

**Материалы секции**  
**ФИЗИКА**



12-23 апреля 2021  
НОВОСИБИРСК



СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

МНСК-2021

АЭРОФИЗИКА

•

ФОТОНИКА И КВАНТОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

•

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

•

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

•

ТЕПЛОФИЗИКА

•

ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

В ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУКАХ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

•

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ,  
АСТРОФИЗИКА И КОСМОЛОГИЯ

•

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ  
И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

Материалы

59-й Международной научной студенческой конференции

12–23 апреля 2021 г.

Новосибирск  
2021

УДК 533; 535; 533.9; 53; 004.67; 519; 532-539; 544; 62; 621; 662; 669; 681;  
33; 15.010; 63  
ББК 22.3; 22.34я431; 22.379я431; 30вб; 31.3; Б в672я431; Ю9; 40я431  
А 992

**А 992** Аэрофизика. Фотоника и квантовые оптические технологии. Физика плазмы. Физика твердого тела. Теплофизика. Физические методы в естественных науках и материаловедении. Физика элементарных частиц, астрофизика и космология. Инструментальные методы и техника экспериментальной физики : Материалы 59-й Международ. науч. студ. конф. 12–23 апреля 2021 г. / Новосиб. гос. ун-т. — Новосибирск : ИПЦ НГУ, 2021. — 296 с.

ISBN 978-5-4437-1182-9

Данное издание представляет собой публикации тезисов 59-й Международной научной студенческой конференции 2021 года (МНСК-2021) по физике (аэрофизике; фотонике и квантовым оптическим технологиям; физике плазмы; физике твердого тела; теплофизике; физическим методам в естественных науках и материаловедении; физике элементарных частиц, астрофизике и космологии; инструментальным методам и технике экспериментальной физики). Сборник включает в себя 256 тезисов.

Материалы конференции представляют интерес для студентов, аспирантов, преподавателей, научных работников, сотрудников образовательных учреждений.

**УДК 533; 535; 533.9; 53; 004.67; 519;  
532-539; 544; 62; 621; 662; 669;  
681; 33; 15.010; 63  
ББК 22.3; 22.34я431; 22.379я431; 30вб;  
31.3; Б в672я431; Ю9; 40я431**

ISBN 978-5-4437-1182-9

© СО РАН, 2021  
© Новосибирский государственный университет, 2021

SIBIRIAN BRANCH OF RAS  
MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION  
OF THE RUSSIAN FEDERATION  
NOVOSIBIRSK STATE UNIVERSITY

ISSC-2021

AEROPHYSICS

•

PHOTONICS AND QUANTUM OPTICAL TECHNOLOGIES

•

PLASMA PHYSICS

•

SOLID STATE PHYSICS

•

THERMOPHYSICS

•

PHYSICAL METHODS IN NATURAL SCIENCES

•

ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS,  
ASTROPHYSICS AND COSMOLOGY

•

INSTRUMENTATION IN EXPERIMENTAL PHYSICS

Proceedings  
of the 59<sup>th</sup> International Students Scientific Conference

April 12–23, 2021

Novosibirsk  
2021

УДК 533; 535; 533.9; 53; 004.67; 519; 532-539; 544; 62; 621; 662; 669; 681;  
33; 15.010; 63  
ББК 22.3; 22.34я431; 22.379я431; 30вб; 31.3; Б в672я431; Ю9; 40я431  
А 992

**А 992** Aerophysics. Photonics and quantum optical technologies. Plasma physics. Solid state physics. Thermophysics. Physical methods in natural sciences. Elementary particle physics, astrophysics and cosmology. Instrumentation in experimental physics : Proceedings of the 59<sup>th</sup> International Students Scientific Conference. April 12–23, 2021 / Novosibirsk State University. — Novosibirsk : IPC NSU, 2021. — 296 p.

ISBN 978-5-4437-1182-9

This edition represents the publications of the 59<sup>th</sup> International Scientific Student Conference 2021 (ISSC-2021) theses in physics (aerophysics; photonics and quantum optical technologies; plasma physics; solid state physics; thermophysics; physical methods in natural sciences; elementary particle physics, astrophysics and cosmology; instrumentation in experimental physics). The collection includes 256 theses.

These Conference materials can be of interest for students, Ph.D. candidates, professors, scientists, and members of educational institutions.

**УДК 533; 535; 533.9; 53; 004.67; 519;  
532-539; 544; 62; 621; 662; 669;  
681; 33; 15.010; 63  
ББК 22.3; 22.34я431; 22.379я431; 30вб;  
31.3; Б в672я431; Ю9; 40я431**

ISBN 978-5-4437-1182-9

© SB RAS, 2021  
© Novosibirsk State University, 2021

## **АЭРОФИЗИКА**

Научный руководитель секции —  
акад. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф. В. М. Фомин

Председатель секции — д-р физ.-мат. наук, проф. С. Г. Мионов

Ответственный секретарь секции — канд. физ.-мат. наук А. А. Яцких

Экспертный совет секции  
д-р физ.-мат. наук А. Н. Кудрявцев  
д-р физ.-мат. наук А. Е. Медведев  
д-р физ.-мат. наук Г. А. Поздняков  
канд. физ.-мат. наук Д. А. Бунтин  
канд. физ.-мат. наук А. С. Верещагин  
канд. физ.-мат. наук Г. В. Шоев

## **AEROPHYSICS**

Section scientific supervisor —  
Acad. RAS, Dr. Phys.-Math. Sci., Prof. V. M. Fomin

Section head — Dr. Phys.-Math. Sci., Prof. S. G. Mironov

Responsible secretary — Cand. Phys.-Math. Sci. A. A. Yatskikh

Section scientific committee  
Dr. Phys.-Math. Sci. A. N. Kudryavtsev  
Dr. Phys.-Math. Sci. A. E. Medvedev  
Dr. Phys.-Math. Sci. G. A. Pozdnyakov  
Cand. Phys.-Math. Sci. D. A. Bountin  
Cand. Phys.-Math. Sci. A. S. Vereshchagin  
Cand. Phys.-Math. Sci. G. V. Shoev





**Изучение статистических характеристик взаимосвязи  
возмущений свободного потока и пульсаций в пограничном слое  
притупленной пластины при числе Маха 2**

Л. В. Афанасьев

Новосибирский государственный университет  
Институт теоретической и прикладной механики  
им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

Влияние возмущений свободного потока на положение ламинарно-турбулентного перехода аналогично действию вынуждающего воздействия на систему свободных колебаний. Именно этим явлением объясняется расхождение в данных о положении ламинарно-турбулентного перехода в зависимости от единичного числа Рейнольдса при фиксированном числе Маха на различных аэродинамических установках.

Считается, что основным источником возмущений свободного потока могут являться турбулентные пристеночные пограничные слои, излучающие акустические возмущения. Одним из методов обнаружения и идентификации источников возмущений может выступать взаимокорреляционный анализ сигналов двух и более датчиков, размещенных в рабочей части установки. Эксперименты, проведенные в лаб. № 14 ИТПМ СО РАН, показывают, что взаимосвязь естественных пульсаций пограничного слоя и свободного потока существует и неоднородна по пограничному слою, а для интерпретации полученных распределений коэффициента корреляции требуются дальнейшие исследования.

В данной работе предлагается использовать искусственно внесенные возмущения с заранее известными параметрами для верификации методики. В качестве источника возмущений с требуемыми параметрами используется двумерная шероховатость на поверхности рабочей части, генерирующая слабые ударные в свободный поток.

По результатам данной работы впервые получено распределение коэффициентов взаимокорреляции между возмущениями свободного потока и пограничного слоя на пластине с цилиндрической кромкой радиуса 0,5 мм при числе Маха 2.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. А. Д. Косинов

**Влияние моделей взаимодействия газа с поверхностью  
на течение в свободномолекулярном воздухозаборнике**

В. А. Гребнева

Новосибирский государственный университет

Данная работа посвящена численному исследованию течения разреженного газа в свободномолекулярном воздухозаборнике. Такие устройства используются при полете космических аппаратов на низких околоземных орбитах. Воздухозаборник обеспечивает сбор атмосферных газов, которые используются в качестве рабочего вещества для электрореактивного двигателя, создающего тягу для компенсации аэродинамического сопротивления. Конструкция воздухозаборника должна обеспечивать его высокую эффективность таким образом, чтобы минимум молекул, попавших в воздухозаборник, отражались обратно в набегающий поток. Как правило, требуется существенное увеличение плотности сильно разреженного набегающего потока. Для решения задач проектирования воздухозаборников необходимы численные исследования таких течений. В работе проведены численные исследования течений в свободномолекулярных воздухозаборниках различных геометрий в условиях низкой околоземной орбиты. Было изучено влияние различных моделей взаимодействия газа с поверхностью на предсказываемую эффективность воздухозаборника. Расчеты проводились с использованием программного комплекса SMILE [1], разработанного в ИТПИМ СО РАН.

---

1. Ivanov M. et all. SMILE system for 2D/3D DSMC computations // 25<sup>th</sup> Int. Symp. Rarefied Gas Dynamics, 21–28 July 2006, St. Petersburg, Russia, AIP Conference Proceedings, Russia, 2007.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Е. А. Бондарь

## **Рассеяние света на атмосферных ледяных кристаллах произвольной формы в рамках приближения геометрической оптики**

Н. Кан, И. В. Ткачев

Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Томск  
Томский государственный университет

Перистые облака покрывают значительную часть земной поверхности (до 30 %) и состоят из ледяных кристаллических частиц различной формы. Они существенно влияют на процесс переноса солнечной энергии через атмосферу и, соответственно, на формирование климата нашей планеты [1]. В зависимости от формы и ориентации кристаллических частиц эти облака могут как задерживать проникновение солнечного излучения вглубь атмосферы к земной поверхности, так и препятствовать выходу теплового излучения Земли в открытый космос, усугубляя парниковый эффект. Поэтому важно получить решение задачи рассеяния света на всем многообразии частиц перистых облаков для их корректного учета в климатических моделях.

Для решения поставленной задачи мы использовали разработанный в Институте оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН вариант приближения геометрической оптики, основанный на алгоритме трассировки пучков [2]. При решении задачи рассеяния света на ледяных кристаллических частицах этот метод значительно превосходит зарубежные аналоги, основанные на алгоритме трассировки лучей, поскольку позволяет одновременно трассировать весь пучок света внутри кристалла.

В результате были получены матрицы рассеяния света для 400 различных кристаллических частиц произвольной формы. На их основе удалось рассчитать усредненные значения индикатрисы рассеяния, что имеет важное значение для уточнения радиационного блока в климатических моделях нашей планеты.

---

1. Hong G. Parameterization of scattering and absorption properties of nonspherical ice crystals at microwave frequencies // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. D11208.

2. Konoshonkin A. V. et al. Beam-splitting code for light scattering by ice crystal particles within geometric-optics approximation // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2015. V. 164. P. 175–183.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук А. В. Коношонкин

## **Исследование оптических свойств частиц неправильной формы для задач лазерного зондирования атмосферы**

Н. Кан, И. В. Ткачев

Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Томск  
Томский государственный университет

Твердые взвешенные частицы в атмосфере, называемые атмосферным аэрозолем, являются объектом активного изучения последние несколько десятилетий, поскольку существенным образом влияют на климат нашей планеты. К таким частицам относятся как пылевые, так и ледяные частицы перистых облаков. В настоящее время перистые облака являются объектом активного исследования как контактными методами, так и методами дистанционного зондирования, в первую очередь лидарами. Несмотря на свою многолетнюю историю, в отличие от жидкокапельных облаков, задача рассеяния света на ледяных кристаллических частицах перистых облаков и крупных пылевых частицах полностью до сих пор не решена.

Основная трудность заключается в том, что для таких частиц отсутствует адекватная оптическая модель, необходимая для интерпретации данных лазерного зондирования крупного атмосферного аэрозоля. Для решения данной задачи мы использовали разработанный в Институте оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН уникальный метод физической оптики [1]. Этот метод эффективен для исследования оптических свойств частиц с размером, значительно большим длины волны падающего излучения.

В результате была получена оптическая модель для частицы неправильной формы размерами от 10 до 100 мкм. Были рассчитаны основные используемые в задачах лазерного зондирования характеристики: деполяризационное и спектральное отношения. Показано, что для таких частиц деполяризационное отношение находится в диапазоне 0,4–0,6 отн. ед., а спектральное отношение существенным образом зависит от длины волны падающего излучения.

---

1. Konoshonkin A. et al. Power laws for backscattering by ice crystals of cirrus clouds // Opt. Express. 2017. Vol. 25, № 19. P. 22341–22346.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук А. В. Коношонкин

## Математическое моделирование работы ракетного двигателя на твердом топливе с двумя режимами тяги

А. Е. Кирюшкин

Томский государственный университет

Режим двойной тяги в ракетных двигателях на твердом топливе (РДТТ) достигается за счет проектирования с заданными характеристиками таких составляющих РДТТ, как сопло, камера сгорания, состав топлива и форма заряда. Использование данного режима широко распространено для ракет оперативно-тактического назначения ввиду того, что зачастую подобные конфигурации обеспечивают более эффективную подачу импульса по сравнению с зарядами, имеющими звездообразный канал, канал с продольной прорезью и пр. [1].

Течение газов внутри камеры сгорания может носить сложный характер: возможно наличие пульсаций давления, образование вихревых структур и застойных зон. Несмотря на сложную природу явлений, происходящих в камере сгорания РДТТ, на данный момент в основном используются математические модели, предполагающие либо нульмерность, либо одномерность течения продуктов сгорания. Принятие упрощающих допущений о характере течения в общем случае делает проблематичным адекватное описание течения продуктов сгорания в многомерных областях.

В настоящей работе предлагается подход, который учитывает как изменение положения поверхности горящего топлива, так и многомерный характер течения [2]. Данный подход применяется для моделирования конфигурации РДТТ, представленной в [1]. Приведены распределения параметров течения в различные моменты времени, а также зависимости давления и тяги от времени. Представленные результаты показали хорошее согласование с экспериментальными данными.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-31-90033.*

---

1. Shekhar H. Burn-back Equations for High Volumetric Loading Single-grain Dual-thrust Rocket Propellant Configuration // Def. Sci. J. 2011. Vol. 61, № 2. P. 165–170.

2. Kiryushkin A. E., Minkov L. L. Solution of internal ballistic problem for SRM with grain of complex shape during main firing phase // J. Phys. Conf. Ser. 2017. Vol. 894. № 1. P. 1–7.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. Л. Л. Миньков

**Исследование эрозии цилиндрического катода,  
находящегося в потоке плазмы**

М. Е. Колпаков

Новосибирский государственный университет  
Институт теоретической и прикладной механики  
им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

На эффективное использование плазмотрона главным образом влияет ресурс работы его электродов. Срок службы электрода зависит от величины его эрозии, потому исследование уровня эрозии является важной задачей. Существенную роль в эрозии электродов играет состояние их рабочей поверхности, в частности образование на ней окисной пленки. В свою очередь, толщина окисной пленки зависит от содержания кислорода в плазмообразующем газе. Известно, что эрозия электродов при небольшой добавке кислородсодержащих газов в дуговую камеру плазмотрона с инертным плазмообразующим газом на порядок меньше, чем при подаче чистого инертного газа.

Целью настоящей работы было исследование влияния окислительного потенциала плазмообразующего газа на уровень эрозии цилиндрического медного катода. Для проведения экспериментов был использован двухкамерный плазмотрон линейной схемы с обратной полярностью подключения электродов. Определение уровня эрозии катода в эксперименте производилось при помощи спектрометра, по интенсивности излучения линий меди в спектре излучения плазменной струи. В качестве плазмообразующего газа использовался воздух. Для изменения содержания химически активного кислорода в камере плазмотрона использовалась подача пропана, который при горении связывает свободный кислород. Расход пропана менялся в пределах, соответствующих диапазону весового содержания свободного кислорода в плазменном потоке  $6,6 \div 23,17$  %.

Была получена качественная зависимость уровня эрозии медных электродов от доли свободного кислорода в плазмообразующем газе. Установлено, что уменьшение содержания свободного кислорода приводит к более чем двукратному уменьшению интенсивности излучения линий меди в генерируемой плазмотроном плазменной струе. Падение носит немонотонный характер с минимумом, соответствующим массовой доле свободного кислорода в плазмообразующем газе, — 11,5 %.

Научный руководитель — С. П. Ващенко

**Исследование теплового потока с помощью  
люминесцентного покрытия при обтекании  
летательного аппарата сверхзвуковым течением**

В. И. Комаров

Новосибирский государственный университет

При создании гиперзвуковых летательных аппаратов важную роль играют исследования по распределению температур и тепловых потоков на внешней поверхности аппарата. На основе этих исследований разрабатываются системы тепловой защиты, выбираются конструкционные материалы. Для получения корректных результатов эксперименты проводятся в условиях, приближенных к реальному полету. Для этого используются высокоэнтальпийные импульсные аэродинамические трубы. В таких трубах наиболее подходящим будет использовать оптические методы измерения тепловых потоков.

В данной работе в качестве оптического метода измерения применялось двухкомпонентное люминесцентное покрытие. Такое покрытие содержит два люминофора: активное и пассивное. Люминесценция активного люминофора зависит от температуры, а пассивного — нет. В качестве люминесцентного покрытия использовалась люминесцентная акриловая краска. Чтобы определить температуру поверхности, необходимо измерить интенсивность активного и пассивного люминофора. Отношение их интенсивностей не зависит от толщины слоя покрытия, геометрии модели и неровности возбуждающего флуоресценцию освещения. Температура поверхности модели определялась по градуированной кривой.

Были проведены эксперименты в импульсной аэродинамической трубе ИТ-302М на полем конусе с углом сжатия на конце. Модель изготовлена из теплоизолятора АГ-4. В результате была получена панорамная картина распределения температур по поверхности модели. В качестве расчетов теплового потока использовался алгоритм Кука — Фельдермана.

Научный руководитель — д-р. физ.-мат. наук Н. А. Маслов

**Исследование развития высокочастотных возмущений  
в гиперзвуковом пограничном слое на конической поверхности  
с двумерным препятствием**

Е. А. Меркулова

Институт теоретической и прикладной механики  
им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Данная работа посвящена исследованию метода управления ламинарно-турбулентным переходом на поверхности летательного аппарата. Для гиперзвукового потока основным механизмом, приводящим к ламинарно-турбулентному переходу, является рост высокочастотных возмущений в пограничном слое (вторая мода Мэка), с дальнейшим опрокидыванием и образованием турбулентного пятна. В 2015 г. в работе Фонга, Шнайдера и др. [1] была показана принципиальная возможность управления ростом возмущения с помощью двумерных шероховатостей. Также было показано использование шероховатостей для затягивания перехода. Целью данной работы является расчетное исследование влияния двумерных препятствий на развитие высокочастотных возмущений в пограничном слое для чисел Маха 5, 6 и 8.

В рамках исследования были проведены стационарные расчеты обтекания гиперзвуковым потоком следующих моделей: гладкой, с каверной, с шероховатостью в осесимметричной постановке для условий потока, реализуемых в экспериментальной установке Транзит-М ИТПМ СО РАН. Модель — остроконечный конус с углом полураствора  $5^\circ$  и длиной 514 мм. В качестве двумерных препятствий были выбраны шероховатость и каверна, имеющие профиль в виде огибающей линии, описываемой квадратом тригонометрической функции, с геометрическими размерами  $3 \times 1$  мм.

Были получены данные о толщине пограничного слоя и профили газодинамических характеристик вдоль поверхности модели. Проведено исследование развития высокочастотных возмущений с помощью линейной теории устойчивости.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ  
(грант № 19-71-00031).*

---

1. Fong K. D. et all. Second Mode Suppression in Hypersonic Boundary Layer by Roughness: Design and Experiments // AIAA J. 2015. Vol. 53. № 10. P. 3138.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Ю. В. Громыко



**Определение динамических коэффициентов демпфирования  
сегментально-конического тела при малых сверхзвуковых скоростях**

Н. А. Мищенко

Новосибирский государственный университет  
Институт теоретической и прикладной механики  
им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

Спускаемые аппараты во время движения в атмосфере в определенных конфигурациях подвержены возникновению автоколебаний. Как отмечается в работах [1], чаще всего подобные явления наблюдаются на малых сверхзвуковых и трансзвуковых скоростях. Природа явления до сегодняшнего дня не ясна, несмотря на более полувека исследований. Прежде всего это связано со сложностью задачи — с большим количеством параметров, которые могут существенно влиять на эволюцию наблюдаемых колебаний.

Цель работы — развитие методики обработки данных и интерпретации результатов, получение динамических коэффициентов по проведенным экспериментам в аэродинамической трубе на установке свободных колебаний с поперечной державкой.

Проведены эксперименты в аэродинамической трубе Т-313 на установке с поперечной державкой. В экспериментах зафиксированы режимы автоколебаний. Получены динамические коэффициенты демпфирования для модели острого конуса с углом полураствора  $20^\circ$  с донной частью формы сферического сегмента.

*Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственной академии наук на 2013–2020 гг. (проект АААА-А17-117030610125-7).*

---

1. Kazemba C. D. et all. Survey of Blunt Body Dynamic Stability in Supersonic Flow // AIAA. 2012. 4509.

Научный руководитель — канд. техн. наук Н. П. Адамов

**Оптимизация формы летательного аппарата  
для снижения звукового удара**

М. С. Николаев

Институт теоретической и прикладной механики  
им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Создание гражданского сверхзвукового летательного аппарата осложняется многими факторами, в число которых входит звуковой удар. Совокупность ударных волн, генерируемых частями корпуса самолета, из-за нелинейного распространения в атмосфере с расстоянием обретает N-образный характер. Такое возмущение негативно сказывается на здоровье людей и животных, а также создает шумовое загрязнение среды, что не позволяет осуществлять перелеты над населенной местностью. На данный момент пока не приняты нормы звукового удара, и его минимизация с сохранением летных качеств летательного аппарата является одной из приоритетных целей в области гражданской сверхзвуковой авиации.

В представленной работе с целью уменьшения интенсивности звукового удара от сверхзвукового гражданского самолета проводилось численное моделирование ближнего поля течения на примере модели C25D Axisymmetric Equivalent Area [1]. Параметры задачи соответствовали крейсерскому полету летательного аппарата на высоте 15 760 м с числом Маха 1,6, углом атаки 0. Задача решалась в осесимметричной стационарной постановке. Геометрия модели была локально оптимизирована с точки зрения звукового удара.

---

1. Wintzer M. Optimization and Adjoint-Based CFD for the Conceptual Design of Low Sonic Boom Aircraft. Ph. D. thesis. Stanford University, 2012.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Т. А. Гимон

**Исследование обтекающих воздушных потоков  
в зависимости от геометрических параметров «шапки» угля,  
перевозимого на открытом подвижном составе**

Р. А. Овчинников

Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск

Перевозка массовых сыпучих грузов, таких как уголь, является ключевой статьей формирования прибыли Российских железных дорог. На сегодняшний день данное направление перевозок требует решения ряда проблем, наиболее существенной среди которых является проблема сокращения потерь сыпучих грузов от выдувания, связанная с недостаточностью груза и загрязнением экологии угольной пылью.

Анализ отечественного и мирового опыта борьбы с выдуванием угля позволил выделить наиболее актуальный метод — разравнивание и уплотнение груза с формированием «шапки» при помощи катков-уплотнителей, разработанных в 70-е гг. XX в. Ввиду того что эксплуатационные условия перевозок угля существенно изменились (модели полувагонов, ассортимент фракций угля, скорость перевозки), актуальна необходимость исследования обтекающих воздушных потоков в зависимости от геометрических параметров «шапки» угля.

В ходе работы было проведено моделирование обтекания воздушными потоками 3D-модели полувагона с углем при помощи программных пакетов FlowVision (ООО «ТЕСИС») и Autodesk CFD. В качестве исходных данных использованы нормативные требования к максимальной скорости движения грузовых поездов: 90 км/ч (25 м/с), нормальные физические условия (температура 273 К и давление 10100 Па), а также модель турбулентности k-ε, наиболее часто применяемая при решении реальных инженерных задач. Изменяемыми данными являются параметры «шапки» угля: угол наклона боковых граней (ограничивается углом естественного откоса фракций угля и лежит в интервале от 27° до 45°), высота относительно основания «шапки» и бортов полувагона. Перебор параметров «шапки» перед каждым последующим запуском на расчет позволил получить данные о воздушных потоках в различных областях полувагона с грузом, что позволило определить оптимальные параметры «шапки» угля (снижающие завихрения), которые и определяют форму катков-уплотнителей.

Таким образом, результаты исследования позволили сформировать основные параметры для проектирования катков-уплотнителей.

Научный руководитель — канд. техн. наук, доц. К. В. Желдак

## **Моделирование сверхзвукового обтекания сферы в атмосфере Марса**

Т. А. Полянский

Институт теоретической и прикладной механики  
им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Данная работа посвящена численному моделированию сверхзвукового обтекания тела в атмосфере Марса, основной компонентой которой является углекислый газ. В осесимметричной постановке решалась нестационарная задача обтекания сферы при числе Маха 10,6.

Использовался континуальный подход на основе решений уравнений Навье — Стокса с использованием модели идеального газа. Термодинамические свойства углекислого газа описывались с использованием полиномиальной модели и по модели ангармонического осциллятора.

Вычисления производились при помощи библиотеки с открытым исходным OpenFOAM и сравнивались с результатами, полученными на Ansys Fluent и при помощи программ, разработанных в лаборатории.

Получено совпадение по положению ударной волны и температуре торможения. Выполнен расчет теплового потока на стенку сферы.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. В. Зайцев

**Анализ воздействия непрерывного лазерного излучения  
на движение микро- и макрочастиц в воздухе**

И. А. Сайдазимов

Новосибирский государственный университет  
Институт теоретической и прикладной механики  
им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

При воздействии лазерным излучением на частицы возникает светореактивная сила, таким образом, частицы могут ускоряться или замедляться. Актуальность темы работы связана с рядом технологических применений. Так, например, используя поток ускоренных лазерным излучением частиц  $Al_2O_3$ , можно увеличить скорость обработки эмали зуба человека. Особый интерес представляет возможность применения лазерного излучения для изменения времени пребывания мелкого орбитального мусора с целью очистки околоземной орбиты.

Целью данной работы является анализ воздействия лазерного луча на частицы различного сорта, их ускорение или торможение. С этой целью была выписана система дифференциальных уравнений для рассматриваемой модели взаимодействия лазерного луча с одиночной частицей. Для решения данной системы была написана программа на языке Фортран и использовался метод Рунге — Кутты четвертого порядка точности.

В настоящей работе проведены численные оценки лазерной энергии и времени воздействия, необходимые для изменения скорости на заданную величину  $\Delta V$ , для сферических частиц алюминия и стали с размерами от одного микрометра до нескольких сантиметров. Представлен сравнительный анализ изменения температуры, числа Маха и массы одиночной частицы с расстоянием  $z$  при ее движении в вакууме и воздухе. Сопоставление результатов расчетов с известными экспериментами показало, что представленная модель хорошо работает при плотностях энергии лазерного излучения от  $60 \text{ Дж/см}^2$ .

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. О. Б. Ковалев

**Исследование толщины стенки микросфер оптическими методами**

М. В. Фролов

Новосибирский государственный университет

В настоящее время является актуальной разработка методов по эффективному выделению гелия из природного газа, так как в его составе содержится порядка 0,2–0,7 % доли гелия от общего объема. Институтом теоретической и прикладной механики СО РАН предложена альтернатива криогенной технологии — мембранно-сорбционная технология, в качестве мембранных элементов которой используются полые синтетические стеклянные микросферы с высокой селективной проницаемостью стенок к гелию и практически непроницаемыми стенками для метана и остального состава природного газа. Микросферы имеют сферическую форму, термостабильность, низкую плотность и химическую инертность. Из-за имеющейся разности парциальных давлений внутри и снаружи микросферы и селективной проницаемости у некоторых стекол гелий способен диффундировать в полость микросферы.

Для определения коэффициента гелиевой проницаемости необходимо знать толщину стенки микросферы, исследованию которой посвящена данная работа. Исследование толщины стенки микросферы производилось оптическими методами с использованием геометрической оптики. В ходе исследований подготовлен экспериментальный стенд для получения фотографий микросфер.

Для нахождения толщины стенки микросферы исследуется отражение источника света. Входными данными для расчета толщины являются координаты источника света, точка отражения, радиус микросферы и фиксированная толщина стенки. По этим данным получается определенная траектория луча, луч проходит вблизи источника света. Используя метод оптимизации, подбирают искомую толщину стенки таким образом, чтобы расстояние от точки положения источника до луча света стремилось к нулю.

Проведены расчеты толщины стенки для различных типов микросфер. Координаты источника света по оси  $X = -10,4$  см, по оси  $Y = 4,6$  см. Исследовано 45 кремнеземных микросфер с радиусами в диапазоне 1,73–4,77 мкм, 49 МС-В-1Л микросфер с радиусами 0,96–4,35 мкм и 60 МС-ВП-9 микросфер с радиусами 1,1–4,21 мкм.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. С. Верещагин

**Параметрическое исследование влияния интенсивности импульсного воздействия на генерируемые возмущения в сверхзвуковом пограничном слое**

С. Р. Хайбуллина

Институт теоретической и прикладной механики  
им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Одной из сложностей изучения нелинейных процессов при развитии возмущений в пограничных слоях является высокая чувствительность к характеристикам исходных пульсаций. При сопоставлении экспериментальных и расчетных исследований сложно подобрать параметры возбуждения возмущений в расчетах, аналогичные экспериментальным. Необходимы обширные систематизированные данные по возбуждению и развитию возмущений с различными параметрами.

В работе проводится прямое численное моделирование в двумерной постановке возбуждения и развития локализованных возмущений в пограничном слое плоской пластины при числе Маха 2. Исследования проведены при разных параметрах набегающего потока ( $Re_1 = 4,5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ ,  $Re_1 = 11,5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ ) при температуре потока  $T_\infty = 164 \text{ К}$ . Такие параметры характерны для набегающего потока в аэродинамической трубе Т-325 ИТПМ СО РАН. Искусственные возмущения генерируются с помощью локализованного по времени и пространству изменения граничных условий. Рассматриваются различные способы введения возмущений изменением граничного условия: на нормальную к поверхности модели компоненту скорости, тепловой поток от поверхности.

Проанализировано развитие пульсаций массового расхода вниз по потоку. Получено, что при увеличении интенсивности воздействия на пограничный слой амплитуда генерируемых возмущений возрастает. Развитие возмущений различной амплитуды и природы подобно, что указывает на линейный характер эволюции в данных исследованиях. Определялось отношение уровней пульсаций температуры торможения к пульсациям массового расхода. Получено, что во всех рассматриваемых случаях это отношение нарастает вниз по потоку в ближней к источнику возмущений области, а в дальней зоне достигает постоянного значения.

*Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг. (проект АААА-А17-117030610125-7).*

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. А. Яцких





# **ФОТОНИКА И КВАНТОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ**

Научные руководители секции —  
акад. РАН С. Н. Багаев, акад. РАН А. М. Шалагин  
Председатель секции — д-р физ.-мат. наук, доц. С. М. Кобцев  
Ответственный секретарь секции — канд. физ.-мат. наук А. В. Иваненко

Экспертный совет секции  
д-р физ.-мат. наук, проф. Е. В. Бакланов  
д-р техн. наук В. П. Корольков  
канд. физ.-мат. наук, доц. Б. Н. Нюшков  
чл.-корр. РАН И. И. Рябцев  
чл.-корр. РАН, проф. М. П. Федорук  
д-р физ.-мат. наук, проф. П. Л. Чаповский  
д-р физ.-мат. наук Д. В. Чуркин  
канд. техн. наук И. С. Шелемба

# **PHOTONICS AND QUANTUM OPTICAL TECHNOLOGIES**

Section scientific supervisors —  
Acad. RAS S. N. Bagaev; Acad. RAS A. M. Shalagin  
Section head — Dr. Phys-Math. Sci., Assoc. Prof. S. M. Kobtsev  
Responsible secretary — Cand. Phys. Math. Sci. A. V. Ivanenko

Section scientific committee  
Dr. Phys.-Math. Sci., Prof. E. V. Baklanov  
Dr. Eng. Sci. V. P. Korolkov  
Cand. Phys.-Math. Sci., Assoc. Prof. B. N. Nyushkov  
Corr. Member RAS I. I. Ryabtsev  
Acad. RAS, Prof. M. P. Fedoruk  
Dr. Phys.-Math. Sci., Prof. P. L. Chapovsky  
Dr. Phys.-Math. Sci. D. V. Churkin  
Cand. Tech. Sci. I. S. Shelemba



**Оптимизация однокубитовых операций с одиночными атомами рубидия в оптических дипольных ловушках**

Н. В. Альянова

Институт физики полупроводников  
им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Одиночные нейтральные атомы, захваченные в массивы оптических дипольных ловушек, могут использоваться для создания квантового компьютера. Атомы щелочных металлов имеют простую структуру электронных уровней. Сверхтонкие подуровни основного состояния таких атомов могут служить двухуровневой системой, переходы в которой могут индуцироваться лазерным или микроволновым излучением. Выбор рубидия (Rb) обусловлен тем, что у тяжелых щелочных металлов есть преимущество перед более легкими, так как большая величина сверхтонкого расщепления способствует сохранению когерентности.

В экспериментах с одиночными атомами рубидия были реализованы и оптимизированы элементарные квантовые операции. Инициализация начального состояния кубитов проводилась оптической накачкой. Накачка в состояние  $5S_{1/2}(F = 2, M_F = 0)$  проводилась линейно поляризованным вдоль внешнего магнитного поля излучением лазера накачки в присутствии излучения лазера перекачки. Для повышения точности накачки было компенсировано лабораторное магнитное поле. Переходы между сверхтонкими подуровнями  $5S_{1/2}(F = 2, M_F = 0) \rightarrow 5S_{1/2}(F = 1, M_F = 0)$  осуществлялись с помощью СВЧ-излучения. В качестве логического нуля было принято состояние  $5S_{1/2}(F = 2, M_F = 0)$ , логической единицы —  $5S_{1/2}(F = 1, M_F = 0)$ . Конечное состояние кубита зависит от длительности СВЧ-импульса. Регистрация состояния кубита осуществлялась с помощью метода резонансной флуоресценции. Селективность по состояниям обеспечивается использованием «выдавливающего» лазерного импульса, приводящего к вылету атомов в состоянии  $5S_{1/2}(F = 2)$  из дипольной ловушки.

В работе продемонстрированы оптическая накачка одиночных атомов, «часовой» СВЧ-переход между сверхтонкими подуровнями атома  $^{87}\text{Rb}$ , а также осцилляции населенностей Раби, что эквивалентно выполнению основных однокубитовых операций, таких как вентиль Адамара и вентиль НЕ. Точность выполнения однокубитовых операций составила  $95,2 \pm 3 \%$ .

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук И. И. Бетеров

**Индивидуальная адресация к отдельным кубитам при выполнении  
однокубитовых операций с одиночными атомами рубидия**

П. И. Бетлени

Новосибирский государственный университет  
Институт физики полупроводников  
им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск

Нейтральные атомы рубидия  $\text{Rb}^{87}$  на сегодняшний день являются одной из возможных физических реализаций кубитов. Для управления состоянием таких кубитов атомы охлаждаются в магнитооптической ловушке до температуры 100 мкК. Затем происходит их захват в массивы дипольных ловушек. В нашем эксперименте массивы формируются сфокусированным после коррекции волнового фронта нерезонансным лазерным излучением с длиной волны 850 нм. В случае атомов рубидия в качестве логических нуля и единицы используются сверхтонкие подуровни основного состояния  $5S_{1/2}$ . Переходы между этими уровнями индуцируются СВЧ-излучением с частотой 6,8 ГГц.

Квантовые вычисления требуют выполнения индивидуальных однокубитовых операций, однако сфокусировать СВЧ-излучение для управления состоянием одного кубита не представляется возможным, поскольку расстояние между захваченными атомами много меньше длины волны СВЧ-излучения. Это создает потребность в дополнительной системе для индивидуальной адресации к отдельным кубитам.

В работе была реализована система индивидуальной адресации в системе из двух дипольных ловушек посредством дополнительного отстроенного от резонанса на 50–100 ГГц лазерного пучка с длиной волны 795 нм. На пути этого пучка установлен акустооптический дефлектор, в котором создавалась звуковая волна частотой 100,7 и 99,7 МГц. Вследствие дифракции лазерный пучок отклонялся так, что фокусировался в одну из дипольных ловушек, расположенных на расстоянии в 17 мкм друг от друга. Частота СВЧ-резонанса в ловушке смещалась в силу динамического эффекта Штарка на 10–30 кГц, вследствие чего в таком атоме переставала происходить перекачка населенности при взаимодействии с СВЧ-излучением.

