

ISSN 0021–3411

**ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ**

# **ФИЗИКА**

**ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ**

**ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ**

**ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ**

**ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА**

**ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ**

**ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ**

**КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА**

**ФИЗИКА ПЛАЗМЫ**

**2·2026**

**ИЗДАНИЕ  
ТОМСКОГО ГОСУНИВЕРСИТЕТА**

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ISSN 0021–3411

# ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ ФИЗИКА

IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

---

Том 69

Февраль, 2026

№ 2 (819)

---

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ  
Основан в 1957 г.

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ  
ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ  
ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА  
ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ  
ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ  
КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА  
ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Свидетельство о регистрации  
ПИ № ФС77-84127 от 28 ноября 2022 г.  
выдано Федеральной службой по надзору  
в сфере связи, информационных технологий  
и массовых коммуникаций

12+

Журнал входит в перечень рецензируемых научных журналов,  
включенных в список ВАК, для публикации основных результатов  
кандидатских и докторских диссертаций

### Учредитель:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Национальный исследовательский  
Томский государственный университет»

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Шеремет М.А.**, проф. (гл. редактор), Томск, Россия  
**Козырев А.В.**, проф. (зам. гл. редактора), Томск,  
Россия  
**Пермякова Л.В.** (отв. секретарь), Томск, Россия  
**Алексеев С.В.**, акад. РАН, Новосибирск, Россия  
**Асеев А.Л.**, акад. РАН, Новосибирск, Россия  
**Борисов А.В.**, проф., Москва, Россия  
**Вараксин А.Ю.**, акад. РАН, Москва, Россия  
**Ворожцов А.Б.**, проф., Томск, Россия  
**Войцеховский А.В.**, проф., Томск, Россия  
**Гитман Д.М.**, проф., São Paulo, Бразилия  
**Демин В.А.**, проф., Пермь, Россия  
**Джафаров Р.Г.**, д.ф.-м.н., Баку, Азербайджан  
**Дитенберг И.А.**, д.ф.-м.н., Томск, Россия  
**Ивонин И.В.**, д.ф.-м.н., Томск, Россия  
**Кистенев Ю.В.**, проф., Томск, Россия  
**Ковалевская Т.А.**, проф., Томск, Россия  
**Колобов Ю.Р.**, проф., Белгород, Россия  
**Коротаев А.Д.**, проф., Томск, Россия  
**Майер Г.В.**, проф., Томск, Россия  
**Манка Оронцо**, проф., Неаполь, Италия  
**Месяц Г.А.**, акад. РАН, Москва, Россия  
**Неклюдов И.М.**, акад. НАН Украины, Харьков  
**Озтоп Хакан**, проф., Элязыг, Турция  
**Ратахин Н.А.**, акад. РАН, Томск, Россия  
**Сагхир Зиад**, проф., Торонто, Канада  
**Саранин А.А.**, чл.-корр. РАН, Владивосток, Россия  
**Суржиков А.П.**, проф., Томск, Россия  
**Суханов Д.Я.**, д.ф.-м.н., Томск, Россия  
**Тао Вен-Куан**, академик Китайской академии  
наук, Сиань, Китай  
**Углов В.В.**, проф., Минск, Республика Беларусь  
**Ушаков В.Я.**, проф., Томск, Россия  
**Чайковская О.Н.**, д.ф.-м.н., Томск, Россия  
**Черепанов В.Н.**, д.ф.-м.н., Томск, Россия  
**Чумляков Ю.И.**, проф., Томск, Россия  
**Шаповалов А.В.**, проф., Томск, Россия  
**Шипилов С.Э.**, д.ф.-м.н., Томск, Россия

### EDITORIAL BOARD

**Sheremet M.A.** (Editor-in-Chief), Professor, Tomsk, Russia  
**Kozyrev A.V.** (Deputy Editor-in-Chief), Professor,  
Tomsk, Russia  
**Permyakova L.V.** (Executive Editor), Tomsk, Russia  
**Alekseenko S.V.**, Academician RAS, Novosibirsk, Russia  
**Aseev A.L.**, Academician RAS, Novosibirsk, Russia  
**Borisov A.V.**, Professor, Moscow, Russia  
**Varaksin A.Y.**, Academician RAS, Moscow, Russia  
**Vorozhtsov A.B.**, Professor, Tomsk, Russia  
**Voitsekhovskii A.V.**, Professor, Tomsk, Russia  
**Gitman D.M.**, Professor, São Paulo, Brazil  
**Demin V.A.**, Professor, Perm, Russia  
**Jafarov R.G.**, Professor, Baku, Republic of Azerbaijan  
**Ditenberg I.A.**, Professor, Tomsk, Russia  
**Ivonin I.V.**, Professor, Tomsk, Russia  
**Kistenev Y.V.**, Professor, Tomsk, Russia  
**Kovalevskaya T.A.**, Professor, Tomsk, Russia  
**Kolobov Y.R.**, Professor, Belgorod, Russia  
**Korotaev A.D.**, Professor, Tomsk, Russia  
**Mayer G.V.**, Professor, Tomsk, Russia  
**Manca Oronzio**, Professor, Naples, Italia  
**Mesyats G.A.**, Academician RAS, Moscow, Russia  
**Neklyudov I.M.**, Academician UAS, Kharkov, Ukraine  
**Oztop Hakan**, Professor, Elazığ, Turkey  
**Ratakhin N.A.**, Academician RAS, Tomsk, Russia  
**Saghir Ziad**, Professor, Toronto, Canada  
**Saranin A.A.**, Corr. Member RAS, Vladivostok, Russia  
**Surzhikov A.P.**, Professor, Tomsk, Russia  
**Sukhanov D.Y.**, Professor, Tomsk, Russia  
**Tao Wen-Quan**, Academician of the Chinese Academy  
of Sciences, Xi'an, China  
**Uglov V.V.**, Professor, Minsk, Republic of Belarus  
**Ushakov V.Ya.**, Professor, Tomsk, Russia  
**Tchaikovskaya O.N.**, Professor, Tomsk, Russia  
**Cherepanov V.N.**, Professor, Tomsk, Russia  
**Chumlyakov Y.I.**, Professor, Tomsk, Russia  
**Shapovalov A.V.**, Professor, Tomsk, Russia  
**Shipilov S.E.**, Professor, Tomsk, Russia

Журнал «Известия вузов. Физика» выходит 12 раз в год и распространяется по подписке. Подписной индекс 70380 в объединенном каталоге «Пресса России». Полные тексты статей доступны на сайте Научной электронной библиотеки: <https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=7725>. Публикация статей в журнале – бесплатная.

### КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Адрес: 634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, д. 36

Телефон: +7(3822) 53-33-35, 78-37-02

Сайт: <http://journals.tsu.ru/physics/>

E-mail: [physics@mail.tsu.ru](mailto:physics@mail.tsu.ru)

**СОДЕРЖАНИЕ****ФИЗИКА ПЛАЗМЫ**

- Коваль Т.В., Зайцев Д.Д., Денисов В.В., Савчук М.В.** Компьютерное моделирование плазменно-пучкового образования в полой катодной трубке с генераторами металлической плазмы.....5

**ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ**

- Зайцев О.В., Гареев Т.И., Нерушев О.А., Корольков И.В., Смовж Д.В., Коваленко П.В.** Синтез тонких пленок анатаза методом магнетронного распыления с дополнительным электродом и последующим отжигом ..... 14
- Гареев Т.И., Зайцев О.В., Нерушев О.А., Сорокин Д.В., Суляева В.С., Смовж Д.В.** Модификация проводящих и структурных свойств CVD-графена с использованием магнетронного разряда ..... 24

**ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА**

- Бутов В.Г., Гофман В.Н., Нестеров Е.А., Тимченко С.Н., Ушаков И.А.** Электромиграционное разделение ионов в растворах электролитов под действием переменного однополярного электрического поля..... 33
- Кочарина А.Р., Чирков Д.В., Скороспелов В.А., Турук П.А.** Моделирование пульсаций давления, вызванных прецессирующим вихревым жгутом ..... 43
- Рогачева А.К., Чирков Д.В.** Ускорение сходимости нестационарных расчетов течений жидкости в гидротурбине с использованием многосеточных методов..... 55
- Лобода Е.Л., Агафонцев М.В., Старосельцева А.А., Фатеев В.Н.** Применение термографии для исследования оптических свойств плазменных струй..... 67

**ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ**

- Зненко С.И., Борисов В.В., Жбанова В.Л.** Особенности спектров люминесценции биологической и технической природы..... 75
- Беляков М.В., Ефременков И.Ю.** Спектроскопические исследования взаимодействия тетрациклина с молоком ..... 87
- Авербух Б.Б., Авербух И.Б.** Оптические сингулярности и предельная разрешающая способность суперлинзы ..... 96
- Лукин В.П., Лукин И.П.** Возможности прогнозирования фазовых флуктуаций на вертикальных атмосферных трассах ..... 105

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ**

- Астапов Д., Астафурова Е.Г., Загibalова Е.А., Астафуров С.В., Данилова Л.В., Колубаев Е.А.** Температурная зависимость механизма разрушения сплава Ni–Al–Cr, полученного методом двухпроводочного электронно-лучевого аддитивного производства ..... 114

**ПЕРСОНАЛИЯ**

- Майер Г.В., Некрылов С.А., Степнов А.О.** Судьба ученого и государственная политика в поздней имперской и раннесоветской России (к 150-летию со дня рождения профессора Александра Петровича Поспелова) ..... 118

**CONTENTS****PLASMA PHYSICS**

- Koval T.V., Zaytsev D.D., Denisov V.V., Savchuk M.V.** Computer simulation of plasma beam formation in a hollow cathode with metal plasma generators ..... 5

**CONDENSED-STATE PHYSICS**

- Zaitsev O.V., Gareev T.I., Nerushev O.A., Korolkov I.V., Smovzh D.V., Kovalenko P.V.** Synthesis of thin films of anatase by magnetron sputtering with an additional electrode and subsequent annealing ..... 14
- Gareev T.I., Zaitsev O.V., Nerushev O.A., Sorokin D.V., Sulyaeva V.S., Smovzh D.V.** Modification of conductive and structural properties of CVD graphene using magnetron discharge ..... 24

**THERMAL PHYSICS AND HYDRODYNAMICS**

- Butov V.G., Gofman V.N., Nesterov E.A., Timchenko S.N., Ushakov I.A.** Electromigration separation of ions in solutions of electrolytes under the influence of alternating unipolar electric field ..... 33
- Kocharina A.R., Chirkov D.V., Skorospelov V.A., Turuk P.A.** Numerical simulation of pressure pulsations caused by a precessing vortex rope ..... 43
- Rogacheva A.K., Chirkov D.V.** Acceleration of convergence of unsteady fluid flow calculations in a hydro turbine using multigrid methods ..... 55
- Loboda E.L., Agafontsev M.V., Staroseltseva A.A., Fateev V.N.** Thermography application to study the optical properties of plasma jets ..... 67

**OPTICS AND SPECTROSCOPY**

- Zienko S.I., Borisov V.V., Zhbanova V.L.** Features of luminescence spectra of biological and technical nature ..... 75
- Belyakov M.V., Efremkov I.Yu.** Spectroscopic studies of tetracycline interaction with milk ..... 87
- Averbukh B.B., Averbukh I.B.** Optical singularities and the ultimate resolution of a superlens ..... 96
- Lukin V.P., Lukin I.P.** Possibilities for predicting phase fluctuations on vertical atmospheric paths ..... 105

**BRIEF COMMUNICATIONS**

- Astapov D., Astafurova E.G., Zagibalova E.A., Astafurov S.V., Danilova L.V., Kolubaev E.A.** Temperature dependence of fracture mechanism of Ni–Al–Cr alloy produced by a dual-wire electron-beam additive manufacturing ..... 114

**PERSONALITY**

- Mayer G.V., Nekrylov S.A., Stepnov A.O.** The Fate of a Scientist and State Policy in Late Imperial and Early Soviet Russia (on the 150th Anniversary of Professor A.P. Pospelov) ..... 118

## ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

УДК 537.525, 533.9.03

DOI: 10.17223/00213411/69/2/1

**Компьютерное моделирование плазменно-пучкового образования в полой катодной трубке с генераторами металлической плазмы\***Т.В. Коваль<sup>1</sup>, Д.Д. Зайцев<sup>1</sup>, В.В. Денисов<sup>1</sup>, М.В. Савчук<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

Представлены результаты компьютерного 3D-моделирования и экспериментальных исследований характеристик (концентрация и температура электронов, потенциал плазмы) плазменно-пучкового образования, формируемого в режиме горения несамостоятельного тлеющего разряда в полой катодной трубке с генераторами металлической плазмы. Расчеты, проведенные в дрейфово-диффузионном приближении, подтвердили экспериментальные измерения. Показано, что при работе генераторов металлической плазмы уменьшение плотности и увеличение температуры плазменных электронов сопровождается снижением потенциала плазмы. Различие экспериментальных и расчетных характеристик плазмы связано как с усреднением потоков частиц и их энергии в математической модели, так и с особенностями используемых генераторов электронов и металлической плазмы. Повышение температуры электронов по сравнению с традиционной разрядной схемой (полым анодом) оказывает влияние как на свойства плазменно-пучкового образования, так и на процесс формирования покрытий в данных условиях.

**Ключевые слова:** несамостоятельный тлеющий разряд, полая катодная трубка, концентрация плазмы, степень неоднородности, пучково-плазменное образование, распределение концентрации заряженных частиц, плазменный источник, компьютерное моделирование, дрейфово-диффузионное приближение.

**Введение**

Пучково-плазменные технологии и вакуумно-дуговой плазменно-ассистированный метод нанесения покрытий на поверхности режущих инструментов, деталей и элементов устройств занимают особое место среди широкого спектра способов получения функциональных и упрочняющих покрытий [1]. Одной из ключевых задач при их внедрении в производственные циклы цифрового интеллектуального автоматизированного оборудования является обеспечение требуемой степени однородности плазмы в крупных вакуумных объемах ( $> 0.1 \text{ м}^3$ ) [2–4]. Формирование плазмы с низкой степенью неоднородности и возможностью независимой регулировки рабочих параметров может быть реализовано с использованием несамостоятельного тлеющего разряда с полой катодной трубкой.

В тлеющем разряде с полой катодной трубкой и внешней инжекцией электронов плазма по способу генерации относится к пучково-плазменным образованиям (ППО) [5]. Под ППО понимают плазменную среду, в которой основные характеристики (концентрация и температура электронов, потенциал плазмы) определяются электронным пучком, инжектируемым в электрическую разрядную систему. Зажигание и устойчивое горение разряда обеспечиваются в определенном диапазоне рабочих параметров (давление, ток, напряжение), что позволяет использовать ППО для решения прикладных и фундаментальных задач [6, 7].

