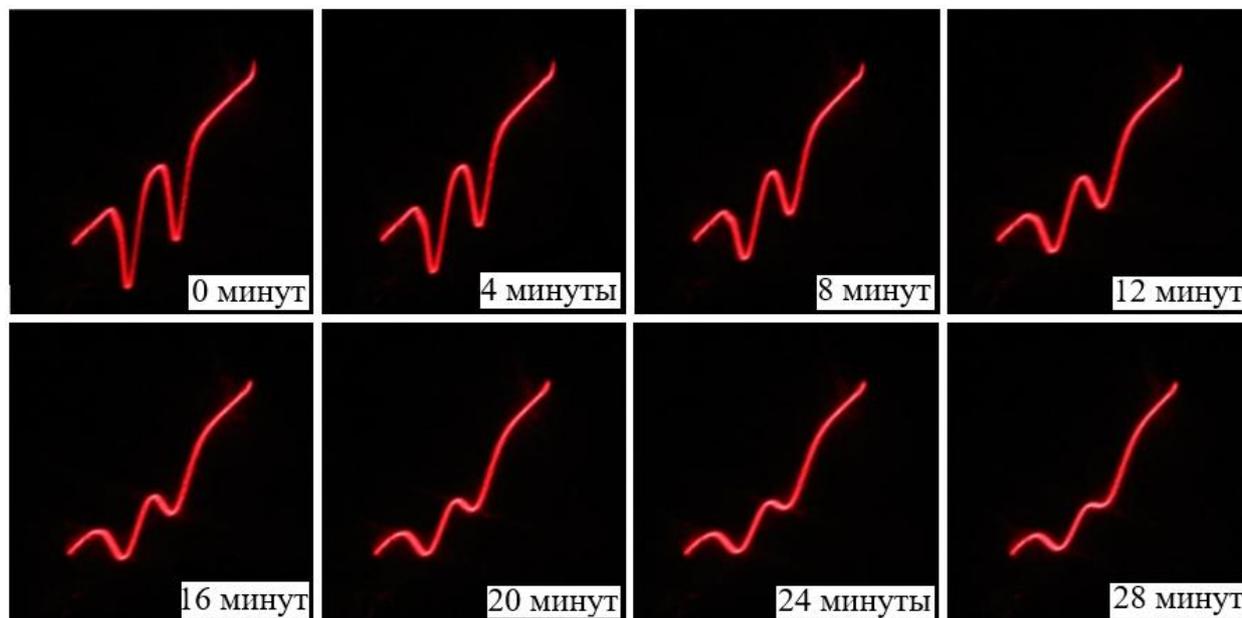


Рис. 4. Полученные рефрактограммы с двумя диффузионными слоями в разные моменты времени после создания многослойной жидкости

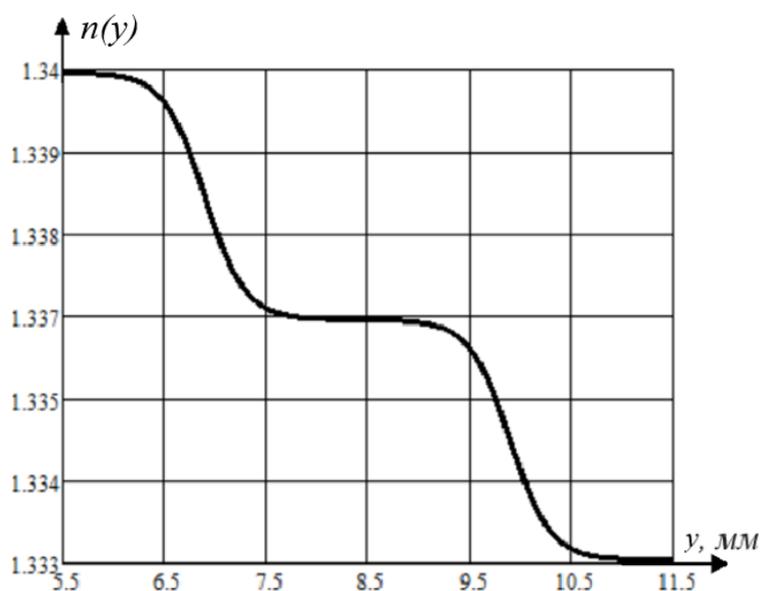
Исходя из зависимости для среды с одним диффузионным слоем, была подобрана модель, которая описывала бы созданную систему с двумя диффузионными слоями. Такая зависимость описывается формулой

$$n(y) = \frac{n_3 - n_2}{2} \cdot \operatorname{th}\left(\frac{y - y_{s2}}{h}\right) + \frac{n_2 - n_1}{2} \cdot \operatorname{th}\left(\frac{y - y_{s1}}{h}\right) + \frac{n_1 + n_3}{2} \quad (4)$$

где n_3 – показатель преломления четырёхпроцентного раствора соли, n_2 – показатель преломления двухпроцентного раствора соли, n_1 – показатель преломления чистой воды, h – характерная полуширина слоя, y_s – положение центра неоднородности.

Формула (4) была подобрана для функции гиперболического тангенса, так как данный закон лучше всего описывает переходный слой. На рис. 5 приведен график подобранной зависимости показателя преломления от координаты y для рефрактограммы с двойным диффузионным слоем.

Цифровая обработка рефрактограммы включала в себя несколько этапов. На первом этапе изображение было преобразовано в чёрно-белый формат и для уменьшения объема обрабатываемых данных, выделялась только область с информативной частью. Далее выполнялась бинаризация с фильтрацией для снижения уровня шума. Поскольку лазерная плоскость имеет конечную толщину, а теоретическая зависимость – тонкую линию, требовалось преобразовать экспериментальные данные в вид, соответствующий теоретической модели. Это было достигнуто с помощью алгоритма, основанного на поиске максимальных значений интенсивности [14]. На рис. 6 представлено сравнение теоретической и обработанной экспериментальной рефрактограммы. Из рисунка видно, что теоретическая зависимость имеет высокую степень сходства с экспериментальной.



$n_3 = 1,3403, n_2 = 1,3367, n_1 = 1,3333, h = 0,4 \text{ мм}, y_{s1} = 9,9 \text{ мм}, y_{s2} = 6,9 \text{ мм}.$

Рис. 5. График подобранной зависимости $n(y)$ для модели из двух диффузионных слоёв

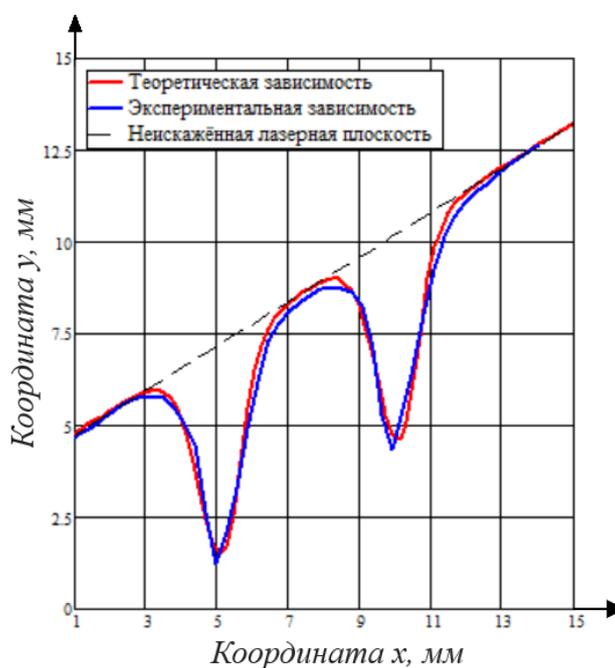


Рис. 6. Сравнение теоретической зависимости с экспериментальной для модели с двумя диффузионными слоями

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был реализован принцип исследования диффузионного слоя для анализа многослойной жидкости, состоящей из нескольких пограничных слоёв. Расширена методика создания многослойной жидкой среды. Для проведения эксперимента были выбраны солевые растворы с различной концентрацией и чистая вода.

В результате проведённого эксперимента получены рефрактограммы с двойным диффузионным слоем. После этого была проведена обработка полученных результатов. Для расчётной рефрактограммы была выбрана тангенциальная модель пограничного слоя и на основании данной модели подобрана теоретическая зависимость. Сравнение с экспериментальной рефрактограммой показывает высокую степень сходства зависимостей. Небольшие расхождения можно объяснить погрешностью измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Какаулин С.В., Кабардин И.К., Гордиенко М.Р.** Развитие метода лазерной доплеровской анемометрии для верификации численных расчетов при исследовании движения газа в управляемом поворотно-расходящемся потоке // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2022. № 8. С. 130-137.
2. **Усманова Ш.Ш., Скорнякова Н.М., Сапронов М.В., Софурев Д.В., Кучменко А.В., Неткачев В.В.** Визуализация водного потока в стеклянной трубке методом мультицветной АИЧ // Графикон. 2023. № 33. С. 285-291.
3. **Шагиянова А.М. и др.** Анализ области визуализации пристеночного слоя жидкости при регистрации методами высокоскоростной термографии // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2020. № 2. С. 31-35.
4. **Smietana M., Bock W.J., Mikulic P., Chen J.** Pressure sensing in high-refractive-index liquids using long-period gratings nanocoated with silicon nitride // Sensors. 2010. № 10. Pp. 11301-11310.
5. **Кугейко М.М., Баравик А.А.** Определение концентрации компонентного состава газов методом оптической спектроскопии в условиях перекрытия их спектральных линий // Оптика и спектроскопия. 2021. № 10. С. 1221-1226.
6. **Evgrafova A.V.** The influence of thermal boundary conditions on heat transfer from a localized heat source // Bulletin of Perm University. Physics. 2018. № 2(40). Pp. 68-74.
7. **Козлов В.В., Грек Г.Р., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г., Вихорев В.В.** Диффузионное горение круглой микроструи водорода при до- и сверхзвуковой скорости истечения из сопла // Сибирский физический журнал. 2018. № 2. С. 37-52.
8. **Евтихиева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С.** Лазерная рефрактография. М: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 175 с.
9. **Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С., Юркевичюс С.П.** Лазерная рефрактография – новая технология рефрактометрии жидких сред // Инноватика и экспертиза. 2019. № 3 (28). С. 157-166.
10. **Крикунов А.В.** Исследование рефракции плоского лазерного пучка в переходном слое стратифицированной жидкости // Вестник МЭИ. 2011. № 4. С. 97-102.
11. **Расковская И.Л., Сергеев Д.А., Ширинская Е.С.** Диагностика характеристик солестратифицированной жидкости методом лазерной рефрактографии // Измерительная техника. 2010. № 10. С. 36-38.
12. **Крикунов А.В., Расковская И.Л., Ринкевичюс И.Л.** Визуализация и построение 3D-рефрактограмм в объёме жидкости XII // Межд. науч.-техн. конф. «Оптические методы исследования потоков». Москва: Издательский дом МЭИ. 2011. 9 с.
13. **Евтихиева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В.** Исследование физических процессов в жидкости методом лазерной рефрактографии // XII Межд. науч.-техн. конф. «Оптические методы исследования потоков». Москва: Издательский дом МЭИ. 2013. 12 с.
14. **Крикунов А.В.** Лазерная рефрактографическая система диагностики диффузионного слоя жидкости // Дисс. канд. техн. наук. Москва, 2011. 138 с.

Levin D.S., Pavlov I.N.

*National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: liovin.danila@mail.ru*

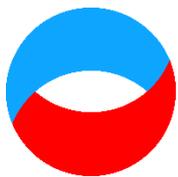
RESEARCH OF MULTILAYER LIQUID BY LASER REFRACTOGRAPHY

ABSTRACT

This work is devoted to the study of a multilayer liquid in the form of several diffusion layers, which are created layer by layer in a stationary transparent container. To carry this out, salt solutions with different concentrations were selected and an experimental setup was assembled.

For the obtained refractograms, a theoretical dependence of the refractive index on the coordinate was selected. Comparison of the selected dependence with the experimental one showed a high degree of similarity.

**LASER REFRACTOGRAPHY, DIFFUSION LAYER, MULTILAYER MEDIUM,
HETEROGENEOUS MEDIA**



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 536.521:621.452.32

Иванов Е.С., Фланден В.С.

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: tron_line@list.ru*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАСШИРЕНИЯ ДИАПАЗОНА ИЗМЕРЕНИЯ
ПИРОМЕТРА ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК В СТОРОНУ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР**

АННОТАЦИЯ

Повышение температуры рабочих лопаток (РЛ) турбины в газотурбинных двигателях (ГТД) до 1200 °С и более, снижает их прочность и уменьшает ресурс. Чтобы не допускать их перегрева для контроля температуры РЛ, используются оптические пирометры турбинных лопаток (ПТЛ) с кремниевыми PIN-фотодиодами (ФД). Они имеют малую инструментальную погрешность $\pm 0,5-1,0\%$ и являются оптимальным решением при высоких температурах РЛ от 900 °С и более.

В некоторых случаях требуется информация о тепловом состоянии РЛ во всём диапазоне рабочих режимов, в том числе при температурах от 500 °С, когда интенсивность их излучения гораздо ниже, чем при 1200 °С. При этом сигнал ПТЛ с кремниевыми ФД существенно меньше. В результате ухудшается соотношение сигнал/шум и возрастает погрешность измерения температуры РЛ.

Одним из способов расширения диапазона измерения является смещение спектра чувствительности ПТЛ в длинноволновую область, где спектральная плотность энергетической яркости излучения РЛ возрастает, в результате чего улучшается соотношение сигнал/шум. Однако, при этом требуется применять световоды (СВ) и ФД, для более длинноволновой области спектра по сравнению с кварцевыми СВ и кремниевые ФД.

Другим способом является применение фотодетекторов с внутренним усилением фототока за счёт лавинного эффекта. Это является перспективным решением при использовании кремниевого лавинного ФД и InGaAs-PIN-ФД совместно с кварцевым СВ в составе бихроматического ПТЛ спектрального отношения.

**ПИРОМЕТР, ТЕМПЕРАТУРА, ЛОПАТКИ ТУРБИНЫ, ДИАПАЗОН ИЗМЕРЕНИЯ,
ДЛИННОВОЛНОВАЯ ОБЛАСТЬ, ФОТОДИОД, ШУМЫ, ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО**

ВВЕДЕНИЕ

Верхняя граница диапазона допустимой температуры РЛ турбины ограничена величиной 1200 °С, так как её превышение приводит к снижению прочностных свойств РЛ, что уменьшает их ресурс. На некоторых режимах превышение указанной температуры на 5 °С выше нормы снижает ресурс РЛ на 10% [1]. Поэтому в систему управления ГТД вводятся ограничения в зависимости от режима работы ГТД, не допускающие перегрева РЛ. Таким образом, чтобы не повредить РЛ и продлить срок службы, требуется получение достоверной информации об их температуре в первую очередь на самых теплонапряжённых режимах работы ГТД. Это является основной задачей ПТЛ, у которого верхней границей диапазона измеряемых температур является указанная величина 1200 °С.

Вместе с тем для верификации расчётных моделей турбины высокого давления (ТВД) и разработки новых технических решений необходима информация о температуре РЛ во всём диапазоне рабочих режимов ГТД, в том числе и при малой тяге, когда температура РЛ сравнительно невысокая. Это приводит к необходимости расширения диапазона измеряемых температур ПТЛ в область низких значений, примерно до 500...600 °С, когда интенсивность излучения РЛ гораздо меньше, чем при температуре 1200 °С.

МЕТОДЫ УМЕНЬШЕНИЯ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ДИАПАЗОНА ИЗМЕРЯЕМЫХ ТЕМПЕРАТУР

Выбор спектральных диапазонов фотодетекторов ПТЛ

Следует отметить, что существуют ограничения при выборе спектрального диапазона фотодетектора ПТЛ, так как он воспринимает излучение не только от РЛ, но и от продуктов сгорания (ПС), находящихся между ним и РЛ. Кроме того, ПС также частично поглощают собственное излучение РЛ. В результате в сигнал ПТЛ попадает помеха, соизмеримая с излучением самой РЛ, которая вносит существенную погрешность при измерении её температуры [1]. Основными составляющими компонентами ПС, образующимися при сгорании углеводородного топлива, являются углекислый газ и водяной пар. На рис. 1 представлен спектр излучения газообразной составляющей ПС [2].

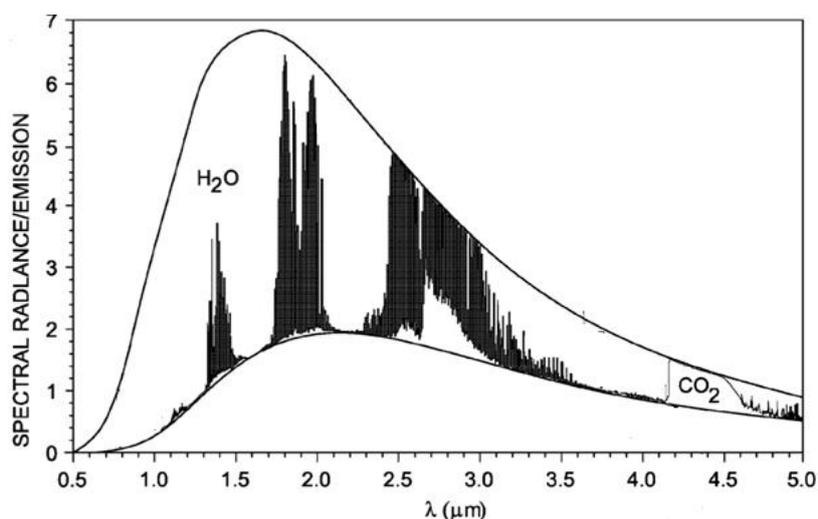


Рис. 1. Спектральное распределение излучения газообразной составляющей ПС [2]

На рис. 1 изображены:

- спектральная плотность излучения РЛ (нижняя кривая);
- сумма спектральной плотности излучения РЛ и спектральной плотности излучения абсолютно черного тела (АЧТ) при температуре ПС в проточной части ТВД (верхняя кривая);
- между указанными выше линиями расположены линейчатые спектры излучения молекул H_2O и CO_2 , из которых в основном состоят ПС.

Исходя из рис. 1 можно выделить 4 окна прозрачности, в которых поглощение и излучение ПС оказывает наименьшее влияние на результат детектирования излучения РЛ в ПТЛ:

- | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 окно: $0,7 < \lambda_1 < 1,1$ мкм; | 3 окно: $2,1 < \lambda_3 < 2,3$ мкм; |
| 2 окно: $1,5 < \lambda_2 < 1,7$ мкм; | 4 окно: $3,7 < \lambda_4 < 3,9$ мкм. |

Таким образом, диапазоны спектральной чувствительности фотодетекторов ПТЛ должны располагаться в указанных 4-х окнах прозрачности газообразных ПС, присутствующих в проточной части ТВД.

Метод смещения диапазона спектральной чувствительности фотодетекторов ПТЛ в более длинноволновую область спектра

Одним из методов расширения диапазона измерений ПТЛ в низкотемпературную область является смещение спектрального диапазона чувствительности ПТЛ в длинноволновую область, так как согласно формуле Вина, при температуре РЛ 500-600 °С и менее, интенсивность теплового излучения возрастает с увеличением длины волны в диапазоне длин волн $0,4 < \lambda < 3,3$ мкм. На рис. 2 пунктиром показан вид зависимостей спектральной плотности энергетической светимости АЧТ от длины волны при различных температурах [3]. Для РЛ эти зависимости имеют аналогичный вид с поправкой на коэффициент излучательной способности РЛ.

