

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
ИНСТИТУТ ТЕПЛОФИЗИКИ СО РАН  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»  
ОПТИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО им. Д.С. РОЖДЕСТВЕНСКОГО

---

**ОПТИЧЕСКИЕ  
МЕТОДЫ  
ИССЛЕДОВАНИЯ  
ПОТОКОВ**

---

**ПРОГРАММА  
XIV МЕЖДУНАРОДНОЙ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

**26 – 30 июня 2017 года  
МОСКВА**

**К 110-летию В.А. Фабриканта**

**XIV Международная научно-техническая конференция**  
***ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТОКОВ***  
***(ОМИП-2017)***

**Москва, 26 – 30 июня 2017 г.**

**ОРГКОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ**

**Сопредседатели конференции:**

**В.Е. Накоряков – академик РАН, Э.П. Волков – чл.- корр. РАН**

**Сопредседатели программного комитета:**

**д.т.н. Ю.Н. Дубнищев, д.ф.-м.н. Б.С. Ринкевичюс**

**Ученый секретарь: к.т.н. Н.М. Скорнякова**

**Члены оргкомитета:**

Т.В. Баженова (Москва)	И.Ч. Машек (Санкт-Петербург)
А. Ю. Вараксин (Москва)	Б.И. Минеев (Москва)
Г.Н. Вишняков (Москва)	В.Е. Мошаров (Жуковский)
В.М. Гордиенко (Москва)	С.Б. Одинокоев (Москва)
В.А. Гречихин (Москва)	О.Ф. Петров (Москва)
В.А. Гурашвили (Троицк)	В.Е. Привалов (Санкт-Петербург)
О.А. Евтихиева (Москва)	А.В. Приезжев (Москва)
Е.В. Ершов (Королев)	Н.В. Семидетнов (Санкт-Петербург)
Г.М. Жаркова (Новосибирск)	В.В. Смирнов (Москва)
П.Г. Зверев (Москва)	В.И. Смирнов (Москва)
В.М. Землянский (Киев)	Ю.Д. Чашечкин (Москва)
И.А. Знаменская (Москва)	Ю.В. Чугуй (Новосибирск)
С.И. Иншаков (Жуковский)	Н.А. Фомин (Минск)
И.Б. Ковш (Москва)	В.Г. Шеманин (Новороссийск)
В.П. Кулеш (Жуковский)	В.И. Ягодкин (Москва)
Ю.Н. Кульчин (Владивосток)	С. Greated (Edinburgh)
Г.Г. Левин (Москва)	Yu. Kompenhans (Getingen)
А.Е. Луцкий (Москва)	W. Staude (Bremen)
О.Г. Лысенко (Минск)	С. Tropea (Darmstadt)
Д.М. Маркович (Новосибирск)	J. Turner (Manchester)
Г.Г. Матвиенко (Томск)	

## **ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ**

1. Работа конференции будет проходить в помещении Московского энергетического института (технического университета) по адресу: ул. Красноказарменная, д.17. Рабочие аудитории: Б-200, А-202. Открытие конференции и первое пленарное заседание состоится в Зале Ученого Совета (Малом актовом зале) НИУ «МЭИ».

2. Регистрация участников конференции будет проводиться 26 июня с 15.00 до 18.00 и 27 июня с 9.00 до 18.00 в ауд. А-106 (дом 17, корп. А). При регистрации необходимо иметь копию платежного поручения по перечислению оргвзноса.

3. Продолжительность пленарных, приглашенных и обзорных докладов — 30 мин, секционных докладов — 15 мин (включая дискуссию). В распоряжение докладчика будут предоставлены: компьютер с установленным пакетом MS Office (Word, PowerPoint), компьютерный проектор.

4. Для стендового доклада предоставляются щиты, скотч, кнопки. На один доклад приходится площадь размером: ширина — 840 мм, высота — 1200 мм.

5. Обратными билетами оргкомитет не обеспечивает.

## **КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ**

Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, 17, кафедра физики им. В.А. Фабриканта, ауд. А-111.

Тел., факс: (495) 362-72-44, e-mail: [omfi@mpei.ru](mailto:omfi@mpei.ru), Web-сайт: <http://omfi.mpei.ac.ru>.

Проезд: ст. м. Авиамоторная, трамваи 24, 37, 50; троллейбус 24 до остановки «МЭИ».

# СХЕМА ПРОЕЗДА



## Как добраться до МЭИ от ст. метро «Авиамоторная»

- проезд: трол. № 24  
трамв. № 24, 37, 50
- пешком: 8 – 10 мин

# РАСПОРЯДОК РАБОТЫ КОНФЕРЕНЦИИ

27 июня

## 10.00. Открытие конференции

Вступительное слово проректора НИУ МЭИ

Вступительное слово сопредседателя программного комитета Б.С. Ринкевичюса

## Пленарные доклады:

1. *Бондарев А.Е., Галактионов В.А.* **Построение и обработка результатов вычислительного эксперимента на основе параллельных решений для оптимизационных и параметрических исследований в газовой динамике**

В докладе представлен комбинированный подход, предназначенный для построения и анализа многомерных параметрических решений нестационарных задач вычислительной механики жидкости и газа. Подход может применяться для моделирования процессов образования пространственно-временных структур, а также для поиска оптимального сочетания геометрических или физических характеристик в выбранном классе задач.

Представленный в докладе подход основан на решении задач параметрического поиска и оптимизационного анализа с помощью параллельных вычислений. Результаты вычислений представляют собой многомерные массивы данных. Для поиска скрытых взаимосвязей в массивах применяются методы анализа многомерных данных и визуализации. Все алгоритмы комбинированного подхода организованы в виде единой технологической цепочки. Подобная организация позволяет рассматривать реализованный подход как прототип обобщенного вычислительного эксперимента. Приводятся примеры практической реализации подхода для различных классов задач.