Математическое моделирование газового разряда является необходимым инструментом при оптимизации существующих и проектировании новых плазменных источников. Одномерные модели тлеющего разряда с полой катодной трубкой, основанные на ряде допущений, при условии их верификации экспериментальными данными позволяют описывать закономерности протекания процессов в разряде, оценивать характеристики плазмы. Характерной особенностью разряда низкого давления является наличие отрицательного потенциального барьера вблизи анода [8, 9]. Плазма внутри катодной полости представляет собой потенциальную ловушку для электронов [10–12]. Инжекция в катодную полость электронов, ускоряемых в катодном падении потенциала, позволяет понизить давление и напряжение горения тлеющего разряда [13, 14].

\* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме № FWRM-2022-0001.

## ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 539.23

DOI: 10.17223/00213411/69/2/2

**Синтез тонких пленок анатаза методом магнетронного распыления с дополнительным электродом и последующим отжигом\***О.В. Зайцев<sup>1,2</sup>, Т.И. Гареев<sup>2</sup>, О.А. Нерушев<sup>2</sup>,  
И.В. Корольков<sup>3</sup>, Д.В. Смовж<sup>2</sup>, П.В. Коваленко<sup>1</sup><sup>1</sup> Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, г. Новосибирск, Россия<sup>2</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия<sup>3</sup> Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Исследовано применение метода импульсного магнетронного распыления с дополнительным разрядом, создаваемым малым анодом, для синтеза покрытий диоксида титана. Рассмотрено влияние эффекта перераспыления на пористость пленок. Пленки были отожжены при температуре 500 °С в атмосфере воздуха и азота для получения кристаллической фазы анатаза. Рассмотрено влияние дополнительного разряда на ток заряженных частиц, направленных на подложку. Выявлены различия в пористости покрытий. Измерены размеры области когерентного рассеяния, которые оказались сопоставимы с толщиной пленок. Вычислены значения микронапряжений и энергии Урбаха и проведен анализ соответствия этих параметров друг другу в условиях пористых покрытий.

**Ключевые слова:** магнетронное распыление, диоксид титана, анатаз, фотокатализ, ионная бомбардировка, триодное распыление.

**Введение**

Тонкие пленки, получаемые методом магнетронного распыления, имеют очень широкую область применения: от защитных покрытий до различных компонентов электронных схем [1]. При этом для выбранного конкретного материала связь его свойств напрямую зависит от параметров распыления, таких как давление, мощность разряда, состав газовой атмосферы и форма подаваемого сигнала. Также одним из ключевых параметров магнетронного синтеза, который в традиционном методе нельзя устанавливать напрямую, является ионная бомбардировка растущей пленки. Ионная бомбардировка влияет на плотность пленок, степень кристалличности и их морфологию [2]. Существующие методы по управлению ионным током на подложку включают в себя: подачу ускоряющей разности потенциалов (чаще всего – отрицательное смещение подложки), использование несбалансированного магнетронного распыления, что позволяет увеличить область локализации плазмы вплоть до подложки и тем самым увеличить ионный ток, и использование дополнительных электродов для увеличения концентрации заряженных частиц в объеме камеры. Первый метод имеет ограничение из-за того, что не изменяет концентрации заряженных частиц в объеме, а увеличивает их энергию бомбардирующих ионов, однако энергия ионов имеет ограничение по максимальному значению, так как избыточная энергия бомбардирующих ионов приводит к излишним микронапряжениям в пленке [3]. Второй метод позволяет увеличить концентрацию ионов, однако параметры магнетронного разряда и ионного тока находятся в зависимости друг от друга, что уменьшает вариативность. Третий метод привлекает особое внимание, так как лишен недостатков предыдущих. Обычно в качестве дополнительного электрода используется термокатод [4], что исключает влияние на разряд, но при этом не позволяет контролировать энергию бомбардирующих ионов. В данной работе в качестве дополнительного электрода используется малый электрод, расположенный вблизи подложки, на который подается отрицательное или положительное напряжение относительно стенок камеры. Такая конфигурация позволяет увеличить концентрацию заряженных частиц в результате образования плазмы, и контроль параметров разряда позволяет контролировать ионный ток независимо от параметров магнетронного разряда.

Для данной работы в качестве материала для синтеза был выбран диоксид титана. Тонкие пленки диоксида титана широко используются в фотокатализе, так как  $\text{TiO}_2$  – полупроводниковый

\* Работа поддержана РНФ (грант № 24-19-00357, <https://rscf.ru/project/24-19-00357/>).

## Модификация проводящих и структурных свойств CVD-графена с использованием магнетронного разряда\*

Т.И. Гареев<sup>1</sup>, О.В. Зайцев<sup>1,2</sup>, О.А. Нерушев<sup>1</sup>,  
Д.В. Сорокин<sup>1,2</sup>, В.С. Суляева<sup>3</sup>, Д.В. Смовж<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

<sup>2</sup> *Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, г. Новосибирск, Россия*

<sup>3</sup> *Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

Исследовано влияние мощности, давления и времени напыления процесса магнетронного распыления на изначальные свойства графена, полученного методом химического осаждения из газовой фазы (CVD). Получены композиты олово – графен путем напыления оловянного покрытия толщиной 5 нм на CVD-графен. Давление рабочего газа варьировалось от 1 до 8 Па, мощность на мишени – от 4 до 16 Вт. Полученные материалы были охарактеризованы с помощью сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света. Определено сопротивление графена до и после напыления. По результатам анализа структурных и электропроводящих свойств определена возможность получения композита без значительного изменения структурных свойств графена. Показано, что на процесс дефектообразования в графене влияют как свойства потока распыленного вещества, задаваемые мощностью и давлением, так и время процесса напыления. Увеличение степени дефектности коррелирует с увеличением времени напыления и уменьшением скорости роста покрытия.

**Ключевые слова:** магнетронное распыление, CVD-графен, дефектность графена, композит олово – графен.

### Введение

В последнее время наблюдается интенсивное развитие исследований, посвященных созданию и изучению материалов на основе структур различной размерности, а также совершенствованию методов их получения. Эти материалы благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам открывают новые горизонты в различных областях науки и технологий. Композитные материалы демонстрируют исключительный потенциал, находя применение в оптоэлектронике, газовых и биосенсорах, электронных накопителях, катализе и системах аккумулирования энергии. Это позволяет рассматривать их в качестве перспективной альтернативы существующим материалам и устройствам. Графен как двумерный углеродный материал занимает особое место среди низко-размерных структур благодаря своим выдающимся тепло- и электропроводящим свойствам, что делает его крайне перспективным для широкого спектра применений, в частности, в области сенсорных технологий. Ключевыми требованиями к таким сенсорам являются высокая селективность, быстрый отклик, чувствительность и стабильность при работе в различных условиях. Использование графена является перспективным как для достижения превосходных свойств, так и для их сочетания в одном материале [1].

Несмотря на изначально уникальные свойства, «чистый» графен не всегда является оптимальным для всех прикладных задач. Идеальный графеновый слой не адсорбирует молекулы, однако его сенсорные характеристики могут быть существенно изменены присутствием примесей на поверхности или структурных дефектов [2]. В связи с этим одним из эффективных способов повышения селективности и чувствительности графена, например, в определении наличия опасных газов, таких как NO<sub>2</sub> в атмосфере, является его целенаправленная модификация газочувствительными наночастицами оксидов металлов. Выбор оловянных наночастиц обусловлен их известными сенсорными характеристиками, что делает рассматриваемый композит крайне перспективным для разработки высокоэффективных чувствительных элементов [3]. Однако модификация графеновой поверхности, в частности степень его дефектности, напрямую определяет проводимость композита и, следовательно, эффективность сенсорных устройств [4]. Таким образом, возникает комплексная задача оптимальной функционализации графена для получения композитов на его основе. Немаловажным в этом вопросе является выбор метода функционализации.