В результате эксперимента были получены осцилляции Раби по отдельности в каждой из ловушек, при отсутствии осцилляций во второй ловушке.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук И. И. Бетеров

**Терагерцовая метаповерхность с чувствительным к углу падения резонансом для исследования пленок субмикронной толщины**

С. А. Бычкова

Новосибирский государственный технический университет  
Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

Тонкопленочные покрытия широко используются в передовых промышленных и научных приложениях, в связи с чем развитие новых методов их характеристики является востребованным. В данном ключе терагерцовое (ТГц) излучение альтернативно видимым и ИК-волнам для исследования оптически непрозрачных покрытий. Традиционно в данном случае применяются плазмонные метаповерхности (ПМП), положение резонанса которых чувствительно к диэлектрическому окружению благодаря высокой локализации поля, при этом они облучаются под фиксированным углом  $\theta$ . Путем измерения спектра пропускания ПМП в отсутствие и при наличии аналита (тонкого слоя исследуемого вещества) определяется смещение резонансного пика, связанное с изменением диэлектрических свойств окружения ПМП и толщиной аналита. Предлагается применять ПМП с высокочастотным резонансом, чувствительным к  $\theta$ . При линейной зависимости частоты резонанса от  $\theta$  частотный спектр пропускания ПМП может быть однозначно заменен на угловой спектр пропускания при фиксированной длине волны, что устраняет необходимость проведения спектральных измерений и позволяет заменить дорогие терагерцовые спектрометры компактными полупроводниковыми одночастотными источниками.

Целью представленной работы является изучение свойств и природы данного резонанса. Экспериментальная апробация предложенного подхода выполняется с использованием метаповерхности, состоящей из гексагональных щелевых колец в слое металла, напыленного на полипропиленовую пленку. Экспериментальные данные демонстрируют хорошее совпадение с численным моделированием структуры в ANSYS® Electromagnetics Suite.

Научный руководитель — канд. техн. наук Н. А. Николаев

## **Особенности усиления ультракоротких импульсов в оптических волокнах в С-диапазоне**

В. М. Волоси

Новосибирский государственный университет  
Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

На сегодняшний день лазерные технологии занимают огромный пласт как научной, так и коммерческой деятельности. Особый интерес представляют волоконные генераторы ультракоротких импульсов, обладающие компактностью и устойчивостью к внешним воздействиям. В таких лазерах возможна генерация сильночирпованных диссипативных солитонов (СЧДС), обладающих более высокой энергией в импульсе по сравнению с энергией в режиме генерации классических солитонов. Все перечисленные свойства делают генераторы СЧДС очень привлекательным для использования во многих областях исследований. Так, например, для изучения биологических образцов востребованы источники импульсного излучения с высокой пиковой мощностью с определенной длиной волны. Увеличение мощности излучения достигается за счет использования усилителей на основе оптических волокон, допированных активными элементами (эрбием или иттербием).

В данной работе проводится моделирование СЧДС в оптическом волокне на длинах волн С-диапазона. Определены параметры усиленных импульсов, их спектральные и временные характеристики. Аналогичные параметры будут изучены в ходе эксперимента на базе генератора СЧДС с перестраиваемой длиной волны в диапазоне 1530–1550 нм. Перестройка достигается применением спектрального фильтра, выполненного с использованием объемной дифракционной решетки. Блок усиления будет выполнен на основе активного оптического волокна, допированного эрбием.

В докладе будут представлены результаты моделирования распространения ультракоротких импульсов в оптических волокнах и данные, полученные по итогам проведенных экспериментов, в том числе зависимости эффективности усиления от центральной длины волны усиливаемых импульсов. Также будет проведено сравнение полученных данных с модельными.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Д. С. Харенко

## **Моделирование рассеяния различных бесселевых пучков произвольными частицами**

С. А. Глухова

Институт химической кинетики и горения СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

В настоящее время бесселевы пучки занимают ведущее положение среди структурированных пучков, обладающих орбитальным угловым моментом. Основным достоинством бесселевых пучков является их «недифрагируемость», т. е. возможность распространяться без расширения, но только в центральной области луча. Данные пучки имеют различные применения в таких областях, как оптическое манипулирование (оптические пинцеты), обработка материалов, микроскопия и др. Во многих физических задачах важно учитывать рассеяние бесселевых пучков, которое довольно хорошо изучено для сферических частиц, однако слабо — для частиц с произвольной формой и внутренней структурой. В связи с этим в этой работе преследуются две цели: классификация различных типов векторных бесселевых пучков высокого порядка и наиболее общая реализация моделирования рассеяния таких пучков произвольной частицей с помощью метода дискретных диполей.

В рамках первой задачи было предложено описание различных поляризаций через матрицу  $M$ , связанную с векторными потенциалами Герца. Этот подход позволяет наглядно продемонстрировать соотношения между различными типами пучков и их поляризациями, а также между пучками разных порядков с использованием операторов поворота и дуальности, действующих на матрицу  $M$ . Более того, этот подход позволил обобщить формализм матриц рассеяния (Мюллера и амплитудной матрицы) для вихревых пучков, который используется во многих реализациях метода дискретных диполей, в том числе и в популярном программном пакете с открытым исходным кодом ADDA. В результате моделирование рассеяния различных типов бесселевых пучков было реализовано в ADDA и доступно на GitHub: <https://github.com/stefaniagl/adda>. Также проведено успешное сравнение с литературными данными для шаров. Таким образом, теперь каждый может моделировать рассеяние бесселевых пучков частицами с произвольной формой и внутренней структурой.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук М. А. Юркин

## Теоретическое моделирования ВЧ-тракта волноводного $\text{CO}_2$ -лазера с последующей экспериментальной проверкой

М. А. Жилин

Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск

Волноводные  $\text{CO}_2$ -лазеры с высокочастотным (ВЧ) возбуждением широко применяются в технологии, приборостроении и медицине. В качестве активной среды, как правило, используется смесь газов  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ , He и Xe при общем давлении от нескольких десятков до 100–150 торр. Одной из важных частей лазера данного типа является ВЧ-тракт. Под ВЧ-трактом подразумевается электрическая схема возбуждения активной среды лазера, включающая ВЧ-генератор накачки, передающий кабель, схему согласования, вакуумный ВЧ-ввод и электродный узел. ВЧ-тракт играет исключительную роль, поскольку определяет эффективность работы лазера и стабильность зажигания разряда [1].

Электродный узел представляет собой оптический волновод с электродами для возбуждения поперечного ВЧ-разряда. Параллельно электродам подключаются катушки индуктивности, образуя высокодобротный параллельный колебательный контур, настроенный на резонансную частоту, близкую к частоте ВЧ-генератора. Параметры катушек индуктивности определяются геометрическими размерами элементов электродного узла.

В данной работе проведено теоретическое моделирование ВЧ-тракта волноводного  $\text{CO}_2$ -лазера с учетом свойств волновода как длинной линии, что дает возможность оценить распределение разряда по объему волновода. Результаты расчетов в отсутствие разряда в лазере сравнивались с измерениями импеданса с помощью векторного рефлектометра OBZORTR1300/1. Для подтверждения результатов моделирования, определения оптимальных параметров ВЧ-тракта и отработки методики настройки схемы согласования в лазере включался разряд при различных геометрических размерах элементов ВЧ-тракта и измерялся реальный КСВ с помощью направленного ответвителя при различных частотах следования импульсов возбуждения. Результаты моделирования совместно с полученными экспериментальными данными будут использованы при оптимизации конструкции волноводного  $\text{CO}_2$ -лазера.

---

1. Karapuzikov A. I., Markelov A. A. Numerical Simulation and Experimental Studies of the RF Power Circuit of Waveguide  $\text{CO}_2$  Lasers // Instrum. Exp. Tech. 2019. Vol. 62. No. 3. P. 343–349.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. И. Карапузиков



## Оптимизация источника зондирующего излучения для распределенного волоконного датчика температуры

Н. И. Калмыков

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

Распределенные волоконные датчики температуры на основе эффекта Рамана являются одними из самых перспективных приборов для измерения профилей температуры протяженных объектов. В таких датчиках в волокно запускается серия зондирующих импульсов малой длительности и детектируется рассеянное излучение от каждого импульса. Далее, находят зависимость интенсивности рассеянного излучения от времени (расстояния) — рефлектограмму. В рамановских датчиках информация о температуре содержится в рефлектограмме для антистоксовой спектральной компоненты.

Для увеличения отношения сигнал/шум необходимо использовать мощные импульсные лазерные источники. По причине большой стоимости мощных лазерных диодов используют схему — задающий малоомощный лазер и волоконный эрбиевый усилитель. Однако в случае относительно редких импульсов лазера возникает проблема, связанная с генерацией усиленного спонтанного излучения (ASE) между импульсами источника, уровень которого может достигать порядка 50 % в спектре излучения. ASE является главным источником шума усилителя и вносит основной вклад в искажение рефлектограммы. Цель данной работы состоит в подавлении этого излучения.

В работе используется два лазерных диода: диод с зондирующими импульсами длительностью 10 нс (пространственное разрешение 1 м), с частотой повторения 6,2 кГц и длиной волны 1550 нм и непрерывный диод накачки с длиной волны 980 нм. Для подавления ASE была реализована модуляция тока диода накачки меандром при помощи генератора, синхронизированного с импульсами источника. Это позволило изменять коэффициент заполнения импульсов диода накачки. Далее, подбирался оптимальный коэффициент заполнения, обеспечивающий минимальную долю спонтанного излучения. Было установлено, что для выходной мощности накачки 30 мВт при коэффициенте заполнения 50 % доля ASE уменьшилась на 10 % и стала равна 35 %.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук И. А. Лобач

**Обобщенные рамсеевские методы в спектроскопии резонансов когерентного пленения населенностей**

Д. В. Коваленко

Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Относительно недавно были разработаны эффективные методы подавления полевых сдвигов в атомных часах, такие как обобщенная автобалансная рамсеевская спектроскопия (ОАБРС) и комбинированный сигнал ошибки (КСО). Данные спектроскопические схемы основаны на возбуждении атомов двумя рамсеевскими последовательностями импульсов (накачки и детектирующего) с разными временами свободной эволюции (темные времена). Эти методы приводят к полному подавлению полевых сдвигов и его флуктуаций, как это было показано в оригинальных работах, где теоретический анализ проводился в рамках двухуровневой атомной системы, которая применима только к оптическим часам. Тем не менее теоретическое исследование возможности реализации методов ОАБРС и КСО в атомных часах микроволнового диапазона на эффекте когерентного пленения населенностей (КПН) ранее не проводилось.

В настоящей работе этот пробел был заполнен. Для этого рассматривалось взаимодействие рамсеевских импульсов когерентного бихроматического поля с трехуровневой  $\Lambda$ -системой. Для анализа временной динамики атомной системы применялся формализм матрицы плотности. В качестве спектроскопического сигнала исследовалось поглощение поля, накопленное в течение действия детектирующего импульса. Было аналитически доказано, что при выборе правильного значения сопутствующего параметра для метода ОАБРС и калибровочного коэффициента равным  $\exp(-\Gamma*(T_1-T_2))$  (где  $\Gamma$  есть константа, определяющая релаксацию атомов к изотропному распределению по подуровням основного состояния, а  $T_1$  и  $T_2$  — различные времена свободной эволюции) для метода КСО полевой сдвиг часовой частоты, стабилизируемой по КПН-резонансу, будет полностью подавлен. Полученные расчетные зависимости полностью подтверждают аналитические результаты. Реализация методов ОАБРС и КСО позволит значительно улучшить долговременную стабильность (до уровня ниже  $10^{-14}$ ) и точность КПН-часов.

Научные руководители — д-р физ.-мат. наук В. И. Юдин, канд. физ.-мат. наук М. Ю. Басалаев, д-р физ.-мат. наук А. В. Тайченачев

## **Численное моделирование нелинейной динамики распространения мод шепчущей галереи на поверхности волоконных световодов**

А. Ю. Колесникова

Новосибирский государственный университет

Генерация оптических частотных гребенок (ОЧГ) в микрорезонаторе является актуальным направлением исследований. ОЧГ позволяют создавать стандарты частоты и имеют приложения в прецизионной частотной метрологии, спектроскопии, обработке оптических сигналов, радиофотонике и т. д. На данный момент уже получена генерация ОЧГ в тороидальных, кольцевых резонаторах [1], в то же время актуальной задачей является получение ОЧГ в цилиндрических микрорезонаторах на поверхности оптических волноводов, так как они будут выдавать меньшую частоту повторения последовательности импульсов [2].

Работа посвящена изучению и анализу модели, описывающей динамику распространения мод шепчущей галереи на поверхности волоконных световодов в нелинейном режиме. Целью работы является проведение численных расчетов для определения пороговой мощности излучения, необходимой для наблюдения нелинейных эффектов и генерации ОЧГ.

В ходе выполнения работы были изучены численные методы для решения модифицированного нелинейного уравнения Шредингера с источником. Реализована численная модель, описывающая временную динамику распространения мод шепчущей галереи в потенциале произвольной формы в нелинейном режиме и их спектр. Реализована численная модель, позволяющая определить спектр пропускания системы волокно — источник.

С помощью реализованной численной модели проведена оценка порога мощности, при которой наблюдаются нелинейные эффекты, и продемонстрирована возможность генерации ОЧГ.

---

1. Weiqiang Wang, Leiran Wang and Wenfu Zhang Advances in soliton microcomb generation // *Adv. Photonics*. 2020. Vol. 2(3). 034001.

2. Dvoyrin V., Sumetsky M. Bottle microresonator broadband and low-repetition-rate frequency comb generator // *Opt. Lett.* 2016. Vol. 41. P. 5547–5550.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук И. Д. Вагник

## **Исследование распределения температуры активных элементов в области накачки мощного лазерного усилителя**

А. О. Коновалова

Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

В настоящее время перспективным направлением лазерной физики является получение лазерного излучения с одновременно высокой пиковой и средней мощностью. В ИЛФ СО РАН разрабатывается лазерная система, генерирующая предельно короткие импульсы излучения со стабилизацией фазы огибающей относительно несущей, работающая с высокой частотой следования импульсов [1]. Для достижения высокой средней мощности используется лазерный усилитель. В таких усилителях излучение накачки вызывает сильный неравномерный нагрев активных элементов, проявляются различные тепловые эффекты, поэтому есть необходимость в исследовании распределения температуры активных элементов для дальнейшей оптимизации системы.

Контроль температуры осуществляется с использованием метода бесконтактного исследования температуры. Для повышения точности метода был разработан и оптимизирован Yb:YAG-лазер с диодной накачкой. По результатам был произведен переход из импульсного режима в непрерывный, мощность излучения лазера в рабочем режиме составила 300 мВт. Лазер генерирует излучение в одномодовом режиме. Полученные результаты показали, что лазер может быть использован для проведения экспериментов по лазерной термометрии. Проведены первые эксперименты.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ  
в рамках научного проекта № 20-02-00529-а.*

---

1. Петров В. В., Петров В. А., Купцов Г. В., Лаптев А. В., Кирпичников А. В., Пестряков Е. В. Моделирование процесса лазерного усиления с учетом зависимости теплофизических и лазерных характеристик среды от распределения температуры в активном элементе Yb:YAG // Квантовая электроника. 2020. Т. 50. № 4. С. 315–320.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук В. В. Петров

## Достижение гейзенберговского предела в квантовом оптическом гироскопе с двухмодовым сжатым вакуумом

И. И. Краснонов

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Волоконно-оптический гироскоп — это устройство, позволяющее измерять угловую скорость вращения через фазовую задержку  $\varphi$ , возникающую при прохождении световых волн во встречных направлениях по надлежащим образом ориентированной петле оптоволокна [1]. Однако фазовая чувствительность измерений ограничена наличием шумов, прежде всего обусловленных фундаментальными законами природы. Актуальным является изучение границ точности оптических гироскопов и разработка соответствующих схем.

Целью работы являлось построение квантовой стратегии, позволяющей получить наибольшую точность вычисления сдвига фаз в оптическом гироскопе.

В качестве модели гироскопа использовался интерферометр Маха — Цендера. На вход интерферометра подается двухмодовый сжатый вакуум, также известный как *twin-beam state*. Информацию о вращении системы отсчета прибора несет шум регистрируемой разности чисел фотонов в выходных плечах интерферометра. Среднее значение сигнала в обычном смысле, как разности этих чисел, всегда равно нулю.

В результате проделанных вычислений была найдена дисперсия шума сигнала. Из формулы данной величины можно заметить, что одно из слагаемых при малых  $\varphi$  отвечает достижению предела Гейзенберга, что является целью всех перспективных оптических подходов в квантовой метрологии. Для чистого состояния с  $n$  фотонами на входе в интерферометр были рассчитаны классическая и квантовая информации Фишера, найдены границы Крамера — Рао. Показано, что классическая и квантовая величины имеют одинаковые значения, не зависящие от  $\varphi$ . Построены зависимости информации Фишера и границы Крамера — Рао от параметра сжатия, по которым определены оптимальные параметры, позволяющие получить наибольшую точность вычисления сдвига фаз.

---

1. Grace M.R. et al. Quantum-enhanced fiber-optic gyroscopes using quadrature squeezing and continuous-variable entanglement // Phys. Rev. Appl. 2020. Vol. 14. No. 3. P. 034065.

## **Волоконный ВКР-лазер на основе семисердцевинного волокна с перекрестной связью между сердцевинами**

В. Лабунцов

Новосибирский государственный университет  
Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

Волоконные лазеры на основе эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР-лазеры) являются перспективными источниками лазерного излучения, излучающими на длинах волн, недостижимых для волоконных лазеров на основе активных световодов, легированных редкоземельными ионами. Замена одномодового волоконного световода на многосердцевинное или многомодовое позволяет снизить влияние нежелательных нелинейных эффектов и тем самым улучшить выходные характеристики лазера.

В данной работе используется 7-сердцевинный световод со связанными сердцевинами, в котором, по мере распространения оптического сигнала, осуществляется процесс перераспределения мощности между сердцевинами. Одной из характеристик таких световодов является длина перекачки мощности, т. е. такая длина волокна, при которой излучение, поданное в одну из сердцевины, полностью уходит в другие. Эта длина зависит от длины волны излучения. Для ее нахождения снимались спектры пропускания с центральной сердцевины при различных длинах образцов (0,3–10,5 см). По полученным спектрам была определена длина перекачки для длины волны 1090 нм, которая сравнивалась с расчетным значением.

Созданный ВКР-лазер имел накачку на длине волны 1045 нм. Отстройка частоты для материала сердцевины световода (германосиликатное стекло) составляет ~13 ТГц, а стоксова компонента излучения должна наблюдаться на длине волны 1090 нм. В качестве распределенных зеркал в резонаторе ВКР-лазера использовались брэгговские решетки (ВБР), записанные в периферийных сердцевинах для данной длины волны.

Селективная запись ВБР с высоким коэффициентом отражения только в периферийных сердцевинах многосердцевинного волокна позволила получить эффективную ВКР генерацию с выходной мощностью ~ 2,5 Вт на стоксовой длине волны 1090 нм. Исследование спектральных характеристик волоконного ВКР-лазера показало заметное уменьшение ширины линии генерации по сравнению с ВКР-лазером на основе одномодового односердцевинного световода. Продемонстрирован режим одномодовой ВКР-генерации из центральной сердцевины.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. А. Вольф

## Эффективный алгоритм для расчета данных рассеяния периодической системы Захарова — Шабата

И. И. Муллыджанов

Институт автоматики и электротехники СО РАН, Новосибирск

Нелинейное уравнение Шредингера (НУШ) является моделью распространения нелинейных волн в различных областях физики. Например, НУШ описывает в первом приближении распространение гравитационных волн на поверхности глубокой воды и распространение света в оптоволокне с кубической (керровской) нелинейностью. НУШ можно полностью проинтегрировать (решить) с помощью метода обратной задачи рассеяния (МОЗР), который преобразует волновое поле в так называемые данные рассеяния, представляющие собой нелинейный аналог традиционных Фурье гармоник [1, 2]. Данные рассеяния НУШ могут быть получены в результате решения задачи рассеяния для вспомогательной линейной системы Захарова — Шабата, в которой волновое поле играет роль потенциала. В данной работе представлен новый эффективный метод для численного расчета данных рассеяния в случае периодического нелинейного волнового поля для НУШ с фокусирующей нелинейностью. Алгоритм основан на комбинации метода Фурье — коллокаций [3] и прямого расчета матрицы рассеяния [4] — и позволяет получить полные данные рассеяния: основной спектр (зоны собственных значений) и вспомогательный спектр (фазовые параметры нелинейных гармоник) периодической задачи Захарова — Шабата. Для проверки правильности работы алгоритма мы сравнили результаты с ответом для простого точного решения в виде плоской волны. Эффективность алгоритма показана на различных примерах комплексных волновых полей, представляющих собой сложные зонные структуры. Особое внимание было уделено случаю волнового поля с сильной нелинейностью, содержащего солитоны, которые имеют узкие зоны в спектре собственных значений.

---

1. Точная теория двумерной самофокусировки и одномерной самомодуляции волны в нелинейных средах / В. Е. Захаров, А. Б. Шабат // ЖЭТФ. 1971. Т. 61, № 1. С. 118–134.

2. Теория солитонов: метод обратной задачи / В. Е. Захаров, С. В. Мананков, С. П. Новиков, Л. П. Питаевский. М.: Наука, 1980. 319 с.

3. Nonlinear waves in integrable and nonintegrable systems / J. Yang. Springer-Verlag, 2010. 430 с.

4. Mullyadzhанov R., Gelash A. Direct scattering transform of large wave packets // Opt. Lett. 2019. Vol. 44. P. 5298–5301.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. А. Гелаш

**Фотонное эхо в квантовой яме (GaAs/AlGaAs)**

Р. С. Назаров

Санкт-Петербургский государственный университет

В настоящее время научный интерес представляют эксперименты по исследованию когерентных оптических свойств экситонов и их комплексов в полупроводниках. Ведется поиск материалов, пригодных для создания квантовых логических элементов, один из возможных способов реализаций которых — обработка информации с помощью световых сигналов. Фотонное эхо является одним из оптических явлений, которые могут быть использованы в основе квантового логического элемента.

Настоящая работа посвящена исследованию фотонного эха от экситонов и их комплексов в квантовой яме GaAs/Al(3 %)GaAs. В ходе работы была разработана модель двухуровневой системы и проверена возможность ее применения для моделирования изучаемого явления.

Полученные экспериментальные данные позволяют говорить о наличии фотонного эха в образце. В ходе обработки полученных результатов было установлено, что временная ширина сигнала эха связана с неоднородным уширением ансамбля. Анализ спектров фотонного эха позволяет говорить о сосуществовании фотонного эха с явлением затухания свободной поляризации.

*Работа выполнена на оборудовании Ресурсного центра СПбГУ «Нанопотоника» при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-72-10034).*

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Ю. В. Капитонов



## **Спектрометр терагерцового диапазона на основе волоконного самосканирующего лазера**

Н. Р. Поддубровский

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

Спектроскопия в терагерцовом диапазоне, или THz-спектроскопия, имеет ряд полезных применений, например анализ состава газов. Для проведения THz-спектроскопии в частотной области, как правило, используется сигнал гетеродинирования излучений двух лазеров, один из которых является перестраиваемым, другой — одночастотным. Сигнал биений необходим для генерации THz-излучения при помощи THz-передатчика. Далее THz-излучение пропускается через образец и собирается приемником. Впоследствии THz-сигнал оцифровывается, позволяя получить спектр пропускания образца в терагерцовом диапазоне. Целью данной работы является разработка спектрометра терагерцового диапазона на основе волоконного самосканирующего лазера. Ожидается, что применение самосканирующего лазера вместо перестраиваемого источника позволит уменьшить стоимость THz-спектрометра.

В ходе работы была собрана и протестирована оптическая часть THz-спектрометра. Для получения сигнала биений использовался непрерывный Nd:YAG лазер, генерирующий одночастотное излучение с длиной волны 1064 нм, и самосканирующий волоконный лазер, длина волны которого изменялась от 1055 до 1075 нм. Использованный самосканирующий лазер является импульсным, при переходе от импульса к импульсу частота изменяется на межмодовую частоту — 5,5 МГц. Каждый импульс такого лазера состоит из одной продольной моды с шириной менее 1 МГц. Мы получили сигнал гетеродинирования излучений двух лазеров при помощи оптического ответвителя. На выходе наблюдался сигнал биений на разностной частоте. Частота разностного сигнала изменяется от 0 до 3 ТГц с шагом 5,5 МГц, тем самым открывая возможность для проведения THz-спектроскопии с высокой дискретизацией в широком диапазоне частот.

На текущий момент по причине низкого отношения сигнал/шум сигнал с детектора THz-излучения не был получен. Ведется работа по увеличению мощности полезного сигнала и уменьшению уровня шума.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук И. А. Лобач

**Терагерцовые свойства нелинейных кристаллов  $\text{KTiOPO}_4$   
в диапазоне температур  $-192 \div +150 \text{ }^\circ\text{C}$**

А. А. Рыбак

Новосибирский государственный университет  
Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

В настоящее время одним из перспективных направлений терагерцовой (ТГц) фотоники является разработка узкополосных высокоинтенсивных мобильных источников ТГц-излучения, что позволит приблизиться к созданию компактного терагерцового лидара для эффективного экологического мониторинга состояния окружающей среды, контроля качества фармацевтической продукции, покрытий в автомобильной промышленности.

Одним из перспективных преобразователей лазерного излучения в ТГц являются нелинейные кристаллы калий титанил фосфата ( $\text{KTiOPO}_4$ , КТР). Ранее была показана возможность преобразования в кристаллах КТР лазерного излучения в ТГц-излучение. Цель данной работы — более подробное исследование терагерцовых свойств кристаллов КТР в области 0,2–1 ТГц в диапазоне температур  $-195 \div +150 \text{ }^\circ\text{C}$ .

На терагерцовом импульсном спектрометре (ТИС) в сфокусированном пучке с использованием двух пленочных поляризаторов были исследованы ТГц оптические свойства двух высокоомных ( $\sim 10^{10} \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ ) образцов кристалла КТР, ориентированных вдоль оптических осей. Образцы были выращены низкоградиентным методом Чохральского. Измерения проводились при комнатной температуре (25  $^\circ\text{C}$ ); 50; 100; 150;  $-50$ ;  $-100$ ;  $-150$ ;  $-195 \text{ }^\circ\text{C}$ . Были рассчитаны показатели преломления и коэффициенты поглощения. Дисперсия компонент показателей преломления аппроксимирована в форме уравнений Зельмейера, коэффициенты которых рассчитывались методом наименьших квадратов, получены температурные зависимости коэффициентов Зельмейера для кристаллов КТР. По полученным аппроксимациям определены термооптические коэффициенты и зависимость угла  $V_z$  от температуры для данных кристаллов КТР. Кристаллы КТР имеют меньшее поглощение, чем кристаллы  $\text{LiNbO}_3$ , и могут быть использованы для эффективной генерации ТГц-излучения за счет коллинеарного фазового синхронизма.

Научный руководитель — канд. техн. наук Н. А. Николаев

**Влияние донорной группировки  
на спектрально-люминесцентные и электролюминесцентные свойства  
органических соединений для OLED**

Е. В. Сапожникова  
Томский государственный университет

Органические светоизлучающие диоды (OLED) активно используются в качестве источников освещения и базовых элементов цифровых дисплеев. В основе работы OLED лежит явление электролюминесценции (свечение вещества при воздействии на него электрического тока). Данные устройства создаются на базе тонких пленок органических веществ.

В данной работе в качестве активного вещества были использованы соединения, имеющие одинаковые акцепторные группы, но разные донорные. У первого вещества донорной группой является дифениламин, у второго — карбазол, присоединенный к остальной части молекулы через четвертое положение, у третьего карбазол присоединен через азот. В ходе работы были созданы растворы данных соединений в хлороформе и исследованы их спектрально-люминесцентные и электролюминесцентные свойства. На основе соединений были созданы OLED-структуры и изучены их характеристики.

Растворы всех соединений имеют достаточно высокий квантовый выход флуоресценции. Наименьшее значение получено для молекулы с дифениламином, что может быть связано с тем, что незакрепленные между собой фенильные кольца обладают дополнительной степенью вращения и часть энергии возбуждения теряется безызлучательно. Максимальная яркость была получена у OLED на соединении с дифениламином и составила 14609 Кд/м<sup>2</sup>. Яркость на соединении с карбазолом оказалась гораздо ниже, хотя в растворе это соединение имело наибольший квантовый выход флуоресценции. Это связано с тем, что в OLED-структуре это соединение на границе с транспортным слоем образует эксиплексы, слабо излучающие. На это указывает факт деформации спектра электроизлучения по сравнению со спектром фотолюминесценции.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук К. М. Дегтяренко

## Обратная задача рассеяния прямоугольного и sech-импульсов для системы Захарова — Шабата

А. Е. Чернявский

Новосибирский государственный университет  
Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

Практически вся информация в современном мире передается по волоконно-оптическим сетям, которые на сегодняшний день достигли своего линейного предела. Это означает, что на информационный сигнал в оптическом волокне начинают существенным образом влиять нелинейные (керровские) и дисперсионные искажения. Эволюцию сигнала (огibaющей электрического поля) в оптической линии (волокне) описывает нелинейное уравнение Шредингера (НУШ), которое учитывает оба фактора. Если шумы в линии малы, нелинейно-дисперсионные искажения сигнала можно значительно компенсировать, численно моделируя ход сигнала назад по оптической линии, т. е. численно решая НУШ назад по координате линии, от конца/приемника к началу/источнику. Метод, получивший название «цифровое обратное распространение» (ЦОР), или *digital back propagation* (DBP), имеет ряд вариантов, и все они, так или иначе, основаны на численном решении НУШ.

Один из наиболее эффективных методов решения НУШ основан на методе обратной задачи рассеяния (ОЗР) [1]. При этом ЦОР сводится к решению прямой задачи рассеяния и ОЗР для системы уравнений Захарова — Шабата, ассоциированной с НУШ. Для решения задач рассеяния известен ряд численных методов, среди которых отметим метод внутреннего окаймления Теплицева (*Toeplitz Inner Bordering*, ТИВ) [2], основанный на решении интегральных уравнений Гельфанда — Левитана — Марченко (ГЛМ) с помощью алгоритма окаймления типа Левинсона.

Работа посвящена решению левой и правой задач рассеяния для системы Захарова — Шабата для модельных потенциалов, имеющих как дискретный, так и непрерывный спектр рассеяния, сравнению аналитических результатов с расчетами в среде программирования MatLab и системе Mathematica Wolfram Research, а также тестированию устойчивости и точности алгоритмов ТИВ для таких потенциалов.

---

1. Захаров В. Е., Манаков С. В., Новиков С. П., Питаевский Л. П. Теория солитонов: метод обратной задачи. М.: Наука, 1980. 320 с.

2. Frumin L. L. et al. Efficient numerical method for solving the direct Zakharov — Shabat scattering problem // J. Opt. Soc. Am. B. 2015. Vol. 32. № 2. P. 290–296.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, доц. Л. Л. Фрумин

## Квантовая информация в замкнутой мировой линии

А. В. Шепелин

Новосибирский государственный университет  
Институт автоматике и электрометрии СО РАН, Новосибирск

Квантовая информатика (КИ) — активно развивающаяся область научных исследований и технологий, использующая теоретические и эмпирические результаты квантовой физики для обобщения теории информации и смежных с ней дисциплин. При этом физические ограничения КИ не определены однозначно в первую очередь потому, что не известны все ограничения квантовой механики, в частности мера ее согласованности с общей теорией относительности (ОТО).

В 1991 г. физик-теоретик из Оксфордского университета Дэвид Дойч рассмотрел поведение квантовых объектов, взаимодействующих с гипотетическим объектом из ОТО — замкнутой времениподобной кривой (*Closed Timelike Curve*, CTC). В результате ему удалось разрешить некоторые классические парадоксы путешествий во времени [1]. Данная работа вызвала критику, но также породила интерес к попыткам разрешить подобные парадоксы с помощью альтернативных квантовых моделей (например, с помощью квантовой телепортации с постселекцией квантового состояния [2, 3]).

В рамках настоящей работы была предложена другая теоретическая модель CTC (S-CTC), рассматривающая квантовое состояние не как элемент объективной реальности, а как часть субъективного знания агента. Проведено сравнение квантовых моделей CTC, вычислены выходные состояния и вероятности исходов при наличии акта измерения рассматриваемых систем.

---

1. Deutsch D. Quantum mechanics near closed timelike lines // *Phys. Rev. D*. 1991. Vol. 44. № 10.

2. Lloyd S. et al. Closed timelike curves via post-selection: theory and experimental demonstration // *Phys. Rev. Lett.* 2011. Vol. 106. No. 4. P. 040403.

3. Svetlichny G. Time Travel: Deutsch vs. Teleportation // *Int. J. Theor. Phys.* 2011. Vol. 50.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. Л. В. Ильичев



# **ФИЗИКА ПЛАЗМЫ**

Научный руководитель секции —  
д-р физ.-мат. наук, проф. Л. Н. Вячеславов

Председатель секции — канд. физ.-мат. наук А. А. Шошин

Ответственный секретарь секции — канд. физ.-мат. наук В. В. Анненков

Экспертный совет секции  
канд. физ.-мат. наук А. Д. Беклемишев  
д-р физ.-мат. наук, проф. К. В. Лотов  
д-р физ.-мат. наук П. А. Багрянский

# **PLASMA PHYSICS**

Section scientific supervisor — Dr. Phys.-Math. Sci., Prof. L. N. Vyacheslavov

Section head — Cand. Phys.-Math. Sci. A. A. Shoshin

Section responsible secretary — Cand. Phys.-Math. Sci. V. V. Annenkov

Section scientific committee  
Cand. Phys.-Math. Sci. A. D. Beklemishev  
Dr. Phys.-Math. Sci., Prof. K. V. Lotov  
Dr. Phys.-Math. Sci. P. A. Bagryansky





**Влияние внешней кильватерной волны  
на равновесную последовательность микросгустков**

М. А. Байструков

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

На данный момент идет активное развитие методов кильватерного ускорения. Одним из наиболее перспективных методов является ускорение с использованием протонного драйвера. В CERN проводится программа AWAKE по реализации данного метода. В рамках данной программы проводились эксперименты в одной секции длиной 10 м, в которых изучалась сама кильватерная волна и поведение драйвера в ней. Сейчас производится подготовка ко второй стадии эксперимента под названием Run2. В одной из схем Run2 предлагается использовать предионизованную вторую секцию вместе с лазерной затравкой в первой секции. Схема лазерной затравки: газ рубидия ионизируют лазерным импульсом, который предварительно сводится с протонным пучком так, чтобы лазерный импульс находился в центре протонного пучка по его длине. Это обеспечивает требуемый уровень однородности плазмы и контролируруемую самомодуляцию задней части протонного пучка за счет того, что резкий фронт драйвера генерирует высокое поле начальной затравки.

Однако передняя часть протонного пучка также может самомодулироваться, когда попадет во вторую предионизованную секцию, и создать кильватерную волну. В связи с этим возникает задача о влиянии внешней кильватерной волны на равновесную последовательность микросгустков. В свою очередь, эта задача разделяется на две части: влияние произвольной внешней кильватерной волны на равновесную последовательность микросгустков и самомодуляция гладкого пучка в плазме.

Целью данной работы является нахождение характерных параметров при эволюции равновесной последовательности микросгустков под действием внешней кильватерной волны, а также нахождение приближенного решения для самомодуляции гладкого пучка в плазме. Для достижения цели были проведены серии моделирований при помощи программы LCODE.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. К. В. Лотов

**Исследование двухпоточковой неустойчивости сферически симметричных состояний динамического равновесия плазмы Власова — Пуассона**

С. А. Бибилова

Новосибирский государственный университет

Популярность модели Власова — Пуассона обусловлена ее многочисленными приложениями, в частности, к кинетической теории частиц, которые движутся в электрических или гравитационных полях. Однако основной причиной пристального интереса к модели Власова — Пуассона служит ее применение в изучении высокотемпературной, разреженной плазмы, а именно для разрешения проблемы управляемого термоядерного синтеза (УТС).

В данной работе исследуется задача линейной устойчивости одного класса сферически симметричных состояний динамического равновесия плазмы Власова — Пуассона, вмещающей в себя электроны и один сорт ионов со стационарными функциями распределения, которые изотропны по физическому пространству, но переменны в скоростном континууме.

Прямым методом Ляпунова доказана абсолютная неустойчивость этих состояний равновесия относительно малых возмущений того же типа симметрии. Для неполного незамкнутого подкласса настоящих возмущений получены достаточные условия линейной устойчивости, совпадающие с результатом Ньюкомба — Гарднера — Розенблюта (Н.-Г.-Р.). Показано, что результат Н.-Г.-Р. носит формальный характер.

Обнаружены достаточные условия линейной практической неустойчивости. Построена априорная экспоненциальная оценка снизу и описаны начальные данные для нарастающих во времени малых возмущений. Обращены достаточные условия линейной устойчивости Н.-Г.-Р. Сконструированы аналитические контрпримеры к спектральной теореме Ньюкомба — Гарднера и критерию Пенроуза, которые тоже носят формальный характер.

Полученные результаты согласуются с известной в электростатике теоремой Ирншоу и распространяют ее действие с аналитической механики на статистическую. Найденные достаточные условия линейной практической неустойчивости могут быть использованы в качестве механизма тестирования и контроля на установках для осуществления УТС при реализации физических экспериментов и отладке технологических процессов, а также при выполнении численных расчетов по определению оптимальных режимов работы этих установок.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доц. Ю. Г. Губарев

## **Охлаждение гелиевой атмосферной плазменной струи жидким азотом**

С. А. Вагапов

Институт теоретической и прикладной механики  
им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

Новосибирский государственный университет

Холодные плазменные струи, создающиеся в потоке благородного газа путем возбуждения в нем стримерного разряда, имеют широкий спектр приложений. Одним из наиболее перспективных из них является применение плазменных струй в медицине. При контакте холодной плазменной струи с окружающим воздухом генерируются активные радикалы, которые способствуют стерилизации обрабатываемой поверхности, а также способны подавлять жизнеспособность раковых клеток.