2. *Знаменская И.А., Коротеева Е.Ю., Шишаков В.В., Градобоева О.Н., Новинская А.М.* **Термографическая визуализация тепловых потоков в области лица с целью анализа психофизического состояния человека**

При введении человека в стрессовое состояние меняется активность потовых желез, учащается пульс и ускоряется интенсивность и ритм дыхания, что отражается в кратковременных изменениях теплового поля лица. Использование термографии позволяет регистрировать изменения теплового поля на лице человека и рядом с его поверхностью, вызванных деятельностью центральной и периферической нервной системы. С помощью визуализации и количественной оценки тепловых потоков в области лица, возможен дистанционный анализ эмоционального состояния человека, в случае предварительного анализа физиологических особенностей индивидуума в спокойном состоянии.

3. *Ринкевичюс Б.С., Смольский С.М., Толкачев А.В., Носков В.Я., Гречихин В.А.*  
**Лазерная доплеровская анемометрия: достижения и перспективы**

В докладе представлено прошлое, настоящее и будущее лазерной доплеровской анемометрии. Показаны современные возможности волоконно-оптических ЛДА (датчиков) для измерения скорости перемещения твердых поверхностей; микродатчики для применения в медицине; адаптивные ЛДА для исследования оптически неоднородных потоков.

**13.00–14.00** Обед

**14.00–15.45** Секционные доклады. Секция 5.

**28 июня**

**10.00–13.30** Секционные доклады. Секции 6, 7.

**13.30–14.30** Обед

**14.30–18.00** Секционные доклады. Секции 3, 4.

**29 июня**

**11.00–14.00** Лекции молодежной научной школы СМДП-2017

**14.00–15.00** Обед

**15.00–18.30** Секционные доклады. СМДП-2017

**30 июня**

**10.00–13.00** Секционные доклады. Секции 1, 2.

**13.00** Подведение итогов конференции

## **Секция 1. Лазерная анемометрия**

**Руководители секции** — д.ф.-м.н. Д.М. Маркович,  
к.т.н. Иншаков С.И.

**Секретарь секции** — Тихомирова А. В.

### **1. Приглашенный доклад**

*Сергеев Д.А., Кандауров А.А., Троицкая Ю.И.* **Особенности применения PIV методов при моделировании теплогидрофизических процессов на ЯЭУ**

В работе обсуждаются особенности применения PIV-методов при исследовании теплогидравлических процессов в крупномасштабных моделях ядерных энергетических установках (ЯЭУ), и в частности результаты, полученные на стенде ТИСЕЙ, крупномасштабной модели перспективного реактора на быстрых нейтронах (БН). Описаны методики одновременного использования нескольких лазеров для подсветки и видеокамер для съемки, методики обработки изображений, калибровки и точности выполненных измерений.

*Венедиктов В.С., Замашиков В.В., Тутикин А.В., Третьяков П.К.* **Применение метода PIV для исследования воздействия нестационарного электрического поля на диффузионное горение газообразных углеводородов**

Наложение внешнего электрического поля (ЭП) на пламя рассматривается как один из перспективных методов решения задач по оптимизации процессов сжигания органического топлива, актуальных в современном мире.

В работе приведены результаты исследования нестационарного воздействия слабого ЭП на диффузионное горение углеводородов оптическими методами диагностики, не вносящими возмущений в структуру исследуемого объекта.

Помимо прямой фото- и видео регистрации, спектральной съемки собственного излучения пламени, в работе был применён метод PIV для изучения воздействия ЭП на диффузионный факел в спутном потоке воздуха.

Получены данные (PIV), свидетельствующие о возможности улучшения процесса смешения, интенсификации горения в случае воздействия на пламя ЭП заданной пространственно-временной конфигурации.

*Гречихин В.А., Маслов В.П., Минеев Б.И., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В.* **Дифференциальный метод измерения быстропеременных деформаций твердых тел лазерным измерителем динамических деформаций.**

Приведены результаты исследования оптического лазерного метода измерения параметров быстропеременных деформаций, основанного на оценке вибросмещения оптических меток, нанесенных на поверхность ножки образцового камертона на небольшом расстоянии друг от друга. Проведено обоснование необходимости использования дифференциальной схемы измерения относительного вибросмещения оптических меток. Предложена оптическая схема

лазерного дифференциального измерителя динамических деформаций на базе двухканального лазерного доплеровского анемометра.

4. **Расковская И.Л. О принципиальной возможности измерения локального акустического давления в жидкости на основе интерференционной схемы ЛДА.**

Показано, что в ультразвуковом поле в жидкости принципиально возможно косвенное измерение колебательной скорости частицы и соответствующего локального избыточного давления на основе регистрации рассеянного микрочастицами лазерного излучения при использовании интерференционной схемы лазерного доплеровского анемометра (ЛДА). Рассеянное излучение представляет собой частотно-модулированный сигнал, информативным параметром которого является девиация частоты на второй гармонике акустического поля.

## **Секция 2. Теневые и рефрактометрические методы**

**Руководители секции — к.ф.-м.н Сергеев Д.А.**  
**Секретарь секции — Белов С. Ю.**

1. **Приглашенный доклад**

**Ермакова О.С., Кандауров А.А., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И. Исследование механизмов генерации брызг при ветро-волновом взаимодействии теневыми методами.**

В работе представлены результаты исследований механизмов генерации брызг, при обрушении волн, полученные в рамках лабораторного моделирования ветро-волнового взаимодействия на Высокоскоростном ветро-волновом канале ИПФ РАН. Для исследований использовалась система многоракурсной высокоскоростной видеосъемки с применением теневого метода, включая подводную подсветку. Полученные результаты позволили классифицировать механизмы, приводящие к образованию брызг.