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00357, <https://rscf.ru/project/24-19-00357/>.

## ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

УДК 544.2, 544.3, 544.6

DOI: 10.17223/00213411/69/2/4

**Электромиграционное разделение ионов в растворах электролитов под действием переменного однополярного электрического поля**В.Г. Бутов<sup>1</sup>, В.Н. Гофман<sup>2</sup>, Е.А. Нестеров<sup>2</sup>, С.Н. Тимченко<sup>2</sup>, И.А. Ушаков<sup>2</sup><sup>1</sup> *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*<sup>2</sup> *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

Рассмотрены процессы воздействия переменного однополярного электрического поля синусоидальной формы на молекулы гидратных оболочек ионов в разбавленных растворах электролитов. Показано, что поглощение энергии электрического поля определенной напряженности и частоты молекулами воды гидратных оболочек ионов приводит к частичной дегидратации этих ионов и увеличению их подвижностей.

**Ключевые слова:** переменное электрическое поле, гидратная оболочка, дегидратация ионов.

**Введение**

Разработка новых технологий разделения химических элементов [1, 2], а также их изотопов [3] представляет важную часть развития ядерной, химической, медицинской и ряда других отраслей промышленности [4]. Химические и сорбционные методы разделения используются для получения особо чистых веществ [5, 6], а также при переработке различных производственных отходов [7]. Несмотря на широкую распространенность вышеуказанных методов [8], их использование часто сопровождается образованием побочных продуктов, требующих дополнительной переработки или утилизации. С целью снижения производственных затрат и соблюдения экологической безопасности все большее развитие приобретают безреагентные способы разделения и очистки веществ [9, 10]. К числу последних по праву относятся электромиграционные методы разделения [11]. Многочисленные исследования по разделению ионов электромиграцией в растворах и расплавах солей осуществлялись при использовании внешнего постоянного электрического поля. Это относится и к созданию математических моделей, описывающих поведение ионов, в том числе изотопных, в растворах электролитов под действием электрического поля [12, 13]. В то же время процессы разделения, протекающие в этих средах под воздействием переменных электрических полей, остаются малоизученной областью.

Отдельные опытные результаты свидетельствуют о том, что при наложении переменного электрического поля определенной полярности и частоты на раствор, содержащий в своем составе два разнородных катиона, в прикатодной части разделительного устройства наблюдалось преимущественное концентрирование одного из катионных компонентов. Авторами работы [14] экспериментально подтверждено наличие такого эффекта, названного ими электроиндуцированным дрейфом. По их мнению механизм наблюдаемого эффекта обусловлен поляризующим действием переменного асимметричного электрического поля определенной частоты на ионный сольватный комплекс с последующим образованием диполя в системе «ион – сольватная оболочка», что и определяет повышение скорости движения целевого иона по отношению к скоростям движения других ионов. Согласно классическому определению, явление переноса ионов под действием внешнего электрического поля обычно называют электромиграцией. В данной работе применительно к переменному электрическому полю мы будем использовать термин однополярность, который означает, что в рассматриваемом технологическом процессе один из электродов заземлен, т.е. имеет нулевой потенциал, в то время как другой электрод имеет либо положительный, либо отрицательный потенциал – в зависимости от знака заряда целевого иона.

Такое электрическое поле представляет собой следующие сразу друг за другом полуволны синусоидальной формы с определенной частотой и амплитудой. Такую же синусоидальную форму будут иметь такие характеристики электрического поля, как плотность тока, напряженность и энергия (рис. 1).

## Моделирование пульсаций давления, вызванных прецессирующим вихревым жгутом\*

А.Р. Кочарина<sup>1</sup>, Д.В. Чирков<sup>1</sup>, В.А. Скорospelов<sup>2</sup>, П.А. Турук<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Численное моделирование вихревого жгута проводится в рамках усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса, замкнутых двухпараметрической моделью турбулентной вязкости. При аппроксимации невязких потоков на гранях ячеек используется схема Роу с MUSCL-реконструкцией 3-го порядка и WENO-реконструкцией 5-го порядка. Для моделирования турбулентности использованы модели  $k-\epsilon$ ,  $k-\epsilon$  Кима – Чена, SST и SST-DES. Проведено тестирование на данных для модельной задачи о течении в осесимметричном диффузоре и для течения в модельном блоке турбины Бурейской ГЭС. Показано, что частота пульсаций давления прогнозируется с хорошей точностью, но амплитуда пульсаций занижена. Использование WENO-реконструкции не улучшает точность решения. Наилучшие результаты дает использование модели турбулентности SST-DES.

**Ключевые слова:** уравнения Навье – Стокса, схема Роу, MUSCL-схема, WENO-схема, вихревой жгут.

### Введение

В радиально-осевых турбинах лопасти рабочего колеса (РК) жестко закреплены между ступицей и ободом, поэтому удаление от оптимального режима работы как в область частичного, так и в область повышенного расхода жидкости приводит к появлению остаточной закрутки потока на выходе из рабочего колеса. Формирующиеся в результате нестационарные вихревые структуры в отсасывающей трубе (ОТ) вызывают пульсации давления в потоке, амплитуда которых может достигать десяти и более процентов от напора электростанции [1]. Пульсации давления приводят, в свою очередь, к динамическим нагрузкам на стенки проточного тракта, вибрациям конструкции турбоагрегата. Величина этих вибраций, по сути, определяет границы зоны разрешенной эксплуатации турбины, т.е. диапазона значений расхода и напора, при которых обеспечивается безопасность работы турбины. Таким образом, уменьшение пульсаций давления позволит расширить зону работы гидротурбин в области неполной и повышенной нагрузки.

Амплитудно-частотные характеристики пульсаций давления зависят не только от режима работы, но и от формы рабочего колеса и отсасывающей трубы самой турбины. Поэтому для создания перспективных проточных частей, обладающих пониженными пульсациями давления, требуется адекватно их прогнозировать на этапе проектирования турбины.

На режимах неполной нагрузки, когда расход жидкости через турбину составляет 50–85% от оптимального расхода, в отсасывающей трубе турбины формируется прецессирующий вихревой жгут, вращающийся с частотой  $0.2-0.4 f_n$ , где  $f_n$  – частота вращения рабочего колеса. Численному моделированию этого явления посвящены десятки работ, использующих RANS, гибридные RANS-LES и даже зонные LES модели турбулентности. Однако в подавляющем большинстве работ для численного моделирования используется закрытый гидродинамический пакет ANSYS CFX, не исследуется влияние сетки, размера расчетной области, способа аппроксимации конвективных членов. Среди наиболее глубоких численных исследований динамики вихревого жгута выделяются работы [2–5].

В данной работе для моделирования прецессирующего вихревого жгута в гидротурбине используются усредненные по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса, замкнутые двухпараметрической моделью турбулентной вязкости. Они решаются с использованием численного метода [6, 7], на котором основан отечественный программный комплекс CADRUN. Цель работы состоит в исследовании влияния сетки, модели турбулентности ( $k-\epsilon$ ,  $k-\epsilon$  Кима – Чена, SST и модель отсоединенных вихрей SST-DES), а также схемы для интерполяции значений на грани ячеек (MUSCL, WENO) на точность расчета амплитудно-частотных характеристик прецессирующего вихревого

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 25-21-00195, <https://rscf.ru/project/25-21-00195/> (А.Р. Кочарина и Д.В. Чирков). В.А. Скорospelов и П.А. Турук поддержаны государственным заданием ИМ СО РАН (проект FWNF-2026-0005).