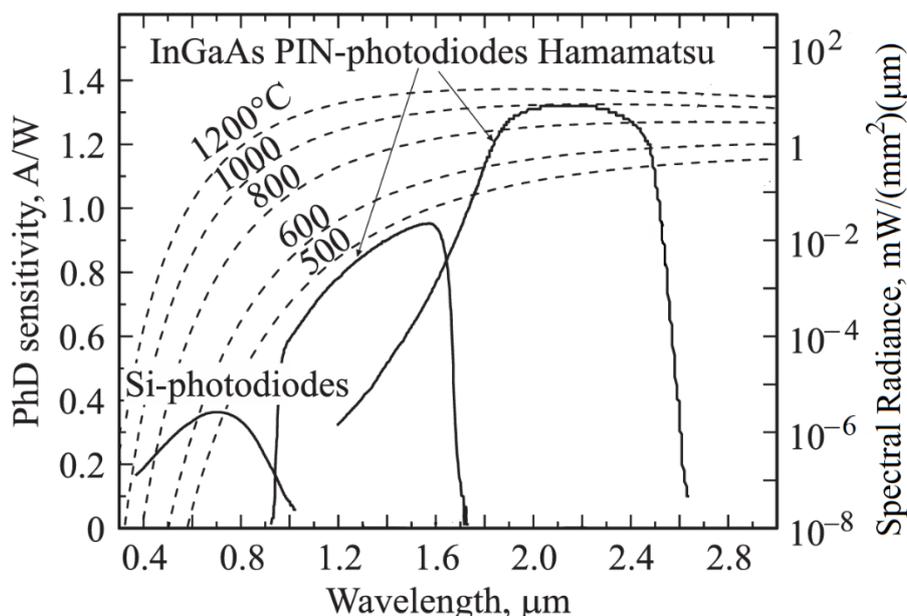


Рис. 2. Спектральная плотность энергетической светимости АЧТ при разных температурах (пунктирная линия), а также области спектральной чувствительности Si- и InGaAs-ФД (сплошная линия) [3]

На длине волны $\lambda_1 = 1$ мкм (λ_{max} для Si-фотодиодов) спектральная плотность излучения АЧТ при температуре 800 °С примерно в 10 раз меньше, чем на длине волны $\lambda_2 = 1,5$ мкм (λ_{max} для InGaAs-фотодиодов стандартной чувствительности). При более низких температурах АЧТ эти различия возрастают. Так, например, при температуре 500 °С на указанных длинах волн λ_1 и λ_2 разница достигает 40-кратной величины. Величина сигнала ПТЛ при его детектировании на λ_1 и λ_2 различается ещё больше, так как максимальное значение спектральной чувствительности Si-ФД составляет примерно 0,4-0,5 А/Вт (на λ_1), а InGaAs-ФД – 0,9-1 А/Вт (на λ_2). Таким образом, фототок, генерируемый в ПТЛ от излучения РЛ InGaAs-ФД значительно превышает фототок, генерируемый Si-ФД.

С увеличением длины волны возрастает не только спектральная плотность интенсивности излучения АЧТ, но и повышается значение спектральной чувствительности фотодиодов. Так для InGaAs-ФД с диапазоном спектральной чувствительности расширенным до 2,5 мкм, она достигает 1,3 А/Вт на длине волны $\lambda_3 = 2,1-2,3$ мкм, на которой спектральная плотность излучения АЧТ при температуре 500° С выше, чем на $\lambda_2 = 1,5$ мкм примерно в 25 раз и примерно в 1000 раз выше, чем на $\lambda_1 = 1$ мкм.

В результате для более длинноволновой области спектра светоэнергетический баланс существенно улучшается, соответственно увеличивается соотношение сигнал/шум. Это подтверждается при рассмотрении большого количества пирометров различного назначения, у которых с понижением измеряемой температуры растёт длина волны, на которой происходит детектирование излучения от объекта измерения, что является общим правилом для производителей пирометров.

Метод повышения величины соотношения сигнал/шум при усилении фототока в фотодетекторе за счёт лавинного эффекта

Из всех фотодетекторов наивысшую пороговую чувствительность имеют фотоэлектронные умножители (ФЭУ), принцип действия которых основан на внешнем фотоэффекте. Они способны регистрировать самые малые потоки излучения, однако у них низкая стабильность и высокая чувствительность к магнитным полям. Это вызывает необходимость их магнитного экранирования и ухудшает весогабаритные характеристики. Кроме того, им требуются стабилизированные источники высокого напряжения. Указанные факторы создают неудобства при их использовании в ПТЛ.

Другим типом фотодетекторов с использованием лавинного эффекта являются лавинные ФД (ЛФД), принцип действия которых основан на внутреннем фотоэффекте. Дополнительно к дробовому шуму фототока, присутствующему во всяком ФД, процесс умножения носителей заряда создаёт в ЛФД шум, который в несколько раз больше дробового и характеризуется коэффициентом избыточного шума. Поэтому соотношение сигнал/шум для ЛФД в несколько раз хуже, чем для ФД.

Но при этом фототок, генерируемый в Si-ЛФД, примерно в 100-200 раз больше, чем в Si-ФД (при коэффициенте умножения $M_{Si} = 100-200$). А фототок, генерируемый в InGaAs-ЛФД примерно в 10-20 раз больше, чем в InGaAs-ФД (при $M_{InGaAs} = 10-20$). В дальнейшем для преобразования фототока в напряжение трансимпедансным усилителем (ТИУ) потребуются меньший коэффициент передачи – трансимпеданс (ТИ). В результате этого в общий шум ТИУ внесёт меньший вклад своего собственного шума. В итоге получается, что при одинаковом усилении сигнала, шум напряжения на выходе ТИУ, включённого совместно с ЛФД, примерно на порядок ниже, чем на выходе ТИУ, включённого совместно с ФД. Применение ЛФД в ПТЛ наиболее целесообразно, так как это повышает соотношение сигнал/шум, которое определяет порог детектирования для оптических сигналов низкого уровня.

Оценка расширения диапазона измерения ПТЛ при использовании InGaAs-PIN-ФД совместно с Si-PIN-ФД на основе метода пирометра спектрального отношения (ПСО)

Метод ПСО более предпочтителен с точки зрения снижения погрешности измерения, которая при этом в меньшей степени зависит от коэффициента излучательной способности РЛ и загрязнения оптики датчика ПТЛ. Оба эти фактора в одинаковой степени влияют на интенсивность излучений с разной длиной волны и при их спектральном отношении взаимно компенсируются. Но эти факторы действуют на сигнал ПТЛ независимо от температуры измеряемой поверхности и вызывают методическую погрешность, связанную с неопределённостью коэффициента передачи излучения от нагретой поверхности до фотодетектора.

Инструментальная погрешность характеризуется соотношением сигнал/шум и в отличие от методической зависит от интенсивности излучения. Она увеличивается при детектировании слабых сигналов, когда измеряемая поверхность имеет низкую температуру.

На рис. 3 представлены графики инструментальной погрешности 2-х ПТЛ в зависимости от измеряемой температуры. Они оба содержат фотопреобразователи на основе Si-ФД. Один из них разработан в Уфимском НПП «Молния» – ОПП-94 [4], другой разработан в ЦИАМ [5]. График ОПП-94 построен исходя из данных, представленных в свидетельстве об утверждении типа средств измерений. С понижением температуры РЛ его инструментальная погрешность резко возрастает, так как при постоянном значении шума на выходе ПТЛ интенсивность излучения РЛ и, соответственно, оптический сигнал от неё резко снижаются.

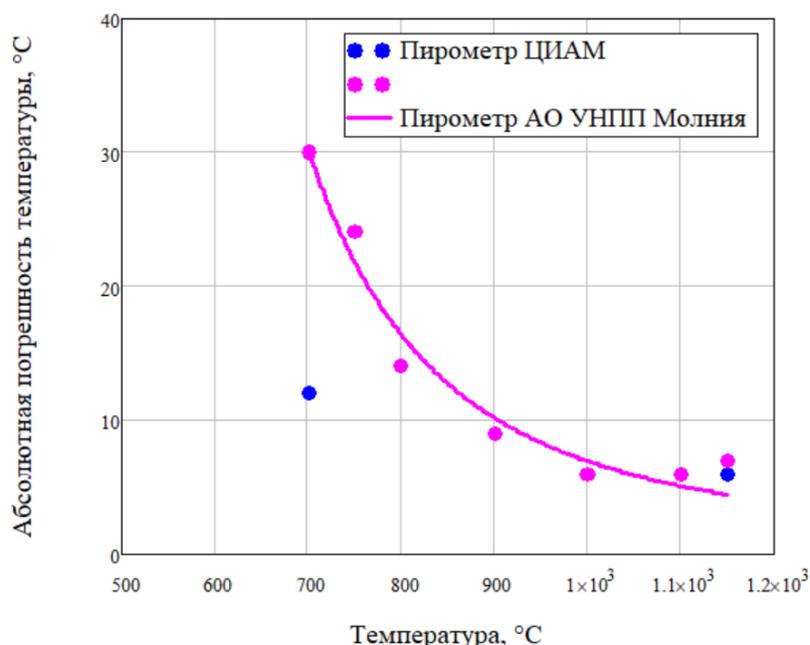


Рис. 3. Инструментальные погрешности ПТЛ разработки УНПП «Молния» и ЦИАМ в зависимости от измеряемой температуры

На рис. 4 представлены графики инструментальной погрешности ПТЛ на основе метода ПСО в зависимости от измеряемой температуры. Эти графики получены расчётным путём, исходя из параметров ПСО, аналогичных тем, которые имеют яркостные пирометры ОПП-94 разработки Уфимского НПП «Молния» и ЦИАМ, содержащие фотопреобразователи с Si-ФД. Диаметр линзы датчика ПТЛ – 9 мм; расстояние от датчика ПТЛ до РЛ – 100 мм; диаметр пятна визирования на РЛ – 4 мм.

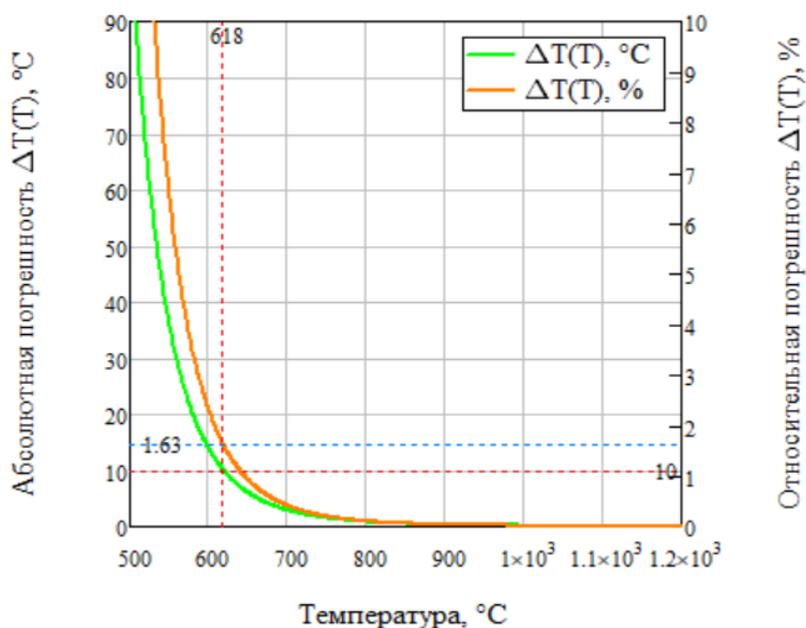


Рис. 4. Зависимость инструментальной погрешности ПТЛ на основе ПСО: Si-PIN-ФД/InGaAs-PIN-ФД от измеряемой температуры

Фотопреобразователь ПСО имеет 2 канала: $0,7 < \lambda_1 < 1,1$ мкм и $1,5 < \lambda_2 < 1,7$ мкм, которые содержат соответственно Si-PIN-ФД и InGaAs-PIN-ФД с размерами чувствительного элемента диаметром 1мм. Для разделения спектральных каналов используется дихроическое зеркало. Для выделения 2-го спектрального канала λ_2 используется интерференционный фильтр, блокирующий излучение $\lambda_2 < 1,5$ мкм.

Как следует из рис. 3-4, для инструментальной погрешности ± 30 °С, ПТЛ на основе ПСО имеет низкотемпературную границу диапазона измерений примерно 560 °С. С другой стороны, ОПП-94 имеет такую же инструментальную погрешность при температуре 700 °С. Следовательно, для допускаемой инструментальной погрешности ± 30 °С низкотемпературная граница диапазона измерений ПТЛ на основе ПСО на 140 °С меньше по сравнению с ОПП-94.

По сравнению с ПТЛ ЦИАМ, для которого низкотемпературная граница составляет 700 °С при допускаемой инструментальной погрешности ± 12 °С, для ПТЛ на основе ПСО указанная погрешность соответствует температуре 610 °С, то есть низкотемпературная граница диапазона измерений для него на 90 °С меньше, чем для ПТЛ ЦИАМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определены основные направления совершенствования конструкции ПТЛ для расширения его диапазона измерений в низкотемпературную область. Проведена оценка погрешности измерения ПТЛ на основе ПСО. Наиболее перспективным является использование бихроматического ПТЛ спектрального отношения.

Светопропускание кварцевого оптического волокна позволяет использовать 3 спектральных окна прозрачности ПС в проточной части ГТД: $0,7 < \lambda_1 < 1,1$ мкм; $1,5 < \lambda_2 < 1,7$ мкм; $2,1 < \lambda_3 < 2,3$ мкм.

В исследованном бихроматическом ПСО использованы Si-PIN-ФД и InGaAs-PIN-ФД в спектральных каналах λ_1 и λ_2 . При замене Si-PIN-ФД на Si-ЛФД соотношение сигнал/шум улучшается и диапазон измерений расширяется в сторону низких температур.

Дальнейшее улучшение соотношения сигнал/шум и расширение диапазона измеряемых температур возможно при использовании спектральных каналов λ_2 и λ_3 , когда во 2-м канале применяется InGaAs-ЛФД стандартной спектральной чувствительности, а в 3-м канале InGaAs-PIN-ФД с диапазоном спектральной чувствительности, расширенным до 2,5 мкм.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

АЧТ – абсолютно черное тело;
ГТД – газотурбинный двигатель;
ЛФД – лавинный фотодиод;
ПТЛ – пирометр турбинный лопаток;
ПС – продукты сгорания;
ПСО – пирометр спектрального отношения;
РЛ – рабочая лопатка;
СВ – световод;
ТВД – турбина высокого давления;
ТИ – трансимпеданс;
ТИУ – трансимпедансный усилитель;
ФД – фотодиод;
ФЭУ – фотоэлектронный умножитель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Поскачей А.А., Пашов Б.М., Ганзбург М.Ф.** Контроль температуры рабочих лопаток газотурбинного двигателя // Наука и технологии в промышленности. 2001-2002. №4-1. С. 22-27.
2. **Патент США.** Pub. No.: US 2012/0170611 A1, Pub Date: Jul. 5, 2012.
3. **Александров С.Е., Гаврилов Г.А., Сотникова Г.Ю., Тер-Мартиросян А.Л.** Система контроля температуры рабочего торца оптоволокна лазерных модулей с

волоконным выводом излучения для медицинской аппаратуры // Физика и техника полупроводников. 2014. Т. 48. № 1. С. 135-141.

4. **Свидетельство** об утверждении типа средств измерений 32.001.А № 38823 от 14 февраля 2012 г.
5. **Бородако В.В., Бухштаб П.А., Минеев Б.И., Романов В.Б., Сахаров В.Б.** Многоканальный оптический пирометр и его апробация при стендовых испытаниях газогенераторов // Мир измерений. 2012. №4. С. 54-57.

Ivanov E.S., Flanden V.S.

*National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: tron_line@list.ru*

INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF EXTENDING THE MEASURING RANGE OF THE TURBINE BLADE PYROMETER TOWARDS LOW TEMPERATURES

ABSTRACT

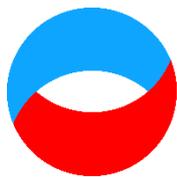
An increase in the temperature of turbine blades in gas turbine engines (GTE) to 1200 °C or more reduces their strength and reduces their service life. To prevent them from overheating, optical turbine blade pyrometers with silicon PIN photodiodes (PD) are used to control the temperature of the RF. They have a low instrumental error of $\pm 0.5-1.0\%$ and are the optimal solution at high temperatures of 900 °C or more.

In some cases, information is required on the thermal condition of RF in the entire range of operating modes, including at temperatures from 500 °C, when the intensity of their radiation is much lower than at 1200 °C. At the same time, the PTL signal with silicon FDs is significantly smaller. As a result, the signal-to-noise ratio deteriorates and the temperature measurement error increases.

One of the ways to expand the measurement range is to shift the PTL sensitivity spectrum to the long-wavelength region, where the spectral density of the energy brightness of the RF radiation increases, resulting in an improved signal-to-noise ratio. However, it requires the use of optical fibers (CB) and FDs, for a longer wavelength range of the spectrum compared to quartz CB and silicon FDS.

Another way is to use photodetectors with internal amplification of the photocurrent due to the avalanche effect. This is a promising solution when using silicon avalanche PD and InGaAs-PIN-PD together with quartz CB as part of a bichromatic PTL spectral ratio.

PYROMETER, TEMPERATURE, TURBINE BLADES, MEASURING RANGE, LONG WAVELENGTH RANGE, PHOTODIODE, NOISE, OPTICAL FIBER



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 535-92

Нестеров Г.В.^{1,2}, Золотухина А.А.^{1,2}, Фомин Дм.С.^{2,3}, Фомин Д.С.^{2,3}

¹ Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Россия,
117342, Москва, ул. Бутлерова, д. 15, E-mail: pr@ntcup.ru

² Общество с ограниченной ответственностью «Предуралье», Россия,
614532, Пермский край, Пермский муниципальный округ,
с. Лобаново, ул. Культуры, д.12, оф. 1.

³ «Пермский НИИСХ» - филиал Пермского федерального исследовательского центра
УрО РАН, Россия,
614532, Пермский край, Пермский муниципальный округ, с. Лобаново, ул. Культуры, д.12, E-
mail: pniish@rambler.ru

**ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ПОЧВЕ НА ОСНОВЕ
СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОТРАЖЕНИЯ**

АННОТАЦИЯ

Спектроскопия отражения является основным методом мониторинга в точном земледелии, позволяя осуществлять дистанционное зондирование больших территорий с использованием спутников или беспилотных летательных аппаратов. Мультиспектральные камеры, несмотря на ограниченное количество спектральных каналов по сравнению с гиперспектральными, предпочтительны благодаря одномоментному захвату изображений, что позволяет эффективно рассчитывать спектральные индексы, такие как NDVI и NDWI. Эти индексы, основанные на контрастных изменениях в спектре отражения, используются для мониторинга состояния растений и оценки свойств почвы, включая содержание органического вещества. Органическое вещество в почве отвечает за структуру, удержание влаги, газообмен и плодородие. Его деградация может привести к снижению урожайности и увеличению выбросов углекислого газа. Целью исследования является изучение возможности спектральных индексов, рассчитанных в диапазоне 400–1700 нм, для прогнозирования содержания органического вещества в почве и определение наиболее информативных длин волн.

ТОЧНОЕ ЗЕМЛЕДЕЛИЕ, СПЕКТРОСКОПИЯ ОТРАЖЕНИЯ, СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИНДЕКСЫ, ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО, ПОЧВА

ВВЕДЕНИЕ

Спектроскопия отражения представляет собой перспективный метод для дистанционного мониторинга сельскохозяйственных угодий, используемый в точном земледелии [1]. Основным преимуществом является неинвазивность и возможность мониторинга больших площадей с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), на борту которых размещаются мультиспектральные камеры [2]. Мультиспектральные камеры предназначены для одновременной съемки в нескольких спектральных диапазонах, благодаря чему можно рассчитывать спектральные индексы и оценивать состояние растений [3]. Спектральные индексы, такие как нормализованный разностный вегетационный индекс

(NDVI), широко применяются более 50 лет для оценки состояния растений [4,5]. Индекс NDVI приобрел популярность благодаря своей нормализованной формуле расчета, которая выражается как отношение разности отражений в ближнем инфракрасном и красном диапазонах к их сумме. Данное сочетание получило большой отклик, так как нормализация делает индекс независимым от вариаций чувствительности сенсоров и условий освещения, обеспечивая стабильность при сравнении данных с разных платформ дистанционного зондирования. Кроме того, существуют индексы, ориентированные на водный баланс и параметры почвы, включая содержание органического вещества [6]. Органическое вещество отвечает за поддержание плодородия почвы, ее структуры, водоудерживающей способности и газообмена. Его деградация снижает урожайность и увеличивает выбросы CO₂. Точное определение содержания органического вещества помогает в принятии оперативных агротехнических решений. Целью исследования является оценка возможностей спектральных индексов в диапазоне от 400 до 1700 нм для прогнозирования содержания органического вещества в почве и определение оптимальных спектральных каналов для мультиспектральных систем.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Полевые работы проводились в 2022 году на опытном агрополигоне «Пермского НИИСХ» - филиала ПФИЦ УрО РАН в зоне дерново-подзолистых тяжелосуглинистых почв. Образцы почвы отбирались с глубины 0-20 см методом «конверта». В лабораторных условиях образцы высушивались до воздушно-сухого состояния, очищались от включений, измельчались и просеивались до фракции менее 1 мм. Содержание органического вещества определялось в аккредитованной лаборатории ФГБНУ «ВНИИ агрохимии».

Спектральные измерения проводились в диапазоне от 400 до 1700 нм с использованием спектрометров OceanOptics. Источником излучения служила галогенная лампа Dedolight DLH4 (150 Вт), установленная под углом 45° к нормали поверхности образца. Отраженный сигнал регистрировался спектрометрами, волоконные выходы которых были расположены перпендикулярно к поверхности образца, помещенного в чашку Петри с выровненной поверхностью. Калибровка проводилась после каждого измерения с использованием эталонной белой пластины.

Цифровая обработка спектров включала медианную фильтрацию для устранения шумов и нормализацию на эталонный спектр для исключения влияния источника излучения и оптического тракта. Спектральные индексы (*SI*) рассчитывались по формуле

$$SI = \frac{R_{\lambda_1} - R_{\lambda_2}}{R_{\lambda_1} + R_{\lambda_2}}, \quad (1)$$

где R_{λ_1} и R_{λ_2} – коэффициенты отражения на длинах волн λ_1 и λ_2 .