2. **Васильев А.Ю., Маслов В.П., Свириденков А.А., Челябин О.Г., Ягодкин В.И. Сравнение измерений размеров капель в факелах распыливания форсунками методами Shadowgraphy и PDPA.**

Проведены измерения размеров капель распыленного топлива в диапазоне от 10 до 100 мкм прямым методом обработки изображений частиц Shadowgraphy (PIS, (PSV)) и фазовым доплеровским анализатором частиц PDPA. Современная техника Shadowgraphy, которая была использована для визуализации капель, наблюдаемых в факелах распыливания пневматических форсунках, основана на использовании фотографий с высоким разрешением, получаемых при



использовании импульсного источника излучения. Этот метод не зависит от формы и свойств частиц и позволяет измерять их размеры от 5 мкм при использовании соответствующих систем получения и обработки изображения и источника освещения. Для обработки изображения использовалась программа Davis 8.4. Алгоритм определения размеров состоит из двух шагов. На первом шаге фиксируются частицы в заданном поле зрения, и на втором шаге анализируется их размер, форма и положение. Каждая точка измерения охватывает площадь размером 2,2мм на 2,9мм. Проведено сравнение D<sub>32</sub> размеров капель, полученных двумя системами. Было обнаружено, что размеры капель, полученные методом Shadowgraphy, согласуются в пределах 6% с размерами, полученными методом PDPA в области основной концентрации капель. Размеры капель D<sub>32</sub>, полученные методом Shadowgraphy, больше чем размеры, полученные методом PDPA за исключением границы факела, где они меньше.

3. *Сычёв Д.Г.* **Влияние турбулентности на результаты теневого фонового метода.**

Произведена оценка влияния наличия турбулентного потока на различных участках оптической оси системы (до и после тестового объекта) в теневом фоновом методе. Показано, что наличие турбулентности существенно сказывается на получаемых изображениях.

### **Секция 3. Визуализация потоков**

**Руководители секции** — д.ф.-м.н. И.А. Знаменская,

д.т.н. Ю.Н. Дубнищев

**Секретарь секции** — Корсаков И. А.

1. *Приглашенный доклад*

*Знаменская И.А., Дорошенко И.А., Наумов Д.С., Наумова Т.Д., Кули-заде Т.А.*  
**Высокоскоростная регистрация взрывных волн от импульсного разряда в потоке.**

Проведено экспериментальное исследование локализованного свечения импульсного объемного разряда с предыонизацией ультрафиолетовым излучением от плазменных листов, получены теневые и PIV изображения сверхзвукового потока с ударными волнами, создаваемого разрядом. Объемный разряд в контрагированной форме представлял собой вертикальный пробой цилиндрической формы высотой 24 мм. Длительность пробоя не превышала 300 нс, что приводило к повышению внутренней энергии газа в зоне пробоя и образованию потока с цилиндрическими ударными волнами. Поток фиксировался с помощью высокоскоростной теневой съемки (скорость съемки до 525 000 кадров/с). На полученных кадрах были визуализированы ударно-волновые конфигурации, измерены их положения и скорости. Также был визуализирован разогретый канал, образовавшийся на месте пробоя. Спутные

потоки за образовавшимися после пробоя ударными волнами также были визуализированы посредством цифровой трассерной анимометрии (PIV). В случае инициирования разряда в потоке за клином пробой происходит в области пониженной плотности в зоне вихревого течения в донной части клина. Было показано, что время свечения разряда в обоих режимах локализации значительно превосходит время свечения в объемном режиме. Длительность послесвечения составляла до 12,5 мкс.

## 2. *Приглашенный доклад*

*Дубнищев Ю.Н., Арбузов В.А., Арбузов Э.В., Бердников В.С., Мелёхина О.С., Шибеев А.А.* **Визуализация конвективных структур и волны кристаллизации в горизонтальном слое воды.**

Методами гильберт-оптики и сдвиговой интерферометрии визуализированы конвективные структуры и волна кристаллизации, индуцированные градиентом температур в горизонтальном слое переохлажденной воды, ограниченном термостатированными поверхностями. Полученные результаты иллюстрируют эффективность оптических методов в задачах, связанных с изучением конвекции и фазовых переходов, представляющих интерес для физического моделирования и практических приложений.

## 3. *Амелюшкин И.А., Жбанов В.А., Стасенко А.Л.* **Физические процессы на межфазной границе при кристаллизации метастабильной жидкости.**

Приведены результаты визуализации, тепловизионной съемки и измерений физико-химических параметров, характеризующих особенности кристаллизацию метастабильной жидкости. Предложено выражение для зависимости скорости фронта кристаллизации метастабильной переохлажденной жидкости от её физических свойств и температуры. Получены численные оценки температурной зависимости энергетического барьера переохлажденной воды и «порядка реакции» соответствующего фазового перехода. На основании экспериментальных данных приведены результаты расчета интенсивности излучения на фронте кристаллизации в зависимости от температуры переохлаждения. Предложены математические модели исследуемых физических явлений.

## 4. *Гузев А.С., Маслов В.И.* **Отрывное обтекание спортивного весла.**

Представлены результаты исследования структуры обтекания и аэродинамические характеристики лопасти спортивного весла. Выявлены некоторые закономерности между сопротивлением лопасти и структурой течения в зоне отрыва потока.