## Ускорение сходимости нестационарных расчетов течений жидкости в гидротурбине с использованием многосеточных методов\*

А.К. Рогачева<sup>1</sup>, Д.В. Чирков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

Исследуются способы ускорения сходимости итерационного процесса при решении нестационарных задач движения несжимаемой жидкости. За основу берется предложенный ранее метод искусственной сжимаемости с неявной конечно-объемной аппроксимацией уравнений Навье – Стокса и приближенной LU-факторизацией. В качестве альтернатив LU-факторизации выбран метод минимальных невязок с многосеточным и ILU-предобуславливателем из библиотеки HYPRE. Сравнение подходов по скорости сходимости и времени счета проводится на задаче нестационарного течения в проточном тракте гидротурбины.

**Ключевые слова:** нестационарные течения, метод искусственной сжимаемости, приближенная LU-факторизация, многосеточные методы, GMRES, гидротурбина, HYPRE.

### Введение

В работе исследуются способы ускорения сходимости итерационного процесса при численном решении нестационарных уравнений Навье – Стокса несжимаемой жидкости. За основу берется неявная схема конечных объемов, реализованная в пакете программ CADRUN [1, 2]. В [1] для связи полей скорости и давления используется метод искусственной сжимаемости. При моделировании нестационарных задач во все уравнения системы вводятся производные по псевдовремени, что делает систему эволюционной по псевдовремени и позволяет находить решение на каждом шаге по физическому времени через итерационное установление по псевдовремени. После линеаризации неявная схема преобразуется в систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Матрица системы представляет собой большую разреженную матрицу. В практических задачах размер этой матрицы достигает нескольких миллионов строк ( $4N$ , где  $N$  – число ячеек сетки). В каждой строке матрицы максимум 28 ненулевых элементов. В текущей реализации метода для решения данной СЛАУ применяется метод приближенной LU-факторизации с явной реализацией граничных условий [1]. Такой подход требует порядка 1000 итераций для достижения сходимости на каждом временном шаге, что приводит к значительным вычислительным затратам, даже при использовании блочного распараллеливания на десятки вычислительных ядер. Указанные временные затраты делают критически важным поиск методов ускорения сходимости алгоритма, особенно при выполнении серийных нестационарных расчетов. Решению данной проблемы была посвящена работа [3], где для решения исходной СЛАУ использовались методы GMRES и PARDISO, реализованные в библиотеке Intel MKL. В [3] авторам удалось добиться ускорения итерационной сходимости, однако сокращения времени счета достичь не удалось, что может быть связано с отсутствием предобуславливателей.

В данной работе исследуются альтернативные подходы к решению СЛАУ, способные существенно сократить требуемое количество итераций и, соответственно, общее время вычислений. В качестве альтернативного метода решения СЛАУ был выбран метод минимальных невязок (GMRES) с алгебраическим многосеточным предобуславливателем и с ILU-предобуславливателем, реализованными в библиотеке HYPRE [4, 5]. Кроме этого, при составлении системы были учтены граничные условия на всех границах расчетной области (неявная реализация граничных условий). Альтернативные методы были внедрены в параллельную версию пакета CADRUN и протестированы на задаче нестационарного турбулентного течения в радиально-осевой гидротурбине Бурейской ГЭС.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 25-21-00195.

## Применение термографии для исследования оптических свойств плазменных струй\*

Е.Л. Лобода<sup>1,2</sup>, М.В. Агафонцев<sup>1,2</sup>, А.А. Старосельцева<sup>1</sup>, В.Н. Фатеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

<sup>2</sup> *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия*

Представлены результаты экспериментальных исследований оптических свойств плазменных струй с применением методов термографии. В качестве рабочего тела применялись следующие газы: воздух, азот, углекислый газ, аргон. Показано, что выбор узкого спектрального интервала в средневолновом ИК-диапазоне дает возможность практически исключить влияние излучения плазменной струи на результаты измерений температуры поверхности образца, подвергающегося термическому разрушению плазменной струей, что позволяет получать поле температуры поверхности образца с хорошим пространственным разрешением и исключить проблему разрушения чувствительного элемента при использовании контактных методов измерений. Представлен оригинальный способ калибровки ИК-камеры «научного класса» по излучению CO<sub>2</sub> для определения термодинамических температур в плазменной струе с рабочим телом CO<sub>2</sub>.

**Ключевые слова:** ИК-термография, плазма, спектр, температура.

### Введение

Применение методов ИК-термографии для определения полей температуры, качественного анализа теплового контраста и отклика материала на воздействие теплового излучения, в том числе для поиска скрытых дефектов и неоднородностей, широко распространено в науке и практике [1–4]. В случаях, когда объект исследования представляет собой твердую или жидкую среду, применение ИК-камер и методов ИК-термографии не представляет особых сложностей и определение коэффициента излучения среды позволяет получить результаты с достаточно высокой точностью. В случае, когда среда представляет собой излучающую смесь газов, в которой протекают химические реакции, что характерно для процессов горения, применение методов ИК-термографии сопряжено с рядом фундаментальных трудностей [5], которые накладывают повышенные требования к применяемым ИК-камерам, а именно, необходимо, чтобы ИК-камера работала в средневолновом ИК-диапазоне, позволяла применять узкополосные оптические фильтры в соответствии со спектром излучения пламени [6] и обладала достаточным быстродействием. Также следует учитывать, что динамические высокотемпературные газовые среды являются полупрозрачными и при измерениях необходимо определять эффективный коэффициент излучения [5]. Несмотря на упомянутые требования к ИК-камерам, методы ИК-термографии при исследовании полей температуры в динамических высокотемпературных газовых средах обладают неоспоримыми преимуществами: они позволяют отказаться от большого числа термопар, инерционность приборов ничтожна и отсутствуют возмущения, вносимые в среду (сток тепла по свободным концам термопар, нарушение теплового баланса, изменение гидродинамики течения и, как следствие, хода химических реакций), отсутствуют проблемы разрушения термопар и т.п.

При экспериментальных исследованиях плазменных струй и их воздействия на различные материалы традиционно применяются контактные методы измерения температуры среды [7] либо проводятся оценки среднemasсовых термодинамических характеристик струи по интенсивности линий излучения маркерных веществ [8]. Эти подходы обладают рядом недостатков, связанных с трудностью получения пространственного и временного распределения температуры.

Очевидно, что все упомянутые выше преимущества ИК-термографии целесообразно использовать при исследовании характеристик плазменных струй и объектов, подвергающихся их воздействию. Следует учитывать, что плазменная струя представляет собой ионизированный поток газа, спектр излучения которого зависит от состава газа и не является непрерывным, как у абсолютно черного тела (АЧТ), по излучению которого калибруются ИК-камеры. Также необходимо учитывать, что, в отличие от пламени, температура в плазменной струе существенно выше и откалибровать прибор по излучению АЧТ с такой температурой не представляется возможным. Тем не

\* Исследование выполнено в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

## ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 543.4 (045), 517.443

DOI: 10.17223/00213411/69/2/8

**Особенности спектров люминесценции биологической и технической природы\***С.И. Зиенко<sup>1</sup>, В.В. Борисов<sup>1</sup>, В.Л. Жбанова<sup>1</sup><sup>1</sup> Филиал «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске, г. Смоленск, Россия

По экспериментальным данным спектра люминесценции в диапазоне длин волн построен спектр в диапазоне частоты с учетом показателей преломления активной среды светодиода и люминесцентного червя. С помощью обратного преобразования Фурье получены импульсные характеристики и кривые спада электронов во времени, которые использовали для построения фазовых портретов люминесценции. Методом декомпозиции фазовые портреты представляли в виде линейной и нелинейной компонент. Анализ показал наличие двух видов люминесценции, протекающих практически одновременно: спонтанной и вынужденной.