В данной работе рассматривается вопрос о нагреве поверхности в процессе ее обработки плазменной струей и способах его минимизации. Джоулев нагрев газа во время инициации стримерного разряда, а также взаимодействие стримеров с поверхностью приводит к тому, что температура поверхности может на десятки градусов отличаться от комнатной, что может привести к биоткани. Для безопасной обработки биологической поверхности необходимо, чтобы ее температура не превышала 40 °С.

В работе апробирован способ минимизации риска ожога поверхности — предварительное охлаждение рабочего газа с помощью жидкого азота. Численно решалась задача теплопроводности для гелиевого канала с теплопроводящими стенками из разных материалов. Определена степень нагрева поверхности при различной длине охлаждающих каналов. Проведено сравнение с экспериментальными данными.

*Проект поддержан грантами РФФИ (№ 18-08-00510) и РНФ (№ 9-19-00255).*

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук И. В. Швейгерт

**Исследование влияния постоянного магнитного поля  
на генерацию плазмы в высокочастотном плазменном эмиттере  
атомарного нагревного инжектора**

В. А. Воинцев

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

В Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера в лаборатории 9-0 разрабатываются атомарные инжекторы для нагрева и диагностики плазмы в крупных термоядерных установках [1, 2]. В данных инжекторах источником ионного пучка является высокочастотный плазменный эмиттер [3], на задней стенке которого установлены постоянные магниты. Генерируемое магнитами поле распространяется внутрь плазменной камеры и способствует уменьшению потери плазмы на заднюю стенку эмиттера, а также повышению эффективности разряда.

В данной работе было исследовано влияние поля постоянных магнитов на генерацию плазмы и величину пучка атомарного инжектора. Эксперименты по получению и диагностике пучка проводились при различных конфигурациях магнитного поля эмиттера. Поле менялось путем изменения количества и расположения магнитов на стенке, а также их заменой на магниты с более слабыми по напряженности полями.

В целях обоснования результатов экспериментов были проведены измерения магнитного поля внутри плазменной камеры по радиусу эмиттера, а также произведено численное моделирование различных конфигураций данных полей.

В докладе представлены результаты экспериментов на нагревном инжекторе, а также полученные путем моделирования магнитного поля.

- 
1. Ivanov A.A. et all. Radio frequency ion source for plasma diagnostics in magnetic fusion experiments // Rev. Sci. Instrum. 2000. Vol. 71. P. 3728–3735.
  2. Sorokin A. et all. Characterization of 1 MW, 40 keV, 1 s neutral beam for plasma heating // Rev. Sci. Instrum. 2010. Vol. 81. 02B108.
  3. Shikhovtsev I. V. et all. Inductive RF drivers for neutral beam injectors at BINP // AIP Conference Proc. 2018. Vol. 2052. Article number: UNSP 040016.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук И. В. Шиховцев

## **О возможности создания магнитных конфигураций с отрицательной треугольностью на токамаке T-15МД**

М. С. Горбун

Курчатовский институт, Москва

Московский физико-технический институт

Большинство современных токамаков имеет D-образную форму сечения плазменного шнура с вытянутостью  $\varepsilon = 1,5-2,5$  и положительной треугольностью  $\delta = 0,15-0,4$ . В то же время было показано, что магнитные конфигурации с отрицательной треугольностью позволяют получить лучшее удержание плазмы по сравнению с аналогичными конфигурациями с положительной треугольностью [1]. Причины этого улучшения являются одной из наиболее актуальных задач магнитного удержания плазмы.

В настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» готовится к запуску токамак T-15МД с базовой магнитной конфигурацией разряда, имеющей  $\varepsilon = 1,75$  и  $\delta = 0,317$  [2].

Цель работы — исследование принципиальной возможности получения равновесных магнитных конфигураций с отрицательной треугольностью, а также возможности их достижения без переделок существующей магнитной системы T-15МД. Расчеты с помощью кода TOKAMEQ [3] показали невозможность получения магнитных конфигураций с отрицательной треугольностью при номинальном токе плазмы 2 МА. Однако при пониженном токе плазмы 1 МА оказалось возможным получить конфигурацию с  $\delta = -0,2$ . Таким образом, на установке T-15МД открывается возможность проведения исследований удержания плазмы в режимах с отрицательной треугольностью.

---

1. Pochelon A. et al. Energy confinement and MHD activity in shaped TCV plasmas with localized electron cyclotron heating // Nucl. Fusion. 1999. Vol. 39. № Special Issu. P. 1807–1818.

2. Melnikov A. V. et al. Physical program and diagnostics of the T-15 upgrade tokamak (brief overview) // Fusion Eng. Des. 2015. Vol. 96–97. P. 306–310.

3. Сычугов Д. Ю. Код для расчета МГД-равновесия Tokameq (модуль библиотеки программ «Виртуальный токамак») // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2008. Вып. 4. С. 85–89.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук А. В. Мельников

**Диагностика радиального распределения плотности быстрых ионов  
на установке «газодинамическая ловушка»**

И. А. Горенков

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Газодинамическая ловушка (ГДЛ) — это линейная магнитная ловушка для удержания плазмы. Ионная компонента в ней может быть условно разделена на две части: теплые и быстрые ионы. Теплые ионы имеют функцию распределения, близкую к равновесной максвелловской с относительно небольшой температурой (~100 эВ). Быстрые ионы — это «надтепловой хвост» функции распределения, формируемый за счет захвата плазмой нагретых атомарных пучков. Детальное изучение удержания быстрых ионов представляет особый интерес с точки зрения проектов источника термоядерных нейтронов на основе ГДЛ, поскольку парные столкновения быстрых ионов будут давать основной вклад в нейтронный поток.

Целью данной работы являлось проектирование устройства для измерения потоков атомов перезарядки с энергиями 5–20 кэВ, покидающих плазму установки ГДЛ. Потоки атомов ионизируются, проходя «обдирочную» мишень, и разделяются по энергиям с помощью 45-градусного электростатического анализатора. Измерения проводятся для небольшого (шириной около 10 %) энергетического диапазона одновременно по 16 хордам, что позволяет получить профиль потоков частиц с заданной энергией вдоль всего диаметра плазмы. В результате диагностика была успешно запущена, были проведены измерения радиальных профилей быстрых ионов.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук В. В. Приходько

**Кинетические неустойчивости плазмы  
в длинной диамагнитной ловушке**

Д. Ю. Кардаш

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

В данной работе исследуются неустойчивости плазмы в режиме диамагнитного удержания. Основная идея диамагнитного удержания заключается в создании области, занятой плазмой с высоким значением отношения давления плазмы к давлению магнитного поля в вакууме. Такой режим удержания обеспечивает снижение продольных потерь по сравнению с потерями из открытой ловушки с низким давлением, большое давление плазмы и, как следствие, высокую мощность термоядерных реакций. Таким образом, диамагнитное удержание потенциально позволяет использовать относительно компактные линейные ловушки в качестве термоядерных реакторов [1]. Магнитное поле практически полностью вытеснено плазмой, что может приводить к несохранению магнитного момента и хаотическому движению частиц с их быстрыми потерями. Количество потенциально опасных типов колебаний очень велико, как и механизмов их возбуждений. Основным интерес представляют кинетические неустойчивости, развитие этих неустойчивостей приводит к возбуждению волн в плазме, источником энергии выступают отличия функции распределения частиц плазмы от максвелловской либо неоднородность плазмы. Предполагается, что такие волны могут приводить к хаотизации движения частиц и аномальным потерям.

Проведена оценка для энергии, передаваемой от поверхностной волны резонансным частицам и, наоборот, по механизму резонансного взаимодействия Ландау (на основе оценок из [2]). Также проведено численное решение уравнения, описывающего пространственную структуру для различных мод колебаний в приближении холодной плазмы. Все это позволяет проводить анализ устойчивости для плазмы с различными функциями распределения.

---

1. Beklemishev A.D. Improved plasma confinement at high beta // Phys. Plasmas. 2016.

2. Арцимович Л. А., Сагдеев Р. З. Физика плазмы для физиков. М.: Атомиздат, 1979. 320 с.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук И. С. Черноштанов

## **Создание предварительной плазмы при помощи электронного пучка на установке «газодинамическая ловушка»**

К. С. Колесниченко

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Для нагрева плазмы в системах с магнитным удержанием часто используется инжекция пучков нейтральных атомов, которые в последующем ионизируются и захватываются магнитным полем. Для эффективного захвата пучков на начальной стадии атомарной инжекции создается предварительная плазма. В магнитных ловушках открытого типа существует несколько способов ее создания. Одним из наиболее популярных является инжекция плазменной струи вдоль магнитного поля из области вне ловушки. Другим эффективным способом является ионизация при помощи мощного микроволнового излучения. Однако для их реализации необходимо решить ряд технических и довольно сложных задач. В данной работе рассматривается альтернативный метод создания предварительной плазмы при помощи электронного пучка.

Для реализации поставленной задачи на установке «газодинамическая ловушка» был создан специальный генератор электронного пучка. Пучок с энергией электронов в диапазоне 22–27 кэВ и током в 5–10 А инжектировался вдоль магнитного поля в ловушку, куда предварительно был напущен дейтерий с плотностью  $\approx 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Для определения параметров полученной в результате ионизации газа предварительной плазмы был сконструирован тройной ленгмюровский зонд. Временные зависимости и пространственные распределения плотности и электронной температуры предварительной плазмы, полученные с помощью этого зонда, были в дальнейшем использованы для оптимизации процесса захвата пучков нейтральных атомов. Также был проведен ряд экспериментов по проверке модели, описывающей процесс создания плазмы.

В результате серии экспериментов было выяснено, что метод создания предварительной плазмы с помощью электронного пучка является эффективным и менее трудоемким по сравнению с другими методами.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук П. А. Багрянский



**Исследование структуры возмущений электрического потенциала плазмы токамака Т-10, вызванных геодезической акустической модой**

О. Д. Крохалев  
Курчатовский институт, Москва  
Московский физико-технический институт

Геодезическая акустическая мода (ГАМ) — высокочастотная ветвь зональных потоков, представляющих собой мезомасштабные структуры радиального электрического поля. Считается, что зональные потоки являются механизмом саморегуляции широкополосной турбулентности, поэтому они могут оказывать значительное влияние на транспортные процессы в плазме [1]. Таким образом, изучение ГАМ может быть ключом к пониманию и контролю транспортных процессов. На текущий момент для ГАМ на Т-10 установлено наличие высокочастотного (ВЧ) и низкочастотного (НЧ) спутников основного пика ГАМ, для них определены температурные зависимости частоты [2].

В данной работе частотная структура возмущений потенциала, вызванных ГАМ, рассмотрена более подробно. Установлено, что  $f_{ГАМ} - f_{НЧ-сам} \approx f_{ВЧ-сам} - f_{ГАМ}$  где  $f_{ГАМ}$ ,  $f_{НЧ-сам}$ ,  $f_{ВЧ-сам}$  — частоты основного пика ГАМ и ее НЧ- и ВЧ-спутников. Разность частот имеет характерную величину  $\Delta = 4$  кГц, типичное значение  $f_{ГАМ} = 20$  кГц. Кроме того, ни в одном из 14 импульсов токамака, в которых была обнаружена трехпиковая структура ГАМ на колебаниях электрического потенциала, не было обнаружено таковой на колебаниях электронной плотности или магнитного поля. Это позволяет предположить, что трехпиковая структура характерна исключительно для электрической компоненты ГАМ.

---

1. Fujisawa A. et al. Experimental progress on zonal flow physics in toroidal plasmas // Nucl. Fusion. 2007. Vol. 47. № 10.

2. Крохалев О.Д., Мельников А.В. Исследование частотной структуры геодезической акустической моды в плазме токамака Т-10 // Тр. 63-й Всерос. науч. конф. МФТИ. 2020. С. 215–217.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук А. В. Мельников

## Нелинейная динамика вейбелевской неустойчивости в одномодовом и многомодовом режимах

А. А. Кузнецов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского

В ряде экспериментов с лазерной плазмой, а также при наблюдениях солнечного ветра космическими аппаратами обнаруживаются сложные анизотропные распределения частиц в плазме. Они характерны для астрофизической плазмы в бесстолкновительных ударных волнах источников гамма-всплесков, плазмы активных областей короны Солнца и других звезд. Исследование неустойчивостей анизотропных распределений и их эволюции важно для понимания процессов формирования согласованных с ними квазимагнитостатических полей в плазме. В частности, такие поля возникают в анизотропной плазме в результате развития вейбелевской неустойчивости.

Целью работы является анализ свойств квазимагнитостатической турбулентности на нелинейной стадии вейбелевской неустойчивости в бесстолкновительной плазме. Для этого получены уравнения сначала для одной вейбелевской моды, а затем для счетного числа мод, волновой вектор которых направлен поперек оси анизотропии начальной функции распределения  $f_0(\mathbf{v})$ , взятой для определенности бимаксвелловской. По определению, вдоль оси анизотропии среднеквадратичная (тепловая) скорость электронов является максимальной. Описание эволюции мод производится в квазилинейном приближении на основе стандартной процедуры линеаризации уравнения Власова для функции распределения электронов  $f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) = f_0(\mathbf{v}) + \delta f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)$  (ионы остаются неподвижными) и учета совместного медленного изменения усредненной по пространству функции распределения электронов. В итоге дополнительно к уравнениям Максвелла получается система связанных дифференциальных уравнений на различные моды функции распределения. Полученная полная система уравнений решается специально разработанным численным методом.

На основе полученных таким образом численных решений изучены особенности нелинейной эволюции вейбелевских мод, установлены свойства и эволюция их спектра мощности, найдена зависимость уровня насыщения суммарного турбулентного магнитного поля от показателя анизотропии исходной функции распределения электронов. Проведены также аналитические оценки уровня насыщения магнитного поля, которые оказались в согласии с результатами численного моделирования.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук М. А. Гарасев

## Азимутальная структура магнитных возмущений в винтовой магнитной ловушке СМОЛА

К. А. Ломов

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Одним из способов подавления продольных потерь из открытой магнитной ловушки является предложенная в ИЯФ СО РАН концепция динамического многопробочного удержания плазмы винтовыми пробками с управляемым вращением плазмы [1]. Для экспериментальной проверки этой концепции была создана установка СМОЛА, состоящая из входного расширителя с источником плазмы, транспортной секции с прямым и винтовым соленидами и выходного расширителя с радиально сегментированным плазмоприемником [2]. В ходе экспериментов на СМОЛА были подтверждены основные предположения концепции: подавление аксиального потока плазмы и пинч-эффект в плазменном шнуре [3, 4]. Продолжаются исследования эффективности подавления потока плазмы в зависимости от величины магнитного поля, его гофрировки, скорости вращения плазмы и других параметров.

В данной работе представлены результаты, полученные с помощью многоканальной азимутальной магнитной измерительной системы, которая состоит из 12 магнитных зондов, распределенных по азимутальной координате в центральной секции установки. По регистрируемому измерительной системой сигналу восстанавливается азимутальная структура возмущения продольного тока в плазменном шнуре до 5 моды включительно. Обнаружено вращение 1 моды возмущений со скоростью  $(0,5-1) \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ , соответствующей скорости вращения плазмы, а также иные возмущения азимутального магнитного поля в диапазоне 10–600 кГц.

В докладе представлены математические методы интерпретации сигнала магнитной измерительной системы и характерные зависимости возмущений азимутального магнитного поля от различных параметров установки.

---

1. Beklemishev A. D. Helicoidal system for axial plasma pumping in linear traps // Fusion Sci. Technol. 2013. Vol. 63 (1T). P. 355–357.

2. Sudnikov A. V. et al. SMOLA device for helical mirror concept exploration // Fusion Eng. Des. 2017. Vol. 122. P. 86–93.

3. Sudnikov A. V. et al. First Experimental Campaign on SMOLA Helical Mirror // Plasma Fusion Res. 2019. Vol. 14. 2402023.

4. Sudnikov A. V. et al. Preliminary Experimental Scaling of the Helical Mirror Confinement Effectiveness // 46<sup>th</sup> EPS Conf. Plasma Physics, EPS. 2019.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. В. Судников

## **Исследование влияния формы поглотителя плазмы на удержание частиц и энергии в открытой ловушке**

А. К. Мейстер

Новосибирский государственный университет  
Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск

В лаборатории 9-1 Института ядерной физики СО РАН ведутся работы по исследованию удержания плазмы в открытой магнитной газодинамической ловушке (ГДЛ). Ловушка типа ГДЛ представляет интерес ввиду возможности создания на ее основе мощного источника нейтронного излучения или термоядерного реактора более простой, по сравнению с токамаком, конструкции [1].

Одной из важнейших задач физики открытых ловушек является уменьшение продольных потерь частиц и энергии из ловушки. На продольные потери может влиять форма плазмодриемника в расширителе установки. В случае когда потоки частиц, движущиеся вдоль силовых линий магнитного поля, падают на поверхность поглотителя плазмы под малыми углами, холодные вторичные электроны эмитируются в направлениях, параллельных силовым линиям. Таким образом, вторичные электроны не проникают в центр установки и не охлаждают удерживаемую плазму [2].

Для проверки этой теории на установке ГДЛ была проведена серия экспериментов с концентрическими конусными жалюзи, установленными на подвижном основании в расширителе установки. В работе представлены результаты данной серии экспериментов.

---

1. Иванов А. А., Приходько В. В. Газодинамическая ловушка: результаты исследований и перспективы // Успехи физических наук. 2017. Т. 187. № 5. С. 547–574.

2. Ryutov D. D. Axial electron heat loss from mirror devices revisited // Fusion Sci. Technol. 2005. Vol. 47. No. 1T. P. 148–154.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Е. И. Солдаткина

## **Разработка модуля генерации и движения частиц пучка для двухмерной версии программы LCODE на языке Python**

Н. В. Охотников

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Новые открытия в области физики высоких энергий требуют ускорителей все больших размеров. В связи с этим в последнее время особый интерес вызывает кильватерное ускорение — метод ускорения пучка заряженных частиц в волне, возбужденной в плазме пучком частиц или лазерным импульсом. Данный способ позволяет получить поля порядка гигавольт на метр.

Процессы, происходящие в кильватерной волне, нелинейны, а характерные времена задачи составляют доли пикосекунд, поэтому неотъемлемой частью успешного эксперимента является его предварительное моделирование.

Для моделирования кильватерного ускорения в ИЯФ СО РАН был разработан программный комплекс LCODE [1], позволяющий получить распределение заряда, полей и кильватерного потенциала посредством решения уравнений Максвелла методом частиц в ячейках.

Старая версия кода, разработанная на языке программирования C, устарела и затрудняет дальнейшую разработку и поддержку программы, поэтому было принято решение переписать ее на языке Python. Использование абстрактных конструкций языка, а также методов ООП позволило повысить гибкость и читаемость кода, при этом не сильно проиграв в скорости вычислений благодаря JIT-компиляции средствами Numba.

Данная работа посвящена разработке Python версии LCODE. Разработан модуль, отвечающий за генерацию и движение частиц пучка, и модуль диагностик для получения промежуточной информации о состоянии системы. Корректность работы проверена на тестовых задачах, решение которых уже известно.

---

1. Sosedkin A. P., Lotov K. V. LCODE: a parallel quasistatic code for computationally heavy problems of plasma wakefield acceleration // Nuclear Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2016. Vol. 829. P. 350–352.

Научный руководитель — А. А. Горн

## **Особенности пирометрии поверхности металлов при ее нагреве излучением миллисекундного лазера**

Г. А. Рыжков

Новосибирский государственный университет

Одна из основных проблем при создании термоядерного реактора — выбор материалов стенки, обращенной к плазме. Наиболее интенсивно плазма воздействует на стенку в диверторе. Для проекта ITER вольфрам был выбран в качестве материала для покрытия стенки дивертора. В процессе работы термоядерного реактора вольфрамовое покрытие наиболее интенсивно повреждается вследствие импульсных тепловых нагрузок (термоударов), которые возникают из-за неустойчивости на краю удерживаемой в реакторе плазмы. Скорость и физика процесса эрозии зависят от температуры, до которой нагревается покрытие под воздействием плазмы. При экспериментальном моделировании воздействия термоударов на стенку в диверторе токамака-реактора важно знать точное значение температуры поверхности вольфрама. На установке БЕТА в ИЯФ СО РАН термоудары экспериментально моделируются с помощью мощного электронного пучка миллисекундной длительности или такого же по длительности импульса лазерного излучения. Электронный пучок имеет большую мощность и позволяет нагревать и расплавлять большую площадь поверхности образца. Лазерное излучение дает возможность проводить эксперименты по плавлению поверхности образцов в сильном магнитном поле независимо от его направления, а также работать с керамическими и другими неметаллическими образцами.

В данных экспериментах единственным возможным методом определения температуры поверхности является радиационная пирометрия — измерение температуры по тепловому излучению, так как данный метод не требует контакта с поверхностью и позволяет измерять достаточно высокие температуры (порядка температуры плавления вольфрама). В экспериментах для пирометрии используются обычные, основанные на кремнии, быстрые камеры и фотоприемники, а также InGaAs-камеры и фотодиоды InGaAs с разными спектральными чувствительностями. В работе рассматриваются особенности работы пирометров в экспериментах на БЕТА и была проведена их калибровка, которая экстраполируется на высокие температуры (до 4500 К). Для камер и фотодиодов оценена точность определения температуры поверхности до 4500 К с учетом шероховатости поверхности, разброса литературных данных излучательной способности и разброса экстраполяции калибровки.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, доц. Л. Н. Вячеславов

## **Измерение потенциала плазмы в газодинамической ловушке методом доплеровской спектроскопии**

А. В. Сандомирский  
Новосибирский государственный университет

Измерение электростатического потенциала плазмы в линейных магнитных ловушках важно для изучения процессов продольного переноса частиц и энергии. Именно уменьшение продольных потерь является критическим условием осуществления УТС в открытой ловушке. В данной работе был использован спектроскопический метод, который имеет ряд преимуществ по сравнению с альтернативными.

Эксперименты проводились в газодинамической ловушке (ГДЛ), которая представляет собой линейную систему для удержания плазмы с аксиально-симметричной конфигурацией магнитного поля. При создании и нагреве плазмы в ГДЛ формируется положительный электростатический потенциал, называемый амбиполярным, спадающий вдоль каждой силовой линии от максимума в центре до нуля на стенке. Такой потенциал определяется квазинейтральностью плазмы в каждой точке, а также равенством продольных токов электронов и ионов на торцевую стенку. Потенциал формирует барьер для покидающих ловушку электронов, а также ускоряет ионы, вытекающие в потоке плазмы через магнитную пробку.

В основе метода диагностики использовался эффект Доплера, основанный на изменении регистрируемой длины волны вследствие движения источника излучения относительно детектора. Чтобы конвертировать ускоренные ионы плазмы в возбужденные атомы с последующим излучением света, использовалась водородная газовая мишень. Излучение при перезарядке на мишени собиралось оптической системой, поступало в спектрометр схемы Черни — Тёрнера с дифракционной решеткой и регистрировалось быстродействующей ПЗС-камерой. Перед измерениями в плазме ГДЛ была произведена калибровка спектральной дисперсии и аппаратной функции прибора при помощи лабораторных газоразрядных ламп H и Ne.

Были проведены измерения потенциала и ионной температуры различных компонент плазмы: основной (водородной и дейтериевой) и примеси гелия. В работе представлены спектры излучения линий H- $\alpha$  (656,28 нм) и He-I (667,8 нм). Впервые были проведены измерения пространственного профиля амбиполярного потенциала в ГДЛ.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. А. Лизунов

## Исследование длинноволновых корреляций электрического потенциала плазмы в стеллараторе TJ-II

Г. А. Саранча  
Курчатовский институт, Москва  
Московский физико-технический институт

Зональные течения считаются возможным механизмом саморегуляции турбулентности в горячей плазме тороидальных ловушек.

На стеллараторе TJ-II (Мадрид, Испания) с помощью двойной диагностики зондирования плазмы пучком тяжелых ионов (ЗПТИ, англ. NIBP) проводятся измерения электрического потенциала плазмы и его колебаний в двух полоидальных сечениях, расположенных друг относительно друга на  $90^\circ$  тороидального угла [1].

С помощью диагностики NIBP на установке TJ-II проводятся исследования причин появления дальних корреляций (англ. *Long-range correlations*, LRC) потенциала плазмы. На первом этапе исследований осуществлена систематизация характеристик LRC в зависимости от режима разряда [2].

Установлено, что на низких частотах ( $f < 20$  кГц) существуют длинноволновые колебания электрического потенциала плазмы, одновременно регистрируемые на расстоянии порядка 2,5 м с высокой ( $> 0,6$ ) когерентностью. Показано, что сдвиг фазы колебаний потенциала имеет значение, близкое к нулю, что согласуется с более ранними наблюдениями [2, 3]. Также установлено, что в ряде режимов сдвиг фазы несколько отличен от нуля, что позволяет предположить тороидальное распространение возмущений потенциала. Выявлено, что функция распределения коэффициента когерентности по частоте колебаний немонотонна и имеет локальный максимум вблизи нулевого значения.

---

1. Melnikov A. V. et al. Heavy ion beam probing — diagnostics to study potential and turbulence in toroidal plasmas // Nucl. Fusion. 2017. Vol. 57. 072004.

2. Melnikov A. V. et al. ECRH effect on the electric potential and turbulence in the TJ-II stellarator and T-10 tokamak plasmas // Plasma Phys. Control. Fusion. 2018. Vol. 60.

3. Xu Y. et al. Long-distance correlation and zonal flow structures induced by mean  $E \times B$  shear flows in the biasing H-mode at TEXTOR // Phys. Plasmas. 2009. Vol. 16. 110704.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Н. К. Харчев



**Выделение независимых компонент в экспериментальных данных винтовой магнитной ловушки СМОЛА корреляционными методами**

М. С. Толкачев

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Продольные потери частиц и энергии являются одной из основных проблем магнитных ловушек с незамкнутой конфигурацией поля. Для устранения данной проблемы был предложен метод винтового удержания плазмы [1]. Указанный метод предполагает создание магнитных пробок, движущихся в системе отсчета плазмы навстречу направлению потока. Для проверки метода в ИЯФ СО РАН была сооружена установка СМОЛА [2]. При изменении спиральности линий магнитного поля либо направления вращения возможен обратный эффект ускорения плазмы.

Оптимальная длина свободного пробега для эффективной работы многопробочного удержания должна быть равна расстоянию между пробками. В горячей плазме ионы имеют большую длину свободного пробега при учете только кулоновских столкновений. Однако существуют механизмы возникновения аномальной столкновительности при развитии неустойчивостей, в связи с чем возникает потребность определения зависимости параметров неустойчивостей от параметров плазмы. Априорная информация о характеристиках МГД-возмущений (в том числе о спектральном и модовом составе), возникающих в плазме при винтовом удержании, отсутствует. В связи с этим требуется определение физически независимых источников сигнала, которые можно получить, используя различные методы обработки данных для выделения схожих закономерностей изменения сигналов, таких как корреляционный анализ, метод независимых компонент и т. д., в основе которых лежит разделение сигнала на аддитивные статистически независимые подкомпоненты. Используя их, можно оценить частоты и скорости распространения возмущений, найти зависимости параметров возмущений от параметров плазмы и режима работы установки. В докладе будут представлены результаты обработки зондовых измерений, полученные с использованием вышеуказанных методов.

---

1. Beklemishev A. D. Helicoidal system for axial plasma pumping in linear traps // Fusion Sci. Technol. 2013. Vol. 63(1T). P. 355–357.

2. Sudnikov A. V. et al. SMOLA device for helical mirror concept exploration // Fusion Eng. Des. 2017. Vol. 122. P. 86–93.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. В. Судников

**Изучение формирования и транспортировки слаботоочного стационарного пучка для калибровки систем диагностики плазмы**

Е. А. Шишкин

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Для калибровки датчиков, используемых в плазменных экспериментах, Институтом ядерной физики был создан источник, генерирующий стационарный пучок ионов водорода. Параметры источника: ток пучка до 50 мкА, напряжение ускоряющей системы 1–60 кВ, диаметр вытягивающей апертуры 1 см.

В работе приведены результаты численного моделирования процессов в камере и пучке калибровочного источника ионов водорода. Представлены результаты оценок и численного моделирования формирования плазмы в камере источника, а также оценка профиля давления остаточного газа в пучковом тракте. Численное моделирование проводилось методом Монте-Карло с использованием программы Molflow для расчета газовых условий, а также численного кода, созданного автором.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. В. Колмогоров

**Исследование высокочастотных возмущений плазмы  
на установке ГДЛ**

Е. А. Шмигельский

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Возбуждение высокочастотных кинетических неустойчивостей в анизотропной плазме может приводить к потере быстрых ионов и уменьшению времени ее удержания. В условиях разряда на установке ГДЛ (ИЯФ СО РАН) возможно развитие дрейфово-конусной, двугорбой и альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивостей [1, 2]. Работа посвящена экспериментальному исследованию модового состава этих неустойчивостей по возмущениям магнитного поля плазмы.

Для регистрации возмущений используется сборка высокочастотных магнитных зондов. При подготовке эксперимента был разработан передающий тракт, позволяющий переключать некоторые из зондов на регистрацию радиальной и осевой компонент возмущений поля вместо азимутальной. Сигналы с зондов записываются быстродействующим АЦП, что позволяет исследовать возмущения с частотами до 100 МГц. В [1] такие возмущения исследовались только по частотному спектру. Используемая диагностика позволяет определить модовую структуру и частотный спектр возмущений, что дает возможность идентифицировать тип возникающей в плазме неустойчивости.

В рамках данной работы были проведены серии разрядов при разных условиях, отличающихся плотностью плазмы, полной энергией компоненты быстрых ионов и магнитным полем. В докладе представлены результаты измерений и анализа модовой структуры высокочастотных возмущений плазмы.

---

1. Шмигельский Е. А. Исследование удержания быстрых ионов в укороченной магнитной конфигурации на установке ГДЛ / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2020.

2. Zaytsev K. V. et al. Kinetic instability observations in the Gas Dynamic Trap // Phys. Scr. 2014. T161: 014004.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Д. В. Яковлев



# **ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА**

Научный руководитель секции —  
акад. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф. А. В. Латышев

Председатель секции — канд. физ.-мат. наук Г. Э. Шайблер

Ответственный секретарь секции — Д. А. Худайбердиев

Экспертный совет секции  
д-р физ.-мат. наук В. Л. Альперович  
д-р физ.-мат. наук З. Д. Квон  
канд. физ.-мат. наук Л. С. Брагинский  
канд. физ.-мат. наук Д. Р. Исламов  
канд. физ.-мат. наук Д. М. Казанцев  
канд. физ.-мат. наук Г. Э. Шайблер

# **SOLID STATE PHYSICS**

Section scientific supervisor —  
Acad., Dr. Phys.-Math. Sci., Prof. A. V. Latyshev

Section head — Cand. Phys.-Math. Sci. H. E. Shaibler

Responsible secretary — D. A. Khudaiberdiev

Section scientific committee  
Dr. Phys.-Math. Sci. V. L. Alperovich  
Dr. Phys.-Math. Sci. Z. D. Kvon  
Cand. Phys.-Math. Sci. L. S. Braginsky  
Cand. Phys.-Math. Sci. D. R. Islamov  
Cand. Phys.-Math. Sci. D. M. Kazantsev  
Cand. Phys.-Math. Sci. H. E. Shaibler



**Аномальные магнитные гистерезисные свойства микрочастиц тетрафторида лития-диспрозия при низких температурах**

Г. Ю. Андреев

Казанский (Приволжский) федеральный университет

Кристаллы ряда  $\text{LiReF}_4$  (Re — редкоземельный ион) представляют значительный интерес для физики магнетизма. Концентрированный монокристалл  $\text{LiDyF}_4$  является дипольным XY-антиферромагнетиком;  $T_N = 0,610(15)$  К. Кристаллическая симметрия группы  $I4_1/a$ , элементарная ячейка содержит два магнитоэквивалентных иона  $\text{Dy}^{3+}$  в узлах с симметрией  $S_4$  [1]. Микроразмерный порошок  $\text{LiDyF}_4$  получен спеканием порошков  $\text{LiF}$  и  $\text{DyF}_3$  при температуре  $600^\circ\text{C}$  в течение 18 ч в атмосфере аргона. Проведены измерения полевых зависимостей намагниченности в диапазоне температур 2–300 К. В районе 2–7 К у образца обнаружен магнитный гистерезис особой формы, так называемый гистерезис-бабочка: две петли, смыкающиеся в начале координат. Получена температурная зависимость площадей петель гистерезиса: эта площадь растет с уменьшением температуры. В том же диапазоне температур (2–7 К) времяразрешенными измерениями намагниченности во внешнем поле напряженностью 12 кЭ исследована температурная зависимость времен продольной магнитной длительной релаксации; полученные значения этих времен релаксации составляют порядка секунд и десятков секунд.

*Работа выполнена при поддержке Правительства РТ и РФФИ (грант № 18-42-160012 р\_а).*

*Автор выражает благодарность сотрудникам КФУ: канд. физ.-мат. наук С. Л. Кораблевой, канд. физ.-мат. наук А. Г. Киямову, А. С. Семакину, М. А. Черосову.*

---

1. Aminov L. K., Malkin B. Z., Teplov M. A. Magnetic properties of nonmetallic lanthanide compounds // Handb. Phys. Chem. Rare Earths. 1996. Vol. 22. P. 295–506.

Научные руководители — канд. физ.-мат. наук, доц. И. В. Романова,  
д-р физ.-мат. наук, проф. М. С. Тагиров

## Исследование энергетического распределения фотоэмитированных электронов из мультищелочного фотокатода

Д. М. Ахмеров<sup>1</sup>, В. С. Русецкий<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный технический университет

<sup>2</sup> Институт физики полупроводников

им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск

Фотокатоды (ФК) на основе антимонидов щелочных металлов широко используются в электронно-оптических преобразователях и в качестве источников электронов в ускорителях. В последние десятилетия активно изучались ФК на основе соединений  $A_3B_5$ , по основным параметрам они все еще лучше ФК на основе антимонидов щелочных металлов. Однако ФК  $A_3B_5$  более требовательны к остаточной атмосфере вакуумных камер и их изготовление сложнее по сравнению с мультищелочными ФК. Несмотря на длительную историю развития мультищелочных соединений на основе Na-K-Sb-Cs в качестве источников электронов, вопрос энергетического распределения фотоэмитированных электронов (ЭРФЭ) остается открытым. Целью данной работы является изучение ЭРФЭ и построение зонной структуры границы раздела  $Na_2KSb/Cs_3Sb$ -вакуум.

В данной работе для исследования фотоэмиссионных свойств использовались плоскопараллельные вакуумные фотодиоды с фотокатодами из соединения  $Na_2KSb$  и  $Na_2KSb/Cs_3Sb$  и полупрозрачными проводящими анодами. Получена спектральная зависимость фотолюминесценции (СЗФ) ФК, из которой была определена ширина запрещенной зоны, равная 1,43 эВ, что не согласуется с результатами ряда предыдущих работ. Из измерений квантового выхода видно, что порог фотоэмиссии  $Na_2KSb/Cs_3Sb$  начинается с энергии 1,43 эВ, которая совпадает с максимумом СЗФ и соответствует ширине запрещенной зоны  $Na_2KSb$ . Это говорит о том, что электронное сродство (ЭС) в данной структуре равно нулю или отрицательно. Порог фотоэмиссии  $Na_2KSb$  начинается с 1,93 эВ, что показывает наличие поверхностного потенциального барьера, а именно положительного ЭС. Из ЭРФЭ для  $Na_2KSb/Cs_3Sb$  видно, что разница между двумя пиками, соответствующими энергии вакуума и дну зоны проводимости, составляет 0,2 эВ. Это указывает на наличие отрицательного ЭС. Из полученных оптических и фотоэмиссионных характеристик построена зонная структура границы раздела  $Na_2KSb/Cs_3Sb$ -вакуум.

Научные руководители —

д-р физ.-мат. наук, проф. О. Е. Терещенко, А. В. Миронов



## Изучение магнитотранспортных свойств тонких пленок $\text{Bi}_2\text{Se}_3$

А. О. Баженов

Институт физики полупроводников  
им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Интерес к изучению гетероструктур, основанных на материалах с комплиментарными электронными и топологическими характеристиками, связан с возможностью получения новых электронных и спин-зависимых свойств, не присущих отдельно взятым материалам. Однако природа магнетотранспортных явлений в таких гетероструктурах остается неясной.

Работа посвящена исследованию магнитотранспортных свойств в структуре топологического изолятора (ТИ) / графен (ГР) на основании пленки  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  толщиной 50 нм, выращенной на графене методом осаждения из газовой фазы. Контакты для измерения транспортных свойств создавались напылением индия с последующей пайкой серебряных проволок с помощью индиевого припоя. Температурные зависимости проводимости и магнетосопротивления (МС) измерялись в гелиевом сосуде Дьюара при температуре 4 К. МС измерялось в магнитном поле до 4 Т.