Для каждой пары длин волн строилась линейная регрессионная модель, связывающая значение индекса с содержанием органического вещества. Точность моделей оценивалась по коэффициенту детерминации (R^2), среднеквадратичной ошибке (RMSE) и относительной ошибке (RE).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Спектральная съемка 15 почвенных образцов была проведена в диапазоне 400-1700 нм, охватывающем видимую и ближнюю инфракрасную области спектра. Значения спектральных индексов и лабораторно определенное содержание органического вещества использовались для построения регрессионных моделей. Анализ регрессионных моделей и их коэффициентов детерминации выявил области спектра, наиболее чувствительные к содержанию органического вещества. Максимальная корреляция была достигнута для комбинации длин

волн 423 нм и 1534 нм. Регрессионная модель для спектрального индекса, использующего эти длины волн, представлена на рис. 1.

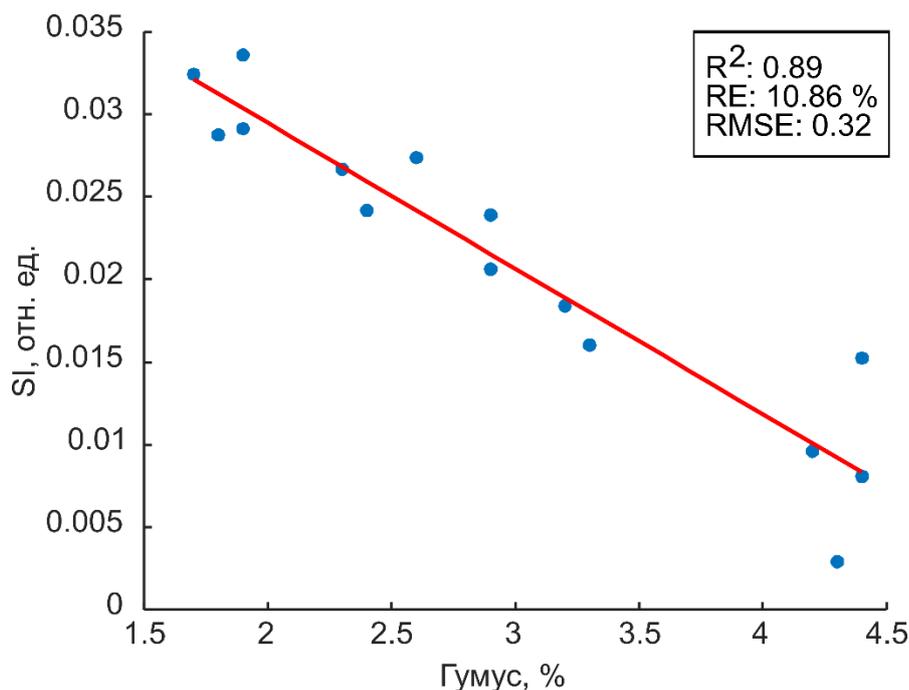


Рис. 1. Регрессионная модель для наиболее коррелирующих длин волн

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования продемонстрирована возможность использования спектральных индексов для количественной оценки содержания органического вещества в почве. Однако лабораторные условия (просушенные и выровненные образцы) минимизируют влияние текстуры, влажности других факторов, что ограничивает переносимость моделей на полевые условия. Для применения метода в дистанционном зондировании с использованием БПЛА необходимо учитывать неоднородность поверхности, наличие растительности, тени и вариации влажности.

Работа выполнена при поддержке субсидии, предоставляемой Министерством образования и науки Пермского края для реализации научного проекта «Разработка методических, аппаратных и программных средств дистанционного мультиспектрального мониторинга сельскохозяйственных угодий» международной исследовательской группой (МИГ) ученых, учредителями которых являются образовательные организации высшего образования и (или) научные организации Пермского края на 2024 г., согласно Приказу Министерства образования и науки от 29.12.2023 №26-01-06-1327 «Об утверждении списка победителей конкурса по отбору научных проектов для предоставления субсидий в 2024 году».

Результаты работы получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН [<http://ckp.ntcup.ru>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Gong Z. et al.** Satellite remote sensing of vegetation phenology: progress, challenges, and opportunities // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2024. Vol. 217. Pp. 149-164.

2. **Sharma H., Sidhu H., Bhowmik A.** Remote sensing using unmanned aerial vehicles for water stress detection: a review focusing on specialty crops // *Drones*. 2025. Vol. 9. № 4. P. 241.
3. **Huang S. et al.** A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing // *J. For. Res.* 2021. Vol. 32. № 1. Pp. 1-6.
4. **Rouse Jr J.W. et al.** Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. Technical report. Remote sensing center college station, Texas, USA, 1974. 87 p.
5. **Qiao L. et al.** UAV-based chlorophyll content estimation by evaluating vegetation index responses under different crop coverages // *Comput. Electron. Agric.* 2022. Vol. 196. P. 106775.
6. **Biney J.K.M. et al.** Exploring the suitability of UAS-based multispectral images for estimating soil organic carbon: comparison with proximal soil sensing and spaceborne imagery // *Remote Sens.* 2021. Vol. 13. № 2. P. 308.

Nesterov G.V.^{1,2}, Zolotukhina A.A.^{1,2}, Fomin Dm.S.^{2,3}, Fomin D.S.^{2,3}

¹*Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Russia,*

117342, Moscow, Butlerova st. 15, E-mail: np@ntcup.ru

²*PREDURALIE Ltd, Russia,*

614532, Perm Region, Perm municipal district, Lobanovo, Kultury st. 12, Room 1.

³*Perm Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia,*

614532, Perm Region, Perm municipal district, Lobanovo, Kultury st. 12, Room 1,

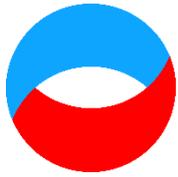
E-mail: psc@permsc.ru

ASSESSMENT OF SOIL ORGANIC MATTER CONTENT USING REFLECTANCE SPECTROSCOPY

ABSTRACT

Reflectance spectroscopy is a key method for monitoring in precision agriculture, enabling remote sensing of large areas using satellites or unmanned aerial vehicles. Multispectral cameras, despite having a limited number of spectral channels compared to hyperspectral ones, are preferred due to their ability to capture images simultaneously, facilitating the efficient calculation of spectral indices such as NDVI and NDWI. These indices, based on contrasting changes in the reflectance spectrum, are used to monitor plant health and assess soil properties, including organic matter content. Soil organic matter is critical for maintaining soil health, influencing its structure, fertility, water retention, and gas exchange. Its degradation can lead to reduced crop yields and increased carbon dioxide emissions. The aim of this study is to investigate the potential of spectral indices, calculated within the 400–1700 nm range, for predicting soil organic matter content and to identify the most informative wavelengths.

PRECISION AGRICULTURE, REFLECTANCE SPECTROSCOPY, SPECTRAL INDICES, ORGANIC MATTER, SOIL



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 681.785.66

Гуревич И.Д., Печинская О.В.

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: GurevichID@mpei.ru*

**КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ, ДАВАЕМОГО
ОБЪЕКТИВАМИ**

АННОТАЦИЯ

Для решения современных измерительных задач оптическими методами требуются оптические системы высокого качества. В связи с этим, закономерно, что с повышением требований к качеству используемых оптических систем, всё острее становится потребность в современных способах и методах контроля качества изображения. Наиболее востребованным направлением модернизации методов контроля качества изображения, даваемого объективом, является реализация классических способов измерений с использованием компьютерных технологий. Одним из примеров такой модернизации является метод компьютерной изофотометрии. В ходе исследования на оптической скамье ОСК-2 методом компьютерной изофотометрии были получены изофотограммы, даваемые фотографическими и проекционными объективами.

В работе представлен алгоритм обработки полученных изофотограмм, позволяющий оценивать качество изображения, даваемое исследуемыми объективами, по таким критериям как функция рассеяния точки (ФРТ), функция передачи модуляции (ФПМ), размер кружка рассеяния, предельно разрешаемая пространственная частота, доля энергии в кружке рассеяния. Представлены результаты измерения указанных параметров и характеристик в монохроматическом и интегральном свете для нескольких объективов. Исследована зависимость получаемых результатов от положения рабочей плоскости объектива микроскопа в окрестностях фокальной плоскости исследуемого объектива, а также от применяемой при обработке изображений фильтрации.

**КОМПЬЮТЕРНАЯ ИЗОФОТОМЕТРИЯ, ФУНКЦИЯ РАССЕЯНИЯ ТОЧКИ, ОЦЕНКА
КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ, ФУНКЦИЯ ПЕРЕДАЧИ МОДУЛЯЦИИ**

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время оптико-электронные системы становятся всё более комплексными. Современное приборостроение, различные виды промышленности, космическая и медицинская сферы – применение оптико-электронных систем затрагивает практически все направления науки и техники. В связи с этим, очевидно, неизменно растёт потребность в современных системах для оценки качества составных частей оптико-электронных систем. В том числе, качества изображения, объективами, входящими в состав оптико-электронных систем.

Развитие направлений, в которых используются оптические системы, напрямую зависит от качества получаемых изделий, ведь для решения современных комплексных задач требуются оптические системы высокого качества, подходящие по многочисленным

критериям. В связи с этим, закономерно, что с повышением требований к качеству используемых оптических систем, всё острее становится потребность в современных способах и методах контроля качества. Вопреки этому, развитие направления существенно замедленно, и не способно полностью удовлетворить запросы технологичных производств.

Наиболее передовым вектором усовершенствования методов контроля является реализация устаревших способов с использованием компьютерных технологий [1]. Такие методы основываются на достижениях компьютеризации, развитии средств видеофиксации, обработки изображений [2]. Именно подобное актуальное решение использовано в данной работе.

Метод компьютерной изофотометрии, используемый в данной работе, является одним из удачных решений в данной области. Его применение позволяет полноценно и всесторонне исследовать качество изображения, даваемого объективами [3]. В данной работе представлена одна из реализаций метода, а также приведены полученные результаты для различных условий измерения.

Фотоснимки выполняются на матричную камеру, соединённую с компьютером. По полученным снимкам строится изофотограмма [4-5], отображающая распределение освещённости в пятне рассеяния. За счёт использования в установке современной камеры, с большим диапазоном времени регистрации, можно обеспечить изофотометрию освещённости до нескольких порядков.

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА КОМПЬЮТЕРНОЙ ИЗОФОТОМЕТРИИ

Схема и методика измерений

В данной работе был использован метод компьютерной изофотометрии для определения качества изображения, даваемого фотообъективам по ФРТ. Для этого была модернизирована оптическая скамья ОСК-2, схема которой представлена на рис. 1.

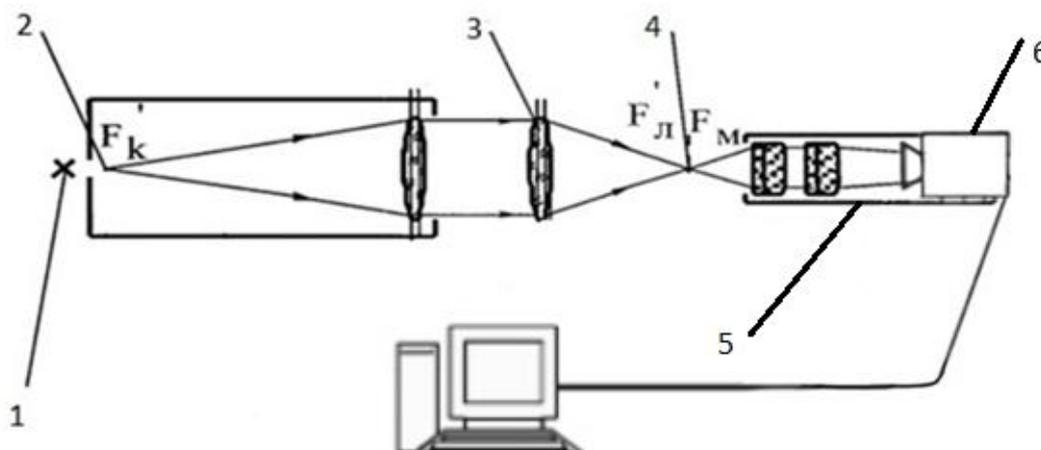


Рис. 1. Схема измерений методом компьютерной изофотометрии (1 – осветитель, 2 – тест-объект, 3 – испытуемый объектив, 4 – изображение, 5 – микроскоп, 6 – камера)

Осветитель 1 подсвечивает установленный в туннель тест-объект 2. Затем, после прохождения коллиматора, параллельный пучок попадает на испытуемый объектив 3. Объектив строит изображение в плоскости 4, которое регистрируется с помощью микроскопа 5, но вместо окуляра на тубусе микроскопа закрепляется камера 6. Тубус микроскопа закреплён на двух механизированных подвижках, что позволяет с того же компьютера с

высокой точностью регулировать положение по двум направлениям – вдоль оптической оси и в поперечном направлении. Перед подключением камеры осуществляется юстировка системы: вместо точечного источника закрепляется протяженный объект, например, мира из состава оптической скамьи, и регулируя положение микроскопа по трем координатным осям, а также испытуемого объектива, добиваются наиболее чёткой картины. Также для выбранного микрообъектива предварительно осуществляется регистрация изображения объект-микрометра проходящего света (ОМП) для определения цены деления одного пикселя. Размер определяется с помощью специального алгоритма, вычисляющего сперва угол наклона изображения, затем выполняется поворот для достижения горизонтального положения линий. В дальнейшем, строится профиль яркости, отображающий отдельные штрихи, и рассчитывается количество пикселей между ними. Последним шагом известное расстояние между штрихами делится на количество пикселей. Таким образом вычисляется коэффициент, загружающийся в дальнейшем в программу для точного пересчёта числа пикселей на изображении в микрометры.

После выполнения юстировки в качестве тест-объекта закрепляется точечная диафрагма размером 16 мкм и производится регистрация серии изображений с последовательным увеличением времени экспонирования. В дальнейшем эти изображения обрабатываются в программе для получения итогового результата.

Для того, чтобы не допустить виньетирования испытуемой системы входным зрачком объектива микроскопа, необходимо, чтобы апертура исследуемого объектива была меньше или равна апертуре используемого объектива микроскопа. В связи с этим, для исследуемых объективов был произведен расчёт апертуры и произведено сравнение с апертурой микрообъектива. Объектив МИР 1В имеет максимальную апертуру 0,18, объектив И50У имеет максимальную апертуру 0,143. В данном исследовании использовался объектив с десятикратным увеличением и апертурой 0,3, что соответствует установленному соотношению и подходит для выполнения регистрации изображений.

Алгоритм обработки

Для регистрации и обработки изображений, полученных методом изофотометрии было реализовано программное обеспечение для удобной регистрации изображений, а также их многоступенчатой настраиваемой обработки (рис. 2). Методика построения функции рассеяния точки (ФРТ) основана на методе компьютерной изофотометрии с использованием серии изображений, полученных при различном времени экспонирования. На первом этапе осуществляется автоматическая съёмка изображений точечного источника с шагом по выдержке, что обеспечивает регистрацию как центрального максимума, так и периферийных областей дифракционного пятна. Далее каждое изображение проходит медианную фильтрацию и нормализацию, после чего в центральной области по положению максимума выделяется квадратный фрагмент фиксированного размера. Для каждого изображения рассчитывается маска — бинарная матрица, определяющая пиксели, удовлетворяющие заданному пользователем критерию и по этой маске суммируются значения в итоговую изофотограмму. Полученная изофотограмма центрируется, нормируется, и по ней рассчитывается двумерное распределение ФРТ. После этого строится ряд зависимостей: радиальное распределение энергии, доля энергии в кружке рассеяния, функция передачи модуляции (ФПМ) по профилю через центр.

Методика построения ФРТ реализована с учётом гибкой настройки ключевых параметров обработки, что позволяет адаптировать алгоритм под объективы различного качества и условий съёмки. После получения серии изображений при разных выдержках, каждое изображение может быть обработано медианной фильтрацией с выбираемым размером ядра (от 0 до 9 пикселей), что позволяет подавить шумы без значительного искажения структуры пятна. На следующем этапе в центральной области каждого изображения выделяется фрагмент фиксированного размера, позволяющий исключить края и

сосредоточиться на основной энергетической области. Для выделения релевантных пикселей используется маска, порог которой задаётся в одном из двух режимов: в абсолютном значении яркости пикселя, либо в проценте от максимума, что удобно при работе с изображениями, различающимися уровнем сигнала. Основной алгоритм может работать в одном из трёх режимов: классическом, логарифмическом и гибридном. В классическом режиме происходит суммирование интенсивностей, удовлетворяющих условию близости к эталонной яркости, с нормировкой по экспозиции, а максимальные значения используются для построения ФРТ. Этот режим подходит для равномерных и слабо зашумлённых распределений. Логарифмический режим работает только с положительными значениями, и весь вклад вносится в соответствии с экспозицией, без пороговой маски — он особенно полезен при широком диапазоне яркостей и хорошем динамическом диапазоне камеры. Гибридный режим сочетает в себе элементы фильтрации по порогу и логарифмического масштабирования, обеспечивая устойчивость к шумам и корректное суммирование информации от слабых и ярких участков. Дополнительно доступна опция вычитания фона — усреднённой периферийной яркости — которая позволяет скорректировать неравномерное освещение и избавиться от паразитной засветки. Полученная изофотограмма нормируется, центрируется, и по ней строится ФРТ. Для получения ФПМ к полученной ФРТ применяется двумерное преобразование Фурье. Оценка доли энергии, заключённой в кружке рассеяния, осуществляется также с помощью ФРТ. В каждом пикселе вычисляется расстояние до центра ФРТ, после чего энергия рассчитывается по возрастанию радиуса, формируя интегральную кривую.

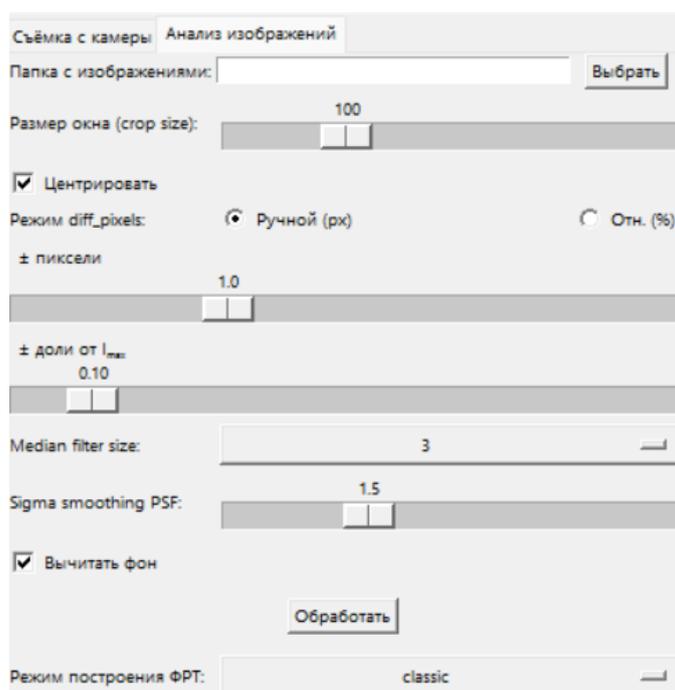


Рис. 2. Интерфейс разработанного и используемого в данной работе ПО

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ПОЛУЧЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В данной работе в качестве исследуемого объектива использовались объективы Индустар 50У-1 3,5/50 и МИР 1В 2,8/37. Для обоих объективов были сняты серии в белом свете и с использованием различных светофильтров. Также для объектива Индустар были произведены серии с изменением положения микроскопа относительно плоскости наилучшей установки в диапазоне $\pm 0,1$ мм. Полученные распределения представлены на рис. 3-9.