**Ключевые слова:** светодиод, преобразование Фурье, люминесценция, центры захвата.

**Введение**

Исследование особенностей спектров люминесценции биологической и технической природы входит в ряд биоинспирированных исследований, результаты которых могут помочь в разработке новых материалов, устройств и технологий. Эти исследования направлены на изучение эволюционно развитых особенностей в биологических организмах. Одной из таких особенностей является биолюминесценция. Биолюминесценцией называют свечение живых организмов. Она происходит за счет специфичных химических реакций с выделением света. Биолюминесценция червей носит экзогенный характер: под воздействием раздражения они выделяют светящуюся жидкость. Химическая основа такого свечения пока не установлена. Светящиеся земляные черви (олигохеты) найдены повсюду в мире. В ответ на раздражение земляные черви также выделяют экстракт со специальными клетками, которые разрушаются и испускают свет в сине-зеленой области спектра. Этот спектр по форме напоминает свечение синего светодиода.

Ранее были исследованы частотные характеристики спектров глаза человека и ограненного алмаза (бриллианта) [1–3]. Работа выполнена на основе результатов современных исследований по применению алмаза в качестве хрусталика глаза. Выявлено, что динамические звенья алмаза и глаза человека для дневного и ночного зрения проявляют усилительные свойства. Сопоставление свойств по величине коэффициента усиления света показало незначительное отличие [3].

Также было проведено сравнение спектральных характеристик глаза человека и фотоприемников по следующим параметрам: быстродействие, число элементарных колебаний, величина показателя широкополосности, длительность импульсной характеристики, число периодов оптических (световых) колебаний [4]. Данный способ исследования позволяет ввести новые критерии количественной оценки качества приемников в видимом диапазоне.

Полученные результаты дают основу продвижению биоинспирированных исследований и позволяют полагать, что источники излучения живых объектов могут помочь в развитии современных светодиодных систем.

Цель работы – выявить особенности спектров люминесценции биологической и технической природы. Было принято решение принять в качестве биологического объекта исследования люминесцирующего червя, а в качестве технического – синий светодиод.

Спектр сибирского червя (*Fridericia heliota*) в диапазоне длин волн приведен на рис. 1, а. Спектр построен по данным спектроскопии ядерного магнитного резонанса [5, 6]. Здесь же представлен, по данным работы [7], спектр синего светодиода (СД). Величина электрического тока СД составляет 20 мА.

\* Исследование выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России (проект № FSWF-2026-0010).

## Спектроскопические исследования взаимодействия тетрациклина с молоком

М.В. Беляков<sup>1</sup>, И.Ю. Ефременков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, г. Москва, Россия

Представлены спектральные характеристики поглощения молока, содержащего тетрациклин, в диапазоне 230–600 нм. Рассчитаны интегральные и статистические параметры спектров и погрешности их определения. Получены аппроксимационные зависимости параметров спектра от концентрации антибиотика. Предложены информативные диапазоны и параметры диагностики наличия и отслеживания концентрации тетрациклина в молоке.

**Ключевые слова:** спектр поглощения, тетрациклин, аппроксимация, молоко, интегральная поглощательная способность, статистические параметры.

### Введение

Тетрациклиновая группа является основным классом антибиотиков широкого спектра действия, которая в последние годы активно применяется в ветеринарии для лечения большого круга болезней сельскохозяйственных животных. Однако остаточное количество антибиотиков может содержаться в молоке, мясе и ускорить эволюцию и распространение резистентных форм микроорганизмов, нарушить процессы сквашивания на перерабатывающих предприятиях [1, 2]. Более того, у человека, употребляющего такие продукты питания в пищу, в долгосрочной перспективе может существенно ухудшиться здоровье, могут появиться аллергические реакции, нежелательная антибиотикорезистентность и дисбиоз [3]. С практической точки зрения контроль потенциально опасных веществ в молоке и продуктах питания связан как с отсутствием научно обоснованных предельно допустимых норм их содержания, так и с трудностями методического характера [4]. Поэтому необходимо постоянное повышение чувствительности к минимальным концентрациям существующих противомикробных препаратов и разработка новых методов, чтобы снижать риск попадания нежелательных веществ в продукты питания. Также необходимо внедрять полученные разработки в цифровые технологии и технические средства агропромышленного комплекса [5].

Оптические методы диагностики лекарственных средств активно развиваются. Проводились экспериментальные и теоретические исследования электронных спектров парацетамола в воде [6]. Разрабатывается флуоресцентный сенсор для диагностики данофлоксацина в образцах молока [7]. С помощью инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье, ультрафиолетовой спектроскопии определяли наличие окситетрациклина в сточных водах, молоке и мясных продуктах [8]. Имеются исследования, где осуществляли обнаружение тетрациклина в образцах молока с помощью флуоресцентных кремниевых наночастиц [9]. С помощью квантовых точек проводили количественное флуоресцентное определение тетрациклина в продуктах животного происхождения [10].

Цель работы – выявление закономерностей и поиск информативных параметров и диапазонов при спектральной диагностике взаимодействия тетрациклина с молоком.

### 1. Материалы и методы исследований

Для исследований использовали молоко агрофирмы «Мичурино» (Россия) с массовой долей жира 2.5%. Хранили молоко в соответствии с регламентом Таможенного союза «О безопасности молока и молочной продукции» (ТР ТС 033/2013). Перед спектральными измерениями молоко перемешивали. На первом этапе подготавливали суспензию тетрациклина.

Процедура приготовления стандартных растворов из тетрациклина состоит из нескольких этапов. В мерную колбу объемом 1000 см<sup>3</sup> поместили 1 см<sup>3</sup> препарата тетрациклин, перед использованием тщательно перемешали, заполнили на 2/3 дистиллированной водой и тщательно перемешали. Далее в мерную колбу объемом 1000 см<sup>3</sup> внесли 0.5 см<sup>3</sup> раствора тетрациклина с концентрацией 200 мкг/см<sup>3</sup>, заполнили на 2/3 дистиллированной водой и тщательно перемешали. Затем пластиковую емкость установили на весы, внесли в нее требуемый объем раствора тетрациклина концентрацией 0.1 мкг/см<sup>3</sup> и довели молоком до суммарной массы 100 г. После чего тщательно перемешали. Далее получили образцы молока объемом 100 см<sup>3</sup> с концентрацией антибиотика 0.001, 0.003, 0.004,

## Оптические сингулярности и предельная разрешающая способность суперлинзы\*

Б.Б. Авербух<sup>1</sup>, И.Б. Авербух<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия

В модели молекулярной оптики рассмотрена интерференция распространяющихся и усиленных эванесцентных волн в ближнем поле суперлинзы. Получена связь характеристик электромагнитного поля в получающейся интерференционной картине с предельной разрешающей способностью суперлинзы, обусловленной эванесцентными волнами.

**Ключевые слова:** молекулярная оптика, метаматериал, суперлинза, разрешающая способность, эванесцентные и распространяющиеся волны, интерференционная картина, точки сингулярности седло и поперечный вихрь.

### Введение

Распространение поляризованного монохроматического электромагнитного излучения – это волновое явление, характеризующееся комплексной амплитудой поля. При интерференции нескольких волн возникающая интерференционная картина неоднородна (есть максимумы, минимумы...). Эта неоднородность проявляется, в частности, в появлении оптических сингулярностей, т.е. точек или линий, где комплексная амплитуда результирующего поля равна нулю. Исследованию таких сингулярностей посвящено много работ (например, в [1, 2] рассматривалась интерференция плоских волн, а в [3, 4] – гауссовых лучей). Различные типы сингулярностей рассматривались в [5], а с точки зрения динамических систем – в [6].