Получена температурная зависимость проводимости, где при высоких температурах наблюдалось уменьшение сопротивления с понижением температуры, связанное с увеличением подвижности носителей заряда, и при низких температурах — металлический ход проводимости. При измерении проводимости в перпендикулярном магнитном поле обнаружен пик отрицательной магнетопроводимости в малых полях до 0,03 Т, что свидетельствует о наличии слабой антилокализации (САЛ), присущей поверхностным состояниям ТИ. Для получения количественных характеристик был проведен анализ МС с помощью двух функций Хиками, которые описывают вклады слабой локализации и слабой антилокализации в магнитное поле. В результате аппроксимаций была получена константа  $\alpha_{\text{САЛ}} \sim -1$ , которая свидетельствует о вкладе в САЛ 2 каналов, по всей видимости, связанных с верхней и нижней границами ТИ. Чтобы определить возможный вклад различных каналов проводимости в наблюдаемый эффект, было численно решено уравнение Пуассона, определяющее изгиб зон в структуре ГР/ $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ , учитывающий положительный заряд дырок в графене и отрицательный заряд электронов проводимости в пленке. Из зависимости изгиба зон от толщины пленки определены условия на количество границ, которые дают вклад в САЛ.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук Н. П. Степина

**Особенности бокового фотовольтаического эффекта в структуре  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{n-Si}$  в зависимости от ориентации кремниевой подложки**

С. В. Бондаренко

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

Известно, что при неоднородном освещении структуры металл — оксид-полупроводник вдоль межфазного слоя генерируется поперечное фотоЭДС, так называемый латеральный фотовольтаический эффект (ЛФЭ). В ряде работ показано, что параметры ЛФЭ для МОП-структур зависят от материала металлической пленки, ее толщины и уровня легирования кремниевой подложки. В продолжение этих исследований мы представляем результаты исследований влияния ориентации кремниевой подложки на ЛФЭ в структуре  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{n-Si}$ .

Образцы были изготовлены на монокристаллических подложках Si(001) и Si(111) n-типа, имеющих одинаковое удельное сопротивление 7,5 см. Пленки магнетита толщиной ~ 40 нм формировались реактивным осаждением железа в атмосфере кислорода на химически окисленные кремниевые подложки.

Форма ЛФЭ-отклика для структуры  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$  характеризуется пиком на переднем фронте ЛПВ-сигнала, тогда как для структуры  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}(111)$  форма ЛФЭ-отклика близка к прямоугольной. По временным характеристикам время нарастания в структуре  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$  равно 8,3 с, что в ~ 3 раза быстрее, чем в структуре  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}(111)$ , а время спада в структуре  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$  составляет 25 с.

Наблюдаемые особенности ЛФЭ в структуре  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{n-Si}$  в зависимости от ориентации кремниевой подложки были проанализированы с учетом различий в плотности поверхностных состояний на границе  $\text{SiO}_2/\text{n-Si}$ . Согласно проведенному анализу, предполагается, что более высокая чувствительность ЛФЭ и более быстрый фотоотклик в структуре  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$ , по сравнению со структурой  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}(111)$ , обусловлены меньшей плотностью поверхностных состояний на границе  $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$ , чем на границе  $\text{SiO}_2/\text{Si}(111)$ .

Научный руководитель — д-р техн. наук, проф. А. Т. Беккер

**Синтез карбида гафния с использованием электродугового разряда**

В. В. Бухарова

Томский политехнический университет

Карбид гафния (HfC) — известный ультратугоплавкий материал (температура плавления  $\sim 4173$  К), обладающий также высокой твердостью до  $\sim 26$  ГПа, высокой износостойкостью, химической и механической стабильностью. Благодаря своим свойствам карбид гафния применяется для создания изделий, работающих при высоких тепловых нагрузках, также в электронике. Синтез данного материала требует больших затрат энергии, так как основным методом его получения является нагревание исходного сырья в вакуумных печах в течение длительного интервала времени. Одним из альтернативных способов решения проблемы получения карбида гафния является синтез с использованием электродугового разряда. Основным преимуществом такого подхода является возможность достижения высоких температур за короткое время. Согласно известной диаграмме состояний, для синтеза карбида гафния требуются температуры порядка от  $\sim 2173$  до  $\sim 2573$  К.

Эксперименты по получению карбида гафния проводились на лабораторном электродуговом стенде в Томском политехническом университете. Для синтеза были использованы коммерческие порошки: порошок гафния со средним размером частиц до  $\sim 100$  мкм с чистотой не менее 99,0 %; порошок рентгеноаморфного углерода (сажи) с чистотой не хуже 99,5%, взятые в соотношении, близком к эквимолярному. Исходные материалы смешивались в шаровой мельнице. Синтез проходил в установке, состоящей из графитовых электродов, установленных вертикально, токоведущих линий, источника питания, системы крепления и перемещения анода. При протекании тока исходное сырье нагревалось, происходил синтез карбида гафния. Полученный материал был проанализирован с использованием метода рентгеновской дифрактометрии.

Рентгеноструктурный анализ порошка показал, что в продукте синтеза присутствуют три кристаллические фазы: графит, фаза исходного гафния, а также кубическая фаза карбида гафния. Таким образом, можно судить об успешной реализации карбида гафния электродуговым методом. В дальнейшем планируется изучение морфологии частиц продукта синтеза, а также проведение оптимизации параметров процесса синтеза.

Научный руководитель — канд. техн. наук А. Я. Пак

## **Моделирование роста двумерной пленки в режиме полной конденсации**

В. П. Винарский

Томский государственный университет

В данной работе исследуется рост двумерных и нульмерных наноструктур. Сам рост наноструктур обычно осуществляется методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), где происходит фазовый переход из газообразного состояния в твердое. Любой фазовый переход есть сложный многоэтапный процесс. В данной работе будет уделено внимание четырем основным процессам, приводящимся по порядку стадий роста: зарождению островков, независимому росту островков, слиянию островков и трехмерному росту пленки. В данном случае имеется интерес к определению времени и условий роста материалов в зависимости от требуемых параметров наноструктур. Моделированию этих зависимостей и посвящена данная работа.

Рассмотрено условие, определяющее режим конденсации атомов. В частности, в данной работе особое внимание уделено режиму полной конденсации, создаваемому в методе МЛЭ. В данном режиме подавляющее большинство атомов, осажженных на поверхность из газообразной фазы, встраивается в растущую твердотельную пленку, а количество атомов, десорбированных обратно в газообразную фазу, настолько мало, что ими можно пренебречь. Важнейшими параметрами контроля ростовых процессов являются зависимость пересыщения газообразной фазы от времени, максимальное пересыщение и время достижения максимума пересыщения, скорость нуклеации и продолжительность стадии нуклеации.

Выяснено, что в продолжение стадии нуклеации происходит зародышеобразование островков. Плотность островков в начале стадии нуклеации равна нулю, однако далее происходит резкое увеличение плотности островков, достигающее максимума в момент времени максимума пересыщения.

В результате рассмотрены различные стадии процесса роста двумерных пленок и наноструктур. Определены временные зависимости пересыщения, скорости нуклеации и плотности островков при подобных режимах эпитаксиального роста.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доц. К. А. Лозовой

## Дрейф вакансионных островков на поверхности Si(100) в условиях электромиграции

Ю. А. Воронцова

Институт физики полупроводников  
им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Процесс электромиграции на поверхности кристаллов изучается уже несколько десятилетий, однако до сих пор ни температурная зависимость эффективного заряда, ни его абсолютная величина не известны с хорошей точностью даже для поверхности Si(100). В [1] эффективный заряд был определен в пределах от 7 до 25 элементарных зарядов, отмечено, что эта определяемая величина сильно зависит от коэффициента диффузии. Также такой большой разброс в оценке эффективного заряда может быть связан с его зависимостью от температуры. Поэтому актуальной целью данной работы является определение температурной зависимости эффективного электрического заряда адсорбированного атома на поверхности Si(100).

В данной работе с применением *in situ* метода сверхвысоковакуумной отражательной электронной микроскопии проведены исследования дрейфа вакансионного двумерного островка на широкой террасе поверхности Si(100) в условиях электромиграции. На поверхности образцов были созданы квазиравновесные условия путем компенсации сублимирующего потока с поверхности из внешнего источника кремния. В результате была получена зависимость скорости островков для различных температур и разного направления электрического тока к рядам доменов сверхструктуры ( $2 \times 1$ ) внутри островка. Было выявлено, что скорость островка не зависит от его размера и положения на террасе.

В рамках теории Бартона, Кабреры и Франка разработана теоретическая модель дрейфа вакансионных островков в условиях электромиграции при компенсации сублимации. Данная модель подтвердила, что величина эффективного заряда, определяемая в данном эксперименте, сильно зависит от коэффициента диффузии, и варьирование последнего в пределах погрешности приводит к значительному изменению величины заряда. Поэтому для получения более точной оценки эффективного заряда проведена серия экспериментов с различной шириной образца с целью исключения влияния коэффициента диффузии.

---

1. Curiotto S. et al. 2D nanostructure motion on anisotropic surfaces controlled by electromigration // Appl. Surf. Sci. 2019. Vol. 469. P. 463–470.

## Влияние состава слоев металлизации и отжига в формовочном газе на параметры барьеров Шоттки на основе InAlAs

И. Ю. Гензе

Новосибирский государственный университет

Соединение  $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$  является функциональным материалом при создании фотодетекторов микроволнового диапазона и транзисторов с барьерами Шоттки (БШ). Свойства БШ во многом определяют рабочие характеристики данных приборов, а также их стабильность и надежность. В настоящее время наибольшее распространение получили Ti/InAlAs БШ.

Традиционным способом улучшения параметров БШ, таких как коэффициент идеальности ( $n$ ) и высота барьера ( $\phi_b$ ), является отжиг. Анализ влияния отжига на параметры Ti/InAlAs БШ проводился лишь в двух работах [1], в которых были получены противоречивые результаты, что не позволяет сделать однозначных выводов о влиянии температуры отжига на параметры Ti/InAlAs БШ.

В данной работе было изучено влияние времени отжига в формовочном газе при температурах 300–450 °С на параметры ( $\phi_b$ ,  $n$ ) БШ на основе InAlAs с различными слоями металлизации: Au (200 нм)/Ti (20 нм), Au (200 нм)/Ti (80 нм) и Au (200 нм)/Pt(80)/Ti (80 нм). Подробное описание этапов формирования БШ представлено в работе [2].

Показано, что увеличение толщины слоя Ti и/или формирование дополнительного барьерного слоя Pt, замедляющих диффузию Au к границе раздела Ti/InAlAs, существенным образом увеличивают температуру и время отжига, приводящие к деградации БШ, что также говорит об улучшении его долгосрочной стабильности.

Установлено, что отжиг по времени до 5 мин для БШ с изначально «низкой»  $\phi_b = 0,58$  эВ позволяет увеличить ее на  $0,1 \pm 0,01$  эВ при неизменном  $n$ , однако при этом не оказывает существенного влияния на параметры БШ с изначально «высокими» значениями  $\phi_b = 0,67$ – $0,69$  эВ. Более длительный отжиг позволяет увеличить высоту барьера до  $0,73$  эВ при сохраняющемся коэффициенте идеальности, равном  $1,09$ , что в целом коррелирует с результатами работы [1].

---

1. Wang L. et al. Schottky barrier characteristics and interfacial reactions of Ti on n- $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$  // Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 91. P. 022110.

2. Chistokhin I. B. et al. Barrier characteristics and interface properties of Au/Ti/n-InAlAs Schottky contacts // Mater. Sci. Semicond. Process. 2018. Vol. 74. P. 193–198.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук М. С. Аксенов

## Электродуговой синтез карбида титана в атмосферной плазме из древесных опилок

А. А. Гумовская, А. И. Кокорина  
Томский политехнический университет

Карбид титана широко известен своей высокой температурой плавления (более 3000 °С), а также высокой твердостью, термической стабильностью, хорошей износостойкостью и относительно низкой плотностью [1]. Для получения карбида титана необходим материал, содержащий металл, в данном случае титан, а также материал, содержащий углерод, в данном случае был использован древесный уголь. Древесный уголь в данной работе был получен с помощью процесса пиролиза сосновых опилок. Древесный уголь, в свою очередь, сочетает в себе высокую прочность, жесткость и вязкость при низкой плотности благодаря его уникальной природной микроструктуре. Карбиды, полученные с помощью пиролизированной древесины, называются биоморфными [2]. Они могут быть использованы для создания перспективных высокотемпературных фильтров. В представленной работе описываются результаты экспериментальных исследований, посвященных безвакуумному электродуговому методу синтеза карбида титана (TiC) с использованием древесного угля сосновых опилок.

Эксперименты выполнялись на лабораторном стенде, основными частями которого являются графитовые катод и анод. В катод засыпается смесь порошков диоксида титана и углерода, которые предварительно были перемолоты и смешаны. Синтез карбида титана в рассматриваемой системе возможен благодаря образованию газообразного облака из монооксида (CO) и диоксида углерода (CO<sub>2</sub>), которое экранирует объем реакции от внешней среды, предотвращая окисление продуктов. Было проведено несколько серий экспериментов, в которых изменялись различные параметры системы, в том числе соотношение исходных масс углерода и диоксида титана.

---

1. Pierson H. O. Handbook of refractory carbides and nitrides. Westwood; New Jersey: Noyes Publications, 1996.

2. Zollfrank C. Microstructure and phase morphology of wood derived biomorphous SiSiC-ceramics // J. Eur. Ceram. Soc. 2004. Vol. 24(2). P. 495–506.

Научный руководитель — канд. техн. наук А. Я. Пак

## **Квантовый эффект Холла в двумерном полуметалле с сильным примесным рассеянием**

М. А. Дрофа

Институт физики полупроводников  
им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

В последнее время большой интерес вызывает исследование двумерного полуметалла (ДП). Данный класс двумерных электронных систем характеризуется перекрытием зоны проводимости и валентной зоны и, соответственно, одновременным существованием двумерных электронов и дырок. Бесщелевой полупроводник HgTe отличается тем, что энергетический спектр квантовых ям (КЯ) на его основе обладает уникальным разнообразием. В частности, при толщинах 14–21 нм HgTe КЯ являются ДП. Эффект Холла в таких системах носит своеобразный характер, потому что холловская ЭДС для электронов и дырок имеет разный знак. По этой причине ряд особенностей в ДП имеет и квантовый эффект Холла. К ним относятся нулевое плато в холловской компоненте проводимости и гигантская нелокальность, вызванная рассеянием между краевыми состояниями электронов и дырок.

В данной работе исследуется образец двумерного полуметалла HgTe с ориентацией (013), с толщиной квантовой ямы 14 нм. Его особенностью является сильное примесное рассеяние при практически одинаковой величине перекрытия зон с ранее изученными ДП в ямах толщиной 20–21 нм. В результате в исследованной системе в окрестности точки зарядовой нейтральности обнаружено плато квантования холловского сопротивления, соответствующее заполнению электронами основного уровня Ландау. Предположено, что подобный эффект возникает вследствие влияния сильного флуктуационного потенциала примесей, а также более чем на порядок меньшей эффективной массы у электронов, чем у дырок. Указанные факторы приводят к тому, что квантование Ландау, а с ним и квантовый эффект Холла демонстрируют только двумерные электроны, а спектр дырок практически не квантуется, и дырочная зона играет роль локализованных состояний, расположенных между уровнями Ландау.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук З. Д. Квон



**Изучение отклика сверхизолятора на высокочастотные импульсы**

Д. Е. Дураков

Институт физики полупроводников  
им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

В связи с бурным развитием квантовых систем обработки информации (квантовые компьютеры) появился серьезный интерес к детекторам, обладающим высоким быстродействием. Данным требованиям соответствуют сверхпроводниковые детекторы. Но возможно ли создание быстродействующих детекторов на основе сверхизолирующего состояния, которое дуально противоположному сверхпроводящему состоянию и у которого при подаче напряжения выше порогового будут образовываться области, где будет разрушаться сверхизолирующее состояние и образовываться импульс тока? Таким образом, целью работы являлось изучение отклика сверхизолирующей пленки после подачи на нее высокочастотного импульса и нахождение релаксационной емкости исследуемого образца.

Для этой цели были взяты пленки нитрида ниобия-титана толщиной 10 нм, выращенные методом атомарно-слоевого осаждения. В работе проводилось 4 эксперимента для частот 0,1; 1; 10 и 100 кГц, в каждом по 5 измерений, в которых менялась амплитуда и длительность прямоугольного импульса. Максимальное напряжение равнялось 2 В, а минимальное изменялось от 0 до 1,6 В с шагом по 0,4 В при пороговом напряжении около 1,8 В. Измерения проводились при температуре 20 мК.

Итак, образец имеет два релаксационных процесса. Первый процесс, характеризующийся емкостью  $C_1$ , показывает переход образца из сверхизолирующего в нормальное состояние, который осуществляется за 0,1 мкс. Далее наблюдается небольшой рост тока до равновесного значения. Этот рост характеризуется емкостью  $C_2$ , которая обратная пропорциональна частоте сигнала. Обе емкости почти не зависят от скачка напряжения  $\Delta U$ . Также была оценена диэлектрическая проницаемость сверхизолятора, которая оказывается экстремально большой для всего диапазона частот.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. Ю. Миронов

**Влияние амплитуды напряжения и концентрации примеси на окно памяти и его эволюцию при циклировании тонких сегнетоэлектрических пленок  $\text{Hf}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_2:\text{La}$**

Т. М. Залялов

Институт физики полупроводников  
им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Сегнетоэлектрические материалы на основе оксида гафния интенсивно изучаются благодаря их отличной совместимости с КМОП и потенциалу масштабируемости в отличие от классических сегнетоэлектриков типа PZT. Наиболее привлекательным для тонких сегнетоэлектрических пленок является применение в энергонезависимой памяти. Однако промышленное использование оксида гафния в сегнетоэлектрической памяти типа FeRAM (*ferroelectric random access memory*) до сих пор откладывается. Одним из основных препятствий является нестабильное переключение поляризации при циклическом переключении. Наблюдаются эффекты *wake-up* и *fatigue* — увеличение и уменьшение остаточной поляризации с увеличением циклов переключения поля. *Wake-up* проявляется на «свежем», еще не подвергнутом переключению образце. После стабильной части циклирования, в которой остаточная поляризация сохраняет свое значение при переключении поля, циклирование завершается эффектом *fatigue* — уменьшением поляризации — или пробоем. Эти эффекты нежелательны для долговременной работы запоминающих устройств, подвергающихся чрезвычайно большому количеству циклов перезаписи информации. Поэтому поиск способов смягчения или устранения этих эффектов остается важной задачей с научной и технической точки зрения. В данной работе изучено влияние напряжения циклирования и концентрации примеси на эволюцию остаточной поляризации.

Для исследования использовались FeRAM-структуры металл — сегнетоэлектрик — металл на основе тонких пленок  $\text{Hf}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_2:\text{La}$  с мольными долями La 0; 2,02 и 3,47 %. Структуры циклично переключались при разных амплитудах напряжения. Для части циклов проводились измерения методикой PUND для определения значения поляризации.

В результате выявлено, что величина остаточной поляризации и вид ее эволюции зависят от амплитуды напряжения циклирования. Изменение концентрации примеси привело к увеличению остаточной поляризации в более чем в 2 раза.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Д. Р. Исламов

**Фазовый переход полупроводник — металл в нанокристалле диоксида ванадия с проводящими конусообразными контактами**

К. Е. Капогузов

Институт физики полупроводников  
им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Диоксид ванадия ( $\text{VO}_2$ ) является активно изучаемым в последние годы функциональным материалом, испытывающим при температуре около 340 К резкий обратимый фазовый переход полупроводник — металл [1]. Наибольший интерес представляют монокристаллы  $\text{VO}_2$ , поскольку они имеют ярко выраженный скачок свойств и испытывают малые механические напряжения во время фазового перехода. Ранее был предложен и сформирован энергоэффективный резистивный переключатель на основе монокристалла  $\text{VO}_2$  с внедренным в него nanoострым контактом [2]. Для дальнейшего изучения их свойств необходимо определить влияние геометрии контактов на свойства фазового перехода в монокристалле  $\text{VO}_2$ .

В данной работе исследуется переключающий элемент на основе монокристалла  $\text{VO}_2$  и двух металлических конусообразных nanoострых контактов к нему. Численным моделированием методом конечных элементов получены картины распределения плотности тока, температуры и напряженности поля внутри кристалла  $\text{VO}_2$  в момент фазового перехода, а также зависимость тока через кристалл от времени.

Были рассчитаны значения тока переключения и мощности на переключение для различных геометрий контактов. Минимальный ток на переключение соответствует геометрии двух внедренных контактов и составляет 7,2 мкА. Результаты моделирования согласуются с экспериментальными данными [2] и предсказывают рекордную энергоэффективность при использовании двух внедренных в кристалл игл. Рассматриваемый в данной работе переключающий элемент перспективен для использования в сенсорах и нейроморфных системах.

---

1. Ke Y. et al. Vanadium Dioxide: The Multistimuli Responsive Material and Its Applications // Small. 2018.

2. Prinz V. Y. et al. A new approach to the fabrication of  $\text{VO}_2$  nanoswitches with ultra-low energy consumption // Nanoscale. 2020.

Научный руководитель — чл.-корр. РАН, проф. В. Я. Принц

## Исследование О-Н связей в пленках $\text{GeSi}_x\text{O}_y$ методом ИК-спектроскопии

Л. А. Карманчук

Институт физики полупроводников  
им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

В данной работе объектом исследования являются пленки  $\text{GeO}[\text{SiO}]$  и  $\text{GeO}[\text{SiO}_2]$ , или пленки нестехиометрических германосиликатных стекол. В последнее время в германосиликатных стеклах был обнаружен устойчивый эффект обратимых резистивных переключений. Это позволяет надеяться, что они могут быть использованы в перспективных элементах памяти будущего — мемристорах. В 2019 г. в подобных пленках был впервые открыт мемристорный эффект [1]. В 2020 г. вышла работа [2], в которой показано, что в пленках  $\text{GeO}_2$  на резистивные переключения большое влияние оказывает наличие в них О-Н групп. Поэтому исследование этих групп в пленках германосиликатных стекол актуально.

В данной работе были проведены измерения спектров ИК-поглощения, комбинационного рассеяния света (КРС); применены вспомогательные методы — спектральная эллисометрия и электронная микроскопия — для определения толщин образцов; проведен отжиг обоих образцов. Из анализа спектров инфракрасного поглощения было установлено, что исходные пленки содержат О-Н группы. После отжига при температуре  $500^\circ\text{C}$  в течение 30 мин в атмосфере аргона они исчезли. Таким образом, низкотемпературные отжиги можно использовать для удаления данных групп из мемристорных структур. Специальная компьютерная программа позволяет сделать оценку количества О-Н связей, используя приближение аналитического и экспериментального результатов. Кроме того, отжиг увеличивает содержание аморфного германия в пленках (о чем свидетельствуют изменения в КРС-спектре).

---

1. Volodin V.A., Kamaev G.N., Gritsenko V.A., Gismatulin A.A., Chin A., Vergnat M. Memristor effect in  $\text{GeO}[\text{SiO}_2]$  and  $\text{GeO}[\text{SiO}]$  solid alloys films // Appl. Phys. Lett. 2019. Vol. 114. P. 233104.

2. Julin Feng et. al. Investigation of physically transient resistive switching memory based on  $\text{GeO}_2$  thin films // Appl. Phys. Lett. 2020. Vol. 117. P. 192102.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук В. А. Володин

**Влияние добавки фторированных углеродных нанотрубок  
на морфологию, стабильность и эффективность  
органических фотовольтаических ячеек**

Е. С. Кобелева

Институт химической кинетики и горения  
им. В. В. Воеводского, Новосибирск

Была разработана и применена методика диспергирования углеродных нанотрубок (УНТ). В разбитой суспензии УНТ большую часть составляют индивидуальные нанотрубки с диаметром 1–2 нм, имеются также жгуты с диаметром до 6 нм.

Применение этой процедуры привело к повышению качества фотовольтаических ячеек на основе композита РЗНТ и фторированных УНТ: увеличилась доля «рабочих» ячеек, производящих фототок; наблюдалась хорошая воспроизводимость фотовольтаического эффекта и близкая к диодной темновая вольт-амперная характеристика. Соответственно, снижалась доля «нерабочих» ячеек с омической вольт-амперную характеристикой или близкой к ней.

Методом ЦВА определен потенциал восстановления фторированных УНТ, соответствующий энергии ВЗМО  $-4,3$  эВ. С использованием значения энергетического зазора между ВЗМО и НСМО  $1,0$  эВ, определенного из спектра оптического поглощения фторированных УНТ, оценено значение энергии НСМО  $-5,3$  эВ. Данные значения указывают на возможность эффективного переноса электрона под действием света с фторированных УНТ на сопряженный полимер РЗНТ и использования композита фторированных УНТ с РЗНТ в качестве активной среды органических фотовольтаических ячеек. В кривых ЦВА нефторированных УНТ пик восстановления отсутствует, что объясняется омическим контактом с электродом, создаваемым металлическими УНТ. Эти данные указывают на превращение значительной части УНТ из металлических в полупроводниковые при фторировании.

Зарегистрирован сигнал ЭСЭ вне фазы от состояния с переносом заряда, возникающий при импульсном лазерном возбуждении композита РЗНТ с полупроводниковыми УНТ. Моделирование зависимости интенсивности этого сигнала от интервала между СВЧ-импульсами позволило установить расстояние начального переноса электрона с РЗНТ на УНТ ( $1,5-7$  нм, максимум на  $3$  нм).

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. Л. В. Кулик

## Моделирование атомной и электронной структуры оксида гафния, легированного лантаном

В. М. Ковзик

Институт физики полупроводников  
им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

В 2011 г. был обнаружен сегнетоэлектрический эффект в тонких (толщиной около 10 нм) пленках оксида гафния. Данный эффект состоит в возникновении спонтанной поляризации в кристалле, ориентацию которой можно изменить посредством внешнего электрического поля. Это вызвало огромный интерес к изучению физических свойств таких пленок в связи с перспективой разработки энергонезависимой памяти, основанной на сегнетоэлектрическом эффекте (FRAM). Сегнетоэлектричество в оксиде гафния связывают со стабилизацией центрально-несимметричной орторомбической фазы  $of\text{-HfO}_2$  ( $Pca2_1$ ). Данная фаза присутствует в реальных поликристаллических пленках наряду с моноклинной, которая является стабильной кристаллической модификацией в нормальных условиях. Для улучшения сегнетоэлектрических свойств  $HfO_2$  используется его легирование различными металлами. Оксид гафния, легированный лантаном ( $HfO_2:La$ ), является одним из наиболее перспективных материалов для создания матриц FRAM. В настоящее время электронная структура и фундаментальные свойства  $of\text{-HfO}_2$ , а также  $of\text{-HfO}_2$ , легированного La, недостаточно изучены.

Данная работа посвящена теоретическому изучению атомной и электронной структуры  $of\text{-HfO}_2$  и  $of\text{-HfO}_2:La$  с помощью квантово-химического моделирования. Моделирование осуществляется в рамках теории функционала плотности с гибридным обменно-корреляционным функционалом в программном пакете Quantum ESPRESSO.

Для  $of\text{-HfO}_2$  и  $of\text{-HfO}_2:La$  были рассчитаны спектры полной и парциальной плотности электронных состояний, получены тензоры оптической и статической диэлектрической проницаемости. Построена диаграмма фазовых переходов между различными кристаллическими модификациями. Показано, что фаза  $of\text{-HfO}_2$  в виде идеального кристалла термодинамически невыгодна при любых давлениях.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Т. В. Перевалов

## Дефекты в слоях InAlAs, выращенных методом МЛЭ на подложке InP(001)

Д. А. Колосовский, Д. В. Дмитриев  
Институт физики полупроводников  
им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

В настоящее время согласованные по параметрам решетки наноструктуры InAlAs/InP вызывают интерес исследователей. В таких структурах наблюдаются специфические механизмы дефектообразования: образование дефектов на гетерогранице подложка — слой (тип I) и образование дефектов в эпитаксиальном слое (тип II). В данной работе сообщается о нескольких методах контроля образования дефектов в гетероструктурах InAlAs/InP. В работе варьировали температуру отжига подложки, условия роста слоев (температуру роста, поток мышьяка) и исследовали влияние короткопериодической сверхрешетки InGaAs/InAlAs.

Образцы InAlAs/InP были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии в установке Ribep Compact 21T. Отжиг подложек InP проводился в потоке мышьяка для предотвращения встраивания фосфора в слои InAlAs из-за эффекта памяти. Установлено, что дефекты типов I и II представляют собой дефекты упаковки, образующиеся в слоях InAlAs, распространяющиеся вдоль плоскостей {111}. На выходе из таких дефектов на поверхности образуются «ямки».

Формирование дефектов типа I связано с замещением фосфора мышьяком в приповерхностном слое подложки и формировании островков InAs в процессе отжига подложки. Рассогласование параметров кристаллической решетки приводит к растягивающей деформации на начальных этапах роста слоев InAlAs и формированию дефекта упаковки. Минимальная плотность дефектов типа I наблюдается при температурах отжига  $\sim 510$  °C и потоке мышьяка  $< 1,5 \times 10^{-5}$  Торр. Рост буферных короткопериодных сверхрешеток InAlAs/InGaAs после отжига позволяет понизить плотность таких дефектов на 2–3 порядка. Дефекты II типа связаны с распадом тройного твердого раствора InAlAs на бинарные соединения в процессе роста в неравновесных условиях. Установлена минимальная плотность дефектов в слоях InAlAs, выращенных при температуре роста 505 °C и потоке мышьяка  $1,5 \times 10^{-5}$  Торр.

Определены оптимальные условия роста для уменьшения плотности дефектов I типа в  $10^8$  раз и II типа в  $10^4$  раза.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук К. С. Журавлев

## **Комбинированный вычислительный метод определения основного состояния спинового стекла**

А. О. Король, Д. Ю. Капитан, А. Е. Рыбин  
Дальневосточный федеральный университет, Владивосток  
Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток

Как правило, изучение спиновых систем в статистической механике выполняется с помощью инструментов случайной выборки. К наиболее мощным из них относится моделирование методами Монте-Карло, представляющими собой случайную выборку из пространства состояний, и последующие расчеты физических величин. Способность современных алгоритмов машинного обучения классифицировать, идентифицировать и интерпретировать большие наборы данных и на их основе выполнять прогнозирование новых свойств и состояний изучаемых систем обеспечивает дополнительную парадигму к вышеупомянутому подходу для обработки экспоненциально возрастающего числа анализируемых состояний в статистической физике.

Нахождение основных состояний, т. е. состояний с самой низкой энергией, является NP-полной задачей из-за макроскопического вырождения и фрустраций, которые существуют в спиновых стеклах.

В данной работе изучается модель Эдвардса — Андерсона на двумерной решетке спинов Изинга с бимодальным распределением связей. В работе для проведения моделирования была использована комбинация гибридного мультиспинового метода и ограниченной машины Больцмана и проведено сравнение с точными решениями для небольших размеров систем для верификации результатов приближенных методов.

Результаты исследования показывают, что основные состояния спиновых стекол можно предсказать с помощью нейронной сети. Однако, учитывая отсутствие точного решения для определения количества вырождений на основном уровне энергии для больших систем, невозможно проверить, достигают ли алгоритмы глобального минимума энергии. Тем не менее алгоритмы машинного обучения могут внести значительный вклад в решение NP-полных задач в будущем.

*Работа поддержана государственным заданием Министерства науки и высшего образования РФ № 0657-2020-0005.*

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук В. Ю. Капитан



**Влияние собственного оксида CdHgTe на пассивирующие свойства поверхности, подвергнутой жидкостному травлению**

И. А. Краснова

Новосибирский государственный университет

Институт физики полупроводников

им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск

При изготовлении фотоприемных матриц для улучшения их частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) необходимо уменьшить фотоэлектрическую связь между фотоприемными элементами. Поскольку длина диффузии носителя заряда в CdHgTe (КРТ) больше, чем расстояние между фотодиодами, улучшение ЧКХ достигается за счет физического разделения при помощи травления меза-структуры. В настоящее время меза-структуры создаются с помощью жидкостного травления водным раствором  $\text{Br} + \text{HBr}$ . При таком травлении на поверхности КРТ образуется избыточный теллур и появляются другие дефекты. В данной работе исследуется влияние собственного оксида КРТ после травления на электрофизические свойства границы раздела КРТ —  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Эксперименты проводились на образцах КРТ с составом  $x = 0,22$ . Был изготовлен образец № 1, на который сразу после травления КРТ наносился диэлектрик. Для создания собственного оксида КРТ образец № 2 после травления лежал сутки на воздухе. Для уменьшения собственного оксида на образце № 3, в камере нанесения  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , проводились 30 циклов нанесения триметилалюминия без окисления. Это связано с тем, что алюминий, являясь химически активным веществом, при контакте с кислородом образует оксидную пленку. На всех образцах формировался слой  $\text{Al}_2\text{O}_3$  методом плазменно-индуцированного атомно-слоевого осаждения. Затем наносился металлический контакт. На полученных структурах измерялись вольт-фарадные характеристики при температуре 77 К. Из полученных данных найдено положение напряжения плоских зон, оценены плотность фиксированного встроенного заряда в диэлектрике и плотность медленных состояний.

Установлено, что наибольшее смещение напряжения плоских зон, свидетельствующее о наличии в диэлектрике фиксированного встроенного заряда, достигается для образца № 1, а наименьшее — для образца № 3. Получено, что наибольшее значение медленных состояний достигается в образце № 1, а наименьшее — в образце № 2. Установлено, что собственный оксид КРТ оказывает лучшее влияние на границу раздела КРТ —  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Научные руководители —

канд. физ.-мат. наук Г. Ю. Сидоров, Д. В. Горшков

## **Определение постоянной решетки во время роста Ge/Si(100) при молекулярно-лучевой эпитаксии**

О. И. Кукунов, А. Ю. Третьяков  
Томский государственный университет

Создание полупроводниковых наноструктур с новыми физическими свойствами является важным направлением развития нанотехнологий. Метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), благодаря высокому уровню вакуума порядка десятой степени Торр, позволяет синтезировать структуры с малым количеством дефектов и высоким уровнем чистоты.

Кремний обладает наиболее развитой технологией получения наноструктур, а напряженные эпитаксиальные слои германия в структуре кремния позволяют улучшить характеристики приборов на основе таких наногетероструктур. Меняя параметры синтеза германий-кремниевых структур, можно управлять энергетическим спектром и, следовательно, шириной запрещенной зоны оптоэлектронных компонентов. При синтезе Ge на Si в слоях германия формируются упругие напряжения вследствие рассогласования постоянных решеток примерно на 4 %. На формирование структур влияют такие параметры, как температура подложки и скорость роста [1].

При МЛЭ с помощью метода дифракции быстрых электронов (ДБЭ) можно получать информацию об исследуемой поверхности и параметрах кристаллической решетки непосредственно во время роста. В ходе работы проведена серия экспериментов по синтезу германия на подложке Si(100) на установке МЛЭ «Катунь-100». Контроль процесса синтеза наногетероструктур осуществлялся с помощью метода ДБЭ. Получена динамика изменения параметров постоянной решетки эпитаксиальных пленок Ge/Si(100) от температуры подложки Si(100), а также зависимости параметров критической толщины напряженных эпитаксиальных слоев германия от температуры подложки Si(100) 250–600 °С.

---

1. Thickness-dependent elastic strain in Stranski–Krastanow growth / V. V. Dirko, K. A. Lozovoy, A. P. Kokhanenko, A. V. Voitsekhovskii // Russ. Phys. J. 2020. Vol. 22. P. 19318–19325 (1–8).

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. А. П. Коханенко

## Анализ кинетики зарождения 2D-островков на поверхности Si(111) при осаждении Ge

А. А. Макеева

Новосибирский государственный университет

В настоящее время Si и Ge широко используются при создании полупроводниковых структур для микро- и оптоэлектроники. Преобладающим методом получения подобных структур является молекулярно-лучевая эпитаксия. Особый интерес представляют начальные стадии зарождения эпитаксиальных пленок, поскольку они определяют конечные свойства растущих структур.

В данной работе методами *in situ* сверхвысоковакуумной отражательной электронной и *ex situ* атомно-силовой микроскопии изучено 2D-островковое зарождение на широких террасах поверхности Si(111) со структурами  $(7 \times 7)$  и  $(1 \times 1)$  в условиях осаждения Ge. Целью данной работы являлось определение кинетики 2D-островкового зарождения и роста, а также критического размера зародыша 2D-островка. На основе анализа распределений площадей захвата [1] 2D-островков Ge, зародившихся на поверхности Si(111)- $(7 \times 7)$  при  $T = 550\text{--}650$  °C, было установлено, что критический зародыш состоит из 2–5 частиц, а кинетика роста 2D-островка лимитирована встраиванием в край островка. Было показано, что при  $T \geq 850$  °C в отсутствие внешнего потока зародившиеся на поверхности Si(111)- $(1 \times 1)$  2D-островки уменьшаются в размерах и в дальнейшем исчезают с поверхности, что указывает на сильную десорбцию Ge. На основе температурной зависимости скорости исчезновения 2D-островков была оценена энергия десорбции Ge с поверхности Si(111) — 1,9 эВ. Была измерена концентрация  $N_{2D}$  зародившихся при  $T = 850$  °C 2D-островков как функции от  $R^2$ , где  $R$  — скорость осаждения Ge,  $\chi$  — параметр масштабирования. При  $T \geq 850$  °C кинетика роста определяется исключительно поверхностной диффузией, и, исходя из полученного  $\chi \approx 0,6$ , критический зародыш состоит из 2–4 адатомов, согласно атомистической теории скоростей зародышеобразования [2]. Однако при  $T \geq 850$  °C частота выхода адатомов из ступени и десорбирующий поток достаточно велики, и реальный размер зародыша больше чем 2–4 адатома.