## 5. *Зудов В.Н., Третьяков П.К.* **Визуализация оптического разряда в высокоскоростной струе.**

Проведено экспериментальное исследование воздействия сфокусированного импульсно-периодического излучения CO<sub>2</sub> - лазера на инициирование и развитие процесса распространения горения в до- и сверхзвуковом потоке гомогенной топливо-воздушной смеси (CH<sub>4</sub>+air). Излучение CO<sub>2</sub>-лазера распространялось поперек потока и фокусировалось линзой на оси сверхзвуковой струи. Для регистрации структуры течения применялась теневая схема со щелью и плоским ножом, расположенным вдоль потока. Изображение фиксировалась скоростной камерой со временем экспозиции 1,5 мкс и частотой кадров 1000 1/с. Показано, что при поперечном вводе лазерного излучения в поток образуется периодическая структура теплового следа, с формированием головного скачка уплотнения от зоны энерговыделения. При малых частотах следования импульсов лазерного излучения взаимодействие теплового пятна с потоком происходит в импульсном режиме. Экспериментально показан процесс нестационарного воспламенения оптическим разрядом метано-воздушной смеси при дозвуковом истечении в неподвижную атмосферу. Результаты оптической визуализации свидетельствуют о горении в следе за областью оптического разряда.

6. *Сагайдачный А.А., Фомин А.В. Тепловизионная визуализация кровотока в реальном времени с использованием метода спектральной фильтрации.*

Описан метод визуализации кожного кровотока в дальнем инфракрасном диапазоне длин волн с помощью тепловизора. Использована аналогия тепловых свойств кожи человека и электрических свойств фильтра нижних частот. На основе данной аналогии развит метод фильтрации, позволяющий преобразовать сигнал температуры поверхности объекта в сигнал, пропорциональный потоку крови под кожей. Приведен пример использования разработанного метода в области визуализации гемодинамики. Приведена электрическая схема фильтра, реализующего взаимное преобразование температура-кровоток в режиме реального времени.

## **Стендовые доклады**

1. *Жаркова Г.М., Коврижина В.Н., Подъячев С.П. Анализ и интерпретация данных видеорегистрации экспериментов с ЖК покрытиями.*

Оптическая диагностика газодинамических параметров на поверхности обтекаемой модели может выполняться с помощью холестерических жидких кристаллов. Для цифровой обработки видеозаписей панорамного цветного оптического отклика холестерических жидких кристаллов на внешние возмущения (касательное напряжение поверхностного трения, температура) необходимо специализированное программное обеспечение. В докладе будут описаны возможности качественной и количественной диагностики с помощью ПО задач аэро- и теплофизического эксперимента, разработанного с использованием интегрированной среды быстрой разработки приложений Lazarus.

## **Секция 4. Новые оптические методы диагностики потоков**

**Руководители секции** — к.т.н. Иншаков С.И.,  
к.т.н. Поройков А.Ю.

**Секретарь секции** — Пояцыка Д.А.

1. *Ведашкина А.В., Павлов И.Н.* **Применение метода каустик лазерного излучения для определения параметров прозрачных неоднородных сред.**

В настоящее время исследования процессов тепло- и массообмена представляют большой научный и практический интерес. В этом аспекте оптические методы изучения физических процессов в жидкостях и газах имеют большие преимущества по сравнению с другими методами. При наличии существенного градиента показателя преломления целесообразно применять методы, в которых используется структурированное лазерное излучение. Одним из таких методов является метод лазерной рефрактографии. Применение структурированного лазерного излучения в отличие от широких световых пучков позволяет оценить изменения показателя преломления в пограничном слое с высокой точностью. Определение геометрических параметров каустик, возникающих при рефракции структурированного лазерного излучения в оптически неоднородных средах, дает дополнительные возможности при решении обратной задачи. В статье рассматриваются два типа неоднородностей: диффузионный слой жидкости и температурное поле около охлажденного тела в горячей воде.

2. *Иншаков С.И., Кудрявцева Е.Д.* **Эмиссионная спектрометрия распределения колебательной и вращательной температуры в низкотемпературной плазме.**

Рассмотрены основные спектрометрические методы анализа горения пропано-воздушной смеси в присутствии продольного неравновесного электрического разряда в сверхзвуковом потоке воздуха. Представлено описание экспериментальной установки. Полученные спектры колебательно-вращательных состояний двухатомных молекул диоксида углерода и циана проанализированы тремя методами: графическим методом, методом относительных интенсивностей (метод Орнштейна) и с помощью неразрешенной структуры спектра. Сделаны выводы об их практической применимости.

3. *Кобцев В.Д., Кострица С.А., Курицын Ю.А., Лигер В.В., Мироненко В.Р.* **Характеризация точности лазерно-абсорбционного термометра газовых потоков в области высоких температур с использованием спектроскопии когерентного антистоксова рассеяния света.**

Экспериментально проверена точность измерений температур квазиоднородно-нагретых газов в диапазоне 1500-2100 К с использованием разработанного трассового термометра реагирующих газовых потоков на основе

диодной лазерной абсорбционной спектроскопии (ДЛАС) молекул  $H_2O$ . Тестовым объектом служило ламинарное метаново-воздушное пламя щелевой горелки с частичным предварительным смешиванием компонентов горючей смеси, обеспечивающее высокую однородность распределения температуры в направлении вдоль щели. Значения средних температур, полученные с помощью ДЛАС при трассовых измерениях в этом направлении в различных частях пламени, сравниваются с результатами локальных измерений температуры вдоль этой трассы, выполненных с использованием спектроскопии когерентного антистоксова рассеяния света (КАРС). Абсолютные значения и профили распределения температур, полученные методом ДЛАС, удовлетворительно согласуются с результатами КАРС-измерений, а различия при температурах  $\sim 1500-2100$  К не превышают 10%.