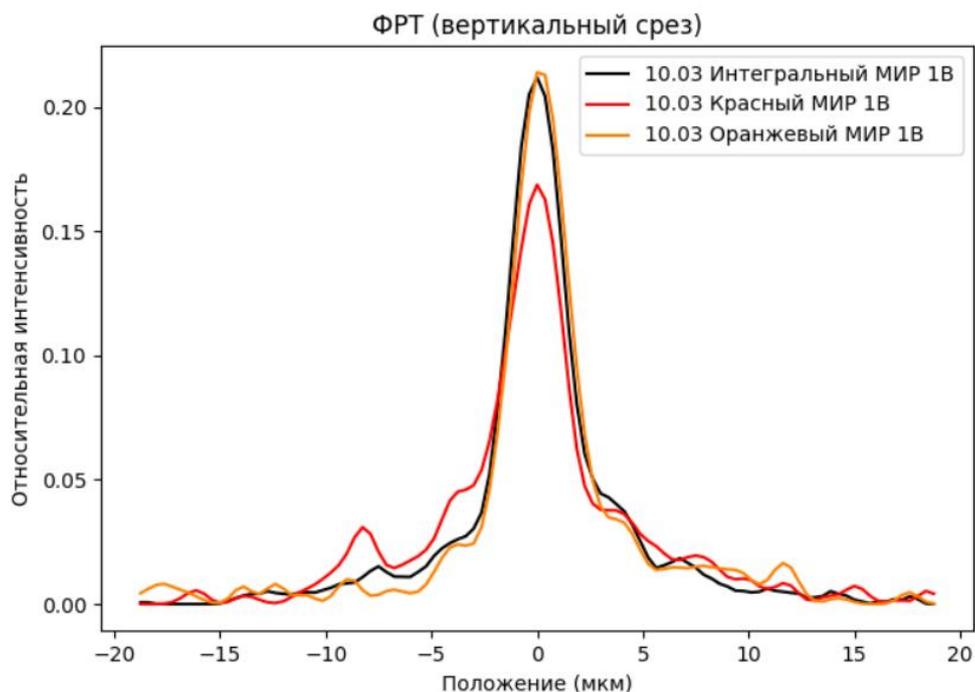


Рис. 3. Сравнение ФРТ объектива МИР-1В в монохроматическом и полихроматическом свете

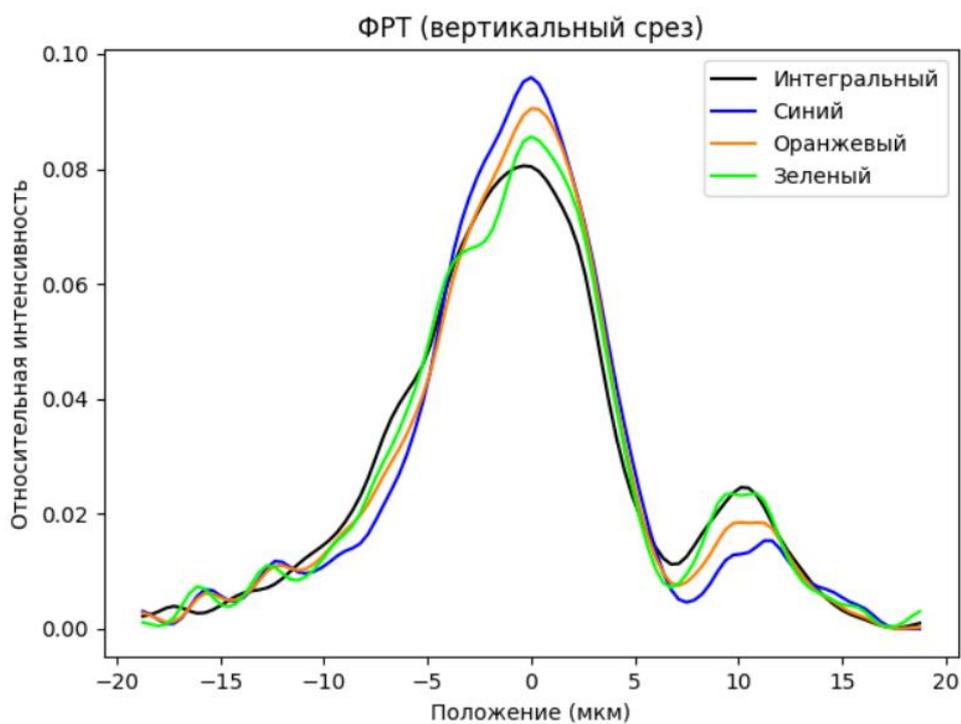


Рис. 4. Сравнение ФРТ объектива И50-У в монохроматическом и полихроматическом свете

Графики, приведённые на рис. 3-4, демонстрируют, что полихроматическое (интегральное) кривые гораздо более сглажены, чем монохроматические. Это хорошо согласуется с теоретическими предположениями относительно сглаженного профиля интегральной ФРТ в связи с усреднением по спектру. Также по данным зависимостям можно сделать вывод, что исследуемые объективы подвержены хроматическим aberrациям на выбранных длинах волн. На рис. 5-6 приведены полученные зависимости МПФ и зависимость распределения энергии в кружке для данных экспериментов.

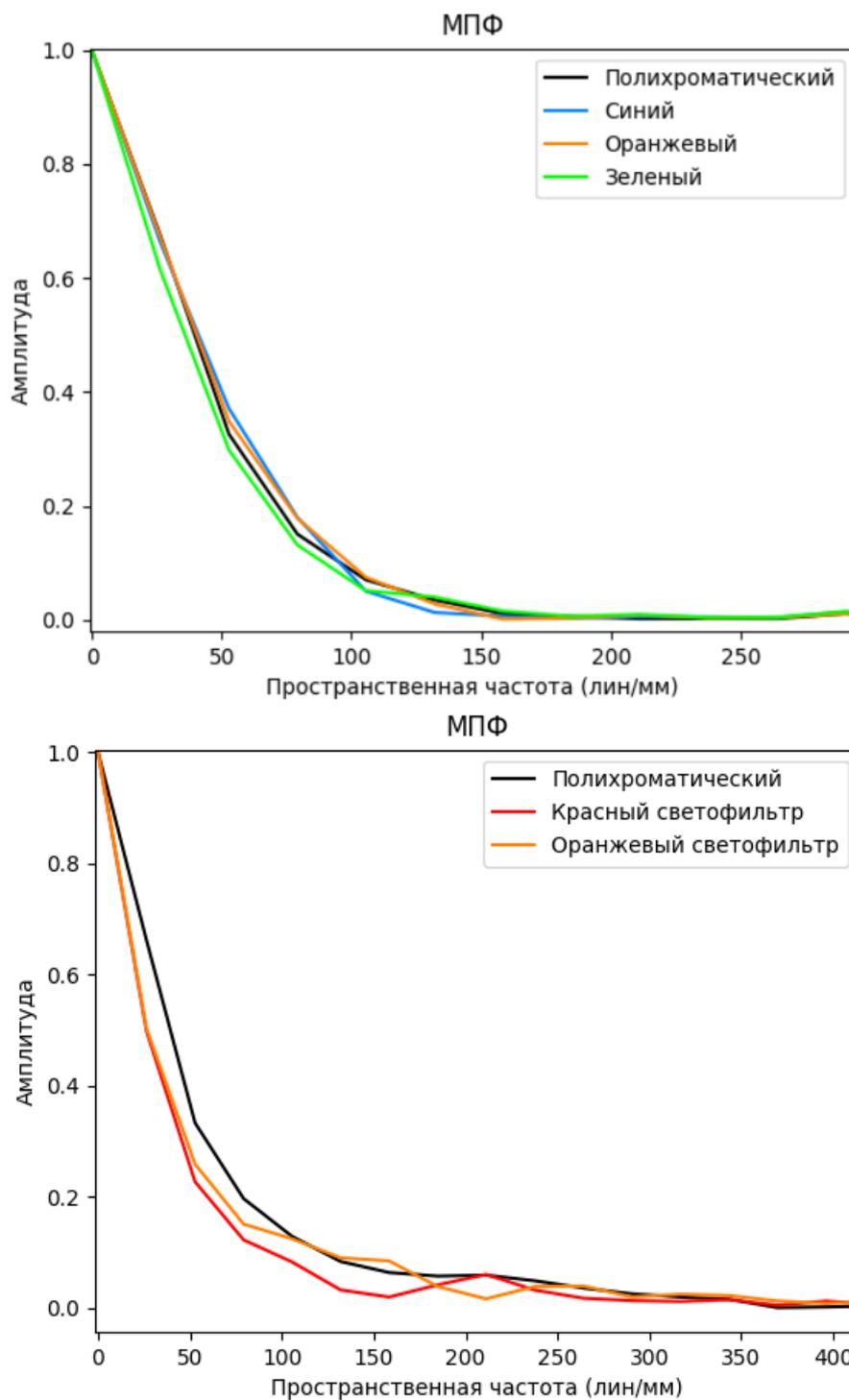


Рис. 5. Сравнение МПФ объектива И50-У (сверху) и объектива МИР 1В (снизу) в монохроматическом и полихроматическом свете

По данным зависимостям можно определить предельную пространственную частоту для объективов при разных длинах волн, а также оценить распределение энергии и размытие кружка рассеяния. Предельную пространственную частоту для объектива И50-У можно оценить в 200 лин/мм, для МИР 1В она равняется 350 лин/мм, что существенно ниже теоретических значений для данных объективов и объясняется aberrациями. Радиус первого тёмного кольца для обоих объективов определяется в районе 5-ти мкм, при расчётных 2-3, что также можно объяснить aberrациями и шумами, влияющими на точность работы алгоритма.

На рис. 7-9 приведены зависимости, полученные для смещения микроскопа относительно плоскости наилучшей установки.

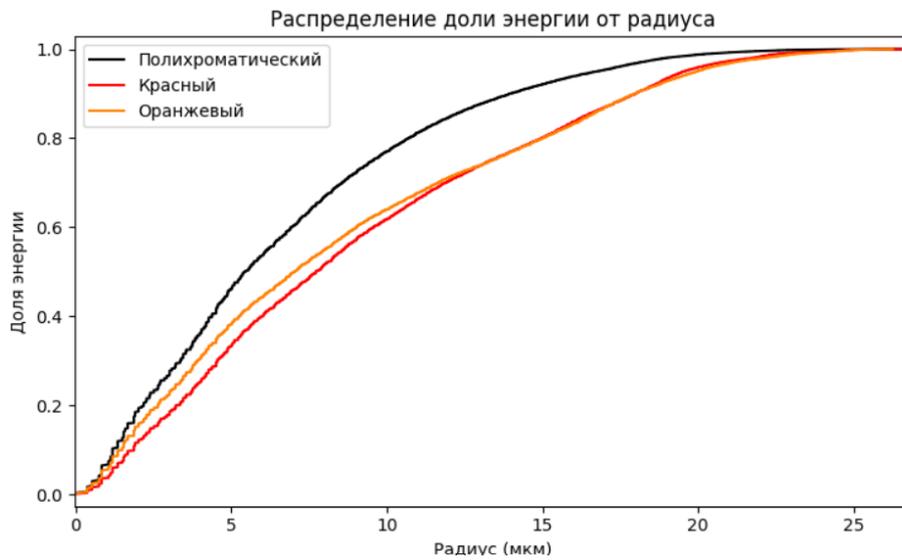
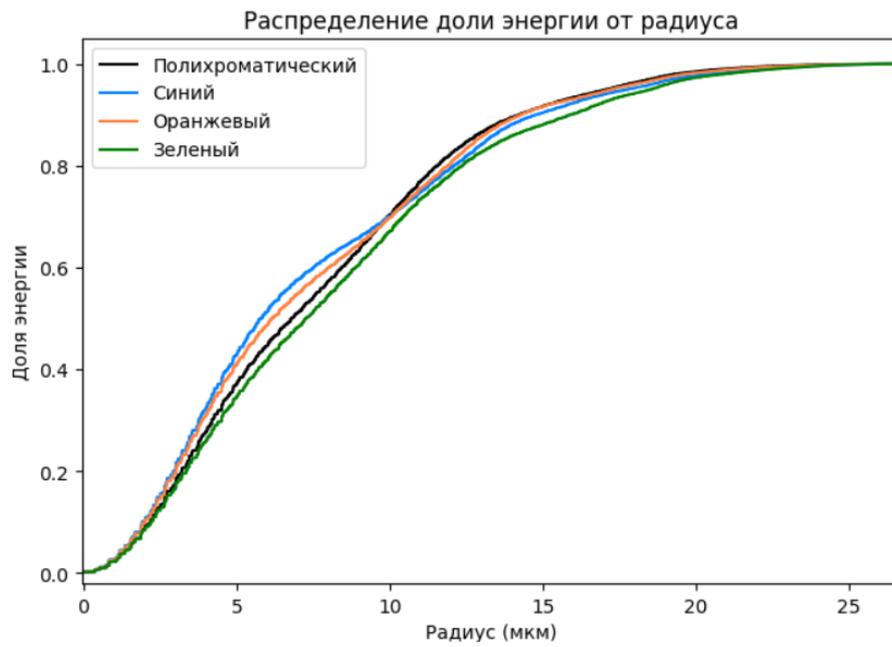


Рис. 6. Сравнение распределения энергии объектива И50-У (сверху) и объектива МИР 1В (снизу) в монохроматическом и полихроматическом свете

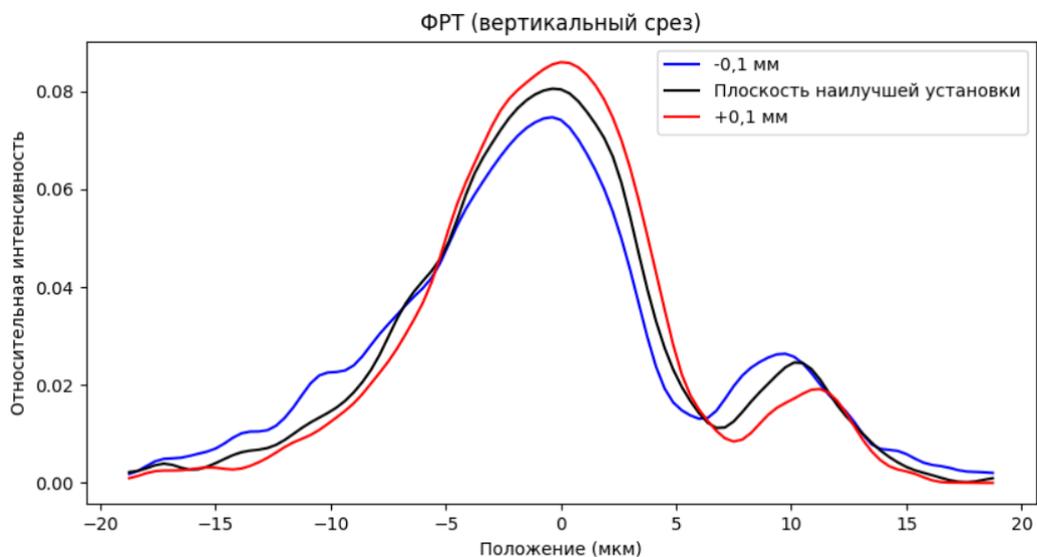


Рис. 7. Сравнение полученной ФРТ для смещения относительно плоскости наилучшей установки

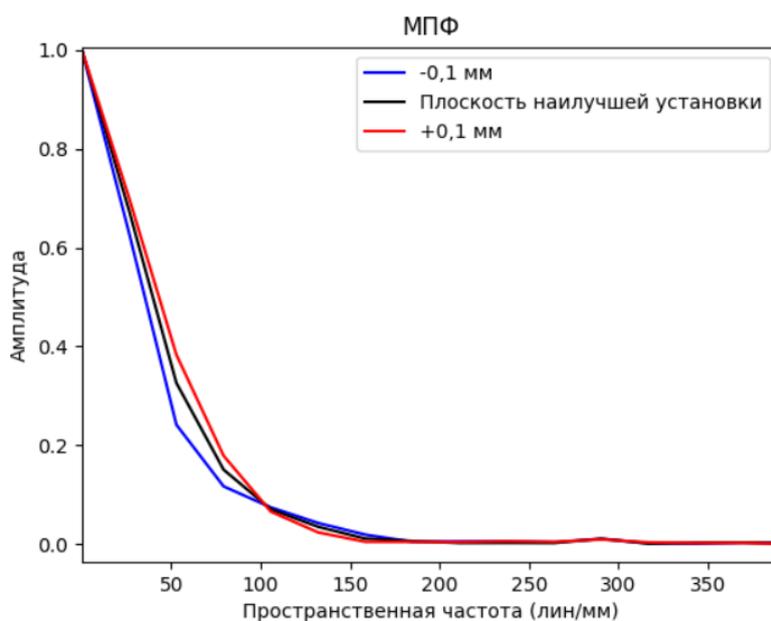


Рис. 8. Сравнение полученной ФПМ для смещения относительно плоскости наилучшей установки

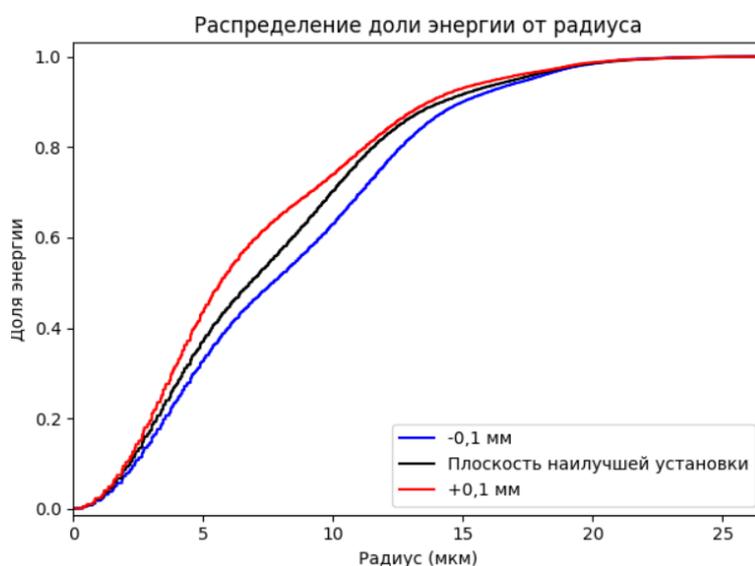


Рис. 9. Сравнение распределения процента энергии для смещения относительно плоскости наилучшей установки

Графики, приведённые на рис. 7-9 демонстрируют, что наилучшими характеристиками обладают зависимости, построенные для +0,1 мм от ПНУ, что говорит о том, что изначальная визуальная оценка была недостоверной. Однако, приняв это, можно судить о существенном снижении качества изображения при сдвиге от ПНУ на примере отклонения – 0,1 мм. В данном случае, вероятно, данное распределение стоит считать отклонением равным -0,2 мм и на всех трёх рисунках заметны значительные ухудшения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен и реализован метод компьютерной изофотометрии на оптической скамье ОСК-2 для количественной оценки качества изображения объективов по таким ключевым критериям, как функция рассеяния точки (ФРТ), функция передачи модуляции (ФПМ), предельная пространственная частота, размер кружка рассеяния и доля энергии, заключённая в нём. Были разработаны алгоритмы автоматизированной съёмки серии кадров при разных выдержках, адаптивной фильтрации, центровки и нормализации изофотограмм, а

также извлечения из них двумерной ФРТ и ФПМ. Были произведены серии измерений нескольких объективов при монохроматическом и полихроматическом освещении на основании анализа которых были сделаны выводы о хроматических особенностях исследуемых объективов. Также были произведены серии со сдвигом плоскости лучшей установки. Исследование влияния смещения рабочей плоскости микроскопа (ПНУ) показало, что исходное “нулевое” положение оказалось не оптимальным: лучшая концентрация энергии и максимальные значения ФПМ на низких частотах достигались при смещении +0,1 мм от первоначального ПНУ. В качестве дальнейшего развития работы можно выделить автоматизацию точной настройки ПНУ на основе оценки качества получаемых зависимостей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кирилловский В.К., Точилина Т.В.** Методы исследования и контроля качества оптических систем: Учеб. пособие. СПб.: НИУ ИТМО, 2012. 100 с.
2. **Точилина Т.В., Кирилловский В.К.** Оптические измерения. Ч. 4. Оценка качества оптического изображения и измерение его характеристик. СПб.: Университет ИТМО, 2018. 86 с.
3. **Ле З.Т.** Разработка и исследование алгоритмического и программного обеспечения для решения задач оценки качества изображения прецизионных оптических систем // Дисс. канд. техн. наук. Санкт-Петербург: ИТМО, 2008. 140 с.
4. **Ле З.Т.** Разработка алгоритмического и программного обеспечения для установки контроля качества изображения объектива // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2006. № 26. С. 221-229.
5. **Ле З.Т., Кирилловский В.К.** Разработка алгоритма и программы для расширения возможностей аппаратуры оценки качества изображения оптических систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2007. № 38. С 122-128.

Gurevich I.D., Pechinskaya O.V.

*National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: GurevichID@mpei.ru*

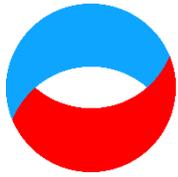
QUANTITATIVE ASSESSMENT OF THE IMAGE QUALITY PROVIDED BY OBJECTIVES

ABSTRACT

Modern optical metrology demands optical systems of the highest quality. Consequently, as requirements on imaging performance become ever more stringent, there is a growing need for advanced methods to evaluate objective lens quality. A key trend in modernizing image-quality testing is to augment classical measurement techniques with computer technology—one example being computer-based isophotometry. In this study, isophotograms produced by photographic and projection objectives were recorded on the OSC-2 optical bench using a digital isophotometric method.