---

1. Einstein T. L. et al. Analyzing capture zone distributions (CZD) in growth: Theory and applications // *J. Cryst. Growth*. 2014. Vol. 401. P. 67–71.

2. Venables J. A. et al. Nucleation and growth of thin films // *Reports Prog. Phys.* 1984. Vol. 47. P. 399–459.

Научный руководитель — А. С. Петров

## Исследование экситонных свойств в монокристалле $\text{MAPbI}_3$

М. П. Мамаева

Санкт-Петербургский государственный университет

В последние годы все более активно ведется исследование галогенидных перовскитов. Интерес к данным прямым полупроводникам обусловлен чрезвычайной эффективностью люминесценции и значительной длиной диффузии носителей заряда, а также дешевизной и простотой синтеза кристаллов.

Зависимость уширения экситонных линий от температуры служит источником информации об экситон-фононном взаимодействии. Уширение в спектрах фотолюминесценции кристаллов галогенидных перовскитов может быть как однородным, так и неоднородным — обусловленным дефектами.

В настоящей работе был изучен монокристалл  $\text{MAPbI}_3$ . Особое внимание было уделено рассмотрению температурной зависимости уширения спектральной линии фотолюминесценции, также была дана нижняя оценка энергии связи экситона.

В данной работе было выявлено небольшое неоднородное уширение  $\Gamma \sim 2,8$  мэВ, что свидетельствует о высоком качестве оптических свойств в классе кристаллических галогенидных перовскитов. С помощью модели Аррениуса была аппроксимирована наименьшая энергия безызлучательной рекомбинации как нижняя оценка энергии связи экситона  $E_b \sim 14,8$  мэВ.

*Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 19-72-10034 на оборудовании РЦ «Нанофотоника» СПбГУ.*

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Ю. В. Капитонов

**Исследование оптических свойств гетероструктур InGaAlAs/InAlAs на подложке фосфида индия для электрооптического модулятора на основе эффекта Штарка**

Н. А. Назаров

Новосибирский государственный университет

В последние годы в мире сформировалось новое научно-техническое направление, получившее название «радиофотоника» (*microwave photonics*). Наиболее перспективной материальной платформой для радиофоники являются соединения АЗВ5 на InP, позволяющие создавать все элементы схемы интегрально на одной подложке. Для InP-платформы модуляторы, являющиеся основным элементом радиофотонной схемы, работают на основе квантового эффекта Штарка. При этом их важнейшими характеристиками являются высокий электрооптический эффект (ЭОЭ) в сочетании с низкими оптическими потерями. Для рабочей длины волны в 1,55 мкм этим требованиям хорошо удовлетворяют КЯ на основе четверного состава InGaAlAs. Однако в литературе мало информации по величине ЭОЭ в гетероструктурах InGaAlAs/InGaAs.

Поэтому для исследования ЭОЭ в InGaAlAs/InAlAs МКЯ в данной работе нами были изготовлены тестовые *pin*-образцы, содержащие КЯ различного состава и толщины слоев. Толщина КЯ в различных образцах варьировалась в пределах от 11 до 20 нм. Требуемый состав InGaAlAs слоев был получен цифровой эпитаксией из соотношения компонент InGaAs/InAlAs  $2 \times 8$  или  $2 \times 6$  монослоев. Для определения величины ЭОЭ в исследуемых структурах было проведено измерение зависимостей коэффициентов пропускания и отражения образцов от напряжения электрического поля на рабочей длине волны модулятора 1,55 мкм. Обнаружена немонотонная зависимость пропускания и отражения образцов от приложенного электрического поля, в кривых присутствуют ярко выраженные резонансы/пики.

Проведен расчет энергетической структуры КЯ, а также спектров поглощения в электрическом поле *kp*-методом. Установлено, что положение пиков на экспериментальных кривых коэффициентов пропускания/отражения соответствует как резонансу между уровнями размерного квантования соседних квантовых ям в электрическом поле, так и скачкам поглощения в рассчитанных спектрах. Поэтому наблюдаемые особенности коэффициентов пропускания и отражения от электрического поля были объяснены в рамках модели непрямых оптических переходов между уровнями соседних КЯ в электрическом поле.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Д. В. Гуляев

**Ван-дер-ваальсовый эпитаксиальный рост  $\text{In}_2\text{Se}_3$  на поверхности полупроводниковых подложек  $\text{Si}(111)$  и  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$** 

С. А. Пономарев  
Новосибирский государственный университет  
Институт физики полупроводников  
им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск

Слоистый  $\text{In}_2\text{Se}_3$  представляет интерес из-за перспективности разработки на его основе солнечных фотоэлементов, фотодетекторов и запоминающих устройств с фазовым переходом. Актуальной проблемой интеграции гетероструктур на основе  $\text{In}_2\text{Se}_3$  с современной полупроводниковой электроникой является поиск способов выращивания пленок  $\text{In}_2\text{Se}_3$  с требуемой кристаллической структурой (фазой) и свойствами на полупроводниковых подложках.

В данной работе с использованием *in situ* отражательной электронной микроскопии выращивались пленки  $\text{In}_2\text{Se}_3$  на подложке  $\text{Si}(111)$  и  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$  при температуре  $T \approx 673$  К. Показано движение атомных ступеней на поверхности  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  в процессе сублимации в потоке селена при температурах 673–723 К. Сублимация происходила по ступенчато-слоевому механизму. Скорость движения в процессе сублимации составляла порядка 600 с/слой. Наблюдавшиеся в процессе роста картины дифракции быстрых электронов на отражение соответствовали эпитаксиальному росту слоистого  $\text{In}_2\text{Se}_3$ . Методом атомно-силовой микроскопии показано, что высота атомных ступеней на поверхности пленок составляет около 1 нм, что соответствует высоте молекулярного слоя  $\text{In}_2\text{Se}_3$ . Рост треугольных 2D-островков  $\text{In}_2\text{Se}_3$  на  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$  ориентирован вдоль кристаллографических направлений  $\langle 11-20 \rangle$ , на поверхности  $\text{Si}(111)$  направление роста в плоскости подложки  $\text{In}_2\text{Se}_3$  не выражено. Методом комбинационного рассеяния света подтверждена  $\beta$ -фаза выращенной пленки. Показано наличие температурного гистерезиса сопротивления пленки  $\text{In}_2\text{Se}_3$  на  $\text{Si}(111)$  в области 140–180 К, происходящего при понижении температуры со скачком из состояния с низкой электропроводностью и сопротивлением  $10^9$  Ом в состояние высокой электропроводности и сопротивлением  $10^4$  Ом, соответствующего структурному переходу  $\beta\text{-In}_2\text{Se}_3 \rightleftharpoons \beta'\text{-In}_2\text{Se}_3$ . С помощью метода высокоразрешающей электронной микроскопии показана гексагональная структура пленки.

*Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 18-72-10063) с использованием оборудования ЦКП «Наноструктуры».*

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Д. И. Роголо

## **Кинетика трансформации формы эшелонов атомных ступеней на поверхности Si(001) в условиях электромиграции**

М. Э. Разживина

Институт физики полупроводников  
им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

На вицинальной поверхности кристалла при нагреве постоянным электрическим током возникает эффект электромиграции, который заключается в направленном дрейфе адатомов. Данный процесс приводит к перераспределению атомных ступеней и формированию эшелонов ступеней. На поверхности Si(001) этот процесс неотъемлемо связан со сверхструктурной реконструкцией ( $2 \times 1$ ), которая обуславливает выраженную анизотропию диффузии адатомов вдоль и поперек димерных рядов реконструкции и наличие двух типов атомных ступеней. Известно, что с увеличением температуры величина анизотропии уменьшается, что может влиять на силу взаимодействия атомных ступеней в эшелоне и, как следствие, на их плотность в эшелоне [1]. Поэтому целью данной работы является определение температурной зависимости потенциала взаимодействия атомных ступеней в эшелоне на поверхности Si(100) в условиях электромиграции.

В работе проведены исследования кинетики трансформации морфологии эшелона атомных ступеней на поверхности Si(100) в условиях электромиграции в интервале температур 1000–1100 °С. С помощью атомно-силового микроскопа изучалась морфология поверхности серий образцов после отжига в сверхвысоковакуумных условиях в течение 5–100 мин. Из АСМ-изображений были получены данные о зависимости среднего расстояния между ступенями от количества ступеней в эшелоне. Зависимость подчиняется степенному закону с показателем  $\alpha$ , который изменяется от  $-0,7$  (1000 °С) до  $-0,5$  (1100 °С). Впервые экспериментально определена температурная зависимость степенного показателя  $\alpha$  на поверхности Si(100). Это подтверждает изменение потенциала взаимодействия с увеличением температуры, так же как и на поверхности Si(111), где это было показано ранее в [2].

---

1. Bartelt N. C., Tromp R. M., Williams E. D. Step capillary waves and equilibrium island shapes on Si(001) // Phys. Rev. Lett. 1994. Vol. 73. No. 12. P. 1656–1659.

2. Homma Y., Aizawa N. Electric-current-induced step bunching on Si(111) // Phys. Rev. B. 2000. Vol. 62. No. 12. P. 8323–8329.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Е. Е. Родякина

## Аномальный диффузионный профиль адатомов на экстремально широких террасах поверхности Si(111)

Е. О. Соловьева

Новосибирский государственный университет

Неравномерность распределения концентрации адатомов на узких террасах мала (для террас шириной  $\sim 1$  мкм —  $\sim 10^{-5}$  МС [1],  $1$  МС =  $7,8 \times 10^{14}$  см $^{-2}$ ) и экспериментально не регистрируется современными методами. Экспериментальное изучение распределения концентрации адатомов требует использовать широкие террасы, сопоставимые по размерам с длиной диффузии. Целью данной работы является определение фундаментальных параметров процесса диффузии адатомов на поверхности Si(111).

Экстремально широкие террасы создавались при отжиге образцов при температуре 1070 и 1090 °С в процессе *in situ* экспериментов, проводимых методом сверхвысоковакуумной отражательной электронной микроскопии. Детальный анализ морфологии поверхности образцов с террасами диаметром 70 и 52 мкм проводился методом *ex situ* атомно-силовой микроскопии. На основе полученных сканов в высоком разрешении сформировано панорамное изображение, в результате обработки которого получено пространственное распределение доли площади участков высокой атомной плотности, демонстрирующее симметричность относительно центра террасы. На его основе построено радиальное распределение концентрации адатомов на террасе  $n(r)$ : в центре — 0,2 МС, а на краях — 0,42 МС. Данное распределение не описывается теоретической аппроксимацией, предполагающей постоянными коэффициент диффузии  $D$  и длину диффузии, как в [1]. Для анализа экспериментального распределения  $n(r)$  использовано решение стационарного уравнения диффузии в предположении, что  $D$  не является постоянной величиной. На основе численного решения этого уравнения для распределения концентрации адатомов на террасе диаметром 52 мкм получена зависимость  $D$  от экспериментально измеренного  $n(r)$  на террасе. Показано, что коэффициент поверхностной диффузии уменьшается от 75 мкм $^2$ /с в центре террасы до 15 мкм $^2$ /с возле края.

*Работа проводилась на оборудовании ЦКП «Наноструктуры» при финансовой поддержке РФФ (грант № 19-72-30023).*

---

1. Pang A. B. et al. Step line tension and step morphological evolution on the Si(111) ( $1 \times 1$ ) surface // Phys. Rev. B. 2008. V. 77. No. 11. P. 115424.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Д. И. Роголо



## Исследование резистивных свойств графена при взаимодействии с водой

Д. В. Сорокин<sup>1</sup>, Е. В. Бойко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный университет

<sup>2</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

Графен привлекает значительное внимание благодаря своим уникальным физическим и электронным свойствам. Производство графена химическим осаждением из газовой фазы является перспективным, относительно недорогим, масштабируемым методом для получения графеновых пленок высокого качества. Данная работа посвящена изучению электрических свойств графена при контакте с дистиллированной водой.

Графен синтезировали методом осаждения из газовой фазы (CVD) на медной фольге. В качестве углеродсодержащего газа использовался метан. Медную подложку отжигали на CVD-установке в течение 30 мин в водороде с расходом 100 ст. см<sup>3</sup>/мин. После стадии отжига смесь газов (аргон — 90 ст. см<sup>3</sup>/мин, водород — 20 ст. см<sup>3</sup>/мин, метан — 0,2 ст. см<sup>3</sup>/мин) для синтеза подавалась в установку в течение 10 мин при температуре 1070 °С. Графен, выращенный на поверхности меди, переносился на полимер ПЭТ/ЭВА методом теплового прессования. Медную подложку, покрытую полимером, обжигали при температуре 190 °С в течение 10 мин. Затем металлическую подложку травили в 40%-м растворе азотной кислоты. Полученный графен-полимерный композит тщательно промывали водой и сушили. Параметры синтеза графена CVD-методом на медной подложке и последующий перенос на полимер подробно описаны в [1]. Сопротивление графена исследовалось двухзондовым методом в воздушной атмосфере и воде. Структура графена исследовалась методом АСМ на кремниевой подложке, а также методом СЭМ на полимере.

В ходе циклических испытаний, при погружении в воду и сушке образца, было показано, что изменение сопротивления графена носит обратимый характер с постоянной амплитудой. Зарегистрирована температурная зависимость сопротивления графена в воде, откуда получено значение ширины запрещенной зоны — 0,17 эВ с точностью 0,01 эВ.

---

1. Kostogrud I. A., Boyko E. V., Smovzh D. V. The main sources of graphene damage at transfer from copper to PET/EVA polymer // Mater. Chem. Phys. 2018. Vol. 219. P. 67–73.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Д. В. Смовж

**Термостабильность сегнетоэлектрических свойств нанослоев оксидов гафния-циркония с алюминием, полученных методом атомно-слоевого осаждения**

К. А. Толмачев

Институт физики полупроводников  
им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Сегнетоэлектрические тонкопленочные материалы используются в энергонезависимой памяти и других приложениях, основанных на способности сегнетоэлектриков переключать свою электрическую поляризацию в ответ на приложенные электрические поля. Большинство полупроводниковых приборов на кремнии производятся при высоких температурах  $\sim 900$  °С. Но свойства сегнетоэлектрических пленок меняются из-за структурных переходов при отжиге. Целью данной работы является получение зависимости сегнетоэлектрических свойств образцов от температуры отжига.

В качестве образца выступает многослойная структура металл — сегнетоэлектрик — металл на кремниевой подложке, состоящая из нанослоев нитрида титана (TiN), оксидов  $\text{HfO}_2\text{ZrO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$  (HZAО) 5 : 5 : 1 и нитрида алюминия (ALN), на которую нанесена омическая контактная площадка, состоящая из слоя нитрида титана и слоя поликристаллического кремния.

Исследование сегнетоэлектрических свойств образцов HZAО проводилось на установке Keithley 4200 методом PUND (*positive-up-negative-down*) при различных режимах подачи импульсного сигнала к образцу. Характерный временной масштаб паттерна подаваемых импульсов порядка  $10^{-6}$ – $10^{-4}$  с.

Из проведенных измерений следует, что при повышении температуры отжига значение поляризации сегнетоэлектрика увеличивается до  $10$  мкКл/см<sup>2</sup>, но также существует температура отжига, после которой значение поляризации сегнетоэлектрика уменьшается. В работе проводится обсуждение полученных данных на основе модели фазовых превращений.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук В. П. Попов

## **Электросопротивление композитов на основе полибензимидазола при повышенных температурах**

А. А. Федоров, В. А. Кузнецов  
Новосибирский государственный технический университет  
Институт неорганической химии  
им. А. В. Николаева СО РАН, Новосибирск

В настоящее время одной из перспективных областей электроники является гибкая электроника. Эта область связана с созданием устройств и компонентов на основе новых материалов, способных выдерживать повышенные деформации без потери эксплуатационных свойств. Одними из перспективных материалов для гибкой электроники являются полимерные композиционные материалы. Благодаря своим термомеханическим свойствам среди множества полимеров выделяется полибензимидазол. Полибензимидазол является диэлектриком, поэтому для использования в электронике в его матрицу необходимо внедрить проводящую фазу. В качестве проводящей фазы в рамках настоящей работы были выбраны графитовые наночастицы.

Поскольку для использования новых материалов в электронике необходимо иметь информацию о ряде фундаментальных свойств, в том числе о типе электронного транспорта в них, то и для данных материалов была поставлена задача выполнения таких исследований. Одними из методов определения электронного транспорта являются измерение и анализ температурных зависимостей электросопротивления. Ранее данные композиты были изучены при низких температурах, неисследованной остается область повышенных температур.

В качестве экспериментальных образцов были взяты композиты на основе полибензимидазола с малослойным графеном и графитовыми нанопластинами с концентрациями 0,75 и 2,00 % (масс.) и 17 и 45 % (масс.) соответственно. Для них были измерены и проанализированы температурные зависимости электросопротивления при температурах от комнатной до 300 °С.

Результаты экспериментов показали, что данные материалы пригодны для использования в электронике при повышенных температурах, поскольку зависимости при циклическом нагревании и охлаждении повторяются. В докладе проводится сравнительный анализ зависимостей для образцов с различной концентрацией проводящей фазы.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Новосибирской области в рамках научного проекта № 19-42-543018*

Научный руководитель — канд. техн. наук В. А. Кузнецов

## Формирование нанокристаллов германия в пленках $\text{GeO}[\text{SiO}_2]$ и $\text{GeO}[\text{SiO}]$

Чжан Фань

Новосибирский государственный университет

Исследование и применение квантово-размерного эффекта в полупроводниковых нанокристаллах (НК) является актуальной проблемой. Основной проблемой остается создание интегрированных в планарную кремниевую технологию источников света, так как все элементы для оптической связи внутри процессора уже созданы на базе данной технологии, таким образом, создание и исследование светоизлучающих полупроводниковых НК может решить эту проблему.

Пленки нестехиометрических германосиликатных стекол  $\text{GeO}_{0,5}[\text{SiO}_2]_{0,5}$  и  $\text{GeO}_{0,5}[\text{SiO}]_{0,5}$  получены со-испарением порошков  $\text{GeO}_2$  и  $\text{SiO}_2$  либо  $\text{GeO}_2$  и  $\text{SiO}$  соответственно и напылением на холодные подложки  $\text{Si}(100)$  и плавленого кварца в высоком вакууме. Затем пленки подвергались печным отжигам при температуре до  $900^\circ\text{C}$ . Наличие и фазовый состав нанокластеров германия в пленках был исследован с применением метода спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС). Трансформация после отжигов окружающей нанокластеры матрицы  $\text{GeSi}_x\text{O}_y$  была исследована с применением Фурье-инфракрасной спектроскопии. Как показал анализ спектров КРС, в исходной пленке  $\text{GeO}_{0,5}[\text{SiO}]_{0,5}$  присутствуют кластеры аморфного германия с размерами 3 нм, а в пленке  $\text{GeO}_{0,5}[\text{SiO}_2]_{0,5}$  не содержится кластеров германия, отжиг при температуре  $800^\circ\text{C}$  привел к образованию НК-Ge, но содержание аморфной фазы Ge составляло до половины объема. После отжига при температуре  $900^\circ\text{C}$  аморфные нанокластеры Ge практически полностью кристаллизовались. Размеры НК-Ge зависели от температуры отжигов, состава пленок и подложки, при этом не наблюдалось формирования НК из твердого раствора Ge-Si.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. В. А. Володин

**Исследование транспорта зарядов в кристаллах  
1,4-бис(5-фенилфуран-2-ил)бензола и его фторированного производного**

Н. А. Шумилов

Новосибирский государственный университет  
Новосибирский институт органической химии им. Н. Н. Ворожцова  
СО РАН, Новосибирск

Органическая электроника является направлением научных исследований, которое занимается разработкой электронных устройств на основе органических полупроводниковых материалов. Одними из наиболее востребованных и перспективных устройств являются органические полевые и светоизлучающие транзисторы. В настоящее время большой интерес представляют разработка и исследование органических светоизлучающих полупроводников на основе кристаллов линейных со-олигомеров. В частности, фуран-фениленовые со-олигомеры хорошо зарекомендовали себя в качестве материалов, обладающих высокой растворимостью, эффективной люминесценцией и подвижностью зарядов. В данной работе исследуется транспорт зарядов в кристаллах 1,4-бис(5-фенилфуран-2-ил)бензол (FP5) и его фторированного производного 5,5'-(перфтор-1,4-фенилен)бис(2-фенилфуран) (FP<sub>F</sub>5).

Методом физического парового транспорта были выращены монокристаллы FP5 и FP<sub>F</sub>5, кристаллы имеют форму пластин и тонких игл соответственно. С помощью метода органических полевых транзисторов в геометрии с верхним затвором и верхними электродами исследованы транспортные характеристики монокристаллов. ОПТ на основе FP5 имеют дырочную подвижность  $\sim 0,1 \text{ см}^2/\text{Вс}$  и среднее пороговое напряжение  $-12 \text{ В}$ . Для монокристаллов фторированного производного, FP<sub>F</sub>5, средняя дырочная подвижность составила  $\sim 0,064 \text{ см}^2/\text{Вс}$  и пороговое напряжение  $-35 \text{ В}$ . Данный эффект обусловлен изменением молекулярной упаковки в кристаллах FP<sub>F</sub>5, в частности большой анизотропией межмолекулярных взаимодействий. Кроме того, негативный эффект на подвижность дырок в PPF5, по всей видимости, оказывает снижение уровней энергии граничных орбиталей, в частности ВЗМО, что ухудшает инжекцию зарядов с графитового электрода.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ  
(проект № 20-73-10090).*

Научный руководитель — канд. хим. наук. М. С. Казанцев

**Детекторы ионизирующих излучений на основе HR GaAs:Cr**

И. Д. Щербаков, М. С. Трофимов  
Томский государственный университет

В областях современной медицины, физике высоких энергий и астрономии широко используются твердотельные детекторы ионизирующих излучений. Перспективными материалами для их создания являются полупроводники сложного состава (бинарные, тройные и четверные соединения). Такие структуры обладают большим атомным номером и плотностью, широкой запрещенной зоной, а также являются радиационно стойкими материалами. Большой интерес проявляется к детекторам на основе арсенида галлия (GaAs), обладающего высокой подвижностью носителей заряда. Однако их эффективному использованию препятствуют малые значения удельного сопротивления и точечные дефекты (EL2-центры), которые являются глубоким донором и возникают в процессе роста GaAs. В ионизованном состоянии EL2<sup>+</sup>-центр обладает большим сечением захвата электронов. Это приводит к существенному снижению времени жизни электронов, и, как следствие, уменьшается эффективность сбора заряда GaAs-детекторов. В настоящее время используются два метода получения GaAs-структур с высоким значением удельного сопротивления: за счет контролируемого введения глубоких донорных уровней EL2 или методом компенсации глубоким акцептором.

В лаборатории Томского государственного университета разработан метод диффузионного легирования GaAs хромом (Cr), который является глубоким акцептором в структуре полупроводника. Удельное сопротивление такой HR (*HR* — *High Resistivity*) GaAs:Cr-структуры достигает значений  $10^9$  Ом·см. Разработанная технология позволяет производить микрополосковые и пиксельные детекторы на основе HR GaAs:Cr-пластин диаметром 3 и 4 дюйма, с толщиной активной области  $250 \div 1000$  мкм. Методом амплитудного анализа определено предельное энергетическое разрешение HR GaAs:Cr-детекторов под действием ионизирующего излучения с энергией 60 кэВ, которое составило  $1 \div 2$  кэВ. На основе спектрометрических измерений в условиях засветки гамма-квантами рассчитано время жизни электронов  $\tau_n \approx 100$  нс. Методом монополярного дрейфа определена скорость электронов и рассчитана подвижность ( $\mu_n \approx 4000$  см<sup>2</sup>/(В·с)) в исследуемых детекторных структурах.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90076.*

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. О. П. Толбанов

## **ТЕПЛОФИЗИКА**

Научный руководитель секции —  
акад. РАН, д-р физ.-мат. наук А. К. Ребров

Председатель секции — д-р физ.-мат. наук Р. И. Мулляджанов

Ответственный секретарь секции — М. А. Клыкова

Экспертный совет секции  
д-р физ.-мат. наук С. В. Станкус  
д-р физ.-мат. наук В. Я. Рудяк  
д-р физ.-мат. наук В. С. Бердников  
д-р физ.-мат. наук И. В. Наумов  
д-р физ.-мат. наук А. А. Васильев  
канд. физ.-мат. наук Д. Ф. Сиковский  
канд. физ.-мат. наук Е. Я. Гагапова  
канд. физ.-мат. наук С. В. Старинский  
канд. физ.-мат. наук И. В. Литвинов

## **THERMOPHYSICS**

Section scientific supervisor — Acad. RAS, Dr. Phys.-Math. Sci. A. K. Rebrov

Section head — Dr. Phys.-Math. Sci. R. I. Mullyadzhanov

Section responsible secretary — M. A. Klykova

Section scientific committee  
Dr. Phys.-Math. Sci. S. V. Stankus  
Dr. Phys.-Math. Sci. V. Ya. Rudyak  
Dr. Phys.-Math. Sci. V. S. Berdnikov  
Dr. Phys.-Math. Sci. I. V. Naumov  
Dr. Phys.-Math. Sci. A. A. Vasilev  
Cand. Phys.-Math. Sci. D. F. Sikovskij  
Cand. Phys.-Math. Sci. E. Ya. Gatapova  
Cand. Phys.-Math. Sci. S. V. Starinskij  
Cand. Phys.-Math. Sci. I. V. Litvinov





## Моделирование испарения кинетическими методами

М. А. Батуева

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Для оптимизации размеров высокоэффективных теплообменников, паровых камер и тепловых трубок с микронными характерными размерами требуются новые фундаментальные знания о процессах с фазовыми переходами на микромасштабе. В [1] были измерены профили температур вблизи межфазной границы при испарении воды. В [2] разработан кинетический подход, описывающий рассматриваемое явление.

Настоящая работа посвящена прямому численному моделированию тепломассообмена на основе уравнений Больцмана. Результаты сравниваются с существующими аналитическими формулами для описания процесса испарения/конденсации на границе раздела жидкость — пар. В частности, сравниваются формулы Герца — Кнудсена, Шраге — Майлса и наши расчеты с помощью моментного метода и S-модели.

Подробно моделируется профиль температуры в слое Кнудсена и за его пределами. Особое внимание уделяется коэффициентам испарения и конденсации. Получено хорошее согласование между результатами, полученными моментным методом и численным решением кинетического уравнения S-модели в случае медленного испарения.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке  
Российского научного фонда (проект 20-19-00722).*

---

1. Gatapova E. Ya., Graur I.A., Kabov O.A., Aniskin V.M., Filipenko M.A., Sharipov F., Tadriss L. The temperature jump at water — air interface during evaporation // Int. J. Heat Mass Transfer. 2017. Vol. 104. P. 800–812.

2. Polikarpov A. Ph., Graur I.A., Gatapova E. Ya., Kabov O.A. Kinetic simulation of the non-equilibrium effects at the liquid-vapor interface // Int. J. Heat Mass Transfer. 2019. Vol. 136. P. 449–456.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Е. Я. Гагапова

## Исследование интенсификации теплообмена при кипении недогретой наножидкости методом градиентной теплотметрии

П. Г. Бобылев, М. Д. Виноградов, Н. Е. Кикоть, А. В. Бикмулин  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Изучение кипения недогретой жидкости является актуальной задачей. Любые теплообменные аппараты, в основе которых лежат фазовые преобразования, достаточно габаритны и металлоемки. Решение вопросов интенсификации процессов, протекающих в них, позволит не только снизить металлоемкость конструкций, но и повысит их эффективность и экономичность. Одной из самых больших проблем является получение распределения плотности теплового потока (ПТП) и ее связь с реальными условиями и режимами кипения.

В качестве экспериментальной модели использовался шар диаметром 34 мм из титанового сплава ВТ 22. Заподлицо с поверхностью устанавливался датчик теплового потока размерами  $3 \times 3 \times 0,3$  мм.

По результатам первой серии экспериментов были получены круговые теплограммы распределения локальной ПТП по поверхности шара в широком диапазоне температурных напоров [2].

Вторым этапом стало исследование теплообмена при кипении в 4 % взвеси  $Al_2O_3$  в воде. Сравнение результатов проводилось на уже исследованных режимах при температуре поверхности  $T_w = 464$  °С и температуре воды  $T_f = 64$  °С.

Результаты показали, что в 4 % взвеси  $Al_2O_3$  режим устойчивого пленочного кипения минимален по времени или вообще отсутствует. При этом время полного остывания модели сократилось в 2 раза. Для комплексного изучения процесса теплообмена при кипении в взвеси  $Al_2O_3$  необходимо получить полную картину кипения, а именно: устойчивое пленочное, переходный режим и пузырьковое кипение.

Следующим шагом стало повышение температуры взвеси до  $T_f = 80$  °С. Значительных изменений распределения ПТП в воде и 4 % взвеси  $Al_2O_3$  не наблюдалось.

---

1. Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Y., Pavlov A.V., Bobylev P.G. Gradient heatmetry for boiling of underheated water on spherical surface // J. Physics: Conference Ser. 2019. 1683(2).

Научный руководитель — д-р техн. наук, проф. С. З. Сапожников

## Влияние тепловой гравитационно-капиллярной конвекции на поля температуры в тонких стенках

Н. И. Боднева<sup>1,3</sup>, А. В. Михайлов<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный университет

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет

<sup>3</sup> Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

Авиатехника является одним из примеров тонкостенных конструкций. Прогресс в авиастроении требует увеличения коммерческой загрузки и снижения веса собственно конструкции. В связи с этим есть потребность в физических и численных моделях для оценок и точных расчетов температурных напряжений в конструкциях летательных аппаратов (ЛА) и другой термонапряженной техники. Конструкция ЛА может неравномерно разогреваться из-за разных факторов: аэродинамического нагрева; конвективных процессов теплообмена в топливных баках; нагрева, связанного с работой двигателя; излучения Солнца. В нестационарных условиях — при взлете, посадке, выходе на крейсерскую скорость — возникают существенные перепады температуры. Из-за больших термических напряжений, дополнительных к механическим нагрузкам, элементы конструкции могут разрушаться. Чтобы рассчитать ресурс элементов ЛА и любой тонкостенной конструкции, требуются достоверные знания о теплообмене в конструкции, о распределениях градиентов температуры и термических напряжений.

Проведены экспериментальные исследования по развитию нестационарной тепловой гравитационно-капиллярной конвекции в прямоугольной полости, частично заполненной жидкостью — имитатором топлива. После внезапного разогрева одной из вертикальных стенок электрическим током в слое жидкости со свободной поверхностью развивается течение тепловой гравитационно-капиллярной природы. С использованием современного тепловизора исследовано развитие течения и поля температуры на свободной поверхности слоя жидкости и влияние набегающего потока горячей жидкости на поля температуры в тонкой металлической стенке. Обработка тепловизионных фильмов позволила получить распределения температуры на свободной поверхности и тонкой стенке в зависимости от времени и построить поля изотерм.

*Исследования выполнены при поддержке грантом РФФИ № 19-48-540003р\_а и в части экспериментальных исследований при поддержке проекта ФНИ ГАН 2017–2020 (проект III.18.2.5, гос. рег. АААА-А17-117022850021-3).*

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук В. С. Бердников

## **Возбуждение цилиндрической детонации пространственно разнесенными инициаторами**

А. А. Борискин

Новосибирский государственный университет

В объеме горючей смеси от точки инициирования в зависимости от вложенной энергии распространяются волны горения или детонации со сферической симметрией. Более простая цилиндрическая симметрия расходящихся волн может быть сформирована в камерах сгорания в виде узкого зазора между параллельными плоскими пластинами. В данной работе для изучения вопроса о возбуждении цилиндрической детонационной волны (ДВ) использовался плоский канал с размером  $260 \times 300$  мм, выфрезерованный в цельном листе из дюралюминия на глубину 3 мм. Второй стенкой канала служил лист оптически прозрачного плексигласа, через который осуществлялась фотосъемка возбуждаемого процесса. Исследования выполнены на стехиометрической смеси ацетилен-кислород, в том числе при разбавлении аргоном.

Из различных инициаторов (электроразряд, взрывающаяся проволока, заряд взрывчатого вещества и т. д.) в данном исследовании предпочтение было отдано струйному механизму, когда в камеру сгорания вводится струя высокотемпературных продуктов реакции (схема дифракции ДВ при переходе из узкого канала в широкий). Критерием инициирования при этом выступает соотношение ширины узкого канала  $l$  и характерного размера детонационной ячейки  $a$ :  $l/a \geq n_*$ . Энергетическим эквивалентом такого способа инициирования смеси является работа расширения истекающих продуктов детонации за время схождения волн разрежения до оси струи.

Основные результаты:

1) схема пространственно разнесенных инициаторов при «оптимальном» расстоянии между ними позволяет добиться возбуждения детонации при меньших энергиях инициирования по сравнению с сосредоточенным зарядом;

2) обнаружены нестационарные режимы возможного возбуждения детонации при отражении затухающей волны от боковых стенок канала, что принципиально важно для вопросов взрывобезопасности;

3) определены базовые характеристики инициирования при разбавлении смеси аргоном.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. А. А. Васильев

## **Получение гидрофобных и супергидрофобных поверхностей на меди с помощью импульсной лазерной абляции**

М. М. Васильев

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

На сегодняшний день гидрофобные и супергидрофобные поверхности играют важную роль в различных приложениях, связанных с энергетикой, добычей полезных ископаемых и защитой окружающей среды, включая самоочистку, защиту от запотевания, коррозии, обледенения и бактерий [1]. Известно, что свойства смачивания поверхности различными жидкостями, например водой, определяются как ее топологией, так и ее химическим составом. Одним из методов, позволяющих тонко контролировать оба этих аспекта, является импульсная лазерная абляция, что обеспечивает применимость подхода для гидрофобизации поверхности вплоть до достижения супергидрофобных свойств [2].

Целью работы являлось экспериментальное исследование импульсного наносекундного лазерного воздействия на медную поверхность для изменения. В работе определены пороги модификации материала при воздействии фундаментальной и второй гармоники Nd:YAG лазера. Исследован вопрос изменения свойств смачивания поверхности меди при ее обработке в различных режимах. Для этого в экспериментах наносился рисунок на образец серий лазерных импульсов при варьировании интервалов между ними, их количества и интенсивности излучения. Обсуждается вопрос оптимизации процесса обработки для создания гидрофобных и супергидрофобных поверхностей.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 21-52-53025).*

---

1. Bhushan B., Jung Y.C. Natural and biomimetic artificial surfaces for superhydrophobicity, self-cleaning, low adhesion, and drag reduction // Prog. Mater. Sci. 2011. No. 56. P. 1–108.

2. Laser texturing of stainless steel under different processing atmospheres: From superhydrophilic to superhydrophobic surfaces // Pou P. et al. Appl. Surf. Sci. 2019. No. 475. P. 896–905.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук С. В. Старинский

**Аномальные ошибки и методы высокого порядка для прямого преобразования рассеяния и уравнения Кортевега — де Фриза**

А. С. Гудько

Новосибирский государственный университет

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

Рассматривается теория прямого преобразования рассеяния для нелинейных волновых полей, содержащих солитоны в одномерном уравнении Кортевега — де Фриза. Показано, что во многих случаях параметры положения солитонов не могут быть идентифицированы известными алгоритмами с помощью стандартной арифметики машинной точности, что делает солитоны в некотором смысле «неуловимыми» [1]. При помощи метода одевания удалось описать природу таких аномальных численных ошибок. Они демонстрируют экспоненциальную зависимость от размера вычислительной области  $L$  при наличии небольшой неопределенности в собственных значениях солитонов. Показано, что один из коэффициентов рассеяния теряет свои аналитические свойства из-за отсутствия компактного носителя волнового поля при  $L \rightarrow \infty$ . Наконец, продемонстрировано, что волновые поля произвольной сложности могут быть надежно проанализированы с использованием высокоточной арифметики и алгоритмов высокого порядка, основанных на разложении Магнуса [2, 3], с обеспечением точной информации об амплитудах солитонов, их скорости, положении и интенсивности излучения. Эта процедура устойчива даже при наличии шума, открывая широкие перспективы при анализе экспериментальных данных по распространению поверхностных волн на мелкой воде.

---

1. Gelash A., Mullyadzhyanov R. Anomalous errors of direct scattering transform // *Phys. Rev. E*. 2020. 101(5). 052206.

2. Mullyadzhyanov R., Gelash A. Direct scattering transform of large wave packets // *Opt. Lett.* 2019. 44(21). P. 5298–5301.

3. Gudko A., Gelash A., Mullyadzhyanov R. High-order numerical method for scattering data of the Korteweg — De Vries equation // *J. Phys.: Conference Ser.* 2020. 1677(1). 012011.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук Р. И. Мулладжанов

## **Измерение и изучение теплофизических характеристик наножидкостей на основе воды и этиленгликоля с углеродными нанотрубками**

Г. Р. Дашапилов, А. А. Шупик  
Новосибирский государственный университет

Наножидкости активно изучаются уже четверть века. При этом следует дифференцировать наножидкости с обычными сферическими частицами и с углеродными нанотрубками. И если процессы переноса в первых достаточно хорошо изучены и качественно понятны, то систематическое изучение этих процессов в наножидкостях с УНТ фактически только разворачивается.