4. *Коротких И.И., Малахов Ю.И., Скорнякова Н.М.* **Высокоскоростная регистрация формирования разряда в индуктивно-связанной плазме.**

Представлены результаты регистрации начальной стадии формирования разряда в индуктивно-связанной плазме методом высокоскоростной цифровой видеосъемки. Исследовались процессы предварительного вспомогательного пробоя в индукторе и последующего формирования факела в среде аргона при давлении близком к атмосферному. Получена информация о временной эволюции геометрических размеров плазменного факела и изменения его как интегральной интенсивности излучения, так и в отдельных спектральных линиях.

5. *Поройков А.Ю.* **Определение погрешности измерения формы гибкой деформируемой поверхности методом корреляции фоновых изображений.**

В работе приведен разработанный и реализованный автором комплекс определения погрешности измерения методом корреляции фоновых изображений. Комплекс позволяет определять погрешность измерения деформаций амплитудой 20 мм на поверхности площадью  $380 \times 380$  мм<sup>2</sup> с дискретностью 0,5 мм по горизонтали и вертикали и 0,001 мм по высоте, и погрешностью не более 0,075 мм. Представлен алгоритм работы комплекса и результаты его измерений.

## **Стендовые доклады**

1. *Зыков А.Ю., Иванова Н.А.* **Фототермокапиллярный метод диагностики размеров подповерхностных теплопроводных включений в нетеплопроводном материале.**

В работе фототермокапиллярный (ФТК) эффект использован для диагностики размеров подповерхностных инородных теплопроводных включений в нетеплопроводной подложке. Модельной системой служил эбонит с вмонтированными заподлицо вертикальными и горизонтальными медными

втулками диаметром 2,2 мм. Максимальная длина вертикальной втулки  $l_{\text{вт}} = 14$  мм, а горизонтальной –  $l_{\text{вт}} = 52$  мм. Рабочая поверхность подложки покрыта пленкой из высохшего слоя черного цапонлака, поглощающей излучение пучка накачки (максимальная мощность пучка накачки  $P_{\text{нак}} = 10,4$  мВт, диаметр несфокусированного и сфокусированного пучка равны 2,5 и 0,5 мм), а сверху нанесен тонкий слой силиконового масла ПМС-5 ( $h = 300$  мкм), в котором возбуждали ФТК эффект. Используя маломощный зондирующий расфокусированный пучок лазера ( $P_{\text{пр}} = 0,3$  мВт), измеряли диаметр  $D_{\text{ст}}$  стационарного ФТК сигнала в зависимости от  $l_{\text{вт}}$ . Установлено, что на начальном участке зависимости  $D_{\text{ст}}(l_{\text{вт}})$  для вертикальных втулок метод имеет максимальную чувствительность  $\Delta D_{\text{ст}}/\Delta l_{\text{вт}} = -120$  для  $l_{\text{вт}} \leq 1,6$  мм, а для горизонтальных – максимальная чувствительность  $\Delta D_{\text{ст}}/\Delta l_{\text{вт}} = -79$  достигается для  $l_{\text{вт}} \leq 3$  мм. Дальнейшее увеличение  $l_{\text{вт}}$  втулки не приводило к заметному изменению  $D_{\text{ст}}$ , что очевидно связано с достижением предельной  $l_{\text{вт}}$  характерной для термически полубесконечной втулки. В случае горизонтальных втулок повышение  $P_{\text{нак}}$  с 3,9 до 10,4 мВт увеличивает крутизну зависимости  $\Delta D_{\text{ст}}/\Delta x$  на границах втулки в 9 раз.

## **Секция 5. Компьютерные методы обработки сигналов и изображений**

**Руководители секции** — к.т.н. В.А. Гречихин,

к.т.н. Н.М. Скорнякова

**Секретарь секции** — Ломаев М. С.

### **1. Приглашенный доклад**

**Арумов Г.П., Бухарин А.В. Использование параметров, описывающих трансформацию пучка, в задаче определения поперечных сечений для несферических частиц**

Представлены две исследовательские программы для нахождения сечений по изображениям частиц с использованием ненормализованных моментов. Программа эффективного восстановления основана на связи между ненормализованными моментами первого и второго порядков с пропусканием и угловым размером ореола от рассеяния вперед. Эта программа имеет перспективы в метрологии, поскольку эта связь определяется посредством калибровки. Программа полного восстановления использует логнормальное распределение в качестве пробного для оценки ширины функции распределения частиц по сечениям. Показано, что ненормализованные моменты до четвертого порядка дают удовлетворительное совпадение параметра среднего с параметром, найденным с использованием обычных статистических моментов для отдельных сечений.

2. *Гешева Е.С., Шторк С.И.* **Исследование характеристик винтовых вихрей в закрученном потоке.**

Работа направлена на подробное изучение характеристик вихревого потока, образующегося в камере тангенциального типа. Измерены поля скорости и завихренности с помощью бесконтактного метода диагностики потока, а также проведена верификация расчетных данных, полученных с помощью CFD пакета Star CCM+ с использованием LES и DES методов моделирования турбулентных потоков. Расчетные профили скорости и частота прецессии вихря согласуются с экспериментальными данными, что говорит о корректности выбранного подхода моделирования турбулентного закрученного потока.

3. *Кужук Ю.Н.* **Цифровая обработка сигналов опτικο-электронной системы измерения относительных деформаций.**

Данная работа посвящена анализу погрешностей корреляционного и кепстрального алгоритмов обработки сигналов, получаемых опτικο-электронным методом оценки относительной деформации объектов с использованием высокоскоростной видеокамеры. Проведено исследование потенциальной точности оценки относительной деформации модели эталонной сетки, численное моделирование и исследование влияния параметров сигнала и шума на точность измерений. Выполнено сравнение нижней границы среднего квадратического отклонения (СКО) погрешностей эффективных оценок относительной деформации с погрешностями, полученными в результате численного моделирования алгоритмов обработки сигналов опτικο-электронной измерительной системы.