We present an algorithm for processing these isophotograms that quantitatively evaluates objective performance by a set of criteria: the point-spread function (PSF), the modulation-transfer function (MTF), the radius of the scattering circle, the ultimate resolvable spatial frequency, and the fraction of energy enclosed within the scattering circle. Measured values of these parameters are reported both in monochromatic and broadband (polychromatic) illumination for several lenses. We also investigate how the results depend on the microscope's working-plane position relative to the test lens's focal plane, as well as on the choice of image-processing filter.

**COMPUTER ISOHPOTOMETRY, POINT SPREAD FUNCTION, IMAGE QUALITY
ESTIMATION, MODULATION TRANSFER FUNCTION**



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 004.335, 004.891.3

Дюкарев В.С., Скорнякова Н.М.

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: DiukarevVS@mpei.ru*

АНАЛИЗ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ХОПФИЛДА

АННОТАЦИЯ

В работе представлены реализация и анализ математической модели нейронной сети Хопфилда, которая реализует свойство ассоциативной памяти – восстановление по искаженному сигналу ближайшего к нему эталонного. Ассоциативной памятью называют такую память, которая завершает или исправляет образ, но не ассоциирует полученный результат с другими образами. Разработана компьютерная программа, моделирующая работу нейронной сети Хопфилда. Проведена оценка процента правильного определения образов для различных изображений. Исследовано влияние корреляции запоминаемых образов на правильное распознавание изображений. Проанализирована зависимость количества запоминаемых образов от числа нейронов сети и способность восстановления изображений при искажении входного образа. Предложена формула, полученная методом регрессии, для описания емкости памяти нейронной сети. Планируется реализация алгоритма работы нейронной сети Хопфилда при помощи оптического коррелятора и последующее исследование его характеристик и области применения.

**НЕЙРОННЫЕ СЕТИ, СЕТЬ ХОПФИЛДА, АССОЦИАТИВНАЯ ПАМЯТЬ,
РАСПОЗНАВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

ВВЕДЕНИЕ

Одной из задач, решаемых нейронными сетями, является распознавание образов. Нейронная сеть Хопфилда реализует свойство ассоциативной памяти – восстановление по искаженному образу ближайшего к нему эталонному [1]. Физическим аналогом нейронной сети Хопфилда является голографический коррелятор. Оптические системы нашли широкое применение в качестве базовых составляющих систем нейронных сетей. Оптические реализации нейронных сетей могут обеспечить преимущества с точки зрения скорости вычислений и плотности внутренних связей [2]. Оптические корреляторы позволяют реализовать глобальную параллельность вычислений [3]. Оптическая аппаратная реализация нейронных сетей позволяет добиться улучшения характеристик нейронных сетей, таких как быстродействие, энергозатратность и др. Возможность реализации таких интегральных операций как свертка и корреляция оптическими методами позволяет использовать оптические системы в качестве составляющих нейронных сетей.

С помощью компьютерного моделирования становится возможным заранее определить параметры разрабатываемой нейронной сети для будущей реализации физического аналога. Это позволяет исследователям не только оптимизировать архитектуру сети, но и предсказать ее поведение в различных условиях, что значительно сокращает время и ресурсы, необходимые для экспериментальной настройки. Соединение принципов работы нейронных

сетей и голографических корреляторов может привести к появлению новых гибридных моделей, которые объединят преимущества обоих подходов, позволяя улучшить эффективность и производительность в области машинного обучения и обработки данных.

ПРИНЦИП РАБОТЫ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ХОПФИЛДА

Нейронная сеть Хопфилда – полносвязная рекуррентная нейронная сеть. Структурно она состоит из одного слоя, включающего в себя N искусственных нейронов. Количество входных сигналов совпадает с количеством нейронов. Каждый нейрон при помощи обратной связи соединен со всеми остальными нейронами сети (см. рис. 1).

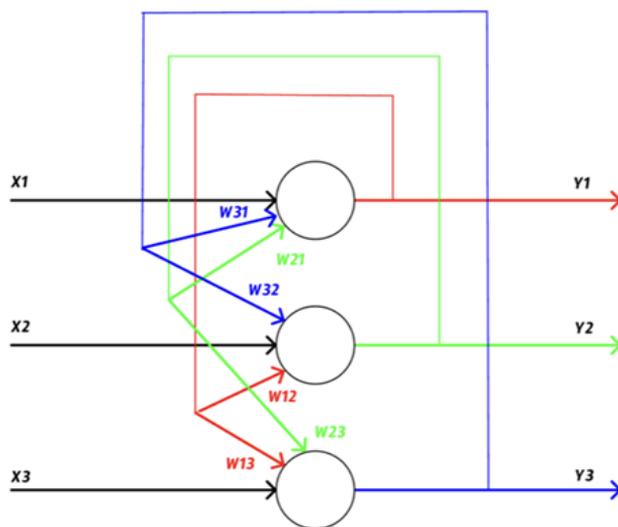


Рис. 1. Структурная схема нейронной сети Хопфилда

Нейроны могут принимать два состояния, в соответствии с активационной функцией sgn .

$$x_i = \begin{cases} 1, \\ -1, \end{cases} \quad (1)$$

где x_i – состояния нейрона.

Для обучения нейронной сети Хопфилда необходимо провести расчет весовых коэффициентов по следующей формуле (в матричном виде)

$$\mathbf{W} = \mathbf{x} \times \mathbf{x}^T, \quad (2)$$

где \mathbf{W} – матрица весовых коэффициентов, \mathbf{x} – входной запоминаемый вектор.

В линейном виде данное выражение можно перезаписать как

$$W_{ij} = \frac{1}{L} \sum_{k=1 \dots m} x_{ik} x_{jk}, \quad (3)$$

где W_{ij} – весовые коэффициенты, L – размерность векторов, m – число запоминаемых изображений, k – номер запоминаемого изображения, x_{ik}, x_{jk} – i -ая (j -ая) компонента запоминаемого k -го вектора.

Для сохранения нескольких входных образов, то для каждого из них вычисляются весовые коэффициенты по формуле (3), полученные матрицы складываются.

Для расчета состояния нейрона в ходе работы сети применяется формула

$$y_j(t + 1) = f(\sum_{i=0}^{n-1} W_{ij}x_i(t)), j = 0, \dots, n - 1, \quad (4)$$

где $y_j(t + 1)$ – промежуточное состояние j -го нейрона, t – номер итерации работы сети, f – активационная функция.

При совпадении выходного вектора с предыдущим состоянием входов нейронной сети можно говорить о достижении устойчивого равновесного состояния, нейронная сеть завершает свою работы и выводит результат работы.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СЕТИ ХОПФИЛДА

Для анализа математической модели нейронной сети Хопфилда была разработана компьютерная программа. Блок-схема алгоритма работы представлена на рис. 2.

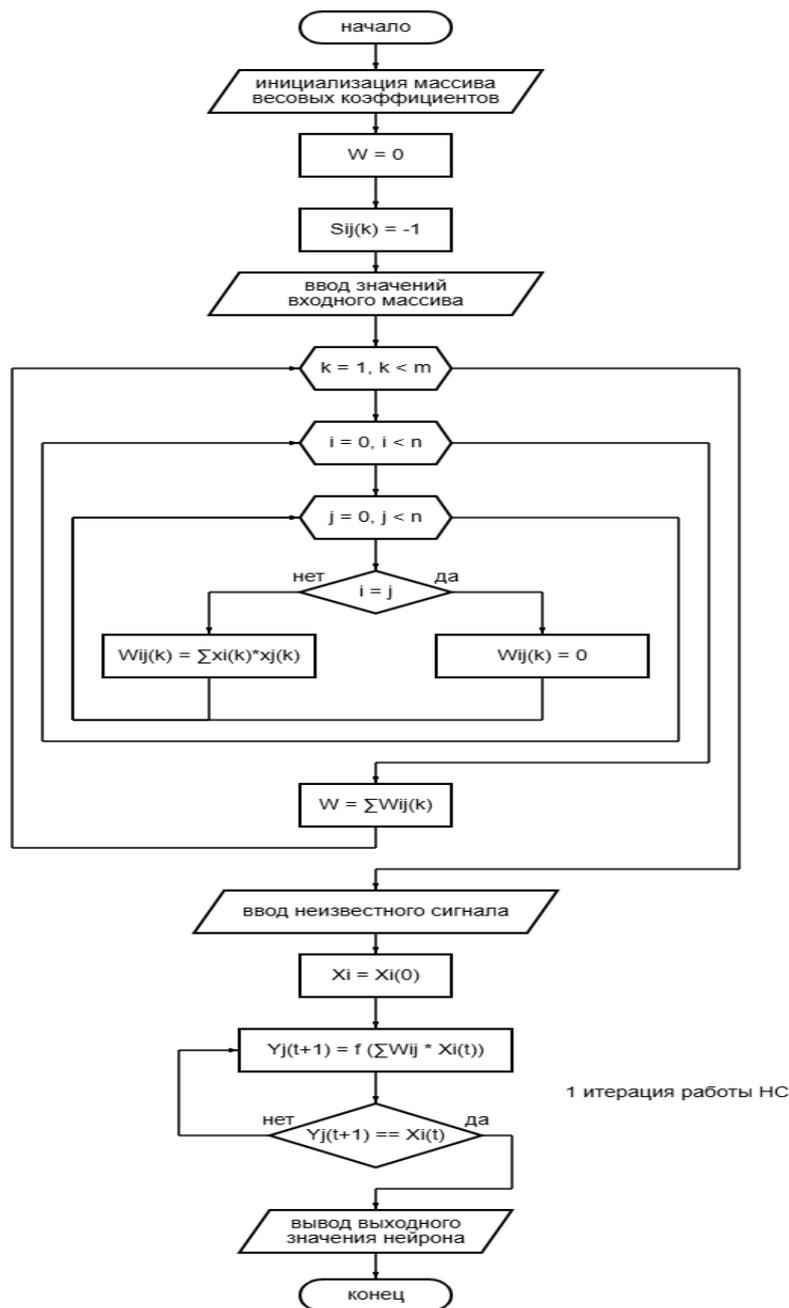


Рис. 2. Блок схема модели нейронной сети Хопфилда

Основными характеристиками данной нейронной сети является емкость памяти – максимальное возможное количество запоминаемых образов M в зависимости от числа нейронов N , и процент правильного определения изображений. В качестве тестовых изображений были использованы буквы латинского алфавита.

Определим процент правильного определения образов для различных изображений при искажении входного образа (см. табл. 1). Анализ был проведен для конфигурации сети из 36 нейронов и 4 запомненных образах.

Табл. 1. Процент правильного распознавания изображения и взаимосвязь с расстоянием Хэмминга

Расстояние Хэмминга	Процент правильного распознавания
0	100
1	100
2	100
5	97
6	89
8	62
10	27

Для анализа были использованы изображения букв: А, В, С и Е. Среднее количество символов для их написания составило 16. При малом отличии от эталонных образов (более 50% исходной информации) процент распознавания изображения был равен более 85%, что говорит о большой восстановительной способности данной модели. Однако, при большем искажении входных сигналов процент распознавания стремительно уменьшился. При расстоянии Хэмминга равном 11 и более на выходе стали появляться несуществующие образы, являющиеся «склейками» частей эталонной выборки изображений.

Другой метрикой, используемой для оценки схожести изображений может служить коэффициент корреляции между изображениями. Для двумерных массивов, которые описывают изображения, формула вычисления коэффициента корреляции выглядит как

$$\text{cor}(A, B) = \frac{\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})(B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{(\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})^2)(\sum_m \sum_n (B_{mn} - \bar{B})^2)}}, \quad (5)$$

где cor – коэффициент корреляции, m и n – размерность изображений, A_{mn} и B_{mn} – элементы изображений, \bar{A} и \bar{B} – средние значения элементов изображений.

Для используемых при анализе изображений букв, коэффициенты корреляции имеют следующие значения

$$\text{cor}(A, B) = 0,1512, \quad (6)$$

$$\text{cor}(A, C) = -0,0125, \quad (7)$$

$$\text{cor}(A, E) = 0,1803, \quad (8)$$

$$\text{cor}(B, C) = 0,1512, \quad (9)$$

$$\text{cor}(B, E) = 0,1468, \quad (10)$$

$$\text{cor}(C, E) = 0,5547. \quad (11)$$

Оценим влияние корреляции между исходными образами на процент правильного распознавания (см. табл. 2).

Табл. 2. Процент правильного распознавания изображения и взаимосвязь с расстоянием Хэмминга

Расстояние Хэмминга	Коэффициент корреляции				
	-0,0125	0,1468	0,1512	0,1803	0,5547
	Процент правильного распознавания				
0	100	100	100	100	100
1	100	100	100	100	100
2	100	100	100	100	100
5	100	98	98	97	90
6	98	90	88	85	82
8	70	64	63	61	53
10	34	29	27	26	21

В табл. 3 представлена зависимость, описывающая значения емкости памяти модели нейронной сети.

Табл. 3. Количество запоминаемых образов и взаимосвязь с количеством нейронов

Количество нейронов N	Количество запоминаемых образов M
25	2
36	4
64	5
100	8

Известны несколько аналитических выражений для оценки максимального количества запоминаемых изображений с помощью сети Хопфилда. В работе [4] предложена следующая формула для вычисления объема памяти

$$M \cong \frac{N}{4 \ln(N)}. \quad (12)$$

В статье [5] в выражении для оценки объема памяти отличается знаменатель

$$M \cong \frac{N}{2 \log_2(N)}. \quad (13)$$

График зависимостей, описываемых формулами (12) и (13) представлен на рис. 3.

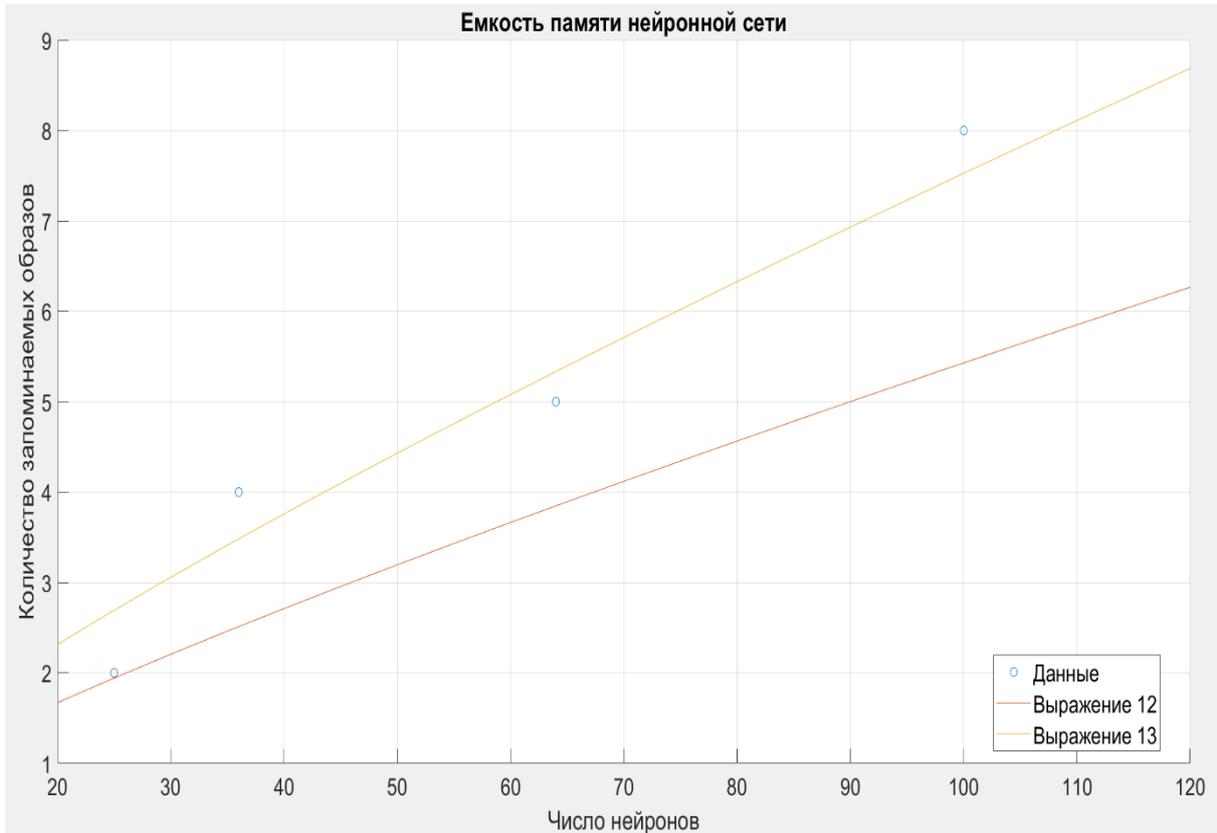


Рис. 3. Зависимость числа запоминаемых изображений от числа нейронов

В соответствии с результатами моделирования можно сделать вывод о том, что оценка по формуле (13) точнее описывает результаты работы программы. Полученные значения количества запоминаемых изображений расположены между значениями, рассчитанными по формулам (12) и (13).

Определим выражение, описывающее емкость нейронной сети, при помощи регрессии. Для малого числа нейронов сети данную зависимость можно представить в виде линейной. Определим коэффициент регрессии β_1 и свободный член β_0 выражения

$$M = \beta_0 + \beta_1 N. \quad (14)$$

Подобранное выражение (15) без свободного члена имеет вид

$$M = 0,082N. \quad (15)$$

Выражение (16), определяющее емкость нейронной сети, со свободным членом имеет вид

$$M = 0,645 + 0,073N. \quad (16)$$

Результаты подбора представлены на рис. 4.

Для оценки качества подбора выражений методом регрессии определим коэффициенты детерминации R^2 по формуле

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \hat{M}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}, \quad (17)$$

где \hat{M} представляет собой расчетные значения M , \bar{M} – среднее значение M . Для выражения 15 коэффициент детерминации равен 0,9359. Для выражения (16) он равен 0,9545, что говорит о том, что последнее выражение, которое включает свободный член β_0 лучше описывает зависимость емкости памяти от количества нейронов сети.

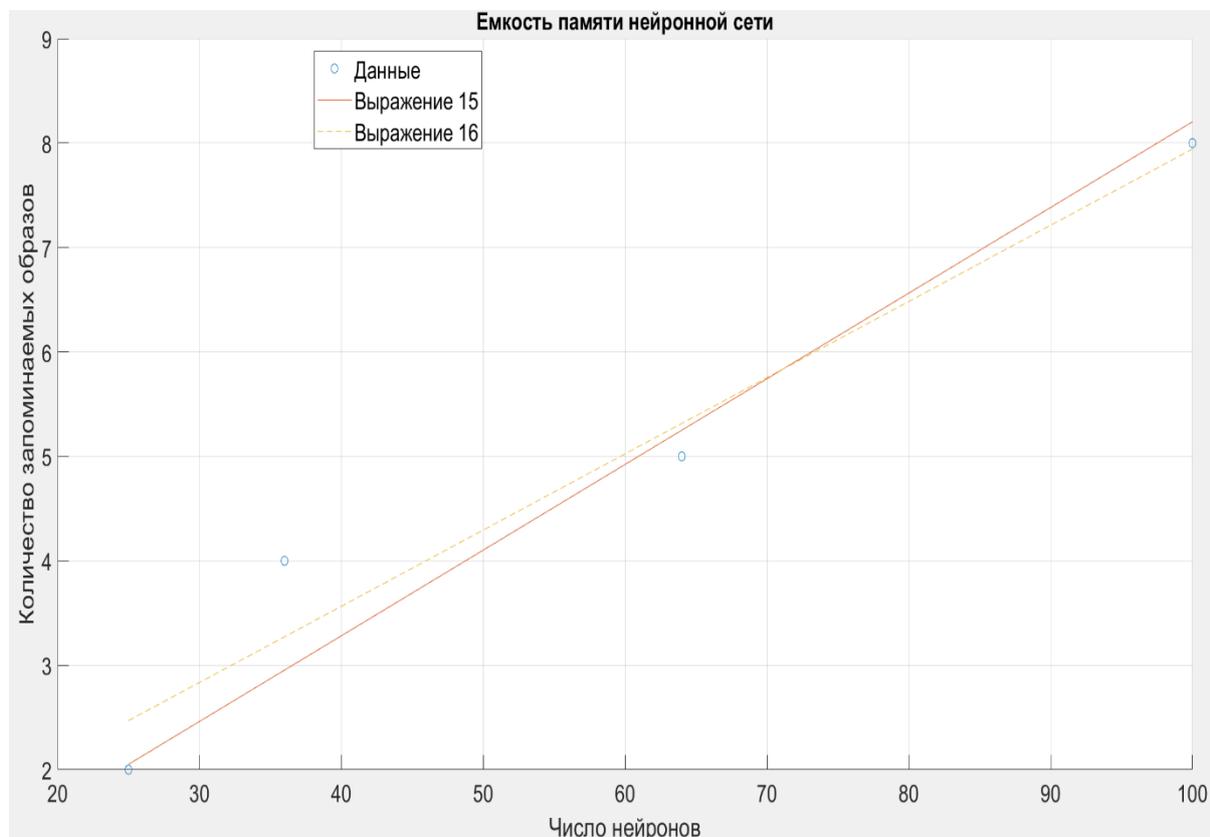


Рис. 4. Емкость памяти нейронной сети

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе анализа математической модели нейронной сети Хопфилда, рассмотрены ее структура, алгоритм работы и главные характеристики, такие как емкость памяти и восстанавливающая способность. При моделировании работы с помощью компьютерной программы исследована возможность распознавать изображения при сохранении более 50% исходной информации, установлено, что объем запоминаемой информации – количество запоминаемых изображений описывается аналитическим выражением $M \cong \frac{N}{2 \log_2(N)}$. При малом количестве нейронов сети емкость памяти можно определить аналитическим выражением $M = 0,645 + 0,073N$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Соколов В.К., Шубников Е.И.** Оптические нейронные сети на базе голографических корреляторов // Квантовая электроника. 1995. Т. 22. № 10. С. 1067-1071.
2. **Суслова Е.В.** Оптическая реализация нейронных сетей // Экономика и социум. 2017. №1(32). С. 704-706.
3. **Сарыбаева А.А.** Корреляционная обработка изображений в оптических нейронных сетях // Sciences of Europe. 2016. №10 (10). С. 127-130.
4. **Farhat N.H., Psaltis D., Prata A., Paek E.** Optical implementation of the Hopfield model // Appl Opt. 1985. Vol. 24(10). Pp. 1469-1475.