Целью данной работы является экспериментальное изучение диффузии одностенных нанотрубок (ОУНТ) в жидкостях, вязкости и электропроводности наножидкостей с ОУНТ. В экспериментах использовались ОУНТ производства OCSiAl, а в качестве базовых жидкостей — вода + поливинилпирролидон (В + ПВП), этиленгликоль (ЭГ) и ЭГ + ПВП. Массовая концентрация ОУНТ варьировалась от 0,05 до 0,2 %. Диффузия наночастиц изучалась методом динамического рассеяния света, а электропроводность — 4-контактным методом. Измерения вязкости и изучение реологии наножидкостей выполнялись с помощью ротационного вискозиметра Brookfield DV-2T со сменными шпинделями. Все наножидкости приготавливались двухшаговым методом: механическим перемешиванием и ультразвуковой обработкой.

Показано, что все изученные наножидкости оказываются неньютоновскими, причем псевдо- или вязкопластическими, хотя базовые жидкости ньютоновские. Установлена зависимость индекса жидкости и параметра консистенции от концентрации ОУНТ, их размера, температуры и времени ультразвуковой обработки. Измерения электропроводности показали, что в наножидкости она растет практически линейно с концентрацией наночастиц и, естественно, существенно зависит от базовой жидкости. При добавлении ОУНТ в ЭГ электропроводность возрастает почти на 5 порядков при используемых концентрациях ОУНТ. Установлено, что она зависит от размера агломератов ОУНТ в жидкости. В данном случае наножидкости с большей переданной энергией имели меньший средний размер агломератов ОУНТ.

*Работа выполнена при частичном финансировании  
Российского научного фонда (проект № 20-19-00043).*

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. В. Я. Рудяк

## **Численное моделирование закрученного течения двух несмешивающихся жидкостей в цилиндрическом контейнере методом решеточных уравнений Больцмана**

К. С. Кинзин

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Закрученные двухжидкостные потоки представляют большой интерес как для фундаментальных исследований, так и для практического применения в технологической индустрии. В последнее время интерес к этой проблеме активно растет в связи с открытием все новых областей использования, например, их исследование достаточно актуально для так называемых воздушных вихревых биореакторов. Создание такого закрученного потока жидкостей различной плотности может вестись посредством герметичного вертикального цилиндрического контейнера с вращающейся крышкой [1]. При вращении крышки цилиндра находящиеся внутри вещества начинают двигаться без существенного перемешивания между собой. В стационарном ламинарном режиме течения наблюдаются вертикальные вихри.

Особый интерес представляет граница раздела двух жидкостей. Ожидается, что около границы раздела двух сред будут образовываться новые циркуляционные ячейки, которые будут расширяться. Для понимания явлений, создающихся в данной системе, нужно смоделировать эксперимент методом решеточных уравнений Больцмана.

Данный метод представляет собой решение кинетического уравнения для некоторого набора псевдочастиц. Вводится функция распределения, которая представляет собой некоторое обобщение плотности. Эволюция распределения на каждом временном шаге ведется посредством двух последовательных шагов: распространения и соударения. На первом шаге направленные частицы перемещаются в соответствующие соседние узлы, а на втором происходит изменение функций распределения из-за столкновений частиц между собой. Преимуществом описанного метода является то, что мы можем вести расчеты одновременно на разных участках сетки, что увеличивает скорость вычислений.

Было произведено моделирование описанного эксперимента методом решеточных уравнений Больцмана и проведен анализ полученных данных.

---

1. Naumov I. V. et al. Slip at the interface of a two-fluid swirling flow // Phys. Fluids. 2018. Vol. 30. No. 7. P. 074101.



## Численное моделирование процессов газового турбулентного горения

А. Д. Кундашкин

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

В последние годы все больше внимания уделяется изучению экономичного сжигания предварительно смешанного топлива, так как оно обеспечивает низкие выбросы  $\text{NO}_x$  и высокую топливную экономичность для многих устройств сгорания. Стратифицированные смеси с неоднородной концентрацией топлива могут давать лучшую стабильность пламени и воспламеняемость по сравнению с предварительно смешанным пламенем в условиях очень скудного топлива и часто намеренно используются в практических системах сгорания, например в двигателях со стратифицированным зарядом.

В данной работе исследуется изотермическая аэродинамика в цилиндрической камере с двумя входными потоками, направленными по оси цилиндра. Сетка, описывающая камеру, была построена в программе Pointwise. Моделирование поля скоростей и распределение давлений осуществлялись с помощью программы OpenFOAM. Данные, смоделированные этим способом, хорошо согласуются с экспериментальными результатами, полученными в [1].

---

1. Zhou R. et al. Flow field measurements of a series of turbulent premixed and stratified methane/air flames // *Combust. Flame*. 2013. Vol. 160. No. 10. P. 2017–2028.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук Р. И. Мулляджанов

## **Исследование поверхностных свойств растворов вода — ПАВ**

Ю. А. Пещенюк, А. А. Семенов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Непрерывное расширение области применения пульсационных тепловых труб стимулирует постановку новых экспериментальных и теоретических задач. Одним из актуальных вопросов является перенос начала разрыва пленки жидкости и дальнейшего осушения рабочей поверхности в область более высоких тепловых потоков.

Проведено исследование по изучению поверхностных свойств растворов вода — ПАВ в зависимости от концентрации. В качестве ПАВ использовались СТАВ, SLS и ТВИН-80. Выбор веществ обусловлен их широким распространением в промышленном использовании, а также отличными друг от друга зарядными композициями (катионным, неионным и анионным типами ПАВ). Свойства растворов измерялись на высокоточном тензиометре Kruss K100 методом пластины Вильгельми.

В ходе данного исследования были получены результаты по температурной зависимости поверхностного натяжения растворов вода — ПАВ для различных концентраций. Также получены данные по краевому углу для промышленной меди в широком диапазоне температур растворов. Знак первой производной поверхностного натяжения по температуре для растворов СТАВ отрицательный, что приводит к оттоку жидкости от более нагретых областей к менее нагретым и последующему разрыву пленки. Тогда как для растворов SLS эта производная может быть положительной. В связи с этим для дальнейших исследований были выбраны растворы SLS. Целью нашего исследования является повышение эффективности работы пульсационных тепловых труб.

Для выбранных концентраций растворов SLS в воде были проведены серии экспериментов на установке Kruss DSA100 по измерению краевого угла методом покоящейся капли в широком диапазоне начальных температур подложки. Проведено сравнения результатов, полученных двумя разными методами.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-79-10096.*

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук И. С. Вожаков

**Синтез нанокompозитных материалов на основе субоксида кремния  
и наноструктур благородных металлов  
методом импульсной лазерной абляции**

А. А. Родионов

Новосибирский государственный университет

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

Синтез композитных материалов с наноструктурными включениями является перспективным направлением для исследований. Встраивание в матрицу наноразмерной фазы позволяет контролируемо изменять характеристики материала. Одним из перспективных методов синтеза таких материалов является импульсная лазерная абляция (ИЛА). В настоящей работе нанокompозитный материал был получен путем последовательного осаждения наноструктур благородных металлов (Ag, Au) и субоксида кремния методом ИЛА.

Для облучения мишеней использовалась вторая гармоника Nd:YAG лазера с длительностью импульса 8 нс. Синтез производился в кислород-аргоновой смеси в широком диапазоне давлений. Конструкция камеры позволяла контролировать давление каждой из составляющих смеси. Для анализа образцов использовалась спектроскопия в видимом и ИК-диапазоне, СЭМ-анализ и эллипсометрия.

Нами была исследована лазерная абляция кремниевых и металлических мишеней в широком диапазоне условий. Изучено влияние наноструктур металла на эффективность окисления нанокompозитного материала и его оптические свойства. Проанализирована эффективность взаимодействия лазерного излучения с кремнием, проведено сопоставление результатов лазерного сверления и гравиметрических измерений.

*Работа выполнена благодаря гранту РФФ № 20-79-00139.*

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук С. В. Старинский

**Ламинарно-турбулентные переходы при конвекции Рэлея — Бенара в слоях жидкости со свободной границей**В. О. Рябов<sup>1,3</sup>, А. В. Михайлов<sup>2,3</sup><sup>1</sup> Новосибирский государственный университет<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет<sup>3</sup> Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

Конвекция Рэлея — Бенара (РБК) — пространственно организованное (когерентное) течение жидкости в горизонтальных слоях, подогреваемых снизу. В слоях или ограниченных фрагментах слоев при наличии свободной верхней границы слоя жидкости течение имеет тепловую гравитационно-капиллярную природу. Относительная роль сил плавучести и термокапиллярного эффекта определяется значениями и соотношением чисел Рэлея ( $Ra$ ) и Марангони ( $Ma$ ). Данный тип конвекции наблюдается в технологических процессах и природных условиях вблизи границ раздела жидкость — газ. Знания особенностей и параметров РБК необходимо, например, в такой наукоемкой технологии, как выращивание кристаллов из расплавов. РБК является также классической задачей физической гидродинамики, и актуальной задачей является изучение ламинарно-турбулентных переходов (ЛТП) в данном типе течений. Новые данные о ЛТП позволяет получить современная тепловизионная техника.

С использованием современного тепловизора были проведены измерения нестационарных полей температуры на поверхности слоя этилового спирта в режиме охлаждения после предварительного нагрева. В результате обработки кадров тепловизионного фильма были получены мгновенные и усредненные по площади распределения температуры по двум координатам на свободной поверхности слоя жидкости. По распределениям температуры можно оценить длины волн основных и вторичных конвективных ячеек, определить локальные градиенты температуры и вклад термокапиллярного эффекта в формирование теплового гравитационно-капиллярного течения в приповерхностном слое жидкости. Построены поля изотерм на свободной поверхности жидкости. Полученные профили и поля температуры необходимы для определения границ ячеек, построения полей корреляции, оценивающих влияние структур течения друг на друга.

*Исследования выполнены при поддержке грантом РФФИ № 19-48-540003р\_а и в части экспериментальных исследований при поддержке проекта ФНИ ГАН 2017-2020 (проект III.18.2.5, гос. рег. АААА-А17-117022850021-3).*

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук В. С. Бердников

## Теплоемкость сверхлегкого сплава Mg70Li30 в интервале температур 300–825 К

Д. А. Самошкин, А. Р. Хайрулин

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

Поиск все более и более легких конструкционных материалов остается актуальной задачей для аэрокосмической и автомобильной промышленности, в области портативной электроники и т. д. Одним из самых привлекательных решений этой задачи является использование сверхлегких сплавов магния с литием в качестве основы для таких материалов. Среди сплавов магний — литий выделяется конгруэнтно плавящийся сплав Mg70Li30 с содержанием 30 ат. % лития, обладающий не только низкой плотностью, но и высокой пластичностью. Надежные данные по многим физико-химическим свойствам (в том числе по теплоемкости) этого сплава необходимы для анализа перспектив его практического использования. Однако обзор имеющихся на данный момент работ, посвященных исследованию сплавов магний — литий, показал, что до настоящего времени измерения теплоемкости сплава Mg70Li30 вообще не проводились.

В данной работе проведены измерения теплоемкости сверхлегкого сплава магний — литий с содержанием 30 ат. % Li в интервале температур от 300 до 825 К методом дифференциальной сканирующей калориметрии на установке DSC 404 F1. Для изготовления образцов сплава Mg70Li30 были использованы слитки магния и лития чистотой 99,95 вес. %. Исследуемые образцы укладывали в тигли из нержавеющей стали или платиновые тигли с корундовыми вставками и платиновыми крышками. Измерения проводились в проточной атмосфере аргона (20 мл/мин) чистотой 99,998 об. %. Погрешность измерений составила 2–3 %.

В итоге были получены новые надежные экспериментальные данные по теплоемкости сплава Mg70Li30 в интервале температур 300–825 К. Показано, что в интервале температур 300–750 К значения молярной теплоемкости сплава Mg70Li30 совпадают с теплоемкостью чистого магния с точностью, не превышающей погрешность измерений. Также обнаружена область температур (570–700 К) со слабовыраженным структурным переходом в сплаве Mg70Li30, что указывает на недостаточную точность и надежность имеющихся в литературе данных о фазовых равновесиях в твердой системе Mg — Li.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-79-10025).*

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. С. В. Станкус

**Статистический анализ распределения паровой фазы  
в кавитационном течении на основе PIV-измерений в жидкой фазе**

А. С. Северин

Новосибирский государственный университет

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

Применен новый метод анализа структуры двухфазных дисперсных течений, основанный на статистической обработке PIV-данных о распределении скорости жидкой фазы, к случаю нестационарного кавитационного обтекания гидрокрыла. При расчете полей скорости итерационным кросс-корреляционным алгоритмом по исходным PIV-данным учитывается концентрация трассеров, находящихся в потоке. В случае когда концентрация трассеров ниже заданного порога, вектор скорости для данной расчетной ячейки не рассчитывается, и такому вектору присваивается статус «неопределенный».

Анализ статусов векторов скорости по всем реализациям (независимым измерениям) проводился с помощью собственного кода, написанного на языке Python 3, в разных точках потока. В данном подходе рассматриваются последовательности «неопределенных» векторов, следующих подряд друг за другом. Предполагается, что такие вектора скорости соответствуют паровой фазе. По полученным последовательностям строятся функции плотности вероятности в виде гистограмм для повторяющихся событий в разных областях течения.

Если такая повторяемость вызвана статистически независимыми событиями (случайное появление паровых образований), то вероятность таких событий представляет собой произведение вероятностей для однократного события. Таким образом, зависимость вероятности таких событий от числа повторений  $n$  имеет вид показательной функции:  $R_{(n)} \sim q^n$ , где  $q$  — вероятность однократного появления.

Данный метод анализа позволяет определить статистический закон распределения паровой фазы по PIV-измерениям для жидкой фазы. Наличие такой информации в каждой точке потока позволяет определить положение и характерные размеры паровой каверны и ее пульсирующей части для нестационарных режимов течения, а также оценить влияние кавитации на основное течение.

Научный руководитель — К. С. Первунин

## **Динамика капли жидкости, падающей на нагретую поверхность**

В. О. Ситников

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Капли являются ключевым объектом во многих промышленных отраслях, таких как камеры сгорания двигателей, струйная печать, спрейное охлаждение [1]. Конечный результат процесса охлаждения при помощи спрея зависит от множества факторов, включая интегральные характеристики системы и характеристики сопла, физические свойства жидкости, поверхности и условия окружающей среды. Эти особенности с фундаментальной точки зрения часто моделируются на основе результатов, полученных при исследовании соударения, динамики и испарения одиночной капли на нагретой поверхности [2]. Механизмами теплообмена в двухфазном режиме являются испарение с поверхности тонкой пленки, вторичная нуклеация, теплопередача на линии контакта.

В данной работе представлены экспериментальные данные по динамике капли жидкости, падающей на нагретую поверхность для различных чисел Вебера и в широком диапазоне изменения температуры твердой поверхности 25–180 °С. Определены основные стадии и скорость контактной линии на различных стадиях в зависимости от температуры. Рассмотрены температурные режимы, при которых происходит кипение тонкой пленки жидкости [2]. Также исследована динамика испарения капель воды на подложке при температуре подложки выше температуры кипения, но ниже температуры Лейденфроста. Динамика процесса испарения была аналогична классическому диффузионному испарению сидячей капли на нагретой поверхности с пиннингом и депиннингом, но время жизни капли значительно короче.

---

1. Khandekar S., Muralidhar K., Sahu G., Gatapova E. Ya., Kabov O.A., Hu R., Luo X., Zhao L. Cooling of high-power LEDs by liquid sprays: Challenges and Prospects // *Appl. Therm. Eng.* 2021. Vol. 184. 115640.

2. Gatapova E. Ya., Gatapova K. B. Bubble dynamics in thin liquid film and breakup at drop impact // *Soft Matter*. 2020. Vol. 16. P. 10397–10404.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Е. Я. Гагапова

## Прямое численное моделирование пламени в горелке Бунзена

Д. А. Сладная

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

В последние десятилетия особое внимание ученых сосредоточено на изучении процесса сажеобразования. Наличие сажи в атмосфере представляет серьезную угрозу для жизни и здоровья человека. Осаждаясь на поверхности земли, частицы сажи существенно влияют на изменение климата, в том числе способствуют глобальному потеплению.

Сажа является продуктом неполного сгорания углеводородов. Процесс сажеобразования можно разделить на 4 этапа: образование подобных структур путем коагуляции молекул ПАУ (полиароматические углеводороды), рост поверхности сажи, коагуляция сажи и последующее ее окисление. Существуют различные полуэмпирические выражения для расчета объемной доли сажи на том или ином этапе, но единого и точного механизма описания процесса сажеобразования на сегодняшний день нет.

Данная работа посвящена прямому численному моделированию предвзрительно перемешанных ламинарных углеводородных пламен с различными начальными условиями. Объектом исследования является горелка Бунзена — круглая струя со смесью метана  $\text{CH}_4$  и воздуха при небольшом числе Рейнольдса ( $\sim 300$ ). В качестве решателя химических реакций выбран пакет OpenSMOKE++. Данный модуль позволяет учитывать детальную кинетику, разрешает систему уравнений для 500–2000 химических реакций, включающих 50–500 реагентов. Для разрешения гидродинамической задачи использован расчетный пакет OpenFOAM. Уравнения решены методом конечных объемов в сжимаемой постановке со вторым порядком точности по пространству (центральные разности) и времени (схема Кранка — Николсона). Расчет проведен в двумерной осесимметричной постановке. Рассмотрено два случая с различным составом смеси: с соотношением входных мольных концентраций  $\text{CH}_4 : \text{O}_2 = 1 : 2$  и  $\text{CH}_4 : \text{O}_2 = 1,5 : 2$ . Проанализированы распределения полей скорости, давления и концентраций реагирующих веществ.

Полученные результаты качественно повторяют экспериментальные наблюдения. На данном этапе работы отслежена динамика высокомолекулярных компонент смеси — ПАУ, являющихся прекурсорами образования сажи. Дальнейшее изучение физических моделей позволит получить новые детали знания о закономерностях сажеобразования.

*Данная работа поддержана грантом РФФ (№ 19-79-10225).*

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук Р. И. Мулляджанов



## Линейный анализ устойчивости затопленной ламинарной струи

Д. А. Созинов

Новосибирский государственный университет,  
Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

В данной работе рассматривается линейный анализ устойчивости затопленной ламинарной струи [1]. Для получения спектра при анализе пространственной устойчивости был применен метод коллокаций [2] с построением решения в точках Лобатто. Прямая запись систем уравнений на граничных точках невозможна из-за возникающей особенности. Для решения возникшей проблемы были внедрены граничные условия на одну из используемых функций. Для проверки корректности численного решения произведено сравнение полученных данных с аналитическим решением системы при некоторых заданных величинах собственных чисел. Растущие возмущения были обнаружены для азимутальных волновых чисел  $m = 0$  и  $m = 1$ .

- 
1. Мулляджанов Р.И., Яворский Н.И. Линейная гидродинамическая устойчивость дальнего поля затопленной ламинарной струи // Науч.-техн. ведомости Санкт-Петерб. гос. политехн. ун-та. 2018. Т. 11(3). С. 2304–9782.
  2. Schmid P., Henningson D., Jankowski D. Stability and Transition in Shear Flows // Appl. Math. Sci. 2002. Vol. 142, 571. 978-1461265641.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук Р. И. Мулляджанов

**Исследование распределений скорости нестационарного вихревого течения в проточной части модели гидротурбины для нахождения оптимальных режимов ее работы**

Д. А. Суслов

Новосибирский государственный университет,  
Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

Одной из проблем эксплуатации гидротурбин является их оптимизация на работу в заданных условиях. На отдельной местности энергию можно получать на малых ГЭС, такие системы надежны и автономны в работе.

Целью работы является разработка экспериментального метода нахождения оптимальных режимов работы микрогидротурбины с помощью воздушной модели турбины пропеллерного типа. Оптимальному режиму с наибольшим КПД в данной модели соответствует расход воздуха  $Q_c = 175 \text{ м}^3/\text{ч}$  при частоте вращения завихрителя  $n_c = 2273 \text{ об/мин}$  [1].

Для режимов с разными расходами воздуха от  $0,63Q_c$  до  $1,85Q_c$  получены профили компонент скорости с применением лазерного доплеровского анемометра. Частота вращения завихрителя была фиксированной и равной  $n_c$ . Найдена зависимость степени закрутки вихревого течения от расхода воздуха в широком диапазоне режимов работы. Обнаруженная значительная закрутка потока при неоптимальных режимах работы приводит к потерям энергии на генерацию спирально-вихревых структур и снижению эффективности гидротурбины в целом. Параметр крутки обращается в ноль при несколько большем расходе ( $1,1Q_c$ ), что расходится с данными численного моделирования [1].

Построено поле скорости в режиме нулевой закрутки для исследования оптимального режима течения. Обнаружено, что поток равномерен по аксиальной скорости, однако имеется в центральной части завихрителя слабая перекрутка потока. Путем анализа распределений скорости за рабочим колесом показано, что для создания микрогидротурбины можно рассматривать нулевой уровень параметра крутки как наиболее оптимальный.

*Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МК-1504.2021.4.*

---

I. Sonin V. et al. Study of the velocity distribution influence upon the pressure pulsations in draft tube model of hydro-turbine // IOP Conference Series: Earth Environ. Sci. IOP Publishing. 2016. Vol. 49. No. 8. P. 082020.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук И. В. Литвинов

**Исследование конвективного теплообмена вблизи цилиндров**

В. В. Сучок, В. В. Сероштанов, Н. А. Жидков, М. Д. Селезнева  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Повышение энергетической эффективности оборудования — одна из важнейших задач энергетики. Решение данной проблемы не представляется возможным без экспериментальных исследований. Наиболее распространенными элементами теплообменных аппаратов являются трубы различного сечения, однако в данный момент большинство экспериментальных данных получены для одиночного цилиндра. На практике эффекты загромождения в трубных пучках рассматриваются как «добавки» к закономерностям, установленным для одиночной трубы, что может привести к ошибкам при проектировании и создании теплообменного оборудования. Проведено исследование с помощью методики градиентной теплотометрии и PIV.

Экспериментальная модель состоит из специальной стойки, на которую устанавливаются друг за другом два или три полых цилиндра, обогреваемых насыщенным водяным паром при атмосферном давлении. Цилиндр проворачивается вокруг оси на угол  $\varphi$ . Расстояние между цилиндрами  $S$  менялось в пределах от 0,5 до 4 калибров. На последний цилиндр ряда устанавливается градиентной датчик теплового потока из монокристаллического висмута, принцип работы которого основан на поперечном эффекте Зеебека: тепловой поток вызывает пропорциональную ему термоЭДС в анизотропных слоях материала.

Опыты проводились в диапазоне чисел Рейнольдса от 400 до 29800. В каждом опыте измерена температура набегающего потока, в то время как температура поверхности цилиндров поддерживалась постоянной. Это позволило рассчитать местные и осредненные коэффициенты теплоотдачи по данным градиентной теплотометрии и термометрии. С помощью PIV были получены мгновенные и осредненные поля скорости, что совместно с теплотометрией позволяет выявить особенности течения и теплообмена вблизи цилиндров.

Полученные результаты послужат основой для изучения течения и теплообмена в пучках труб и интенсификации теплообмена.

Научный руководитель — проф. В. Ю. Митяков

**Калорические свойства жидкого сплава  $\text{Cs}_{60}\text{Pb}_{40}$** 

А. Р. Хайрулин

Новосибирский государственный университет  
Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

Жидкие сплавы щелочных металлов со свинцом относятся к классу веществ, которые, согласно существующим в литературе предположениям, склонны к образованию плотных ионных ассоциатов, диссоциирующих с ростом температуры. Образование ионных связей в таких системах связано с большой разницей в электроотрицательности компонентов, что приводит к тому, что свинец (имеющий электроотрицательность 2,33 по Полингу) выступает в роли окислителя. Существование таких ионных комплексов косвенно подтверждается как существующими нейтронографическими исследованиями, так и аномальным поведением структурно-чувствительных (в частности, теплоемкости) свойств систем щелочной металл — свинец при определенных стехиометрических концентрациях. Предполагается, что в системе Cs–Pb максимальная концентрация ионных комплексов достигается в расплаве, содержащем 50 ат. % Pb. Для построения концентрационной зависимости теплоемкости необходимо провести измерения калорических свойств составов с различным содержанием свинца.

В данной работе на массивном калориметре смешения с изотермической оболочкой были проведены измерения энтальпии и теплоемкости жидкого сплава цезий — свинец, содержащего 40 ат. % Pb. Методом термического анализа была определена температура ликвидуса, составляющая  $802 \pm 3$  К. Далее, в интервале температур от температуры ликвидуса до 1076 К было проведено 12 измерений энтальпии образца. Данные по энтальпии аппроксимировались полиномом первой степени, а теплоемкость была получена дифференцированием полученной температурной зависимости. Отклонение теплоемкости от расчета по закону идеального раствора достигает 60 %.

Таким образом, были получены новые надежные экспериментальные данные по энтальпии и теплоемкости сплава системы Cs–Pb, содержащего 40 ат. % свинца в жидком состоянии. Существенное превышение теплоемкости от расчета по правилу аддитивности косвенно подтверждает имеющиеся в литературе предположения о наличии в структуре таких расплавов ионных ассоциатов, разрушающихся с ростом температуры.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-10023).*

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. С. В. Станкус

**Регенеративные теплообменники для утилизации теплоты  
вентиляционных выбросов**

А. В. Черкасова, Д. А. Хлюстов

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет

Целью данной работы является экспериментальное исследование нового типа теплоаккумулирующего теплообменника при реверсивных режимах течения воздуха в системах вентиляции в климатических условиях Сибири. Следует отметить, что на разработанный тип теплообменника авторами в составе коллектива был получен патента РФ № 2727106. Особенностью данного теплообменника является наличие фазового перехода, который позволяет существенно увеличить время переключения между реверс-процессами (приточка/вытяжка) и тем самым повысить эффективность воздухообмена.

Для исследования тепловой эффективности теплообменника был создан специальный стенд. В натуральных условиях были измерены параметры расхода воздуха, а также значения температур в реверсивных режимах течения. Полученные значения сравнивались с данными для стандартного выпускаемого теплообменного (пропиленового) модуля. Показано, что коэффициент теплоутилизации для пропилена составил 24 %, для исследуемой насадки — 49 % при толщине 40 мм.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ  
в рамках научного проекта № 19-08-00694.*

Научный руководитель – канд. техн. наук, доц. И. В. Мезенцев



# **ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУКАХ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ**

Научный руководитель секции — д-р физ.-мат. наук, проф. С. А. Дзюба

Председатель секции — д-р физ.-мат. наук, проф. С. В. Цыбуля

Ответственный секретарь секции — В. В. Никулин

## **Экспертный совет подсекции «Биомедицинская физика»**

д-р физ.-мат. наук, проф. В. П. Мальцев, д-р хим. наук Н. Э. Поляков, канд. физ.-мат. наук М. А. Юркин, канд. физ.-мат. наук А. А. Ломзов, канд. физ.-мат. наук В. В. Яньшолё, канд. физ.-мат. наук Д. И. Строкотов, канд. физ.-мат. наук А. Г. Марьясов, канд. физ.-мат. наук Ю. И. Глазачев, канд. физ.-мат. наук В. М. Некрасов

## **Экспертный совет подсекции «Физические методы исследования**

### **функциональных материалов и наносистем»**

Акад. РАН В. В. Болдырев, д-р физ.-мат. наук, проф. С. В. Цыбуля, д-р хим. наук, проф. Е. В. Болдырева, д-р физ.-мат. наук, проф. С. А. Громилов, д-р физ.-мат. наук Я. В. Зубавичус, д-р физ.-мат. наук А. Н. Шмаков, д-р хим. наук Б. А. Захаров, д-р хим. наук Э. М. Мороз, д-р хим. наук В. А. Садыков, д-р техн. наук Д. В. Дудина, д-р геол.-минерал. наук Т. Б. Беккер, канд. физ.-мат. наук С. С. Якушкин, канд. физ.-мат. наук Д. А. Яценко, канд. хим. наук О. А. Булавченко, канд. хим. наук В. Л. Кузнецов, канд. хим. наук С. Г. Архипов, канд. хим. наук А. В. Нартова, канд. хим. наук Е. А. Лосев, канд. хим. наук В. Ю. Комаров, канд. хим. наук И. А. Туманов, канд. геол.-минерал. наук С. В. Рашенко, В. В. Никулин

## **Экспертный совет подсекции «Химическая и биологическая физика»**

д-р физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН Н. В. Суровцев, д-р физ.-мат. наук, проф. С. А. Дзюба, д-р хим. наук, проф. А. А. Онищук, д-р хим. наук, проф. А. В. Бакланов, д-р хим. наук, проф. Н. П. Грицан, д-р физ.-мат. наук Н. Н. Медведев, канд. физ.-мат. наук С. Л. Вебер, канд. физ.-мат. наук В. Г. Киселев, канд. физ.-мат. наук Д. И. Колоколов

# PHYSICAL METHODS IN NATURAL SCIENCES

Section scientific supervisor — Dr. Phys.-Math., Prof. S. A. Dzuba

Section head — Dr. Phys.-Math., Prof. S. V. Tsybulya

Responsible secretary — V. V. Nikulin

## **Section scientific committee “Biomedical Physics”**

Dr. Phys.-Math., Prof. V. P. Maltsev, Dr. Chem. N. E. Polyakov, Cand. Phys.-Math. Yu. I. Glazachev, Cand. Phys.-Math. M. A. Yurkin, Cand. Phys.-Math. A. A. Lomzov, Cand. Phys.-Math. V. V. Yanshole, Cand. Phys.-Math. D. I. Strokotov, Cand. Phys.-Math. A. G. Maryasov, Cand. Phys.-Math. V. M. Nekrasov

## **Section scientific committee**

### **“Physical methods of functional materials and nanosystems”**

Acad. RAS V. V. Boldyrev, Dr. Phys.-Math., Prof. S. V. Tsybulya, Dr. Chem, Prof. E. V. Boldyreva, Dr. Phys.-Math., Prof. S. A. Gromilov, Dr. Phys.-Math. Ya. V. Zubavichus, Dr. Phys.-Math. A. N. Shmakov, Dr. Chem. B. A. Zakharov, Dr. Chem. E. M. Moroz, Dr. Tech. D. V. Dudina, Dr. Chem. V. A. Sadykov, Dr. Geol.-Min. T. B. Bekker, Cand. Phys.-Math. S. S. Yakushkin, Cand. Phys.-Math. D. A. Yatsenko, Cand. Chem. O. A. Bulavchenko, Cand. Chem. V. L. Kuznetsov, Cand. Chem. S. G. Arkhipov, Cand. Chem. A. V. Nartova, Cand. Chem. I. A. Tumanov, Cand. Chem. V. Yu. Komarov, Cand. Chem. E. A. Losev, Cand. Geol.-Min. S. V. Rashchenko, V. V. Nikulin

### **Section scientific committee “Chemical and Biological Physics”**

Dr. Phys.-Math., Assoc. Prof. N. V. Surovtsev, Dr. Phys.-Math., Prof. S. A. Dzuba, Dr. Chem., Prof. A. A. Onishchuk, Dr. Chem., Prof. A. V. Baklanov, Dr. Chem., Prof. N. P. Gritsan, Dr. Phys.-Math. N. N. Medvedev, Cand. Phys.-Math. S. L. Veber, Cand. Phys.-Math. V. G. Kiselev, Cand. Phys.-Math. D. I. Kolokolov



# БИОМЕДИЦИНСКАЯ ФИЗИКА

УДК 53.06

## **Плазменная функционализация биodeградируемых наноматериалов с помощью барьерного разряда атмосферного давления для иммобилизации белковых молекул**

А. М. Асташова

Научно-исследовательский институт клинической  
и экспериментальной лимфологии — филиал  
Института цитологии и генетики СО РАН, Новосибирск

Тканевая инженерия в настоящее время является одной из самых многообещающих стратегий восстановления поврежденных органов и тканей. Фибриллярная пористая структура нановолокон поликапролактона (PCL), полученных методом электроспиннинга, имитирует структуру внеклеточного матрикса. Однако их поверхность гидрофобна и непригодна для обеспечения жизнеспособности клеток. Для увеличения биодоступности нановолокон PCL используется метод функционализации с помощью барьерного разряда атмосферного давления при разной концентрации поступающих в камеру газов. Это экологически чистая современная технология электрофизической модификации. Подобная обработка используется для придания различным материалам необходимых свойств без изменения их морфологии. Осаждение COOH-групп на поверхность волокна повышает его биосовместимость а также позволяет связывать белковые молекулы как за счет ионного взаимодействия, так и за счет образования ковалентной связи карбоксильных групп, находящихся на поверхности нановолокна с аминокруппами белков.

Цель работы состоит в исследовании влияния параметров процесса плазменной модификации поверхности нановолокон PCL с последующим присоединением белков на жизнеспособность и функциональную активность мезенхимальных стромальных клеток.

Для определения биодоступности и биоактивности полученных материалов в зависимости от количества COOH-групп и связанных белковых молекул оценен характер и динамика адгезии мезенхимальных стромальных клеток человека, а также их пролиферативная активность.

В результате работы были определены оптимальные условия плазменной модификации, способствующие более равномерному распределению адгезированных клеток, а также увеличению их пролиферативной активности.

Научный руководитель — канд. биол. наук А. О. Соловьева

## **Гемодинамическая реакция на двигательные стимулы с использованием оксиметрии и разработанного ИК-спектрометра**

Д. А. Буянов<sup>1</sup>, С. В. Забодаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский институт электронной техники, Москва

<sup>2</sup>Медицинские компьютерные системы, Москва

Оксиметрия — это неинвазивный метод измерения тканевой сатурации (насыщения гемоглобина кислородом), использующий спектрометрию в красном и ближнем инфракрасном диапазонах. Ближняя инфракрасная спектрометрия (БИКС) допускает мониторинг изменения гемодинамики мозга наподобие дорогостоящего аналога — функциональной магнитно-резонансной томографии. Метод позволяет неинвазивно детектировать функциональную активность тканей, их метаболизм, транспорт кислорода, изменение содержания окси- и деоксигемоглобина в зависимости от активности мозга.

Разработан 4-канальный БИК-спектрометр (NIRS4, Медицинские компьютерные системы, Россия), который может быть использован для исследования мозга или мышечных тканей. Устройство состоит из трехчастотного светодиодного излучателя и четырех фотоприемников, расположенных на расстоянии 25 мм от излучателя. Длины волн излучателя: 770, 810 и 850 нм. NIRS4 работает в соответствии с модифицированным законом Бугера — Ламберта — Бера.

Для оценки гемодинамического ответа мозга на двигательные стимулы использовались два NIRS4. Устройства были размещены на голове испытуемого в положениях С3 и С4 по международной системе «10–20». Был проведен эксперимент: испытуемый находился в положении сидя напротив компьютера. На мониторе появлялись команды «Старт» (2 с) и «Стоп» (12 с) по заранее сформированному алгоритму. При появлении команды «Старт» испытуемый стучал указательным пальцем правой руки по столу. Во время команды «Стоп» испытуемый находился в расслабленном положении, не двигал конечностями и исключал мысли о движении. Общее количество циклов «Старт»/«Стоп» составило 30 повторений.

Полученные кривые оксигенированного и деоксигенированного гемоглобина повторяют результаты аналогичных исследований с использованием зарекомендовавших себя БИК-спектрометров, что можно классифицировать как доказательство работоспособности разработанного устройства.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. С. В. Селищев

## **Использование медицинского Nd:YAG-лазера для безыгольной венепункции**

Р. С. Владимиров

Институт химической кинетики и горения  
им. В. В. Воеводского СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Современные методы забора венозной крови предполагают использование специальных вакуумных пробирок (вакутейнеров), оснащенных двухсторонними иглами. Стандартные размеры игл варьируются в пределах 0,6–1,2 мм, внутренний диаметр — в пределах 0,34–0,84 мм. После операций забора крови часто требуется некоторое количество времени для того, чтобы остановить кровь. Нередки случаи появления гематом. Предполагается, что методы безыгольной венепункции на основе методов абляции с использованием высокомоощных импульсных лазеров теоретически лишены всех этих недостатков.

Целью данной работы является изучение зависимости характеристик получаемых отверстий (диаметра, формы, термических эффектов и т. д.) от параметров лазерной установки. При исследовании данных характеристик станет возможным получение отверстий на коже человека с заданными характеристиками, в том числе с минимальными повреждениями и побочными эффектами.