4. *Сапронов М.В., Скорнякова Н.М.* **Компьютерная визуализация индикатрис рассеяния в динамике.**

Исследована зависимость индикатрис рассеяния электромагнитных волн на сферических однородных и изотропных частицах от параметров центров рассеяния методами компьютерного моделирования. Составлен алгоритм расчета двумерных и трехмерных индикатрис рассеяния на основе теории Ми. Визуализирована динамика индикатрис рассеяния плоско поляризованного излучения при изменении радиуса частиц и их показателя преломления.

5. *Хренникова Т.А.* **Методы цифровой обработки сигнала гомодинного лазерного доплеровского виброметра.**

С использованием неравенства Рао-Крамера проведен расчет нижней границы дисперсии эффективной оценки индекса модуляции сигнала гомодинного лазерного доплеровского виброметра (ЛДВ). Предложены методы обработки сигнала гомодинного ЛДВ для различных видов оптических схем. Проведено численное моделирование и сравнение алгоритма обработки сигнала с оценкой индекса модуляции по ширине спектра для одноканальной схемы гомодинного ЛДВ и алгоритма обработки для схемы с оптическим квадратурным каналом.

## Секция 6. Оптические методы исследования микро- и нанотечений

Руководители секции — д.ф.-м.н. Б.С. Ринкевичюс,  
Секретарь секции — Ильин Д. В.

### 1. *Приглашенный доклад*

*Иванова Е.П. Рентгеновский лазер с оптической самонакачкой с  $\lambda \sim 13,4$  нм на переходе  $4f \ ^1P_1 - 4d \ ^1P_1$  Ni-подобного олова для промышленной нанолитографии*

Представлена модель источника монохроматического излучения с  $\lambda \sim 13,4$  нм, с высоким энергетическим выходом, предназначенного для промышленной нанолитографии. Создание высокоэнергетических источников в указанной области является актуальной проблемой, поскольку именно для этой области разработаны многослойные зеркала с высоким коэффициентом отражения ( $>60\%$ ).

Основа источника – рентгеновский лазер (РЛ) на переходе  $3d93/24f5/2 [J=1] - 3d93/24d3/2 [J=1]$  Ni – подобных ионов олова ( $Sn22+$ ) в плазме образованной при взаимодействии наноструктурированной мишени олова с интенсивным ультракоротким лазером накачки ( $I_{imp} \sim 8 \times 10^{17}$  Вт/см<sup>2</sup>). Механизм инверсии лазеров с оптической само накачкой обусловлен реабсорбцией (перепоглощением) фотонов в оптически плотной плазме. Обсуждаются: принцип создания мишени, схема экспериментальной установки, расчеты коэффициентов усиления и квантовых выходов РЛ с длиной волны 13,4 нм.

### 2. *Доморацкий Е.П., Байбикова Т.Н. Лазерный метод оптико-электронного контроля размеров и формы движущихся микрообъектов с реконструкцией по их импульсным проекционным изображениям.*

Предложен лазерный быстродействующий метод геометрического оптико-электронного дифференциального контроля потока трехмерных микрообъектов (МО), основанный на статистической динамической малоракурсной реконструкции размеров и формы каждого МО по базовым признакам одной триады его импульсных дискретных двумерных проекционных изображений. В качестве базовых признаков выбраны площади трех взаимноортогональных двумерных проекционных изображений МО и линейные размеры трех его одномерных проекционных изображений на взаимноортогональные оси координат (ракursы).

Импульсные изображений с движущихся (летающих) МО формируются путем их засветки в параллельных лучах от импульсных лазерных источников оптического излучения и одновременной их синхронной регистрации с помощью оптико-электронных позиционно-чувствительных видеодетекторов с памятью, работающих в режиме раздельной записи и считывания изображений.

При этом пространственными геометрическими характеристиками при описании размеров каждого МО являются линейные (габаритные) размеры и средний проектированный диаметр (D) трехмерного изображения



аппроксимирующего его эллипсоида общего вида, а при описании формы МО — коэффициент формы (К), определяемый отношением максимального и минимального габаритных размеров (осей) аппроксимирующего эллипсоида.

Быстродействие данного метода контроля — не менее 100 МО/с. При этом относительная погрешность контроля диаметра МО не превысила 0,25 % (при достоверности  $PD = 0,7$  и  $K = 1,3$  отн.ед.), а относительные погрешности контроля коэффициента формы МО лежат в диапазоне от 2,3 % (при  $PK = 0,7$  и  $K = 1,3$  отн.ед.) до 0,6% (при  $PK = 0,96$  и  $K = 1,05$  отн.ед.).

### 3. *Иванова С.В.* Несоразмерные структуры в нанодоменном кристалле.

Изучалась структура рассеянного излучения нелинейным кристаллом барий натриевого ниобата в дальнем поле в температурной области 20-600 °С в зависимости от направления поляризации луча. Результаты показали, что изменения картин рассеяния на экране в дальнем поле соответствуют температурным аномалиям несмещенной компоненты рассеяния в области 20-600 °С при направлении луча перпендикулярно оптической оси и поляризации вдоль этой оси а также эволюции нанодоменных структур в температурной области 20-300 °С. Сложная картина трансформации структуры рассеяния наблюдалась в исследованной температурной области при противоположном направлении поляризации луча.

## **Секция 7. Применение оптических методов**

**Руководители секции** — к.т.н. В.В. Близнюк,

к.т.н. К. М. Лапицкий

**Секретарь секции** — Пояцька Д. А.

### 1. *Бабаев А.А.* Определение разрывов облачности в дневных условиях для повышения производительности станций спутниковой лазерной дальнометрии.