5. **Пасечник С.В., Бугаенко П.С.** Использование нейронной сети Хопфилда для воссоздания образов по неполной и искаженной информации // Информационные технологии в науке и производстве: Материалы молодежной научно-технической конференции, Омск, 15–17 апреля 2014 года. Омск: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Омский государственный технический университет", 2014. С. 46-49.

Dyukarev V.S., Skornyakova N.M.

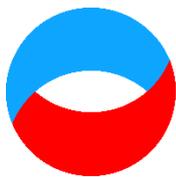
*National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: DiukarevVS@mpei.ru*

ANALYSIS OF THE HOPFIELD NEURAL NETWORK

ABSTRACT

The report presents the implementation and analysis of the mathematical model of Hopfield neural network which implements the property of associative memory - restoration of the closest reference signal based on a distorted signal. Associative memory is the memory that completes or corrects an image, but does not associate the obtained result with other images. A computer program simulating the operation of the Hopfield neural network has been developed. The percentage of correct image determination for various images has been estimated. The influence of the correlation of remembered images on the correct recognition of images has been studied. The dependence of the number of remembered images on the number of network's neurons and the ability to restore images when the input image is distorted with false noise have been analyzed. A formula obtained by the regression method has been proposed to describe the memory capacity of the neural network. It is planned to implement the algorithm of the Hopfield neural network using an optical correlator and then study its characteristics and application.

NEURAL NETWORKS, HOPFIELD NETWORK, ASSOCIATIVE MEMORY, IMAGE RECOGNITION



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 535.8

Здарова Д.А.^{1,2}, Золотухина А.А.^{1,2}, Беляева А.С.^{1,3}

¹ Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Россия,
117342, Москва, Бутлерова ул., 15

² Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: ZdarovaDA@mpei.ru

³ Государственный университет аэрокосмического приборостроения, Россия,
190000, Санкт-Петербург ул. Большая морская 67

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ КОЛОРИМЕТРИИ И СПЕКТРОСКОПИИ
ОТРАЖЕНИЯ В ЗАДАЧЕ ОЦЕНКИ СОДЕРЖАНИЯ ПИГМЕНТОВ В ЛИСТЬЯХ
РАСТЕНИЙ**

АННОТАЦИЯ

В данной работе исследовалась корреляция содержания пигмента в листьях растений с их координатами цветности, определяемые по спектру отражения. Для этого были использованы свежесобранные листья растений, спектральная яркость которых была зарегистрирована спектрометром при освещении образцов источником с равномерной спектральной и яркостной плотностью. Для калибровки спектрометра по спектральным и яркостным характеристикам, при тех же условиях была проведена съемка эталонов с известными, спектрами отражения, значениями координат цветности x , y и яркости $Y_{97,8}$ и 4 в спектральном диапазоне от 400 до 800 нм. После вычисления калибровочных коэффициентов вычислялись координаты цветности в системе МКО 1931 г. и вегетационных индексов. Для определения эталонных концентраций содержания хлорофиллов проведен спектрофотометрический анализ экстрактов листьев. Эмпирическая модель связи между вегетационным индексом $OSAVI$ и содержанием пигмента показала коэффициент детерминации 0,7. При этом показано, что листья, имеющие близкие координаты цветности, содержали концентрацию хлорофиллов, отличающуюся более чем в 2 раза. На основе полученных данных можно сделать вывод о возможностях применения колориметрии и спектроскопии отражения в задаче бесконтактного определения содержания пигментов растений.

КОЛОРИМЕТРИЯ, КОНЦЕНТРАЦИЯ ХЛОРОФИЛЛОВ, ОБРАБОТКА СПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ

ВВЕДЕНИЕ

Хлорофиллы является важным компонентом фотосинтеза растений, индикатором их роста и физиологического состояния. Традиционные методы количественной оценки содержания пигментов в растениях (спектрофотометрия и хроматография) основаны на экстракции пигмента из листьев, что делает их затратными по времени и материалам. Спектроскопия отражения является одним из наиболее перспективных методов оценки концентрации хлорофиллов [1-2], поскольку обеспечивает бесконтактность и высокую скорость измерений. Анализ спектральных характеристик широко используется в задачах

детектирования фитопатогенов [3-4] и абиотического стресса [5], а также оценки пигментного состава растений [6]. Другим широко распространенным методом является колориметрия, основанная на взаимосвязи значений координат цветности листьев и концентрацией пигментов [7-9]. Однако из-за изменчивости параметра цвета листьев прямой анализ значений координат цветности может дать результаты, которые трудно интерпретировать, особенно если выявляемые цветовые изменения невелики, поэтому актуальной задачей является объективная интерпретация полученных данных [10].

Целью данной работы является сравнение методов спектроскопии отражения и колориметрии в задаче количественной оценки содержания пигмента, а именно суммарного содержания хлорофиллов произвольного растения.

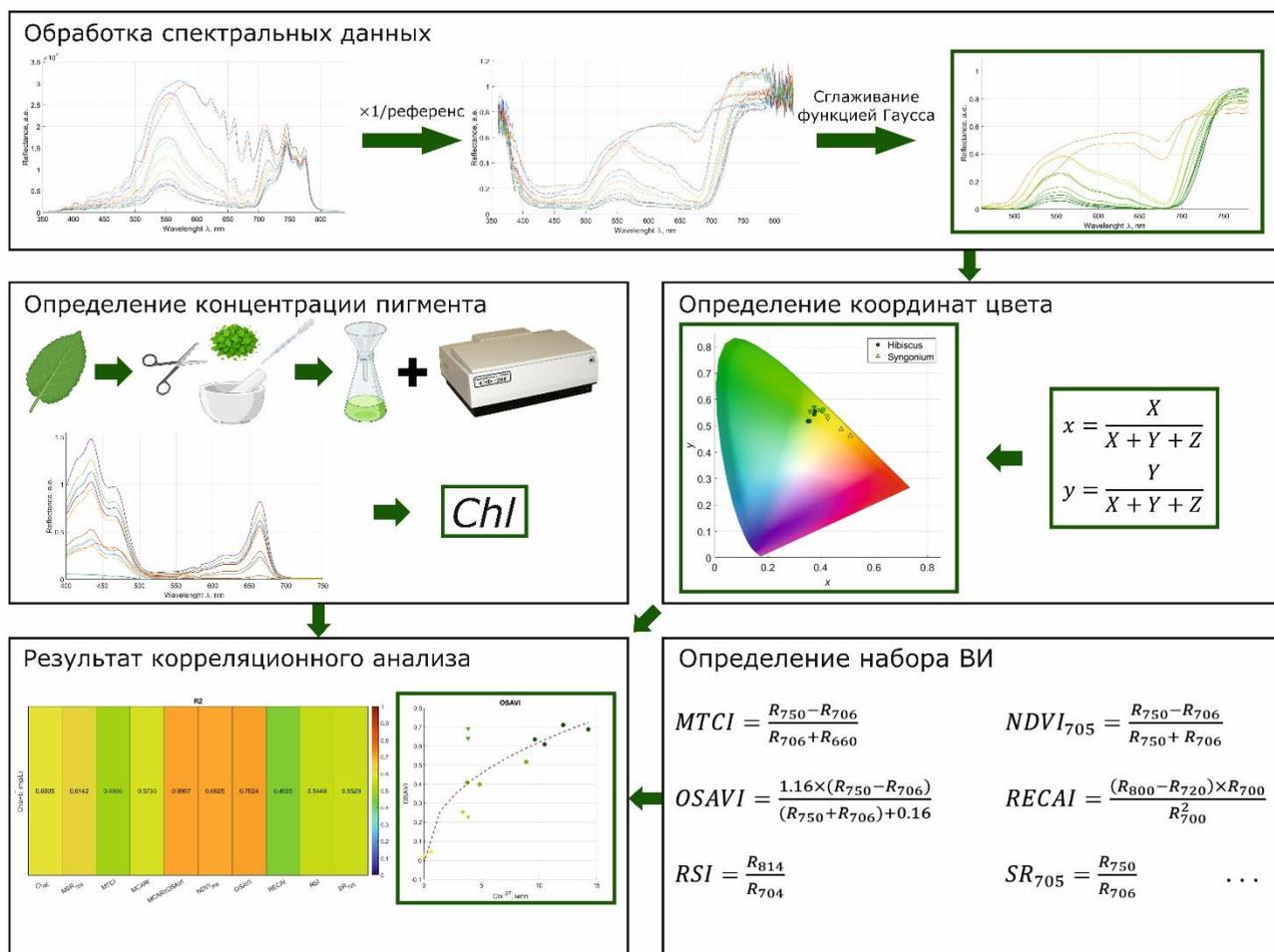


Рис. 1. Алгоритм получения данных для корреляционного анализа

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Регистрация спектральных данных производилась с помощью спектрометра, при этом растительные образцы были закреплены в вертикальном положении. В качестве источника излучения использовалась интегрирующая сфера. Спектральные характеристики растений и эталонов диффузного отражения с известными значениями яркости 97,8 и 4 были получены в диапазоне от 360 до 830 нм с шагом 1 нм. Предварительная обработка данных включала в себя деление спектральных данных на референс и снижение шума спектральных изображений путём сглаживания функцией Гаусса. Расчет 10 вегетационных индексов (ВИ), чувствительных к содержанию хлорофилла, для каждого образца был выполнен по обработанным спектрам для дальнейшего сопоставления эталонных и измеряемых предлагаемым методом концентраций хлорофиллов с помощью метода регрессии.

Полученные обработанные спектры умножались удельные координаты цвета, соответствующие системе *CIE* 1931, и спектр стандартного источника *D65* для получения *X*, *Y*, *Z*. На основе вычисленных значений были определены координаты цветности *x*, *y*, которые затем были нанесены на цветовое пространство в пределах спектрального локуса. Определение эталонных значений концентрации хлорофиллов в тех же растительных образцах проводилось с помощью стандартного спектрофотометрического анализа. Основные этапы алгоритма проведения эксперимента приведены на рис. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнительный анализ был проведён на образцах растений *Hibiscus* и *Syngonium*, отличающихся по цвету и содержанию пигмента. После сбора органы растений были доставлены в лабораторию для регистрации спектральных данных и проведения спектрофотометрического анализа. По полученным данным был проведён корреляционный анализ между ВИ и содержанию хлорофиллов *Chl*. Метод и определение оптимального ВИ позволил построить эмпирическую модель с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,7$ по вегетационному индексу *OSAVI*, среднеквадратичная ошибка для нелинейной модели составила 0,15 мг/л. Для выявления закона изменения координат цветности в зависимости от содержания хлорофиллов были нанесены точки и значения в цветовом пространстве, результаты приведены на рис. 2. Можно отметить, что образцы с близкими координатами цветности показали отличие в содержании хлорофиллов более чем в 2 раза. Корреляция Пирсона между *x* и *Chl* получилась равной -0,71 и между *y* и *Chl* равной 0,07, несмотря на полученные значения наблюдаются различия в содержании пигмента, что говорит о слабой связи пигмента и цвета.

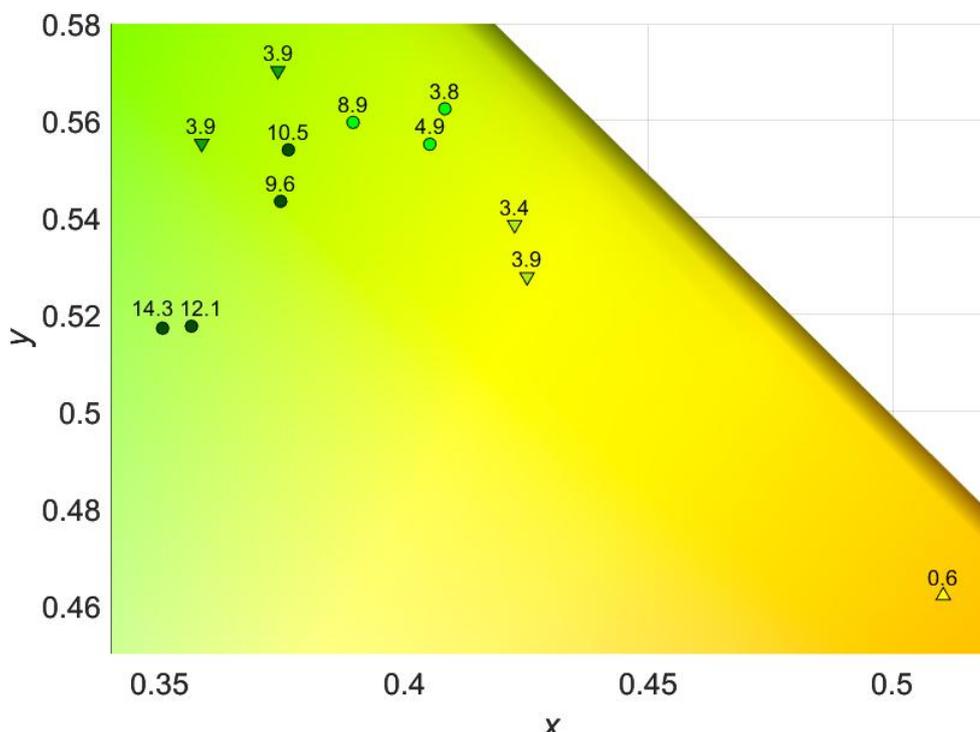


Рис. 2. Цветовое пространство с нанесёнными координатами и значениями *Chl* в мг/л

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данное исследование посвящено сравнению разных методик количественной оценки содержания хлорофиллов как одного из самых информативных показателей состояния растительности в точном земледелии и экологических исследованиях. Представленная методика, основанная на обработке спектров отражения образцов и вычислении ВИ, может

быть использована для задач оптимизации агротехнических операций, идентификации фитопатологий растений, оценки эффективности моделей углеродного регулирования, картирования загрязнений и прогнозирования возникновения природных пожаров.

Для анализа данных координаты цветности и концентрации хлорофиллов были нанесены на цветовом пространстве. Необходимы дополнительные исследования, потому что выявление зависимости между цветом и пигментом сможет внести дополнительный параметр при мониторинге состояния растений.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект №251600121).

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВИ – вегетационный индекс;

Chl – концентрация хлорофилла, мг/л.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Shi H. et al.** Estimation of chlorophyll content in soybean crop at different growth stages based on optimal spectral index // *Agronomy*. 2023. Vol. 13. № 3. Article 663.
2. **Xiao B. et al.** Comparison of leaf chlorophyll content retrieval performance of citrus using FOD and CWT methods with field-based full-spectrum hyperspectral reflectance data // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024. Vol. 217. Article 108559.
3. **Wu G. et al.** Early identification of strawberry leaves disease utilizing hyperspectral imaging combing with spectral features, multiple vegetation indices and textural features // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023. Vol. 204. Article 107553.
4. **Liu Y. et al.** Quantitative assessment of apple mosaic disease severity based on hyperspectral images and chlorophyll content // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. № 8. Article 2202.
5. **Gai J. et al.** Spectroscopic determination of chlorophyll content in sugarcane leaves for drought stress detection // *Precision Agriculture*. 2024. Vol. 25. Pp. 543-569.
6. **Pan W. et al.** Detection of chlorophyll content based on optical properties of maize leaves // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2024. Vol. 309. № 10. Article 123843.
7. **Wang H. et al.** Classification of rose petal colors based on optical spectrum and pigment content analyses // *Horticulture, Environment, and Biotechnology*. 2022. Vol. 64. Pp. 153-166.
8. **Bodor-Pesti P. et al.** Correlation of the grapevine (*Vitis vinifera* L.) leaf chlorophyll concentration with RGB color indices // *Horticulturae*. 2023. Vol. 9. № 8. Article 899.
9. **Madeira A. et al.** SPAD meter versus tristimulus colorimeter to estimate chlorophyll content and leaf color in sweet pepper // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2003. Vol. 34. No. 17–18. Pp. 2461-2470.
10. **Bacci L. et al.** Two methods for the analysis of colorimetric components applied to plant stress monitoring // *Computers and Electronics in Agriculture*. 1998. Vol. 19. № 2. Pp. 167-186.

¹ *Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation, Russia,
117342, Moscow, Butlerova st., 15*

² *National Research University "MPEI", Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya str., 14, E-mail: ZdarovaDA@mpei.ru*

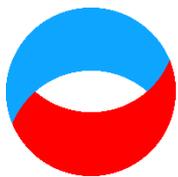
³ *The Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Russia,
190000, Saint-Petersburg, Bolshaya Morskaya st. 67*

COMPARATIVE ANALYSIS OF COLORIMETRY AND REFLECTANCE SPECTROSCOPY METHODS FOR ESTIMATION OF PIGMENT CONTENT IN PLANT LEAVES

ABSTRACT

In this work, the correlation of pigment content in plant leaves with their chromaticity coordinates determined from the reflectance spectrum was investigated. For this purpose, freshly collected plant leaves were used, the spectral brightness of which was registered by a spectrometer when the samples were illuminated by a source with uniform spectral and brightness density. To calibrate the spectrometer by spectral and luminance characteristics, under the same conditions the etalons with known, reflectance spectra, values of color x , y and luminance Y coordinates 97,8 and 4 in the spectral range from 400 to 800 nm were imaged. After calculating the calibration coefficients, chromaticity coordinates in the 1931 CIE system and vegetation indices were calculated. Spectrophotometric analysis of leaf extracts was carried out to establish reference concentrations of chlorophyll content. An empirical model of the relationship between OSAVI vegetation index and pigment content showed a coefficient of determination of 0.7. It is demonstrated that leaves having close chromaticity coordinates contained chlorophyll concentrations differing by more than 2 times. On the basis of the obtained data, it is possible to draw a conclusion about the possibilities of application of colorimetry and reflectance spectroscopy in the task of non-contact determination of plant pigment content.

COLORIMETRY, CHLOROPHYLL CONCENTRATION, SPECTRAL DATA PROCESSING



**Восемнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 30 июня – 04 июля 2025 г.**

УДК 535.434

Сапронов М.В., Русаков Г.И., Усманова Ш.Ш., Полев А.А.

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: RusakovGI@mpei.ru*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ИЗЛУЧЕНИЯ,
РАССЕЯННОГО НА ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНОМ РАСТВОРЕ НАНОЧАСТИЦ**

АННОТАЦИЯ

Доклад посвящен исследованию рассеяния лазерного излучения в оптически прозрачном растворе наночастиц. Разработан алгоритм и создана программа моделирования углового распределения поляризационного контраста лазерного излучения, рассеянного полидисперсной системой сферических частиц. Исследована зависимость полученных моделей от параметров зондирующего излучения и рассеивающих частиц. Создан макет оптико-электронного комплекса и разработана методика проведения эксперимента, позволяющие измерять угловое распределение поляризационного контраста рассеянного лазерного излучения на полидисперсных наночастицах, помещенных в жидкую оптически прозрачную среду, при двух ортогональных состояниях поляризации зондирующего излучения. Разработан алгоритм обработки экспериментальных изображений зондирующего лазерного пучка в рассеянном свете, который позволяет определить зависимость поляризационного контраста от угла рассеяния. Представлены экспериментальные результаты исследования поляризационных свойств рассеянного лазерного излучения в водных растворе наночастиц оксида алюминия Al_2O_3 .

**РАССЕЯНИЕ СВЕТА, УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО
КОНТРАСТА, ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ КОМПЛЕКС**

ВВЕДЕНИЕ

Наноразмерные структуры вещества получили широкое распространение в различных сферах деятельности человека. К таким структурам относятся, в том числе, полидисперсные системы частиц. Примером полидисперсной системы частиц могут служить нанопорошки, дисперсная фаза коллоидных растворов.