В процессе работы были рассчитаны параметры и сконструирована оптическая система для проведения экспериментов. Эксперименты проводились на нескольких образцах биологических тканей. В ходе экспериментов установлено статистическое распределение характеристик отверстий в зависимости от параметров оптической системы.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук К. В. Гилев

## Моделирование изменения формы эритроцита в процессе везикуляризации

А. В. Гисич

Институт химической кинетики и горения  
им В. В. Воеводского СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Популяция эритроцитов постоянно меняется. Около 2 млн клеток поступают в кровоток из костного мозга типичного здорового взрослого человека каждую секунду, и примерно такое же количество клеток выводится организмом из кровотока. Типичный эритроцит циркулирует в течение 100–120 дней, затем перерабатывается и заменяется. Многие характеристики меняются в течение жизни эритроцитов в периферическом кровообращении: объем и масса гемоглобина уменьшаются примерно на 20 и 15 % соответственно, площадь поверхности уменьшается, отношение поверхности к объему увеличивается. Известно, что данные изменения происходят за счет везикуляризации. Однако некоторые исследования утверждают, что везикуляризация не может учитывать весь объем и потерю гемоглобина эритроцитами, поскольку сумма потерянного объема или массы гемоглобина в пузырьках значительно меньше, чем потеря клетками. Также было подсчитано, что в эритроците в целом недостаточно мембраны, чтобы упаковать 20 % гемоглобина в виде пузырьков.

На данный момент не существует точного описания изменения формы эритроцита в процессе старения с учетом размера отщепляемых везикул, а также понимания, имеет ли скорость везикуляризации зависимость от возраста эритроцита.

Целью данной работы являлся поиск оптимальной модели изменения формы эритроцита в процессе старения. Для этого были проведены расчеты параметров эритроцита, основанные на оптической модели, при везикуляризации с учетом вариации размеров отщепляемых везикул и начальных параметров эритроцита (объема и индекса сферичности). Установлено изменение скорости везикуляризации, приводящее к наблюдаемым в эксперименте изменениям формы эритроцита и концентрации гемоглобина с течением жизненного цикла клетки.

В результате моделирования представляется возможным построить зависимости индекса сферичности, объема и площади поверхности от времени циркуляции эритроцита в кровотоке, что в дальнейшем поможет судить о законе изменения везикуляризации в процессе старения и обнаружения патологий.

Научный руководитель — Е. С. Ястребова

**Исследование влияния коллиматора на изображения, получаемые методом однофотонной эмиссионной компьютерной томографии**

М. А. Гурко

Новосибирский государственный университет  
Институт теоретической и прикладной механики  
им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

Однофотонная эмиссионная компьютерная томография (ОФЭКТ) — радионуклидный томографический метод визуализации метаболических процессов, а именно распределения радионуклидных фармацевтических препаратов (радиофармпрепаратов) в организме пациента. Для получения информации о направлении движения зарегистрированных гамма-квантов в методе ОФЭКТ применяется коллиматор [1]. Коллиматор представляет собой пластину толщиной 2–3 см с большим числом отверстий, которые эффективно пропускают только гамма-кванты, падающие в определенном направлении. В результате получают планарные изображения («сырые» данные) распределения радиофармпрепарата. Собирая такие планарные изображения под разными углами с помощью соответствующих математических алгоритмов реконструкции, восстанавливают картину трехмерного распределения радиофармпрепарата.

В данной работе было проведено численное моделирование сбора «сырых» проекционных данных при обследовании пациента методом ОФЭКТ в ядерной кардиологии. Для этого был создан программный комплекс, основанный на методе Монте-Карло. Проекционные данные рассчитывались с использованием математического фантома, имитирующего распределение радиофармпрепарата Тс-МИБИ в органах грудной клетки пациента. Исследовалось влияние параметров коллиматора (толщины коллиматора, размера отверстий) на качество планарных изображений. Оценен вклад рассеянных гамма-квантов в изображения, получаемые с помощью метода ОФЭКТ [2]. Изображения, полученные методом Монте-Карло, были верифицированы с помощью сравнения с клиническими результатами.

*Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 19-02-00244.*

1. Климанов В. А. Физика ядерной медицины: учеб. пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. Ч. 1. 308 с.
2. Беспалов В. И. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом. 4-е изд. Томск: Изд-во ТПУ, 2008.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. Н. В. Денисова

**Изучение влияния механизмов адгезивно-агрегационных процессов на гемостаз методом низкочастотной пьезотромбоэластографии**

А. А. Жуковская

Томский государственный университет

Исследования последних десятилетий привели к значительному прогрессу в изучении системы гемостаза. Нарушения системы регуляции агрегатного состояния крови приводят к патологическим изменениям функций жизненно важных органов, поэтому получение новых знаний о системе гемостаза — главный приоритет прикладных задач.

Одним из методов лабораторной диагностики гемостатического потенциала (ГП) является резонансно-акустический метод низкочастотной пьезотромбоэластографии (НПТЭГ), в котором изменение агрегатного состояния крови регистрируется в виде зависимости амплитуды колебаний пьезоэлектрического датчика от времени в процессе ее коагуляции. С помощью пьезотромбоэластографа АРП-01М «Меднорд» можно визуализировать информацию на всех звеньях гемокоагуляции в цельной крови: от инициации до формирования фибринового сгустка и его возможного лизиса. Для других «глобальных» методов характерно наличие времени задержки между началом теста и измерениями выходного сигнала, т. е. они дают лишь приблизительную характеристику ГП.

В данной работе были исследованы механизмы адгезивно-агрегационных процессов, их влияние на точность резонансно-акустического метода оценки ГП и проведены эксперименты на образцах цельной крови. Для решения задачи нахождения амплитудно-фазовых характеристик иглы-резонатора применен подход, основанный на математической модели вынужденных колебаний физического маятника-цилиндра в вязкоупругой жидкости.

Полученные результаты используются для диагностики нарушений в системе гемостаза и профилактики тромбогеморрагических осложнений.

Научные руководители —

д-р физ.-мат. наук, проф. В. П. Демкин,  
д-р мед. наук, проф., чл.-корр. РАН В. В. Удуг

**Исследование характеристик диффузии воды  
в тканях головного мозга у лиц, перенесших инсульт**

К. В. Журавлева

Новосибирский государственный университет  
Международный томографический центр СО РАН, Новосибирск

Инсульт — острое нарушение кровоснабжения головного мозга, одна из основных причин смертности и инвалидности в мире. Методы диффузионной МРТ (дМРТ), такие как диффузионно-тензорная (ДТ) и диффузионно-куртозисная (ДК) МРТ, являются золотым стандартом диагностики целостности проводящих путей головного мозга. Разработка методов дМРТ для ранней диагностики и прогноза риска инсульта является чрезвычайно актуальным направлением.

ДТ МРТ позволяет получать карты измеряемого коэффициента диффузии (ИКД) и фракционной анизотропии диффузии (ФА). ДК МРТ сверх того дает информацию об эксцессе — отклонении диффузионного распределения от гауссовской формы.

Характеристики диффузии и эксцесса зависят от возраста, поэтому при изучении изменения этих характеристик при патологических процессах необходимо учитывать несколько факторов.

Целью данной работы является анализ диагностической значимости характеристик диффузии и эксцесса, полученных с помощью ДК МРТ, в контрлатеральном полушарии относительно пострадавшего при ОНМК с учетом возрастных и иных различий. Основная гипотеза заключается в том, что состояние тканей контрлатерального полушария отражает априорный риск возникновения инсульта, а их диффузионные характеристики могут служить индикатором вероятности инсульта.

Эксперименты проводились на МР-томографе Philips Ingenia 3.0 T. Были получены диффузионные и T1-взвешенные изображения для 15 здоровых добровольцев и 23 пациентов с инсультом. Выполнено построение карт белого и серого вещества, полученных с помощью сегментации анатомических T1-взвешенных изображений. Для каждой ткани получены усредненные характеристики ИКД, ФА и эксцесса.

U-критерий Манна — Уитни выявил статистически значимые различия между группами испытуемых для ИКД и ФА в белом веществе. Возрастную зависимость исследовали по критерию корреляции Спирмена. Коэффициенты диффузии и фракционная анизотропия также показали статистически значимую зависимость от возраста.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. А. Савелов

## **Проточно-цитометрическое исследование IFN- $\gamma$ -продуцирующих Т-лимфоцитов мышей, иммунизированных ДНК-вакциной против SARS-CoV-2**

А. М. Задорожный

Новосибирский государственный университет  
Государственный научный центр вирусологии  
и биотехнологии «Вектор» Роспотребнадзора, р. п. Кольцово

ДНК-вакцины являются одной из перспективных платформ, на основе которой разрабатываются экспериментальные вакцины против COVID-19. Преимущества таких вакцин в следующем: антиген получает нативную конформацию; активация как гуморального, так и клеточного иммунитета; простота и быстрота изготовления; малозатратность производства.

В отделе биоинженерии ФБУН ГНЦ ВБ «Вектор» была сконструирована ДНК-вакцина pVAX-RBD, несущая последовательность рецептор-связывающего домена (RBD) поверхностного белка S вируса SARS COV-2.

Целью данного исследования являлась оценка развития Т-клеточного ответа у мышей в ответ на введение pVAX-RBD с помощью проточной цитометрии.

Для оценки иммуногенности ДНК вакциной иммунизировали мышей линии BALB/c: опытной группе вводили 100 мкг плазмиды pVAX-RBD; контрольной группе — 100 мкг плазмиды pVAX. Иммунизацию проводили внутримышечно, два раза с интервалом в три недели. Через 10 дней после второй иммунизации у животных были взяты селезенки, из которых выделили спленоциты. Величину Т-клеточного иммунного ответа оценивали по числу спленоцитов, продуцирующих IFN- $\gamma$  CD8+ и CD4+ Т-лимфоцитами с помощью метода внутриклеточного окрашивания цитокинов (ICS). Измерения проводили на проточном цитофлуориметре BioRad ZE5.

Полученные результаты показали, что между группами есть статистически значимые различия в продукции IFN- $\gamma$  CD8+ цитотоксических лимфоцитов и CD4+ Т-хелперов. Таким образом, можно заключить, что ДНК-вакцинные конструкции, кодирующие рецептор-связывающий домен белка S вируса SARS-CoV-2, обладают способностью индуцировать Т-клеточный иммунный ответ, специфичный в отношении этого вируса.

Научный руководитель — д-р биол. наук, доц. Л. И. Карпенко



## Детектирование саккад с помощью систем видеоокулографии и электроокулографии

В. А. Зайцев

Томский государственный университет

Саккады — быстрые, баллистические движения глаз, происходящие в одном направлении. Они варьируются по амплитуде от небольших движений, совершаемых, например, во время чтения, до гораздо больших движений — во время разглядывания комнаты. Возникновение саккад при проведении тестов для клинической оценки вестибуло-окулярного рефлекса (например, теста импульса головы) является индикатором дисфункции вестибулярного аппарата, поскольку такие саккады раскрывают механизм компенсации смещения глаза во время активации вестибуло-окулярного рефлекса [1].

В работе была произведена запись саккад с использованием двух методов одновременно: электроокулографии (ЭОГ) и видеоокулографии (ВОГ). Затем на основе этих записей было проведено сравнение методов ЭОГ и ВОГ. Запись сигналов осуществлялась следующими устройствами: IMPAQ (*Maastricht, the Netherlands*), ICS Impulse (*GN Optometrics, Taastrup, Denmark*). На лицо добровольца были прикреплены электроды ЭОГ слева и справа для каждого глаза, а поверх электродов были надеты очки ВОГ.

Составлена программа обработки полученных сигналов в пакете Matlab r2014b. Была произведена фильтрация сигналов обеих систем и их передискретизация, сигналы были выровнены по времени и совмещены при помощи кросс-корреляции.

Выполнено сравнение систем по форме саккад. Построен доверительный интервал площадей под кривыми каждой саккады. Посчитана стандартная ошибка измерений. Площади под кривыми саккад обеих систем сравнивались с помощью статистического теста Манна — Уитни. Показано, что различие между саккадами, записанными системами ЕОГ и ВОГ, не является значимым.

---

1. Van Doolen T.S., Starkov D., Lucieer F. M.P. Comparison of three video head impulse test systems for the diagnosis of bilateral vestibulopathy // *J. Neurology*. 2020. No. 267. P. 256–264.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. В. П. Демкин

**Изучение влияния хинона-хелатора эмодина на процессы  
перекисного окисления липидов, индуцированного ионами железа**

П. А. Кононова  
Новосибирский государственный университет  
Институт химической кинетики и горения  
им. В. В. Воеводского, Новосибирск

Окислительный стресс, индуцированный ионами переходных металлов, играет важную роль в функционировании живых систем. Он может как участвовать в канцерогенезе, так и использоваться в противоопухолевой терапии. С помощью соединений — хелаторов ионов металлов, в частности хинонов-хелаторов, — можно регулировать окислительный стресс. Известно, что некоторые хиноны-хелаторы способны увеличивать выработку свободных радикалов, что может привести к повреждению клеточной мембраны в результате перекисного окисления липидов и к нарушению работы встроенных в мембрану белков. В связи с этим большое значение имеет понимание механизмов влияния хелаторов на окисление липидов. В данной работе исследовалось влияние противоопухолевого препарата эмодина (6-метил-1,3,8-тригидроксиантрахинон) на перекисное окисление мицелл линолевой кислоты и бицелл фосфолипидов в присутствии ионов железа, а также влияние аскорбиновой кислоты на этот процесс.

Реакция перекисного окисления катализировалась ионами железа по реакции Фентона. Скорость окисления липидов измерялась методом ЯМР-спектроскопии в отсутствие и присутствии эмодина и аскорбиновой кислоты. Аскорбиновая кислота может проявлять как антиоксидантную активность, останавливая цепную реакцию перекисного окисления, так и прооксидантную активность, восстанавливая  $Fe^{3+}$  до высокореакционного иона  $Fe^{2+}$ . В результате показано увеличение скорости перекисного окисления липидов в присутствии как аскорбиновой кислоты, так и эмодина. Это говорит о прооксидантной активности эмодина. Установлено также, что одновременное присутствие аскорбиновой кислоты и эмодина приводит к дальнейшему увеличению скорости реакции окисления липидов.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук О. Ю. Селютина

**Исследование процессов перекисного окисления липидов  
с участием хелатных комплексов тиосемикарбазона Dp44mT**

В. Е. Кошман

Новосибирский государственный университет  
Институт химической кинетики и горения  
им. В. В. Воеводского, Новосибирск

Тиосемикарбазоны обладают широким спектром химической и биологической активности (противовирусной, антибактериальной, противораковой и т. д.), что вызывает повышенный интерес ученых из различных областей науки. Основным механизмом их противораковой активности долгое время считали ингибирование рибонуклеотид редуктазы. Однако последние исследования подчеркивают большую роль окислительного стресса в противоопухолевой активности тиосемикарбазонов. Данный аспект их биологической активности мало изучен в настоящее время и представляет большой интерес для медицинской химии.

В данной работе были исследованы процессы перекисного окисления липидов с участием хелатных комплексов тиосемикарбазона Dp44mT (Di-2-pyridylketone-4,4,-dimethyl-3-thiosemicarbazone) с ионами железа и меди. Методами  $^1\text{H}$  ЯМР- и оптической спектроскопии было изучено взаимодействие хелатных комплексов Dp44mT с липидной мембраной, их роль в реакции перекисного окисления ненасыщенных липидов и роль аскорбиновой кислоты в данном процессе. В качестве модельных систем использовались мицеллы линолевой кислоты и бицеллы ДНРС/DLPC.

Установлено, что комплексы Dp44mT с железом проявляют антиоксидантную активность, в то время как комплексы с медью — прооксидантную. Обнаружено, что аскорбиновая кислота существенно увеличивает активность комплексов Dp44mT с железом. Оптические данные позволяют сделать вывод о том, что усиление активности комплексов в присутствии аскорбиновой кислоты может происходить из-за изменения их структуры.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 20-33-70019).*

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук О. Ю. Селютина

**Влияние осмотического давления на проницаемость перитонеальных клеток для тиомочевины**

М. А. Кузовлева, Л. Е. Каткова, Г. С. Батурина  
Институт цитологии и генетики СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Перитонеальный диализ — это метод терапии терминальной стадии почечной недостаточности. Функционально он обеспечивает обмен веществ между кровью и диализной жидкостью через естественную мембрану, образованную клетками перитонеального эндотелия. Мочевина — это продукт белкового метаболизма, пути выведения которого в процессе перитонеального диализа остаются недостаточно изученными. Общепринятым аналогом для изучения транспорта мочевины является тиомочевина.

В работе исследовалось влияние осмотического давления на проницаемость плазматической мембраны перитонеальных клеток крысы для тиомочевины.

Метод измерения концентрации тиомочевины в клетке основан на эффекте гашения флуоресцентного красителя *Calcein*. Исследования проводились на первичной культуре перитонеальных клеток крысы. Клетки помещались в проточную камеру с терморегуляцией, затем производилась загрузка клеток флуоресцентным красителем *Calcein*. В эксперименте происходила смена внеклеточной среды: PBS → PBS + 100 или 280 мМ манитола → PBS + 100 или 280 мМ тиомочевины.

По начальному участку профиля флуоресценции можно определить величину коэффициента линейной регрессии концентрации тиомочевины в цитоплазме клетки. Это достаточно корректно отражает величину потока тиомочевины внутрь клетки. Для определения внутриклеточной концентрации тиомочевины использовали калибровочную кривую для флуоресцентного красителя *Calcein*. Коэффициент проницаемости (P) тиомочевины рассчитывали с помощью первого закона Фика для диффузионных потоков.

Получены следующие величины:  $P = (7,62 \pm 0,001) \cdot 10^{-6}$  см/сек (в среде с осмотическим давлением 380 мОсм/кг),  $P = (8,22 \pm 0,003) \cdot 10^{-6}$  см/сек (в среде с осмотическим давлением 560 мОсм/кг).

С использованием одновыборочного t-критерия Стьюдента на уровне 0,05 наблюдается возрастание проницаемости плазматической мембраны перитонеальных клеток крысы для тиомочевины при увеличении осмотического давления среды.

Научный руководитель — д-р биол. наук, доц. Е. И. Соленов

**Эффекты микропучкового облучения на рост опухоли  
в модели ксенотрансплантации клеток глиобластомы человека  
иммунодефицитным мышам**

Я. Е. Курбатова

Новосибирский государственный университет

Институт цитологии и генетики СО РАН, Новосибирск

Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск

Актуальность исследований, связанных с лечением злокачественных опухолей, растет с каждым годом в связи ростом онкологической заболеваемости. Сейчас существует широкий спектр борьбы с этим недугом, включающий в себя различные методы лучевой терапии (ЛТ). До конца неизученная природа уникальных свойств раковых клеток позволяет некоторым видам опухолей быть слабовосприимчивыми и невосприимчивыми вообще к воздействию современных методов ЛТ. К таким опухолям относится глиобластома головного мозга — одна из самых агрессивных опухолей с печальным прогнозом выживаемости пациентов.

Терапия микропучками рентгеновского излучения — метод, пока не использующийся в клинической практике, но потенциально более эффективный, чем традиционная радиотерапия [1]. Ткани, попадающие в энергетический максимум микропучка, облучаются намного сильнее, чем при стандартной ЛТ. Неопухолевые ткани восстанавливаются за счет биологических эффектов от тканей, находящихся в тени микропучка.

В данных исследованиях иммунодефицитные мыши с ксенотрансплантированной глиобластомой человека подвергались облучению рентгеновскими микропучками в диапазоне доз от 50 до 200 Гр. Получение микропучков происходит на электронном ускорителе ВЭПП-4М, на котором установлен 9-полюсный вигглер, генерирующий синхротронное излучение с энергетическим диапазоном от 30 до 150 кэВ. Для формирования микропучков использовались танталовые щели толщиной 3 мм с периодом 400 мкм и шириной полосы 200 мкм. Максимальная продолжительность жизни животных после микропучкового облучения оказалась на 22 % больше, чем в контрольной группе.

---

1. Bartzsch S., Corde S., Crosbie J.C. et all. Technical advances in x-ray microbeam radiation therapy // Phys. Med. Biol. 2020. Vol. 65. P. 02TR01

Научные руководители — канд. биол. наук Е. Л. Завьялов,  
канд. физ.-мат. наук К. Э. Купер

## **Исследование влияния прохождения эритроцитов через капилляры на основные параметры эритроцитов**

Т. А. Лагунов

Новосибирский государственный университет  
Институт химической кинетики и горения  
им. В. В. Воеводского СО РАН, Новосибирск

В процессе жизни эритроциты циркулируют по сосудам нашего организма, подвергаясь воздействию сдвигового напряжения (особенно в мелких капиллярах, диаметр которых сравним с диаметром эритроцита). В литературе имеются данные о «физиологических уровнях» сдвигового напряжения и его влиянии на некоторые параметры эритроцита (в основном на удлинение и эластичность мембраны). Также существуют работы, показывающие, что параметры эритроцита зависят не только от величины сдвигового напряжения, но и от времени нахождения эритроцита в этом напряжении. Оценки сверху показывают, что классические методы забора венозной крови (венепункция иглой) имеют схожие с физиологическими величины и времена воздействия сдвигового напряжения на эритроцит. Новые методы забора крови (такие как безыгольная лазерная венепункция) могут создавать отверстия меньшего диаметра, что увеличивает величину сдвигового напряжения. Знания о связи сдвигового напряжения с параметрами эритроцита позволят учесть влияние метода забора крови на параметры клеток, что может улучшить диагностическую точность.

К сожалению, измерения, описанные в литературе, проводились на устройствах (микроскопе, дифракционном эктацитометре, дифракционном цитометре), позволяющих измерить относительно небольшое количество параметров эритроцитов (обычно диаметр, толщину, отношение полюсей при растяжении сдвиговым напряжением). Метод сканирующей проточной цитометрии позволяет получать гораздо больше (до 48) параметров эритроцитов.

В работе использовался метод сканирующей проточной цитометрии для измерения параметров эритроцитов венозной крови, пропущенных через иглы различных диаметров и длин. Было показано, что большинство параметров эритроцитов не зависят от диаметра иглы. Дополнительно было проведено моделирование движения и вращения эритроцита в потоке в программном обеспечении COMSOL для более корректной оценки действующего сдвигового напряжения.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. В. П. Мальцев

## Оценка доли целлюлозного компонента в растительном сырье на примере соломины тростника

В. А. Михеев

Институт химической биологии  
и фундаментальной медицины СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Рациональная утилизация растительного сырья после сбора урожая является важной технологической задачей, для решения которой используются, в частности, методы механохимии, позволяющие извлекать отдельные компоненты из пожнивных остатков, таких как солома злаковых. Цель данной работы — разработка способа оценки доли целлюлозного компонента в разных анатомических частях соломы для подбора оптимальных режимов ее измельчения. Исследование было проведено на соломинах тростника обыкновенного (*Phragmites australis*), изъятых из природной среды.

Соломины были разделены на фрагменты, для каждого из которых были определены длина и вес. На базе лаборатории химии твердого тела ИХТТМ СО РАН были определены влажность, зольность, доля сухого вещества, а также проведен элементный анализ фрагментов соломин.

Кусочки соломин разных фрагментов (по 1 г) для микроскопического анализа предварительно обработали 25 мл 5 %-го раствора серной кислоты с выдержкой на водяной бане в течение 5 ч, потом материал промывали водой до pH 7 и заливали в парафин и смесь смол эпон-аралдит.

Оценку доли целлюлозы в разных фрагментах соломин проводили на парафиновых и полутонких срезах, окрашенные азуром-2, которые изучали в светооптическом микроскопе Leica DM2500, с помощью цифровой камеры Leica MC 170HD получали изображения участков стенки соломин.

Изображения анализировали с помощью программы, предназначенной для перевода цветных изображений в двухцветные, написанной в среде LabVIEW. Определяли соотношение площади клеточных стенок эпидермы, основной паренхимы и элементов закрытых коллатеральных пучков. Программа была дополнительно скорректирована и адаптирована для особых случаев.

Полученные данные по содержанию целлюлозного компонента в разных анатомических структурах стебля соломины и их изменения по длине соломины будут использованы при разработке механохимических методов утилизации соломы злаковых сельскохозяйственных культур.

Научный руководитель — д-р биол. наук, проф. Е. И. Рябчикова

**Физика протонной МР-спектроскопии  
при диагностике опухолей головного мозга**

С. Б. Муравлев

Новосибирский государственный университет  
Федеральный центр нейрохирургии, Новосибирск

Рак головного мозга и другие заболевания нервной системы занимают 10-е место среди причин смерти мужчин и женщин. По оценкам, в этом году 18 020 взрослых (10 190 мужчин и 7830 женщин) умрут от первичных раковых опухолей головного мозга и ЦНС. Опухоли головного мозга составляют от 85 до 90 % всех опухолей первичной ЦНС [1].

В данной работе был произведен набор клинического материала при помощи МР-спектроскопии у 30 пациентов с первичными опухолями головного мозга, а также 10 здоровых пациентов (контрольная группа). Набор включал по 3 МРТ-исследования: до, непосредственно после операции и спустя 6 недель. МРТ-данные использовались для построения плана операции и дальнейшего лечения. Далее проведен анализ снимков с введением статистического значимого показателя изменения объемов регрессированной области и оценка качества здоровых прилегающих тканей. Был также проведен анализ состояния тканей головного мозга спустя 6 недель в сравнении с контрольной группой пациентов, не имеющих данного заболевания.

Исследование показало, что данный подход может успешно применяться для диагностики опухолей головного мозга и оценки состояния пациента в течение реабилитационного периода.

---

1. Статистический отчет CBTRUS из Американского онкологического общества *Cancer Facts & Figures 2020*.

Научный руководитель — канд. мед. наук М. Е. Амелин



**Оценка цитотоксических эффектов БНЗТ на ускорителе  
ИЯФ СО РАН на моделях линий опухолевых клеток человека  
с липосомальной доставкой боркаптата  
по сравнению с его свободной формой и борфенилаланином**

А. А. Пономарев, А. И. Касатова  
Новосибирский государственный университет  
Институт цитологии и генетики СО РАН, Новосибирск  
Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск

В настоящее время боркапнат натрия (BSH) и фенилаланин бора (BPA) являются соединениями  $^{10}\text{B}$ , широко используемыми в клинических испытаниях бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ), но они не обладают достаточной селективностью накопления в опухолях, и исследования по разработке новых соединений  $^{10}\text{B}$ , способных селективно накапливаться в опухолевых тканях, продолжают во всем мире. Цель данного исследования — провести сравнительную оценку эффективности БНЗТ для линий опухолевых клеток человека, U87 (глиобластома), SW-620 (колоректальная аденокарцинома), SK-Mel 28 (меланома) с использованием липосомального боркаптата натрия (ЛБШН), боркаптата натрия (BSH) и фенилаланина бора (BPA) в концентрации 40 мкг/мл  $\text{B}^{10}$  в культуральной среде. Липосомы были изготовлены обращенно-фазовым испарением [1]. Облучение нейтронами проводилось на ускорителе протонов с литиевой мишенью, разработанном для БНЗТ в ИЯФ СО РАН. Интеграл тока протонного пучка составил от 0,21 до 0,27 мА\*ч при энергии 2,05 МэВ. Оценка эффектов БНЗТ после облучения опухолевых клеток эпителиальными нейтронами, расчетная поглощенная доза для которых была равна 6 Гр-экв, проводили при помощи МТТ и клоногенного тестов. Результаты исследования методом МТТ-теста показали, что выживаемость опухолевых клеток *in vitro* после облучения в группе липосомального BSH по сравнению с группами BPA и BSH практически не отличалась. Выявлена низкая токсичность ЛБШН для нормальных (здоровых, нетрансформированных) клеток фибробластов эмбриона человека (86 %) по сравнению с BSH (65 %) и BPA (56 %). Изучение эффектов БНЗТ в клоногенном тесте выявило высокую эффективность липосомального BSH против клеток меланомы SK-Mel 28: выживаемость *in vitro* составила 16 %, что в 3 раза ниже по сравнению с группами BSH 48 % и BPA 49 %. Дальнейшие изучения модификации и доставки липосомального бора необходимы для улучшения результатов клинического применения БНЗТ.

---

1. Kanygin V. et al. In vitro and in vivo evaluation of fluorescently labeled borocaptate-containing liposomes // J. Fluoresc. 2021. No. 31(1). P. 73–83.

Научный руководитель — д-р биол. наук И. А. Разумов

**Изменение скорости аксонального транспорта  
как критерий ранней диагностики заболеваний головного мозга**

Е. С. Прохорова

Институт цитологии и генетики СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Каждый год в России выявляют более 34 тыс. новых случаев заболевания раком мозга. Так как терапия данного вида опухоли затруднена, особую важность приобретает ранняя диагностика данной патологии. МРТ является перспективным неинвазивным методом выявления опухолей мозга, в том числе и на ранних стадиях. Ранее в исследованиях на лабораторных мышцах была доказана связь между нарушениями в энергетическом метаболизме мозга и развитием таких патологий, как болезнь Паркинсона, болезнь Альцгеймера, ишемия, рак. Наиболее энергозатратным процессом в нейроне является работа ионных каналов, обеспечивающих проведение нервного импульса по аксону, что подразумевает интенсивную логистику между различными областями аксона и ЭПР. Поэтому изменения в метаболизме нейрона не могут не отражаться на скорости аксонального транспорта, что неоднократно было показано на мышинных моделях болезни Паркинсона и Альцгеймера. На модели ортопической ксенотрансплантированной опухоли мозга (линия клеток U87) с помощью T1-взвешанной МРТ была продемонстрирована связь между скоростью роста опухоли и параметрами движения магнитоcontrastных наночастиц по аксонам нейронов ольфакторной системы. Объем и скорость роста опухоли обратно коррелировали со скоростью аксонального транспорта наночастиц. Таким образом, полученные результаты открывают новые перспективы для разработки критериев неинвазивной диагностики различных заболеваний ЦНС.

Научный руководитель — А. В. Ромашенко

## Спектральные и фотохимические свойства хрусталика глаза

С. А. Сеницын

Международный томографический центр СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Основными функциями хрусталика глаза являются пропускание и фокусировка видимого света на сетчатке глаза. Малоизученной функцией хрусталика является защита сетчатки от УФ-А излучения (315–400 нм) путем поглощения этого света. Ранее было показано, что в человеческом хрусталике основными хромофорами являются молекулы с малым молекулярным весом, кинуренин и его производные. Эти молекулы практически отсутствуют в хрусталиках животных, что ставит вопросы о наличии поглощения в УФ-А диапазоне, соединениях, поглощающих этот свет, и их фотохимии.

Исследование было проведено с комплексным использованием методов биохимического анализа, включая оптическую спектроскопию, жидкостную хроматографию и гель-электрофорез.

Было установлено, что хрусталики как свиньи, так и коровы обладают значительным поглощением в УФ-А диапазоне. Анализ водорастворимой фракции гель-проникающей хроматографией показал, что основными хромофорами являются белки хрусталика (86 % от общего поглощения), а метаболиты составляют малую часть (14 %). Природа этой полосы поглощения заключается в эффекте переноса заряда в фотовозбужденном состоянии между заряженными аминокислотными остатками на полипептидную цепь или между этими заряженными остатками. Интенсивность этого поглощения значительно меньше поглощения белков в УФ-Б диапазоне (280–315 нм), однако высокая концентрация белков (до 400 мг/мл) приводит к значительному поглощению всей ткани в УФ-А диапазоне.

Продолжительный фотолиз хрусталика при физиологических условиях приводит к заметному уменьшению этой полосы поглощения без видимого изменения в составе метаболитов. Это указывает на разрушение полосы УФ-А поглощения белков, т. е. взаимодействий путем переноса заряда. Квантовый выход фотодеградации менее 10 % указывает на высокую фотохимическую стабильность ткани хрусталика. Таким образом, белки хрусталика обладают ранее неизученной полосой поглощения в УФ-А диапазоне, возбуждение которой приводит к эффективной диссипации поглощенной энергии квантов света в тепло.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук П. С. Шерин

## Активации одиночных тромбоцитов с помощью фотолabileных соединений

Д. В. Спирина

Новосибирский государственный университет

Активация тромбоцитов — процесс, вносящий вклад в развитие сердечно-сосудистых заболеваний, являющихся основной причиной смертности в мире. Исследование направлено на создание метода диагностики нарушенной активации на ранней стадии.

Отличительным признаком активации тромбоцитов является резкий рост концентрации ионов кальция в цитоплазме. Этот признак позволяет отслеживать динамику активации тромбоцитов с помощью кальциевых зондов в реальном времени. Сама активация может быть вызвана *in vitro* добавлением АДФ [1].

В данной работе разработан и усовершенствован метод активации одиночных тромбоцитов без прикрепления к поверхности с помощью оптического импульса. Протокол основан на использовании АДФ, действие которого заблокировано фотоактивным остатком и включается только при освещении УФ-излучением. Система позволяет отслеживать самые ранние стадии активации.

Эксперимент проводится в луночном планшете, к которому подведено УФ-излучение с помощью собирающей линзы и светодиода мощностью 3 Вт с длиной волны 340 нм. Управление длительностью вспышки осуществляется через плату *Arduino*, сигнал на которую подается с приложения на компьютере. Интенсивность флуоресценции клеток, нагруженных флуоресцентным зондом Fluo-4, отслеживалась с помощью программного модуля ImageJ TrackMate [2].

Описанный подход открывает новые возможности в исследовании тромбоцитов, включая изучение межклеточной передачи сигнала и нелинейного взаимодействия различных биохимических путей. Полученная простейшая теория позволяет дать общую картину процесса на основе данных о каждой отдельной клетке.

---

1. Horev M. B. et al. Differential dynamics of early stages of platelet adhesion and spreading on collagen IV- and fibrinogen-coated surfaces // *F1000Research*. 2020. (9).

2. Tinevez J.-Y. et al. TrackMate: An Open and Extensible Platform for Single-Particle Tracking // *Methods*. 2016. (115).

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. Е. Москаленский

## Влияние вязкости крови на коронарный кровоток

А. Т. Суюндукова

Томский государственный университет

Ишемическая болезнь сердца (ИБС) занимает лидирующее место по смертности в структуре всей кардиологической патологии. ИБС обусловлена стенозирующим атеросклерозом коронарных артерий, который ограничивает кровоток к сердечной мышце и может привести к тяжелым последствиям, в частности к острому инфаркту миокарда и острой сердечной недостаточности.

Для того чтобы оценить физиологическую значимость стеноза коронарной артерии определяется фракционный резерв кровотока (ФРК/FFR), который является важнейшим элементом в формировании способа лечения пациентов с хронической ИБС [1]. Фракционный резерв кровотока — это отношение максимального кровотока в суженной артерии к максимальному кровотоку в этом же сосуде без стеноза [2].

Повышение вязкости крови вносит существенный вклад в гемодинамику сосудов. Кроме того, нарушение реологических свойств крови может способствовать ремоделированию сердца и эндотелия сосудов [3]. Вязкость цельной крови — это интегральный показатель, зависящий от множества параметров, определяющих ее макро- и микрореологические свойства. При этом наибольшее значение имеют четыре фактора: гематокрит, вязкость плазмы, агрегация и деформируемость эритроцитов.

На основе метода локальной гемодинамики 2D проведены исследования зависимости кровотока в стенозированных коронарных артериях от вязкости крови. Показано, что скорость кровотока значительно изменяется с изменением вязкости крови.

---

1. Мочула А. В. и др. Динамическая однофотонная эмиссионная компьютерная томография миокарда как метод идентификации многососудистого поражения коронарного русла // *Вестн. рентгенологии и радиологии*. 2016. Т. 97. № 5. С. 289–295.

2. Симаков С. С. Современные методы математического моделирования кровотока с помощью осредненных моделей // *Компьютерные исследования и моделирование* 2018. Т. 10. № 5. С. 581–604.

3. Marcinkowska-Gapiska A. and Kowal P. Analysis of Complex Viscosity in a Group of Patients with Circulation Disorders // *Acta Physica Polonica*. 2012. A121. No. 1. P. 54–56.

Научные руководители — д-р физ.-мат. наук, проф. В. П. Демкин,  
д-р мед. наук К. В. Завадовский

**Математическая модель роста сфероидов клеток  
НЕК 293 и SC-1 R780 на основе сравнительного анализа  
их размерных характеристик в динамике культивирования  
при разных посевных дозах**

Т. Н. Торохов

Институт химической биологии  
и фундаментальной медицины СО РАН, Новосибирск

Культуры клеток традиционно выращивают на плоской поверхности культуральных сосудов (2D-культура), и эту форму используют в большей части исследований, включая наработку белков и микроорганизмов. Однако 2D-культура не позволяет реконструировать микроокружение клеток, сложные межклеточные и клеточно-матриксные взаимодействия, существующие в условиях организма. Приблизиться к решению этих проблем позволяет использование 3D-культивирования, одним из его вариантов являются клеточные сфероиды — агрегаты клеток «сферической» формы, сохраняющие трехмерную «архитектуру» и в ряде случаев специфические для ткани функции. Сфероиды используют в качестве экспериментальных моделей органов и злокачественных опухолей *in vitro*, для изучения токсического эффекта разных веществ; механизмов действия лекарственных препаратов; взаимодействия наночастиц с клетками.

В работе использованы сфероиды клеточных линий: НЕК 293, клетки почки человека (поляризованные, имеющие апикально-базальную симметрию) и клетки SC-1 R780, неполяризованные фибробласты мыши. Сфероиды получали, рассеивая клетки в разных посевных дозах в планшеты с низкоадгезивной поверхностью. Сфероиды ежедневно фотографировали при одном увеличении в ходе эксперимента с помощью цифровой камеры микроскопа. В качестве планиметрических характеристик использовали площадь сечения, периметр сечения, большие и малые хорды, полученные при измерении на фотоснимках. Изучение морфологии сфероидов разных линий установило различия в расположении клеток поверхностной области, а также в формировании «ядра» сфероида, содержащего погибшие клетки. Выявлены различия характера роста сфероидов линий клеток НЕК 293 и SC-1 R780, позволившие построить кривые роста сфероидов и выбрать параметры культивирования сфероидов для последующих экспериментов. Проработаны вопросы моделирования роста и обмена клеток сфероидов с окружающей средой. Построена математическая модель роста сфероидов в зависимости от посевной дозы.