В настоящей работе исследуется появление оптических сингулярностей в случае суперлинзы. Ранее в работах [7, 8] численными расчетами было показано, что интерференция бегущих и эванесцентных волн может приводить к возникновению оптических вихрей в ближней зоне суперлинзы. Расчеты базировались на макроскопическом описании процесса. Решалась граничная задача о распространении электромагнитного ТМ излучения через плоскопараллельный слой среды с отрицательным преломлением. Решение задачи Френеля основывалось на уравнениях Максвелла. Задавались выражения для отраженной волны, волн в слое и волны, прошедшей слой. Далее определялась функция пропускания слоя. Среда описывалась макроскопически и характеризовалась эффективными значениями диэлектрической  $\epsilon$  и магнитной  $\mu$  проницаемостей. Анализировались функция пропускания такого слоя и вектор Пойнтинга прошедшего слой излучения. Аналогичные результаты были получены в работе [9].

В [10] численными расчетами было показано появление обратного потока энергии в ближнем поле за линзой. Объяснялось это конечными размерами линзы. В работе [11] в результате численных расчетов возникновение оптических вихрей в ближней зоне суперлинзы было связано с появлением устойчивой системы точек сингулярности седло – вихри – седло в слое и за ним. Седловые точки объяснили, в частности, появление отрицательного потока энергии в некоторых областях пространства около этих точек.

Но использование эффективных параметров в уравнениях Максвелла и применение численных методов не раскрывают механизм взаимодействия электромагнитного излучения со средой и формирования отраженной и преломленной электромагнитных волн. Для этого нужен микроскопический подход. Поэтому в данной работе, основываясь на результатах работ [12, 13], в модели молекулярной оптики рассмотрено формирование оптических сингулярностей в ближней зоне суперлинзы. В работе [12] рассматривалось распространение электромагнитного излучения через плоскопараллельный слой метаматериала с отрицательным преломлением. В такой среде возможно существование обратных волн и в [12] был обоснован выход этих волн за пределы слоя (при макроскопическом описании это явление отсутствует [14]). При определенных условиях такой

\* Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ, дополнительное соглашение от 1 июня 2021 г. № 075-02-2021-1389, дополнительное соглашение с Минобрнауки России от 4 февраля 2022 г. № 075-02-2022-879. Соглашение от 16.02.2023 г. № 075-02-2023-932. Соглашение от «28» февраля 2024 г. № 075-02-2024-1432.

## Возможности прогнозирования фазовых флуктуаций на вертикальных атмосферных трассах\*

В.П. Лукин<sup>1</sup>, И.П. Лукин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия*

Описывается построение алгоритма управления системами адаптивной оптики, использующего прогнозирование эволюции пространственных и временных распределений фазовых искажений в оптической волне при распространении в условиях атмосферной турбулентности и выработку управляющих сигналов для коррекции искажений волнового фронта в реальном масштабе времени на вертикальных атмосферных трассах. Показано, что на таких трассах, взамен вертикальных профилей интенсивности турбулентности и скорости ветра, можно использовать усредненные величины, а именно моменты скорости ветра и параметр Фрида, получаемые по данным зондирования или с использованием предварительно созданных моделей атмосферы.

**Ключевые слова:** атмосферная турбулентность, модели спектра турбулентности, адаптивная оптика, алгоритмы.

### Введение

В настоящее время активно развиваются методы фазового и амплитудно-фазового управления в системах адаптивной оптики (АО). Причем эти методы применяются как для наземных систем передачи энергии и информации лазерным пучком, так и для астрономических инструментов. Одним из путей повышения эффективности таких систем является развитие алгоритмов, использующих различного рода прогнозирование флуктуаций корректируемых искажений волнового фронта [1, 2]. В настоящей работе анализируются алгоритмы фазовой адаптивной коррекции, которые учитывают эволюцию волнового фронта, обусловленного ветровым движением турбулентности поперек трассы распространения оптических волн на неоднородных атмосферных трассах.

### Обоснование применения прогнозирующего алгоритма коррекции

Известно, что атмосферная турбулентность представляет собой случайный процесс со стационарными первыми приращениями [3]. Поэтому эволюцию как самой турбулентности, так и обусловленных ее фазовых искажений  $S(\vec{\rho}, t)$  в плоской оптической волне, прошедшей слой атмосферной турбулентности, соответственно можно описать [3] как урезанный ряд Тейлора следующего вида:

$$S(\vec{\rho}, t + T) = S(\vec{\rho}, t) + \frac{dS}{dt} T, \quad (1)$$

где  $\vec{\rho} = (x, y)$  – двумерный вектор для произвольной точки оптического поля;  $t$  – текущее время;  $T$  – достаточно короткий интервал времени.

Применив гипотезу [3] «замороженной турбулентности», временную производную флуктуаций фазы  $\frac{dS}{dt}$  можно записать как скалярное произведение двумерного вектора скорости ветра  $\vec{V}$  и пространственного градиента фазы  $\nabla_{\rho} S(\vec{\rho}, t)$ , т.е.

$$\frac{dS}{dt} = \nabla_{\rho} S \vec{V}. \quad (2)$$

А поскольку мы рассматриваем фазовые искажения в некоторой фиксированной плоскости ( $Z = \text{const}$ ), то в (2) градиент фазы может быть представлен как двумерный вектор, и тогда

$$\nabla_{\rho} S \vec{V} = \frac{\partial S}{\partial x} V_x + \frac{\partial S}{\partial y} V_y. \quad (3)$$

\* Развитие концепции прогнозирующих алгоритмов было выполнено в рамках госзадания Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, численные расчеты выполнены при финансовой поддержке проекта РНФ № 23-42-00043.

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 620.172.2

DOI: 10.17223/00213411/69/2/12

**Температурная зависимость механизма разрушения сплава Ni–Al–Cr, полученного методом двухпроволочного электронно-лучевого аддитивного производства\***Д. Астапов<sup>1</sup>, Е.Г. Астафурова<sup>1</sup>, Е.А. Загибалова<sup>1</sup>,  
С.В. Астафуров<sup>1</sup>, Л.В. Данилова<sup>1</sup>, Е.А. Колубаев<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

Изучена температурная зависимость механизма разрушения сплава Ni–Al–Cr, полученного методом электронно-лучевого аддитивного производства, после испытаний на растяжение в интервале температур 300–1273 К. При  $T = 300$  К сплав представляет собой смесь фаз на основе NiAl ( $B2+L1_0$ ), Ni<sub>3</sub>Al и Ni, легированных Cr. Установлено, что с увеличением температуры испытания макро- и микромеханизм разрушения сплава изменяется при переходе через  $T_{хв} = 873$  К: от смешанного, интер- и транскристаллитного хрупкого и транскристаллитного вязкого, при  $T \leq T_{хв}$  до вязкого транскристаллитного при  $T > T_{хв}$ . Показано, что температура  $T_{хв}$  соответствует температуре обратного  $L1_0$  (NiAl)  $\rightarrow$   $B2$  (NiAl)-мартенситного превращения при нагреве. То есть формирование мартенситной  $L1_0$  (NiAl)-фазы в процессе аддитивного производства интерметаллического сплава Ni–Al–Cr выступает одним из факторов, ответственных за его хрупкое разрушение при комнатной температуре. Исследуемый сплав разработан для производства интерметаллических покрытий методом электронно-лучевого аддитивного производства.