Одной из важных характеристик наночастиц является их функция распределения по размерам (ФРР). Поэтому актуальна задача развития методов диагностики и контроля параметров наночастиц, в том числе лазерных методов [1].

Данная работа посвящена проверке возможности использования углового распределения поляризационного контраста лазерного излучения, рассеянного на полидисперсном ансамбле наночастиц, в качестве информативной измеряемой характеристики для определения ФРР. В настоящем исследовании, которое является продолжением работ [2, 3] авторов, представлены результаты измерения углового распределения поляризационного контраста лазерного зондирующего излучения, рассеянного на ансамбле наночастиц.

Для построения углового распределения поляризационного контраста в каждом направлении рассеяния измеряются интенсивности рассеянного излучения для параллельной

и перпендикулярной плоскости рассеяния составляющих поляризации рассеянного лазерного излучения. Само значение поляризационного контраста рассчитывается по формуле (1) [4].

$$K = \left| \frac{I_{\perp} - I_{\parallel}}{I_{\perp} + I_{\parallel}} \right|, \quad (1)$$

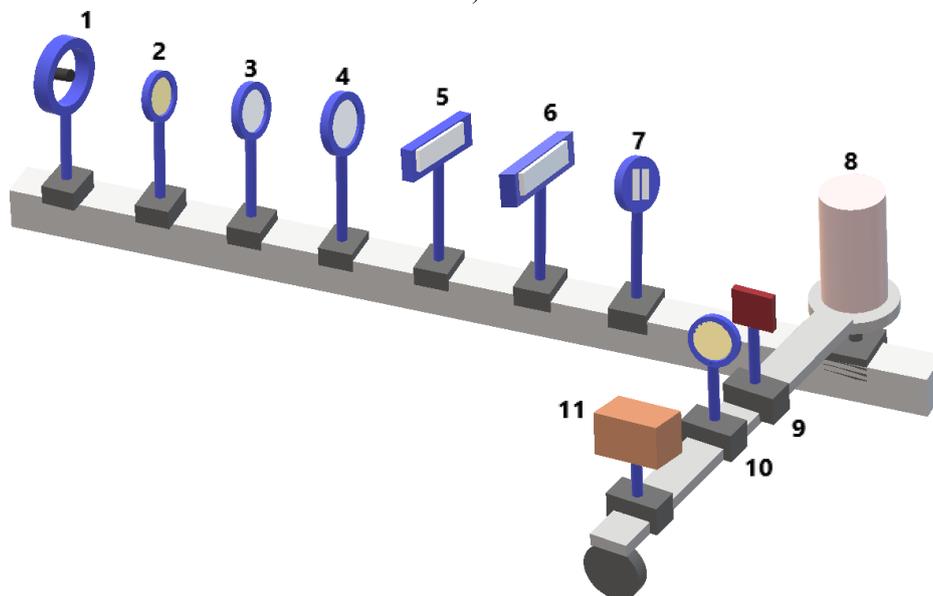
где I_{\parallel} и I_{\perp} – интенсивности параллельной и перпендикулярной плоскости рассеяния составляющих рассеянного излучения соответственно [5].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ РАССЕЯННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Схема и фотография экспериментальной установки для измерения углового распределения поляризационного контраста рассеянного излучения представлены на рис. 1. Источником лазерного излучения служит лазерный модуль с длиной волны излучения $\lambda = 515$ нм. Выходное лазерное излучение преимущественно линейно поляризовано, плоскость поляризации ориентирована под углом 45 градусов к горизонту [6].



а)



б)

1 – лазерный модуль, 2, 10 – линейные поляризаторы, 3, 4 – длиннофокусные сферические линзы, 5 – короткофокусная цилиндрическая линза, 6 – длиннофокусная цилиндрическая линза, 7 – прямоугольная щель, 8 – сосуд с жидкостью, 9 – стойка для ослабляющих фильтров, 11 – фотокамера Nikon J5

Рис. 1. Экспериментальная установка: а) фотография, б) схема

После лазерного модуля 1 по направлению луча следует поляризатор 2, который позволяет выделить параллельную или перпендикулярную плоскости рассеяния составляющую поляризации зондирующего излучения. Далее на оптической скамье установлена оптическая система, состоящая из двух сферических линз 3 и 4, короткофокусной

цилиндрической линзы 5, длиннофокусной цилиндрической линзы 6, прямоугольной щели 7. Система сферических линз необходима для создания узкого лазерного пучка в области измерения, система цилиндрических линз обеспечивает формирование практически не расходящейся лазерной плоскости в области измерения, щель служит для устранения паразитного излучения, исходящего от лазерного модуля.

Объектом исследования в данной работе является физическая модель коллоидного раствора в цилиндрическом сосуде 8, которая была получена путём добавления нанопорошка оксида алюминия в дистиллированную воду с последующей ультразвуковой обработкой для диспергирования наночастиц. Стекланный сосуд установлен в область измерения, причём зондирующее излучение направлено по диаметру цилиндрического сосуда, а лазерная плоскость ориентирована параллельно его оси.

Рассеянное излучение регистрируется с помощью цифровой фотокамеры Nikon 1 J5 11, установленной оптической скамье. Перед камерой на этой же скамье установлены держатель с ослабляющими светофильтрами 9 и поляризатор 10. Оптическая скамья, на которой установлена система регистрации рассеянного излучения имеет возможность вращаться вокруг оси цилиндрического сосуда. Таким образом обеспечивается возможность регистрации излучения, рассеянного под различными углами в диапазоне от 5° до 165° , поляризатор 10 позволяет осуществлять поляризационную селекцию рассеянного лазерного излучения.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

При проведении экспериментального исследования поляризационных свойств рассеянного лазерного излучения необходимо было учесть два фактора. Во-первых, интенсивность излучения, падающего на матрицу фотокамеры изменяется в очень широком диапазоне значений в зависимости от угла и положения поляризаторов 2 и 10 в экспериментальной установке, во-вторых, отклик фотокамеры нелинейно зависит от экспозиции, а сама нелинейная характеристика зависит от настройки светочувствительности камеры (ISO) и времени выдержки [7]. Поэтому было принято решение экспериментально измерить зависимость яркости пикселей на цифровом изображении от интенсивности падающего излучения и учесть нелинейность передаточной функции при обработке результатов эксперимента. Также было принято решение проводить регистрацию рассеянного излучения при неизменных настройках фотокамеры в течении всего эксперимента, чтобы исключить любое изменение самой передаточной функции.

График экспериментально измеренной зависимости средней яркости пикселей на изображении (ISO 1600, время выдержки 1/1.6 с) от интенсивности падающего излучения представлена на рис. 2.

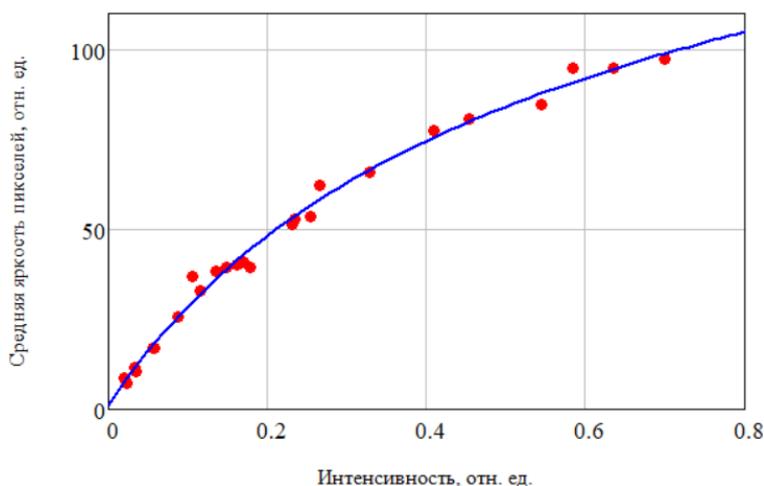


Рис. 2. График зависимости средней яркости пикселей от интенсивности падающего излучения для зелёного канала матрицы Nikon J5

Так как в данном эксперименте интенсивность рассеянного излучения изменялась в широком диапазоне значений при различных углах рассеяния, некоторые снимки обладали избыточной экспозицией при неизменных параметрах съемки. Поэтому при проведении эксперимента использовались ослабляющие светофильтры для некоторых углов рассеяния. Ослабляющие светофильтры, изготовленные из нейтрального стекла различных марок, использовались как для измерения нелинейной характеристики фотокамеры, так и при проведении эксперимента непосредственно. Для повышения достоверности получаемых результатов коэффициенты ослабления каждого из светофильтров были измерены экспериментально. Результаты измерения приведены в табл. 1.

Табл. 1. Коэффициенты ослабления светофильтров при $\lambda = 515$ нм

№	Марка стекла	Коэффициент ослабления при $\lambda = 515$ нм
1	НС-1	1,71
2	НС-2	3,93
3	НС-3	11,36
4	НС-6	1,43
	НС-7	2,20
	НС-8	4,34
	НС-9	17,98
	НС-1	1,84
	НС-2	5,91
	НС-3	29,07
	НС-6	1,57
	НС-7	3,05

Эксперимент по регистрации УРПК рассеянного лазерного излучения начинался с подготовки объекта исследования. Для создания физической модели коллоидного раствора в сосуд наливалась вода двойной дистилляции, а затем помещались наночастицы оксида алюминия. После того, как крупные частицы оседали на дно сосуда, из толщи раствора набирался шприцом небольшой объем, который помещался в цилиндрический сосуд с водой двойной дистилляции, который затем подвергался сонической обработке в ультразвуковой ванне [8]. После этого цилиндрический сосуд с подготовленным раствором наночастиц устанавливался в область измерения.

Когда объект исследования был подготовлен, осуществлялась непосредственно регистрация изображений зондирующей лазерной плоскости в рассеянном излучении под различными углами. Для регистрации первого снимка в серии камера устанавливалась на угол рассеяния 30° и осуществлялась съёмка. Каждое следующее изображение в серии регистрировалось после поворота приёмной системы вокруг оси цилиндрического сосуда на угол 5° относительно предыдущего положения.

Была проведена съёмка четырех серий фотографий для разных состояний поляризации падающего и рассеянного излучений. В первых двух сериях плоскость поляризации зондирующего излучения была перпендикулярна плоскости рассеяния, при этом второй поляризатор устанавливался в положения 0° и 90° (перпендикулярно и параллельно плоскости рассеяния) соответственно. В третьей и четвёртой сериях плоскость поляризации зондирующего излучения была ориентирована параллельно плоскости рассеяния с аналогичными положениями второго поляризатора: 0° и 90° (перпендикулярно и параллельно плоскости рассеяния) соответственно.

Для того, чтобы получать изображения, пригодные для измерения интенсивности излучения, съёмка на камере Nikon 1 J5 осуществлялась в формате RAW, чтобы избежать

встроенной обработки получаемых изображений в формате JPEG. Обработке подвергалась только информация, полученная с зеленого канала фотокамеры

На рис. 3 представлены экспериментальные изображения, полученные при углах рассеяния 30° , 90° и 150° для двух ориентаций поляризатора, установленного перед фотокамерой (перпендикулярно и параллельно плоскости рассеяния) в случае, когда плоскость поляризации падающего излучения ориентирована перпендикулярно плоскости рассеяния. На рис. 4 представлены аналогичные экспериментальные изображения, но полученные для случая, когда плоскость поляризации зондирующего излучения параллельна плоскости рассеяния.

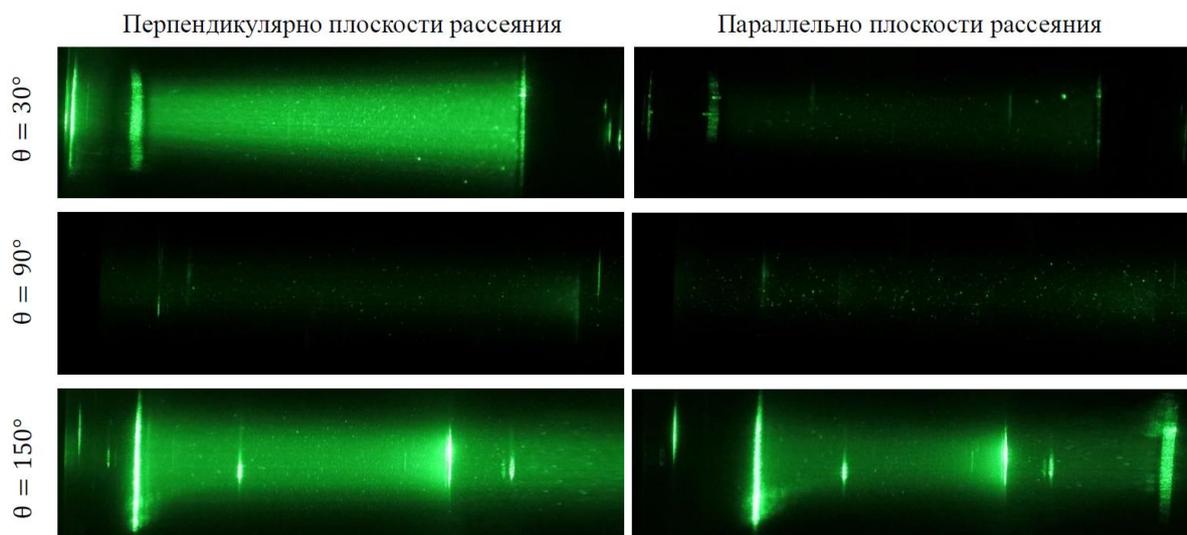


Рис. 3. Экспериментальные изображения лазерной плоскости в рассеянном излучении в случае, когда плоскость поляризации зондирующего излучения перпендикулярна плоскости рассеяния

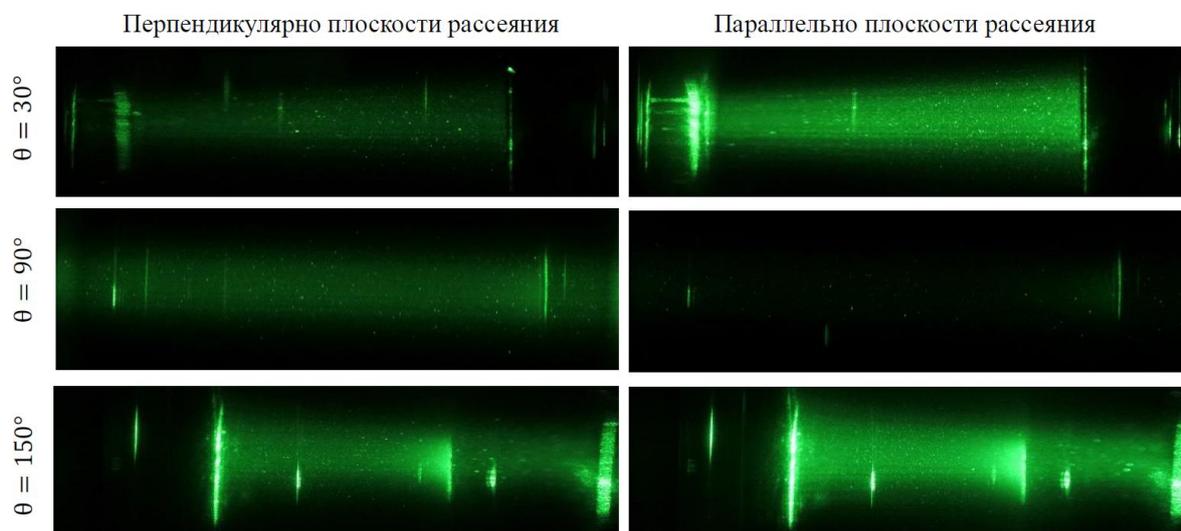


Рис. 4. Экспериментальные изображения лазерной плоскости в рассеянном излучении в случае, когда плоскость поляризации зондирующего излучения перпендикулярна плоскости рассеяния

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

При обработке экспериментальных результатов важно было учесть, что наиболее информативными являются участки изображения, на которых не происходит преломления, так как рассеянное излучение не должно изменять своего направления. Это справедливо только для излучения, которое было рассеяно объемом среды, локализованным вблизи оси

цилиндрического сосуда. Поэтому при обработке экспериментальных изображений учитывались пиксели, которые были расположены в небольшой области, соответствующей части зондирующей лазерной плоскости в окрестности оси цилиндрического сосуда. Распределение средней яркости пикселей в зависимости от угла детектирования приведены на рис. 5 и 6.

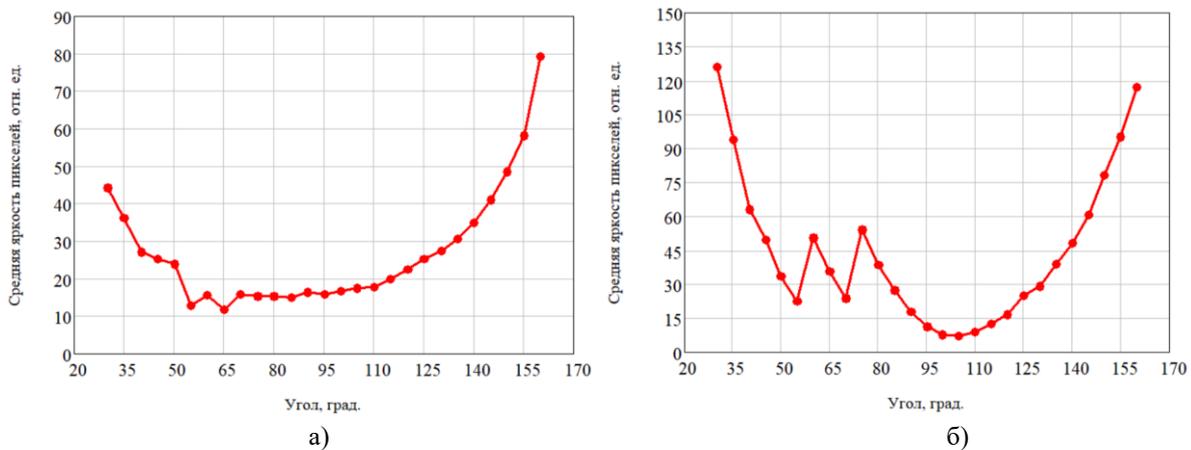


Рис. 5. Графики зависимостей средней яркости пикселей от угла рассеяния при положении плоскости поляризации зондирующего излучения перпендикулярно плоскости рассеяния: а) поляризация рассеянного излучения перпендикулярна плоскости рассеяния, б) поляризация рассеянного излучения параллельна плоскости рассеяния

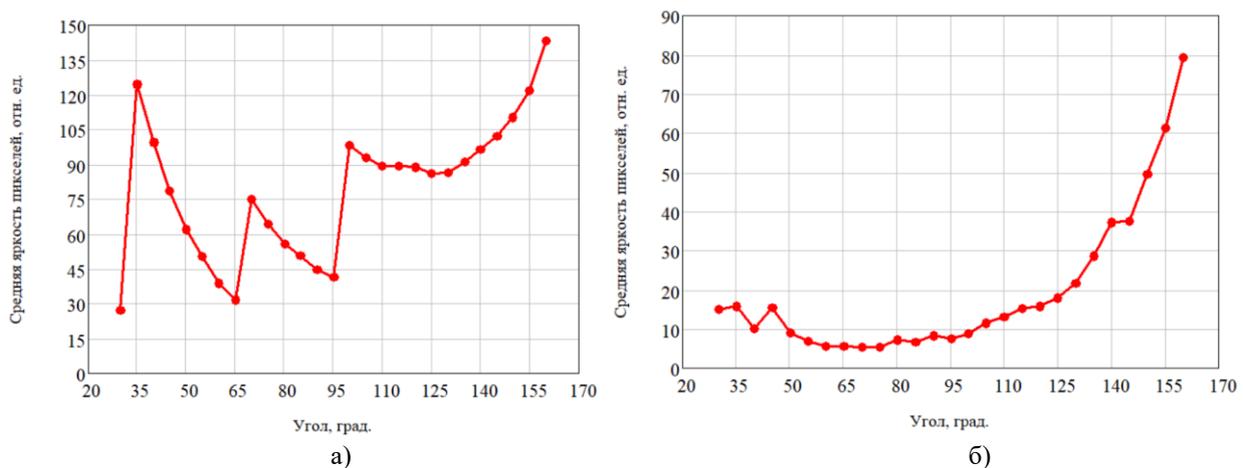


Рис. 6. Графики зависимостей средней яркости пикселей от угла рассеяния при положении плоскости поляризации зондирующего излучения параллельно плоскости рассеяния: а) поляризация рассеянного излучения перпендикулярна плоскости рассеяния, б) поляризация рассеянного излучения параллельна плоскости рассеяния

Следующим шагом обработки экспериментальных данных был учет нелинейной характеристики фотокамеры. Для этого использовалась измеренная зависимость средней яркости пикселей от интенсивности падающего излучения, график которой представлен на рис. 2. Для каждого среднего значения яркости пикселей была найдена соответствующая интенсивность излучения, выраженная в относительных единицах. Графики зависимостей относительной интенсивности зарегистрированного излучения от угла рассеяния представлены на рис. 7 и 8.