Доклад содержит описание разработанного алгоритма разрывов облачности в дневных условиях для повышения производительности станций спутниковой лазерной дальнометрии. Предложенный алгоритм является адаптивным и содержит настройки для регулирования быстродействия. Прикладные возможности алгоритма апробированы на экспериментальных данных, полученных с лазерных станций спутниковой лазерной дальнометрии.

### 2. *Близнюк В.В.* Многофункциональный оптико-электронный комплекс для диагностики излучения лазерных диодов в свободное пространство.

Рассмотрена конструкция измерительной установки, обеспечивающей одновременные измерения энергетических, пространственно-энергетических и поляризационных параметров излучения с большой расходимостью.

3. *Веденин Е.И., Чартий П.В., Шеманин В.Г.* **Изменение функции распределения частиц по размерам в потоке как критерий отказа пылеулавливающего оборудования.**

Возникновение сверхнормативных аэрозольных выбросов влечет изменение функции распределения частиц по размерам. Числовым параметром, позволяющим восстанавливать функцию распределения частиц по размерам является средний объемно-поверхностный диаметр частиц, что позволяет использовать изменение среднего объемно-поверхностного диаметра в качестве критерия возникновения сверхнормативного аэрозольного выброса. Для оценки эффективности использования среднего объемно-поверхностного диаметра в качестве критерия возникновения сверхнормативного аэрозольного выброса введено понятие кратности отказа. Оцененная минимальная кратность отказа, которую позволяет обнаруживать изменение среднего объемно-поверхностного диаметра оказалась меньше минимальной кратности отказа, которую позволяют обнаруживать другие существующие критерии возникновения сверхнормативных аэрозольных выбросов, такие как возрастание массовой концентрации и изменение перепада давления на последней ступени очистки.

4. *Корсаков И.А., Близнюк В.В., Семенова О.А., Мунхцэцэг Х.* **Автоматизированный контроль режима генерации лазерного диода, входящего в лазерную измерительную систему.**

Описана установка, обеспечивающая в автоматизированном режиме работы высокоточные измерения диаграммы направленности излучения лазерного диода в плоскости p-n-перехода.

5. *Латицкая И.А., Латицкий К.М., Янина Г.М.* **Лазерная оптоволоконная система с цифровой регистрацией сигнала для измерения турбулентных пульсаций воздушного потока.**

Выполнены экспериментальные исследования характеристик волоконно-оптического датчика, работающего по схеме светового маркера с модуляцией лазерного излучения при регистрации сигнала цифровой фотокамерой. В процессе работы создан лабораторный макет лазерной системы диагностики статистических характеристик турбулентности на основе фотографической регистрации аккумулированных двумерных сигналов оптоволоконного датчика. Разработана фотографическая методика регистрации прогиба рабочего элемента оптоволоконной системы. Проведена экспериментальная проверка результатов расчета резонансных частот датчика.

6. *Паршин В.А.* **Учет векторного характера излучения лазерного диода в свободное пространство при вводе его в оптическое волокно на входе лазерной доплеровской системы.**

Показано, что при выработке алгоритма оптимального ввода излучения лазерного диода в оптическое волокно необходимо пользоваться дипольно-волновой теорией дифракции

7. *Печинская О.В., Сангаджиева Е.Д., Скорнякова Н.М.* **Глубина резко изображаемого пространства и глубина резкости в оптических системах, оснащённых адаптером шаймпфлюга.**

В работе изложены два подхода к определению глубины резко изображаемого пространства в оптических системах с адаптером Шаймпфлюга: относительно предмета и изображения. Получены соотношения, позволяющие оценить изменение ГРИП в зависимости от угла наклона оси объектива. Определена точность установки объектива как функция угла наклона оси объектива и заданных параметров регистрации изображения.

8. *Смирнов В.И.* **Анализ погрешностей измерения параметров поляризации квазимонохроматического излучения на основе теории информации.**

Методами параметрической теории информации исследованы минимальные дисперсионные границы оценок параметров Стокса частично поляризованного квазимонохроматического излучения в поляриметрической схеме с анализатором и фазовым компенсатором в условиях нормального аддитивного шума. На основе анализа распределений плотности информации о параметрах Стокса и их комбинаций по факторам угла поворота анализатора и фазового сдвига компенсатора дано обоснование существующим и найдены новые оптимальные планы измерений. Найдены соответствующие этим планам дисперсионные матрицы. Выведены формулы для получения эффективных оценок. Рассчитаны предельные погрешности оценок различных параметров поляризации. Результаты анализа подтверждены методом численного моделирования.

9. *Тарасов А.Е.* **Измерительная установка для проведения экспресс-анализа модовой структуры излучения лазерного диода.**

Описана конструкция установки, которая позволяет в условиях проведения профилактических и ремонтных работ лазерных измерительных систем мобильно проверить режим генерации лазерного диода на основной моде.

## **Стендовые доклады**

1. *Салихов Т. Х., Алишер Маъмалатиф, Ходжаев Ю.П.* **Теория генерации второй гармоники фотоакустического сигнала двухслойными оптически неоднородными твердотельными образцами.**

Предложена теория генерации второй гармоники нелинейного фотоакустического сигнала оптически неоднородными двухслойными

твердотельными образцами. Установлено, что для наиболее интересных случаев, имеющих место в эксперименте, амплитуда этой гармоники ФА-сигнала простым образом связана с термическим коэффициентом оптического коэффициента поглощения обоих слоев образца. Следовательно, измерение амплитуды ФА- сигнала позволяет определить величину термического коэффициента и, тем самым, температурную зависимость величины коэффициента оптического поглощения системы.

**Научная молодежная школа**  
**«Современные методы диагностики потоков –2015»**  
**Научный руководитель — д.ф.-м.н. Б.С. Ринкевичюс**  
**Ученый секретарь — к.т.н. Н.М. Скорнякова**

**Секционные доклады**

1. *Белов С.Ю., Петрова О.В.* Устранение искажений на изображениях при наличии турбулентности.