**Ключевые слова:** электронно-лучевое аддитивное производство, интерметаллиды, разрушение.

Аддитивное производство (или 3D-печать) используется для получения заготовок сложной формы из интерметаллических сплавов, поскольку последние плохо обрабатываются резанием и точением [1–3]. Ранее была продемонстрирована принципиальная возможность получения заготовок сплава системы Ni–Al–Cr, которая широко применяется в авиакосмической отрасли [4], методом электронно-лучевого аддитивного производства (ЭЛАП) с использованием промышленных проволок NiCr и Al [5]. При комнатной температуре сплав обладал дендритной микроструктурой: дендриты представляют собой смесь фаз NiAl и Ni<sub>3</sub>Cr(Al), а междендриты – это смесь Ni + Ni<sub>3</sub>Al. Присутствие упорядоченных интерметаллических фаз в составе материала определяет его механическое поведение в интервале температур  $T = 300$ –1273 К [5]. Формирование в междендритных областях смеси  $\gamma + \gamma'$  (Ni + Ni<sub>3</sub>Al)-фаз обеспечивает типичную [6] для таких сплавов аномальную температурную зависимость прочностных свойств (с достижением максимума при  $T = 873$  К [5]). Однако влияние температуры на механизмы разрушения такого гетерофазного аддитивно изготовленного сплава системы Ni–Al–Cr до сих пор не установлено, что и является целью данной работы.

Заготовки интерметаллического сплава с линейными размерами 30×30×40 мм получены методом двухпроволочного аддитивного производства на лабораторной установке, разработанной в ИФПМ СО РАН (Томск, Россия) [7]. Проволоки NiCr (сплав X20H80) и Al (сварочная проволока ESAB OK Autrod 1070) подавались одновременно в ванну расплава с соотношением скоростей подачи 3:1. Детали аддитивного производства сплава описаны в работе [5]. С помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ, LEO EVO 50, «Zeiss») была проведена аттестация поверхностей разрушения образцов (в форме двойных лопаток, размеры рабочей части 12×2.6×1.4 мм) после испытаний на растяжение в интервале температур  $T = 300$ –1273 К. Рентгеноструктурный анализ (РСА) проводился на дифрактометре ДРОН-8Н («Буревестник»), оснащенный высокотемпературной вакуумной камерой (CuK $\alpha$ -излучение), в интервале углов  $2\theta = 40$ –55° при температурах  $T = 300$ –1273 К с шагом 200 К. Качественный фазовый анализ полученных рентгенограмм выполняли с использованием программного обеспечения PowderCell с базой данных Powder Diffraction File.

Результаты анализа образцов после испытаний на одноосное растяжение показали, что в области температур  $T \leq 873$  К сплав системы Ni–Al–Cr характеризуется смешанным разрушением. Макроскопически образцы разрушаются хрупко после незначительной пластической деформации (удлинение составляет 2–10% [5]), признаков образования шейки не обнаружено. На поверхностях разрушения видны следы как хрупкого транскристаллитного разрушения по типу «скола», так и вязкого (ямочного) внутризеренного разрушения. Кроме этого, происходит формирование хрупких вторичных трещин (рис. 1, а, б).

На вставках рис. 1, а, б видны области с морфологией «скола», которые соответствуют разрушению дендритных областей, содержащих хрупкую фазу NiAl. Этот микромеханизм разрушения преобладает при

\* Исследования выполнены в рамках проекта государственного задания FWRW-2022-0005.

## ПЕРСОНАЛИЯ

УДК 93/94

DOI: 10.17223/00213411/69/2/13

**Судьба ученого и государственная политика  
в позднеимперской и раннесоветской России  
(к 150-летию со дня рождения профессора  
Александра Петровича Поспелова)\***Г.В. Майер<sup>1</sup>, С.А. Некрылов<sup>1</sup>, А.О. Степнов<sup>1</sup>*Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Исследуется жизненный путь профессора-физика А.П. Поспелова (1875–1949). Прослеживается влияние государственной национальной политики на западных окраинах Российской империи на его профессиональную социализацию. В Сибири он сделал карьеру ученого, стал первым деканом физико-математического факультета, а затем ректором Томского университета. Он как представитель группы первых сибирских профессоров-физиков точно спрогнозировал, а во многом даже определил сценарии научного освоения и развития этого региона в советское время. Отмечается значительное, хотя и не всегда очевидное, влияние идеологии и научного мировоззрения А.П. Поспелова и других физиков его поколения на государственную политику в области науки, техники и высшего образования позднеимперского и раннесоветского периодов.

**Ключевые слова:** государственная политика, высшее образование, университеты, Сибирь, революция, А.П. Поспелов.

Государственная политика поздней Российской империи в области науки и высшего образования редко становилась предметом специального исследования. Эта тема присутствует скорее на полях классической и современной историко-научной литературы. Основные установки здесь хорошо известны. Прежде всего, сравнение с последующим советским периодом заставляет воздерживаться от утверждений о существовании такой целостной политики в Российской империи (скорее нужно говорить о множестве подходов, формируемых разными лицами и ведомствами). Государство в отношении высшей школы проявляло осторожность, в отдельные периоды переходящую в подозрительность. Это манифестировано в сословно-классовой фильтрации студенческого и профессорско-преподавательского состава, в жестком контроле над внутренним распорядком высших учебных заведений со стороны попечителей учебных округов и других чиновников Министерства народного просвещения, в репрессивных мерах. Последние, правда, предпринимались редко, и самым большим наказанием для особо фрондирующих ученых порой было увольнение и запрет на преподавание (зачастую временный) в государственных вузах (В.А. Обручев, М.М. Ковалевский, Н.М. Кижнер, Ф.Э. Молин и др.). Активное развитие в начале XX в. (главным образом во время и после Революции 1905–1907 гг.) сети частных высших учебных заведений, куда можно было перейти на преподавательскую и научную работу, смягчало эти меры: «мучеников режима» среди ученых в Российской империи было немного.

Отсутствие стройной и системной политики в области науки и высшего образования (эта политика была прерывной, лишенной цельности и реактивной – по преимуществу отражала реакцию правительства на проникновение общественно-политического процесса в стены вузов), однако не исключало того, что самые разные направления государственной политики (в области национальной, сословной, даже конфессиональной и т.д.) имели влияние на науку и высшую школу. Важен и другой аспект: ученые позднеимперской России далеко не всегда (вопреки некоторым устоявшимся мнениям) были просто объектами этой политики. Напротив, субъектная роль людей науки является зримой – многие ученые тогда были агенты и субъектны. В этом смысле изучение политики того периода не может исчерпываться исключительно входящими сигналами (законодатель-

\* Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2024-0008.

*Ежемесячный научный журнал*

**ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ФИЗИКА**  
**IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA**

**2026. Т. 69. № 2**

**Адрес редакции и издателя:**  
634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, д. 36,  
Томский государственный университет,  
редакция журнала «Известия вузов. Физика»

Старший редактор *Л.А. Пивоварова*  
Выпускающий редактор *Л.В. Пермякова*  
Редактор-переводчик *И.А. Бобровникова*  
Оригинал-макет *Д.В. Фортеса*

---

Подписано к печати 18.02.2026. Выпуск в свет 23.03.2026. Заказ № 6680.  
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Печать цифровая.  
Усл. п. л. 14.65. Уч.-изд. л. 16.41. Тираж 42 экз. Цена свободная.

---

Отпечатано на полиграфическом оборудовании  
Издательства Томского государственного университета,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, тел. (3822) 531-528, 529-849.  
<http://publish.tsu.ru>; e-mail: [rio.tsu@mail.ru](mailto:rio.tsu@mail.ru)