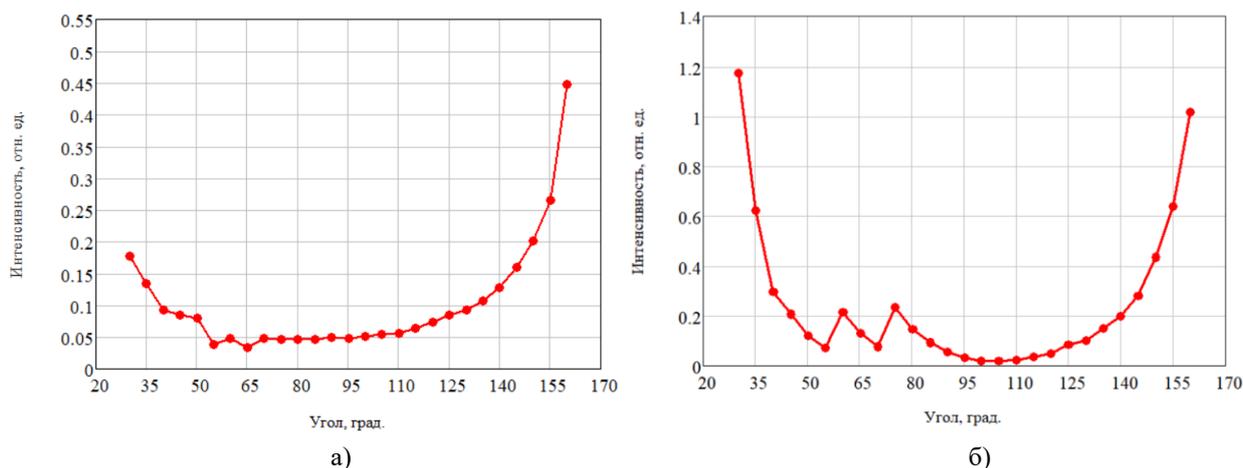


Рис. 7. Графики зависимостей относительной интенсивности от угла рассеяния при положении плоскости поляризации зондирующего излучения перпендикулярно плоскости рассеяния: а) поляризация рассеянного излучения перпендикулярна плоскости рассеяния, б) поляризация рассеянного излучения параллельна плоскости рассеяния

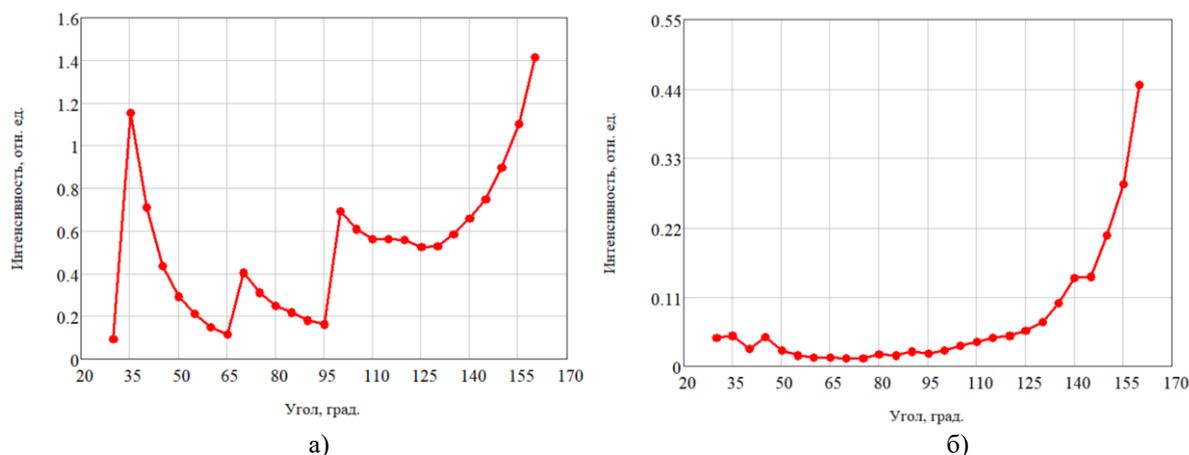


Рис. 8. Графики зависимостей относительной интенсивности от угла рассеяния при положении плоскости поляризации зондирующего излучения параллельно плоскости рассеяния: а) поляризация рассеянного излучения перпендикулярна плоскости рассеяния, б) поляризация рассеянного излучения параллельна плоскости рассеяния

После нужно было учесть при определенных углах установки камеры коэффициенты ослабляющих светофильтров. Поэтому полученные значения интенсивности были помножены на соответствующие коэффициенты ослабления, которые приведены в табл. 1. Количество частиц, рассеивающих излучение, которое затем регистрируется фотокамерой, является еще одним существенным фактором, влияющим на вид экспериментальных изображений, а соответственно и на характеристику поляризационного контраста. При изменении углового положения приемной системы количество учитываемых рассеивающих центров также меняется. При установке приемной системы на угол 90 градусов количество частиц, рассеивающих излучение в направлении фотокамеры, минимально, а при установке на угол 50 – максимально. Было определено, что количество центров, рассеивающих излучение в направлении приемной системы, пропорционально $\sin^{-1}(\theta)$. Для того, чтобы исключить количество частиц, рассеивающих излучение, которое регистрируется приемной системой, из числа факторов, оказывающих влияние на форму зависимости относительной интенсивности от угла рассеяния, полученное для каждого угла θ значение интенсивности было помножено на $\sin(\theta)$. Результаты, полученные на этом шаге обработки, представлены на рис. 9 и 10.

После учёта коэффициентов ослабления светофильтров и количества частиц, вносящих вклад в регистрируемый оптический сигнал, был проведен расчет поляризационного контраста по формуле (1). Графики зависимости углового распределения поляризационного

контраста для случаев ориентации плоскости поляризации рассеянного излучения перпендикулярно и параллельно плоскости рассеяния представлены на рис. 11.

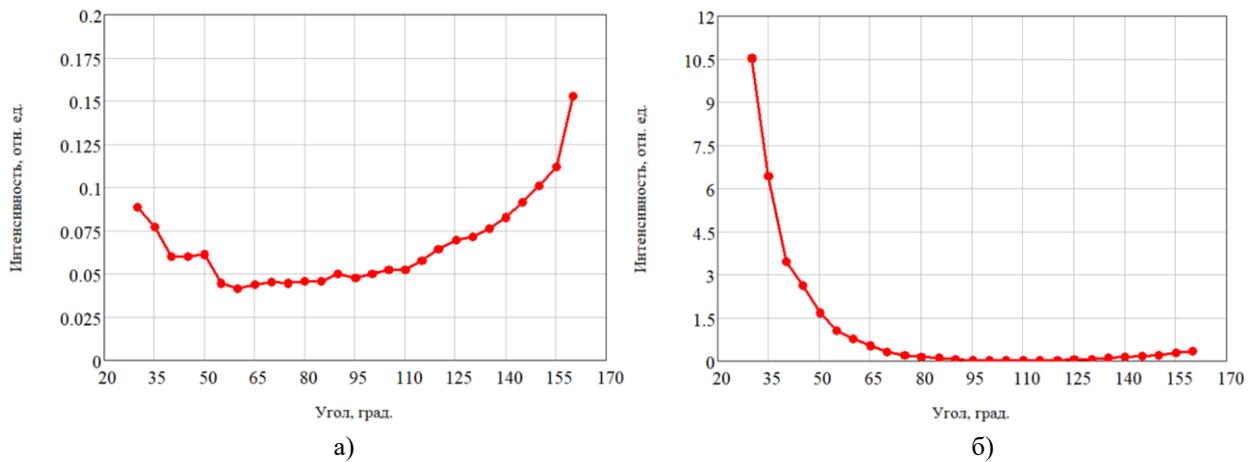


Рис. 9. Графики зависимостей относительной интенсивности от угла рассеяния при положении плоскости поляризации зондирующего излучения перпендикулярно плоскости рассеяния с учетом коэффициентов ослабления светофильтров: а) поляризация рассеянного излучения перпендикулярна плоскости рассеяния, б) поляризация рассеянного излучения параллельна плоскости рассеяния

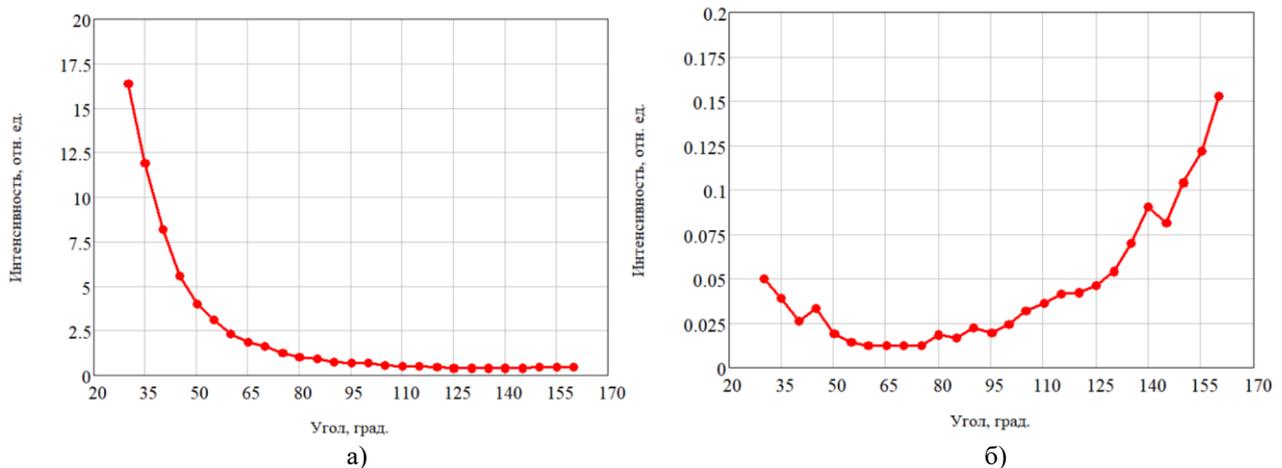


Рис. 10. Графики зависимостей относительной интенсивности от угла рассеяния при положении плоскости поляризации зондирующего излучения параллельно плоскости рассеяния с учетом коэффициентов ослабления светофильтров: а) поляризация рассеянного излучения перпендикулярна плоскости рассеяния, б) поляризация рассеянного излучения параллельна плоскости рассеяния

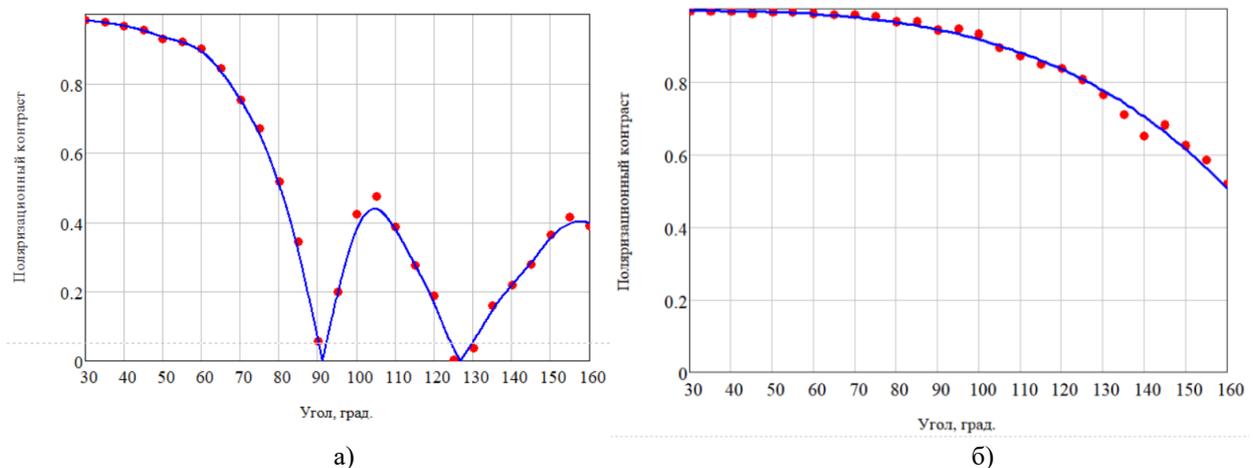


Рис. 11. Графики углового распределения поляризационного контраста: а) плоскость поляризации зондирующего излучения перпендикулярна плоскости рассеяния, б) плоскость поляризации зондирующего излучения параллельна плоскости рассеяния

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был создан макет оптико-электронного комплекса и разработана методика проведения эксперимента, позволяющие проводить измерение углового распределения поляризационного контраста рассеянного на наночастицах в жидкой прозрачной среде лазерного излучения с длиной волны 515 нм при двух ортогональных состояниях поляризации зондирующего излучения. Разработан и программно реализован алгоритм обработки экспериментальных изображений зондирующего лазерного пучка в рассеянном свете, который позволяет определить распределение поляризационного контраста в диапазоне углов рассеяния от 30 до 150 градусов. Представлены результаты экспериментального исследования поляризационных свойств рассеянного лазерного излучения в водном растворе наночастиц оксида алюминия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Skornyakova N.M., Anikeev A.V., Parshin V.A.** Optical study of the concentration and particle size distribution of octadecylamine in water // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1421. P. 012010.
2. **Sapronov M.V., Skornyakova N.M., Usmanova S.S.** Development of optical diagnostic method for colloidal solutions based on elastic light scattering // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2127. P. 012059.
3. **Сапронов М.В., Скорнякова Н.М., Усманова Ш.Ш., Полев А.А.** Исследование наночастиц в растворах оптически прозрачных жидкостей методом статического рассеяния света // *Оптические методы исследования потоков: труды XVII МНТК*. Москва: НТЦ УП РАН, 2023. С. 699-709.
4. **ГОСТ Р ИСО 12005-2013.** Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений параметров лазерных пучков. М.: Стандартинформ, 2014. 5 с.
5. **McMaster W. H.** Polarization and the Stokes Parameters // *American Journal of Physics*. 1954. Vol. 22. №. 6. Pp. 351-362.
6. **Близнюк В.В., Паршин В.А., Семенова О.И., Тарасов А.Е.** Метрологическое обеспечение лазерных измерительных систем, используемых для исследования потоков // *Оптические методы исследования потоков: труды XVII МНТК*. Москва: НТЦ УП РАН, 2023. С. 224-228.
7. **Ишанин Г.Г.** Приемники излучения оптических и оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение. Ленинградское отд-ние. 1986. 175 с.
8. **Taurozzi J.S., Hackley V.A., Wiesner M.R.** Ultrasonic dispersion of nanoparticles for environmental, health and safety assessment issues and recommendations // *Nanotoxicology*. 2011. Vol. 5(4). Pp. 711-729.

Sapronov M.V., Rusakov G.I., Usmanova Sh.Sh., Polev A.A.

*National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: RusakovGI@mpei.ru*

INVESTIGATION OF THE POLARIZATION PROPERTIES OF RADIATION SCATTERED ON AN OPTICALLY TRANSPARENT SOLUTION OF NANOPARTICLES

ABSTRACT

The report is devoted to the study of the scattering of laser radiation in an optically transparent solution of nanoparticles. An algorithm has been developed and a program has been created for modeling the angular distribution of the polarization contrast of laser radiation scattered by a polydisperse system of spherical particles. The dependence of the obtained models on the parameters of probing radiation and scattering particles is investigated. A mock-up of an optoelectronic complex has been created and an experimental technique has been developed to measure the angular distribution of the polarization contrast of scattered laser radiation on polydisperse nanoparticles placed in a liquid optically transparent medium under two orthogonal states of polarization of the probing radiation. An algorithm for processing experimental images of a probing laser beam in scattered light has been developed, which makes it possible to determine the dependence of the polarization contrast on the scattering angle. Experimental results of a study of the polarization properties of scattered laser radiation in an aqueous solution of aluminum oxide nanoparticles Al_2O_3 are presented.

LIGHT SCATTERING, ANGULAR DISTRIBUTION OF POLARIZING CONTRAST, OPTICAL-ELECTRONIC COMPLEX

Авторский указатель

А

Абатуров М.А. 273
Анциперов В.Е. 299
Арбузов Э.В. 79, 86
Асютин Р.Д. 225

Б

Балашова А.М. 339
Белых А.Ю. 219, 225
Беляева А.С. 507
Богаченков А.Н. 464
Бондарев А.Е. 367
Бондарева Н.А. 374
Будников А.А. 418
Бурлаков А.Б. 464
Быков А.А. 225

В

Вдовин М.И. 152, 196
Ведяшкина А.В. 93
Ветрова Н.А. 252
Винецкий Ю.Р. 263
Винниченко Н.А. 45
Виноградов Ю.А. 412

Г

Гоголев К.С. 243
Горбачева П.В. 436
Гуревич И.Д. 489
Гурылева А.В. 458

Д

Деревесникова Д.А. 458
Дубнищев Ю.Н. 79, 86
Дюкарев В.С. 499

Е

Еремеева К.В. 458
Еремин Д.В. 258
Ермакова О.С. 196

З

Загайнов И.А. 407
Захарова А.А. 349
Зверев П.Г. 9
Здарова Д.А. 507
Здитовец А.Г. 412
Здорников С.А. 123
Знаменская И.А. 137, 202, 407
Золотухина А.А. 225, 485, 507
Золотухина О.С. 79
Зотова А.Н. 196
Зыкова Л.А. 464

И

Иванов Е.С. 478
Иванова А.А. 112
Иванова Е.В. 258
Иншаков С.И. 101
Исаенков С.В. 123

К

Кадыров Р.И. 281
Карнозова Е.А. 137
Касаткин В.Э. 273
Кершнер В.А. 299
Кислицын Д.И. 384
Козлов В.В. 144, 158
Козлов П.В. 407
Конопацкий Е.В. 384
Королькова О.В. 211
Котова О.В. 384
Краев И.М. 152, 196
Кривоклякин Г.Д. 263
Кувшинников А.Е. 367
Кузьмин В.И. 273
Куимов Е.В. 252
Курьяков В.Н. 315

Л

Лапиков М.М. 79
Лапицкая И.А. 64, 258
Лапицкий К.М. 339
Лебедева М.С. 426

Лёвин Д.С. 470
Литвиненко М.В. 158
Литвиненко Ю.А. 158
Лукашов В.В. 86
Лунева Л.А. 252
Луцкий А.Е. 137

М

Марченков А.Ю. 233
Матвеева И.А. 436, 443, 451
Мачихин А.С. 458
Миськив Н.Б. 56
Могорычная А.В. 34
Мурсенкова И.В. 112, 117

Н

Назаров Н.А. 56
Наумов А.А. 418
Нгуен Т.Х. 281
Нестеров Г.В. 485
Неткачев В.В. 129
Никитин П.А. 324
Никитин С.Ю. 426

П

Павлов И.Н. 64, 93, 202, 211, 290, 392, 470
Паршин В.А. 418
Печинская О.В. 233, 243, 339, 489
Пименова И.А. 451
Платонов Д.М. 418
Подвесовский А.Г. 349
Пожар В.Э. 329
Польщикова О.В. 320
Поляков М.П. 225, 334
Попович С.С. 407, 412
Поройков А.Ю. 258
Пуштаев А.В. 45

Р

Расковская И.Л. 93, 392
Родин И.Р. 202, 211
Руденко Ю.К. 45

С

Сазонов А.С.	117
Сапронов М.В.	26
Свиридов Г.Б.	233
Свистушкин В.М.	458
Сергеев Д.А.	152, 196
Скорнякова Н.М. ...	26, 129, 499
Смирнов В.И.	360
Смирнов И.В.	9
Смирнов С.В.	305
Софуев Д.В.	26
Старинская Е.М.	56
Стаценко Е.О.	281
Степура А.В.	384
Сударев А.А.	219, 320
Сысоев Н.Н.	137

Т

Терехова А.С.	305
--------------------	-----

Титов С.А.	464
Томникова К.Е.	443
Троицкая Ю.И.	152, 196
Тупикин А.В.	86
Тытик Д.Л.	273

У

Усманова Ш.Ш.	26
--------------------	----

Ф

Федоров Е.К.	64, 211
Филонов А.А.	349
Фланден В.С.	478
Фомин Д.С.	485
Фомин Дм.С.	485

Х

Хохлов Д.Д.	219, 225
------------------	----------

Ц

Цыбров Е.Г.	426
------------------	-----

Ч

Чашечкин Ю.Д.	71, 168, 175
Черданцев А.В.	123

Ш

Шарикова М.О.	320
Шестаков М.В.	18, 311
Шишкин Д.В.	225

Я

Ягодницына А.А.	311
Ян С.	458
Янина Г.М.	202

**Оптические методы исследования потоков:
Труды XVIII Международной научно-
технической конференции.**

...

Объем ...
Электрон. текстовые данные.