Целью исследования является устранение влияния модели турбулентности на получаемых изображениях. Решение данной задачи достигается путем компьютерной фильтрации зашумленных изображений.

В работе получены изображения с смоделированными турбулентными искажениями, а также проведена их обработка при помощи каскадных фильтров.

2. *Близнюк В.В., Григорьев В. С., Кривоногов Р. В., Буянхишиг Р.* Температурные зависимости поляризационных параметров и спектра излучения лазерных диодов, используемых в лазерных измерительных системах

Определены температурные зависимости относительных изменений контраста и пиковой длины волны излучения одномодового лазерного диода в диапазоне значений температуры окружающей среды от 290 К до 345 К

3. *Вин А.М., Ринкевичюс Б.С., Павлов И.Н.* Оптико-электронный комплекс для визуализации формы шероховатой поверхности с помощью структурированного оптического излучения

Описаны схема и принцип работы разработанного оптико-электронного комплекса для визуализации формы шероховатой поверхности с помощью структурированного оптического излучения. Исследованы характеристики структурированных оптических пучков, получаемых с помощью дифракционных оптических элементов. Разработана методика визуализация формы плоских шероховатых поверхностей.

4. *Вин Тху* **Опτικο-электронные комплекс диагностики аэродинамических потоков корреляционными методами**

Работа посвящена расчету рассеяния света частицами в среде MathCad. В теоретической части рассмотрен физический смысл рассеяния света оптически однородными сферическими частицами; приведены основные закономерности рассеяния Ми в случае освещения частицы одним пучком света; описаны особенности рэлеевского рассеяния; дан сравнительный анализ рассеяния Рэля и рассеяния по теории Ми.

5. *Ильин Д.В., Евтихиева О.А.* **Моделирование влияния турбулентности на оптические методы**

В данной статье рассматривается влияние турбулентности, смоделированной на изображении, на оптические методы обработки изображений. Создается пара изображений, состоящая из исходного изображения и такого же изображения, смещенного относительно исходного, проводится моделирование турбулентности на изображении со смещением. Проводится обработка данной пары изображений кросскорреляционным методом при различных коэффициентах турбулентности. Была получена зависимость полученного в результате обработки значения смещения и, соответственно, погрешности результатов от значения коэффициента турбулентности.

6. *Ломаев М.С., Латина Л.Г.* **Вейвлет-обработка изображений.**

В работе показаны возможности фильтрации и слияния изображений с помощью вейвлет-преобразования. Данные алгоритмы помогают улучшать изображения оптических методов диагностики потоков в случае, если по всему изображению или частично наблюдается дефокусировка.

7. *Молодцов И.С., Скорнякова Н.М.* **Обработка изображения лазерного интерференционного метода с применением гильберт преобразования**

В данной статье описывается алгоритм обработки интерференционной картины от пузырька воздуха в основе которого лежит Гильберт преобразование. Метод позволяет определять мгновенную частоту и фазу интерференционной картины. Данные результаты важны для определения параметров пузырька в будущем.

8. *Пояцька Д.А., Евтихиева О.А.* **Влияние искажений лазерной плоскости на точность метода анемометрии по изображениям частиц.**

В данной работе рассмотрены различные случаи прохождения лазерной плоскости через полый стеклянный цилиндр. С помощью компьютерного моделирования получены картины, характеризующие профиль лазерной плоскости в приближении геометрической оптики. Был проведён анализ смещения лучей на экране после прохождения лазерной плоскости через цилиндр. Проведен эксперимент, соответствующий теоретическому расчету.

9. *Пью Ту Кхант* **Комплекс теневой анемометрии по изображениям частиц для измерения малых скоростей**

В докладе представлен метод теневой анемометрии по изображению частиц, описан его принцип действия, проведён подбор источника излучения и оптимальных параметров метода. В процессе работы проводились экспериментальные исследования. В результате исследования было проведено сравнение результатов, полученных теоретически и экспериментально.

10. *Сангаджиева Е.Д., Печинская О.В.* **Исследование влияния поворота оси объектива к оси матрицы видеокамеры на глубину резкости**

В работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния поворота оси фотографического объектива к оси матрицы видеокамеры в оптической системе, оснащённой адаптером Шаймпфлюга, для предмета на конечном расстоянии. Конкретизируются понятия глубины резко изображаемого пространства и глубины резкости для объектива, наклонного к оптической оси системы. Предложен алгоритм определения глубины резкости по изображению тестового экрана.

11. *Со Мин Канг, Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В., Зубарев Е.И.* **Исследования рефракции плоского оптического пучка около нагретого шара и цилиндра**

Изложены принципы оптической рефрактографии - метода диагностики оптически неоднородных сред и потоков жидкости, основанного на рефракции пространственно структурированного оптического излучения (СОИ), цифровой регистрации рефракционной картины (рефрактограммы) и ее компьютерной обработке с целью восстановления свойств среды. Приведены примеры визуализации теплофизических процессов, обусловленных свободной конвекцией в жидкости около нагретых тел.

12. *Суслин А.С., Поройков А.Ю.* **Разработка устройства обработки видеоинформации в режиме реального времени на основе интегральной схемы программируемой логики**

В работе изложен ход выполнения проекта по разработке макета устройства для обработки видеоинформации в режиме реального времени, на основе использования интегральной схемы программируемой логики. Устройство позволяет захватывать видеоинформацию с КМОП сенсора с последующей ее обработкой и передачей для визуализации результата по внешним интерфейсам.

13. *Шершинева А.В.* **Компьютерная обработка высокоскоростной съемки плазменного факела.**

В работе представлена методика обработки изображений плазменного факела для получения скорости распространения плазмы.