Научный руководитель — д-р биол. наук, проф. Е. И. Рябчикова

**Измерение вязкоупругих характеристик цельной крови в процессе коагуляции в условиях физиологической нормы и патологии методом низкочастотной пьезотромбоэластографии**

М. Н. Хоряк

Томский государственный университет

Метод низкочастотной пьезотромбоэластографии (НПТЭГ) является наиболее точным среди других методов, позволяющих производить оценку изменений системы регуляции агрегатного состояния нативной крови и ее гемостатического потенциала в режиме реального времени. С помощью пьезотромбоэластографа АРП-01М «Меднорд» были исследованы изменения вязкоупругих характеристик крови в процессе коагуляции в условиях физиологической нормы и у пациентов с гипертонической болезнью сердца. Для этого был проведен эксперимент по определению функционального состояния гемостатического потенциала цельной нестабилизированной крови до и после воздействия антикоагулянта дабигатрана этексилата.

В ходе проведения исследования происходит адгезия крови на погруженный конец измерительного элемента (иглы-резонатора), что приводит к его утяжелению и, соответственно, другим изменениям в упруго-деформируемой системе, образующейся пьезотромбоэластографом и образцом крови. Например, нелинейно зависящее от нарастания массы смещение собственной частоты колебаний иглы-резонатора в область меньших частот.

По результатам серии экспериментов было выявлено, что вязкоупругие характеристики цельной крови, измеряемые используемым резонансно-акустическим методом, заметно чувствительны к введению лекарственных препаратов. Так, у здоровых участников исследования действие антикоагулянта обеспечивало выраженное снижение амплитудных характеристик пьезотромбоэластограмм и замедление процесса свертывания крови. Также анализ полученных данных показывает, что до и после введения дабигатрана этексилата при гипертонической болезни вязкость и скорость свертываемости крови больше, чем у здоровых добровольцев.

Научные руководители — д-р мед. наук, проф., чл.-корр. РАН В. В. Удут,  
канд. физ.-мат. наук, доц. С. В. Мельничук

## **Применение нечеткой нейросетевой модели для определения гемостатического потенциала**

А. О. Цибулина

Томский государственный университет

В медицинской практике достаточно развиты методы, необходимые для изучения вязкоупругих свойств крови, но проблема принятия правильного решения при оценке гемостатического потенциала — это одна из наиболее важных задач, требующая построения математической модели, позволяющей обрабатывать нечеткую информацию.

При проведении тестов низкочастотной тромбоэластографии на различных группах пациентов видны значительные различия в поведении кривой изменения агрегатного состояния крови, что обусловлено различием в биохимических показателях крови. Применение стандартных подходов зачастую искажает диагноз и для повышения достоверности медицинского заключения требует увеличения выборки и проведения дополнительных тестов.

В рамках данной работы проблема неопределенности в принятии решения об уровне гемостатического потенциала была изучена при помощи нейро-нечеткого моделирования [1]. Применение математического аппарата нечеткой логики к обработке данных теста низкочастотной тромбоэластографии (НПТЭГ) на основе статистической выборки пациентов дает возможность построить нечеткую нейросетевую модель системы гемостаза и верифицировать гемостатический потенциал для различных клинических ситуаций.

Апробация нейро-нечеткой модели процесса коагуляции крови проводилась на результатах анализа крови в различных клинических ситуациях (ишемическая болезнь сердца, артериальная гипертензия 1–2-й степени) в сравнении с показателями здоровых добровольцев.

---

1. Phuong N. H., Kreinovich V. Fuzzy logic and its applications in medicine // *Int. J. Med. Informatics*. 2001. Vol. 62. No. 2–3. P. 165–173.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. В. П. Демкин



# ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И НАНОСИСТЕМ

УДК 538.911

## Special aspects of structure of complex oxides of iron under high pressure in wide temperature range

N. M. Belozerova

Frank laboratory of neutron physics, Dubna  
Joint institute for nuclear research, Dubna

A study of spinel ferrites is great importance regarding their interesting structural and magnetic properties having both fundamental and applied interest. A wide range of magnetic properties of spinel ferrites determined by the peculiarities of a distribution of iron ions between different crystallographic sites in a spinel-type crystal structures. One of the important part of advanced research of Zn-Cu spinel-type ferrites is the synthesis of complex ferrites with controlled redistribution of iron ions between A and B sites, leading to variation of magnetic properties of ferrites. Understanding the relationship between the structural properties and magnetic order of ferrite spinel can be given by the studies of the modifications of the magnetic structure upon variation of structural parameters under a pressure application.

In present work, a spinel ferrite  $Zn_{0.3}Cu_{0.7}Fe_{1.5}Ga_{0.5}O_4$  was chosen at ambient condition, and performed neutron diffraction studies at high pressure. Neutron powder diffraction measurements at ambient and high pressures up to 4.7 GPa were performed at ambient temperatures with the DN-6 diffractometer at the IBR-2 high-flux pulsed reactor [FLNP, JINR] using the sapphire anvil high-pressure cell. In additional, for studies the role of structural parameters across the paramagnetic-ferrimagnetic phase transition we had investigate structure and magnetic moments evolution in temperature range 300–425 K.

With increasing temperature and pressure, a gradual decreasing of the magnetic moments of iron ions in the A and B crystallographic sites were observed. This effect corresponds to magnetic phase transition from ferrimagnetic state to paramagnetic one. The lattice parameters, interatomic bond lengths and angles, magnetic moments of iron as functions of temperature and pressure were calculated. The structural mechanisms of the magnetic transition in spinel ferrite compounds are discussed.

*The work has been supported by the RFBR grant № 20-02-00550-a.*

Scientific supervisor — Dr. Phys.-Math. Sci. D. P. Kozlenko

**MOF nanoparticles for drug delivery loading and release  
of model l-leucine molecule into MIL-100**

I. E. Gorban, M. A. Soldatov, V. V. Butova, P. V. Medvedev,  
O. A. Burachevskaya, A. Belanova, P. Zolotukhin, A. V. Soldatov  
Southern Federal University, Rostov-on-Don

Metal-organic frameworks (MOF) constitute a unique class of porous crystalline materials, where metal centers (metal ions or metal clusters) are connected by organic linkers into a three-dimensional lattice [1]. MOFs could have unique sensory, sorption, catalytic, and other properties. That is why MOFs application in industry is developing at a record-breaking pace nowadays. Moreover, these materials are quite promising candidates for targeted drug delivery and controlled drug release.

In this study [2] the synthesis of the MIL-100 metal-organic framework particles were carried out by hydrothermal (HT) and microwave (MW)-assisted methods. Transmission electron microscopy showed formation of microparticles in the course of hydrothermal synthesis and nanoparticles for microwave-assisted synthesis. Powder X-ray diffraction confirmed formation of larger crystallites for hydrothermal synthesis. Particle aggregation in aqueous solution was observed by dynamic light scattering. However, the stability of both samples could be improved in acetic acid solution. Nitrogen sorption isotherms showed high porosity of the particles. l-leucine molecule was used as a model molecule for loading in the porous micro- and nanoparticles. Loading was estimated by FTIR spectroscopy and thermogravimetric analysis. UV-VIS spectroscopy quantified l-leucine release from the particles in aqueous solution. Cytotoxicity studies using the HeLa cell model showed that the original particles were somewhat toxic, but l-leucine loading ameliorated the toxic effects, likely due to signaling properties of the amino acid.

*This work was supported by Russian Science Foundation, (Project No. 19-73-10069).*

---

1. Butova V.V., A Soldatov M.; A Guda A.; A Lomachenko K.; Lamberti C. Metal-organic frameworks: Structure, properties, methods of synthesis and characterization // Russ. Chem. Rev. 2016. No. 85. P. 280–307.

2. Gorban I. E. et al. l-Leucine Loading and Release in MIL-100 Nanoparticles // Int. J. Mol. Sci. 2020. No. 21(24). P. 9758.

Scientific supervisor — Cand. Phys.-Math. Sci. M. A. Soldatov

### **3D X-ray imaging based on coded aperture**

F. Habibimarekani, A. Guilherme Buzanich, U. Reinholz, M. Radtke  
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, Germany

This project addresses the development of a stable, reproducible and inexpensive methodology for imaging, based on a coded aperture for X-ray spectroscopy. Specifically, we will enable simultaneous energy and depth resolved X-ray fluorescence (XRF) information of a sample by employing masks with a multi-pinhole pattern. The conceptualized experimental set-up follows as: sample → mask → energy sensitive area detector. In this construction, the final image is composed of an overlay of the single images produced by each pinhole, similar to a stack of camera obscuras. Hence a new procedure must be developed to reconstruct these images, for a broad range of experimental requirements. This new method will permit simultaneous detection of multiple elements contained within a sample, thus yielding 3D information. Furthermore, this method leads to increased collection of photons and hence requires shorter measuring times. The initial tests will concern characterization of polymer-imprinted metal-organic frameworks (Poly-MOFs). These materials are envisioned as catalyst supports, helping to overcome challenge with using powders in catalytic devices. As such, Poly-MOFS are of great interest to both industry and academia. The first experiments will be done with synchrotron produced X-rays. Once established, however, the technique will become transferrable to laboratory sources, and experiments in the near-field range on a fully automated basis.

The general goal of this project is to develop a stable, reproducible and fast methodology for imaging, based on a coded aperture. In contrast to X-ray lenses, this project proposes a facile, inexpensive method to obtain high quality pictures for characterization of any object by means of X-ray spectroscopy.

Scientific supervisor — Dr. A. Guilherme Buzanich, Dr. U. Reinholz,  
Dr. M. Radtke and Prof. Dipl.-Ing. Dr. Tech. Sci. Strelina Christina

**The neutron diffraction study of crystal structure of  $\text{Bi}_{2-x}\text{Mn}_x\text{WO}_6$** 

O. N. Lis

Frank laboratory of neutron physics, Dubna  
Joint institute for nuclear research, Dubna  
Institute of Physics, Kazan Federal University

The discovery of unusual dielectric properties like ferroelectricity led to the study of a large number of ferroelectric oxides of various structural families to identify new materials and/or compositions for use in devices. Among all these materials, serious attention has been attended on various lead-free multiferroics (exhibiting ferroelectric/antiferroelectric and ferromagnetic/antiferromagnetic properties in the same phase) with unique properties can be applied for a wide range of applications. Among the well-known compounds,  $\text{Bi}^{3+}$ -containing compounds have gained enormous attention due to their high stability, nontoxicity, tunable band structures, and chemically active electrons resulting in excellent visible light driven photocatalysis. However, the structural transformation of perovskite-like compounds synthesized by introducing the 3d transition metal elements in  $\text{Bi}_2\text{WO}_6$ .  $\text{Bi}_{2-x}\text{Mn}_x\text{WO}_6$  are the less investigated series.

The present work focuses on detailed studies of the crystal structure of  $\text{Bi}_{2-x}\text{Mn}_x\text{WO}_6$  ( $x = 1, 1.2$ ) by means of neutron diffraction on a DN-12 diffractometer of a pulsed high-flux IBR-2 reactor (FLNP, JINR, Dubna, Russia) using a high-pressure cell with sapphire anvils in the wide pressure and temperature range. The temperature dependences of the unit cell parameters, the volume and the interatomic bond lengths of the  $\text{Bi}_{2-x}\text{Mn}_x\text{WO}_6$  compound were obtained. The calculated compressibility coefficients indicate anomalies in the behavior of interatomic lengths. To improve the understanding of the lattice instabilities the Raman spectroscopy studies of the vibration spectra of the  $\text{Bi}_{2-x}\text{Mn}_x\text{WO}_6$  compounds were performed.

*The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, grant RFBR N19-52-45009 IND\_a.*

Scientific supervisor — Cand. Tech. Sci. S. E. Kichanov

**Comprehensive study of Ni-rich NMCs synthesis conditions influence on Li<sup>+</sup>/Ni<sup>2+</sup> antisite defects**

E. D. Orlova

Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow

The layered oxides  $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$  with higher nickel content ( $x > 0.6$ ), so-called Ni-rich NMC are the promising high-energy density cathode materials for Li-ion batteries. However, these materials face decline of electrochemical properties during prolonged use, which is related to Li<sup>+</sup>/Ni<sup>2+</sup> antisite defects.

The present work aims at obtaining of low antisite disordering  $\text{LiNi}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$  (NMC811) in order to improve electrochemical properties.

NMC811 samples were obtained by hydroxide or carbonate co-precipitation route with sulfates and acetates as transition metals sources and following annealing with Li source in either air or oxygen flow. Phase composition and electrochemical performance were investigated by powder X-ray diffraction (XRD), high angle annular dark field scanning transmission electron microscopy (HAADF-STEM) and galvanostatic charge-discharge cycling. The antisite defects were analyzed semi-quantitatively by comparison of  $a$  and  $c$  lattice parameters, and (003) and (104) diffraction peaks, as well as quantitatively by Rietveld refinement of powder XRD data and HAADF-STEM images treatment by StatSTEM software. The last method was firstly applied to antisite defects quantifications in order to distinguish surface and bulk contribution.

The obtained samples are found to be single-phase layered oxides (s.g.  $R\text{-}3m$ ). The amount of antisite defects perfectly correlates with semi-quantitative parameters and electrochemical properties. Estimation of defects with StatSTEM software showed that the higher is bulk contribution to overall disordering, the lower is specific capacity. The optimal synthesis conditions were found to be hydroxide co-precipitation route from sulfates followed by oxygen annealing. Such samples demonstrate low antisite disordering (2 %), high specific discharge capacity of about 200 mAh/g at 0.1 C (1C = 200 mAh/g) and capacity retention after 100 cycles at 1C — 90 %.

*This research was funded by the Russian Science Foundation, grant 20-13-00233.*

Scientific advisors — Cand. Chem. Sci., Prof. A. M. Abakumov,  
Cand. Chem. Sci. A. A. Savina

**Investigation of the adsorption properties of ethylene on HKUST-1**

A. Y. Pnevskaya, A. L. Bugaev  
The Smart Materials Research Institute  
Southern Federal University, Rostov-on-Don

Metal organic frameworks (MOFs) are crystalline nanoporous materials comprised of small metal-containing clusters connected by polyfunctional organic ligands [1]. The ligands act as spacers, creating an open porous three-dimensional structure, with high pore volume and surface area. This hybrid architecture opens the possibility of designing a great variety of new porous materials potentially exploitable for a number of applications in gas storage and separation, catalysis, medicine and other fields. Recently, a Cu-based HKUST-1 MOF was shown effective for storage and release of ethylene and 1-methylcyclopropene implying the potential applications in food industry [2]. Here, we investigate ethylene adsorption and desorption potteries of HKUST by means of *in situ* infrared spectroscopy and theoretical calculations.

Experimental infrared spectra were obtained for a commercial HKUST-1 sample (Basolite C300) in DRIFTS mode. The sample was activated in Ar at 180 °C for one hour to remove water coordinated to Cu ions and then exposed to 1 % C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/Ar flow at room temperature. The shift of the C-H wagging mode by 40 cm<sup>-1</sup> was observed indicating ethylene binding to unsaturated Cu-centers. The gradual desorption process was observed at room temperature in inert atmosphere. The results were complemented by adsorption energies of ethylene and 1-methylcyclopropene on Cu-sites and corresponding vibrational frequencies calculated at DFT level of theory. The results shed light on ethylene and 1-methylcyclopropene binding to HKUST-1 for potential use as mediator and, respectively, inhibitor of fruit ripening.

---

1. Zhou H. C. et al. // Chem. Rev. 2012. No. 112. P. 673–674.

2. Chopra S. et al. // Postharvest Biol. Tec. 2017. No. 130. P. 48–55.

Scientific supervisor — Cand. Phys.-Math. Sci. A. L. Bugaev

**Исследование окисления метанола на поверхности монокристалла Pt(111) методом колебательной спектроскопии с модуляцией поляризации инфракрасного излучения**

Е. Е. Айдаков

Новосибирский государственный университет  
Институт катализа СО РАН, Новосибирск

Как известно, платиновые катализаторы активно используются в процессах получения ценных химических соединений путем селективного окисления простых спиртов. Исследование данного класса реакций представляет практический и фундаментальный интерес. Метод колебательной спектроскопии с модуляцией поляризации инфракрасного излучения позволяет проводить исследования каталитических реакций в условиях, приближенных к реальному катализу, т. е. в режиме *in situ/operando*. Важно отметить, что получение спектров газовой фазы и поверхности производится одновременно, при этом модуляция поляризации позволяет разделить вклады адсорбированных молекул и молекул в газовой фазе.

Исследование окисления метанола на поверхности монокристалла платины Pt(111) проводилось методом PM IRRAS. Каталитическая ячейка соединена с ИК-спектрометром VERTEX 80v, оснащенный HgCdTe-детектором и фотоупругим модулятором на основе кристалла ZnSe.

Изучение реакции окисления метанола на поверхности Pt(111) проводили в широком диапазоне температур (250–600 К) и соотношений метанол : кислород (1 : 1, 1 : 2, 1 : 10). Было установлено, что при увеличении концентрации кислорода в реакционной смеси уменьшается температура достижения 100 % конверсии метанола. При этом также увеличивается селективность по оксиду углерода CO<sub>2</sub>.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки (№ 075-15-2019-1876).*

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. А. Сараев

## **Влияния лигатуры Al-Er на структуру и физико-механические свойства алюминиевого сплава AMg5**

А. А. Ахмадиева, М. А. Селиховкин, Н. И. Кахидзе  
Томский государственный университет

Разработка сплавов, имеющих повышенные механические характеристики, коррозионную стойкость и эксплуатационные свойства в сочетании с низкой себестоимостью, является актуальной задачей современной промышленности. Цель работы — исследование структуры и физико-механических свойств алюминиевого сплава AMg5, содержащего эрбий в качестве легирующего компонента.

В качестве исходного материала в настоящей работе использовался сплав AMg5 (91,9–94,68 % Al, 4,8–5,8 % Mg и др.), в расплав которого была введена лигатура системы Al-Er, полученная методом гидрирования-дегидрирования. Методом литья в стальной кокиль были получены отливки, содержащие эрбий с концентрацией 0,5 мас.%, а также отливки исходного сплава, полученные при аналогичных условиях.

Методом гидростатического взвешивания определялась плотность полученных образцов. Для исследования микроструктуры сплавов подготовленные шлифы изучались на металлографическом микроскопе Olympus GX-71. Средний размер зерна исследуемых сплавов определялся методом случайных секущих по полученным изображениям микроструктуры. Твердость образцов определялась по методу Бринелля. Были проведены испытания на растяжения стандартных плоских образцов на испытательном стенде Instron 3369.

Плотность полученных сплавов составила 2,65 г/см<sup>3</sup>. Средний размер зерна исходного (без эрбия) сплава — 372 мкм. Добавление лигатуры Al-Er привело к увеличению размера зерна полученных сплавов до 507 мкм. Твердость легированного эрбием сплава составила 64 НВ, у исходного сплава — 58 НВ. Анализ диаграмм нагружения сплавов при растяжении показал, что у исходного сплава AMg5 значения предела текучести составили 64 МПа, предела прочности — 170 МПа и максимальной деформации до разрушения — 14,75 %. При введении лигатуры Al-Er в расплав AMg5 значения предела текучести составили 64 МПа, предела прочности — 204 МПа при максимальной деформации до разрушения 21,4 %.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госзадание № 0721-2020-0028).*

Научные руководители — канд. техн. наук И. А. Жуков,  
д-р физ.-мат. наук, проф. А. Б. Ворожцов



**Неразрушающие и микроинвазивные методы исследования объектов культурного наследия Румынии**

Б. А. Бакиров

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна  
Казанский федеральный университет

Всестороннее изучение объектов культурного наследия современными естественно-научными методами является одной из важнейших задач археологии и других связанных с историей наук. Особый интерес представляют декоративные элементы античной и средневековой архитектуры, такие как мозаики, фрески, барельефы и др. Данные декоративные элементы, с одной стороны, хранят в себе ценную информацию о древних технологиях и техниках декорирования, а с другой — являются удобными объектами изучения структурной и химической деградации строительных материалов. Следует отметить, что полученные экспериментальные данные имеют важное значение для развития методологии реставрации и сохранения ценных археологических находок.

В данной работе были исследованы найденные на территории современной Румынии фрагменты: античной римской мозаики из Констанцы, античного римского монумента из Адамклинси, средневековых фрески и керамики из замка Корвинов. Для анализа были взяты образцы из фондов Музея римской мозаики (Констанца, Румыния). Неразрушающие методы нейтронной дифракции и нейтронной томографии были применены для исследования фазового состава материала образцов и пространственного распределения неоднородностей во внутренней структуре. Для детального изучения особенностей поверхности был применен микроинвазивный метод рамановской спектроскопии, а также оптической микроскопии.

В результате работы был получен минеральный состав данных фрагментов (кальцит, кварц), что указывает на технику их изготовления. Реконструкция трехмерных моделей позволила определить пространственное распределение основных фаз, выявить участки структурной деградации, а также наличие слоев краски или других покрытий на исследуемых фрагментах. Проведены объемные расчеты по данным томографии. Возможный состав участков деградации и покрытий также был детально проанализирован.

Научный руководитель — канд. техн. наук С. Е. Кичанов

**3D-печать композиционных материалов на основе полимера  
и однослойных углеродных нанотрубок: от филаментов  
до оптических элементов**

К. И. Баскакова

Институт неорганической химии  
им. А. В. Николаева СО РАН, Новосибирск

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) с углеродными нанотрубками (УНТ) демонстрируют высокие значения электропроводности и хорошую экранирующую способность в МГц- и ГГц-частотах при низких концентрациях наполнителя. Однако особенности частотной дисперсии диэлектрической проницаемости любых перколяционных композитов не позволяют получить материал, эффективно ослабляющий электромагнитное излучение не только в ГГц, но и в ТГц-диапазонах частот. Для освоения ТГц-диапазона необходимо добиться резонансного взаимодействия материала с высокочастотным электромагнитным полем.

Технология 3D-печати, позволяющая быстро и малозатратно создавать объекты сложной геометрии, открывает перспективы для настольной печати пассивных элементов высокочастотной оптики и прототипирования защитных покрытий. Это актуально для коммуникации, теле- и радиовещания, GPS, мобильной связи и др.

В данной работе исследованы особенности создания ПКМ с разным содержанием ОУНТ методами послойного наплавления и фотополимеризации. Исследованы особенность окисления полимера и ОУНТ в процессе экструдирования филамента, структура и электропроводность тонких напечатанных пластин и пластин, полученных из суспензии ОУНТ в полимере. Методами 3D-печати получены оптические элементы, исследованы их электромагнитные свойства в ГГц- и ТГц-диапазонах частот.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ  
в рамках научного проекта № 19-31-27001.*

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук О. В. Седельникова

## **Измерение спектра и потока нейтронов ускорительного источника нейтронов ИЯФ СО РАН**

М. И. Бикчурина

Новосибирский государственный университет

Ускорительный источник эпитепловых нейтронов, предложенный и созданный в ИЯФ СО РАН, обеспечивает генерацию и формирование потока нейтронов, пригодного для отработки методики бор-нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей (БНЗТ). В работе представлены и обсуждаются результаты исследований с применением активационных методик. Используя активационные фольги из набора SWX-1552 (*Shieldwerx*, США), опробовали способ восстановления спектра нейтронов по сеточному методу с применением регуляризации Тихонова. Спектрометром  $\gamma$ -излучения на основе полупроводникового детектора, выполненного из особо чистого германия, зарегистрировано излучение  $\gamma$ -квантов. Проведены сравнения между экспериментальными и теоретическими данными. Контроль выхода нейтронов осуществлялся с помощью регистрации  $\gamma$ -квантов от активированного бериллия в ходе реакции  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ . Была проведена оценка дозы радиации от мишенного узла в сравнении с нормами безопасности. В заключение описаны планы дальнейшего развития применения активационных методик при проведении БНЗТ.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, доц. С. Ю. Таскаев

## **Осаждение тонких фторполимерных покрытий с различной морфологией на цилиндрические поверхности методом HWCVD**

А. Л. Богословцева

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Тонкие пленки из различных материалов находят широкое применение в современных приборах и устройствах. Перспективными материалами для получения тонких покрытий являются полимеры, в частности фторполимеры. Для некоторых устройств требуется осаждение тонкопленочных покрытий на цилиндрические поверхности различного диаметра. Например, покрытия из тонких гидрофобных пленок могут интенсифицировать теплообмен при фазовых переходах. Как правило, эти свойства зависят от поверхностной структуры покрытия.

Основными способами получения тонких пленок фторполимеров с различной структурой являются PVD- и CVD-методы. Эти методы, как правило, ориентированы на осаждения покрытий на гладкие и равномерные поверхности, в то время как большинство современных теплообменных устройств состоит из металлических трубчатых элементов малого радиуса. Поэтому адаптация этих методов для осаждения покрытий является актуальнейшей задачей.

В представленной работе было проведено осаждение покрытий на цилиндрические поверхности методом HW CVD. Показано, что при осаждении на вращающиеся цилиндрические поверхности малого радиуса морфология фторполимерного покрытия существенно изменяется и зависит от частоты вращения образца. Установлен еще один параметр, позволяющий изменять строение формируемого фторполимерного покрытия в процессе осаждения методом HW CVD.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. И. Сафонов

**Изучение ионной жидкости [C12-Im-C12][Cl] с помощью метода молекулярной динамики в жидкокристаллическом состоянии**

А. А. Бутюгина

Санкт-Петербургский государственный университет

Класс ионных жидкостей из-за его разнообразия перспективен для изучения, поведение большинства ИЖ в разных условиях до сих пор не исследовано в полной мере. Также они находят все большее применение в современном производстве, например, в качестве компонентов заменителей нефтепродуктов.

Цель данной работы — исследовать ионную жидкость [C12-Im-C12][Cl] в жидкокристаллическом состоянии, используя метод молекулярной динамики. В результате исследования была создана модель в потенциалах OPLS-AA, с помощью программы AKMD создана и уравновешена начальная конфигурация ее раствора в воде, полученный раствор промоделирован в течение 2,4 нс.

При обработке результатов моделирования интерес представляют конформации катиона при температуре 370 К и их взаимодействие с ионами хлора и молекулами воды. Были рассмотрены наиболее выгодные конформации относительно 3 различных связей, для этого была изучена плотность вероятности реализации соответственных двугранных углов. Оказалось, что алкильные цепи с наибольшей вероятностью направлены в одном направлении, более того, они ортогональны плоскости имидазольного кольца и это совпадает с изначальной конфигурацией молекулы. Для изучения второго вопроса была рассмотрена функция радиального распределения взаимодействий. Численные значения этой функций позволяют сделать вывод, все молекулы воды и анионы концентрируются около имидазольных колец.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доц. А. В. Комолкин

**Исследование влияния углерода на механические свойства сплава АК9**

В. Д. Валихов, Н. И. Кахидзе  
Томский государственный университет

Композиционные материалы на основе алюминия и его сплавов обладают широким спектром сфер применения благодаря своим свойствам, таким как высокая удельная прочность, трещиностойкость, пластичность, износостойкость. Введение различных армирующих элементов (частиц, волокон) в алюминий и его сплавы придает композиту повышенную твердость, повышают пределы прочности и текучести. Введение в алюминий углерода способствует увеличению износостойкости и твердости.

В данной работе в качестве матричного материала был использован литейный алюминиевый сплав АК9 (Al — 85,9–91,6 %, Si — 8–11 %, Mn — 0,2–0,5 %, Mg — 0,2–0,4 %). Для введения углерода в расплав был использован порошок древесного угля со средним размером частиц около 85 мкм. В расплав алюминиевого сплава при температуре 700 °С вводился древесный уголь, помещенный в алюминиевый контейнер из фольги и предварительно нагретый до 150 °С. Введение углерода производилось непосредственно в струю расплава с последующим механическим перемешиванием в защитной среде аргона в течение 50 с. Содержание углерода в полученном композиционном материале составило 0,6 масс. %.

Установлено, что введение 0,6 масс. % углерода в алюминиевый сплав АК9 приводит к увеличению механических свойств сплава. Проведенные испытания на твердость по шкале Бринелля и микротвердость по шкале Виккерса показали увеличение значений с 71 до 84 НВ и с 68 до 103 НВ.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-13-01252).*

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. А. Б. Ворожцов

## Верификация пучка эпитепловых нейтронов для бор-нейтронозахватной терапии

Г. Д. Верховод

Новосибирский государственный университет

В Институте ядерной физики СО РАН предложен и разработан источник эпитепловых нейтронов на основе ускорителя тандема с вакуумной изоляцией и литиевой мишени для развития бор-нейтронозахватной терапии — перспективной методики лечения злокачественных опухолей. Для измерения «борной» дозы, обусловленной реакцией  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ , разработан малогабаритный детектор с двумя литиевыми полистирольными сцинтилляторами, один из которых обогащен бором [1]. С применением детектора измерено пространственное распределение борной дозы и дозы гамма-излучения в водяном фантоме  $330 \times 330 \times 315 \text{ мм}^3$  и проведено сравнение полученных результатов с результатами численного моделирования компонент поглощенной дозы в подобном тканеэквивалентном фантоме. Показано, что полученные результаты хорошо согласуются с расчетными. Установлено, что применение 72 мм замедлителя из оргстекла обеспечивает приемлемое качество пучка нейтронов для проведения *in vitro* и *in vivo* исследований, а именно: 1 мА 2,05 МэВ пучок протонов на литиевой мишени обеспечивает мощность дозы 30 Гр экв./ч в клетках, содержащих бор в концентрации 40 ppm, и 6 Гр экв./ч в клетках без бора. Разработанная методика оперативного измерения борной дозы и дозы гамма-излучения позволяет провести подобную верификацию пучка нейтронов, подготавливаемого для клинических испытаний БНЗТ, после размещения системы формирования пучка нейтронов с замедлителем из фторида магния в бункере, соседнем с установкой.

---

1. Bykov T. et all. Initial trials of a dose monitoring detector for boron neutron capture therapy // JINST. 2021. Vol. 16. P01024.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук С. Ю. Таскаев

**Исследование стеклокерамического материала, полученного  
из природного минерального сырья**

Я. Ю. Верхошанский, Д. А. Ткачев  
Томский государственный университет

Стеклокерамика — поликристаллический материал, получаемый путем контролируемой кристаллизации стекла с различными добавками. Она широко применяется в промышленности: от бытовых предметов до сложных ответственных узлов конструкций. Ее используют для создания пористых теплоизоляционных материалов, изготовления пропантов, создания пористых фильтрующих материалов.

В работе изучен материал на основе стекла и природного минерального сырья. Для подготовки материала, производился помол исходного сырья. Затем получали водный шликер, из которого формировались образцы в форме параллелепипеда и спекались при разных температурах в течение 3 мин и различном количестве пластификатора. В качестве пластификатора использовалась легкоплавкая глина в количестве 15; 25 и 30 мас. %.

Изучена структура методом рентгеноструктурного анализа, проведены испытания на прочность в зависимости от содержания кристаллической фазы, определены размеры кристаллитов.

Показано, что данный материал содержит 60–75 мас. % стекла, а на полученных рентгенограммах присутствуют аморфная и кристаллическая фазы. С увеличением количества пластификатора содержание кристаллической фазы возросло с 25 до 48 %. Показано, что размеры кристаллитов для каждого из образцов с 15, 25 и 30 % пластификатора составили 19,8, 18,8 и 30,6 нм соответственно.

Показано, что прочность зависит от температуры спекания: при увеличении температуры спекания предел прочности уменьшается с 0,09 до 0,05 МПа вследствие формирования пор.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. С. Н. Кульков



**Выбор оптимальных конфигураций и создание мониторов пучка синхротронного излучения для станций с ондуляторными источниками**

Н. М. Говоров

Институт ядерной физики им. Г. М. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Необходимыми качествами экспериментальной станции на пучках синхротронного излучения (СИ) являются стабильность и корректность работы рентгеновской оптики. Для ее первичной настройки, переюстировки и контроля пучков СИ используются мониторы, позволяющие измерять как их интенсивность, так и положение.

Цель данной работы — выбор оптимальных конфигураций таких устройств, проектирование прототипа, тестирование отдельных узлов.

Для реализации желаемого устройства была выбрана система с кристаллом алмаза с регистрацией квантов на основе эффекта Комптона. Разработан эскиз, выбраны наиболее критические параметры монитора. В приближении условий эксплуатации проводится исследование влияния тепловых нагрузок на оптические и механические свойства основного кристалла.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Я. В. Ракшун

**Рентгенофазовый анализ двойных оксидов Sr-Ti-O  
в связи с условиями их синтеза**

А. С. Горкуша

Новосибирский государственный университет  
Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск

Двойные оксиды со структурой слоистого перовскита типа  $A_2BO_4$ , где  $A = Sr, Ba, Ca$ ;  $B = Ti$ , привлекают внимание в качестве перспективных катализаторов одностадийных процессов переработки метана в этилен, в частности окислительной димеризации метана, осуществляемой при давлении, близком к атмосферному. В связи с изучением каталитических свойств этих систем актуальной задачей является отработка методик их синтеза, сопровождаемая контролем фазового состава образцов на всех стадиях их приготовления.

В рамках данной работы были исследованы серии образцов Sr-Ti-O, синтезированные различными методами: керамическим методом с использованием предварительной стадии механохимической активации, цитратным и полимерным методами. Исследования проводились для того, чтобы понять, при каких комбинациях методов синтеза и исходных реагентов получается наиболее чистая целевая фаза  $Sr_2TiO_4$ , а также установить промежуточные продукты твердофазного взаимодействия. Для многофазных образцов была отработана методика количественного анализа на основе моделирования полного профиля дифракционных картин.

Показано, что содержание фазы  $Sr_2TiO_4$ , близкое к 100 %, достигается в случае образцов, синтезированных из карбоната стронция, с использованием стадии механохимической активации. В случае же образцов, синтезированных цитратным методом, максимальное содержание целевой фазы составило ~ 70 %. Также в рамках данной работе получены предварительные данные о наличии корреляции каталитических характеристик и фазового состава образцов: лучшие показатели по конверсии метана и селективности в отношении  $C_2$ -углеводородов демонстрируют катализаторы, являющиеся практически однофазными слоистыми перовскитами  $Sr_2TiO_4$ .

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. С. В. Цыбуля

## **Исследование морфологии и структуры поверхности тонкопленочного нитрида алюминия, полученного методом магнетронного распыления**

Б. Ц. Дылыков

Лаборатория ФДНС АТИЦ ФФ НГУ, Новосибирск

Одним из перспективных материалов в твердотельной электронике считается нитрид алюминия (AlN). Среди материалов, используемых для создания диэлектрических покрытий, а также акустических приемников и излучателей, высокочастотных резонаторов, нитрид алюминия привлекает внимание технологов ввиду его физико-химических свойств: большой ширины запрещенной зоны в 6,2 эВ, отличных пьезоэлектрических свойств, высокой скорости распространения акустических волн и высоких значений теплопроводности.

Целью настоящей работы было исследование морфологии наноструктурированных пленок нитрида алюминия на подложках ситалла, полученных методом магнетронного распыления, методами атомно-силовой (АСМ) и растрово-электронной микроскопии (РЭМ). В зависимости от параметров роста пленок (заданных температур нагрева, уровней вакуума в камере, соотношения потоков прекурсора газа и скорости потока прекурсора газа) изменялась структура пленок. Для этих пленок проведено исследование их шероховатости. Это исследование направлено на то, чтобы выявить взаимосвязь между параметрами роста и морфологией и структурой тонких пленок AlN для оптимизации процесса роста и контроля получения гладких поликристаллических пленок с требуемой стехиометрией и пьезоэлектрическими характеристиками.

С применением АСМ и РЭМ удалось показать, что управление морфологией AlN может быть достигнуто за счет изменения параметров роста. А также мы можем дать рекомендации по оптимальному выращиванию тонкопленочного нитрида алюминия методом магнетронного распыления.

*Работа была поддержана грантом Минобрнауки РФ FSUS-2020-0029.*

Научный руководитель — Dr. Tech. Sci. П. В. Гейдт

**Исследование изменения строения композита на основе полиэтилена, модифицированного многослойными углеродными нанотрубками, под воздействием лазерного излучения**

Н. А. Золотарев

Новосибирский государственный университет  
Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск

Композиционные материалы на основе полимерных, керамических матриц в наше время находят широкое практическое применение. Введение углеродных нанотрубок в полимерные матрицы позволяет получить композиты с комплексом улучшенных свойств (поверхностной прочностью, устойчивостью к нагрузкам, высокой электропроводностью и т. п.). В данной работе исследовалась возможность создания эффективных контактов в токопроводящих композитах на основе полиэтилена (ПЭ), модифицированного многослойными углеродными нанотрубками (МУНТ), путем обработки поверхности композита лазерным лучом. Необходимость создания эффективных контактов в полимерных композитах связана с перспективностью разработки практических приложений (например, в электронике, нагревательных элементах, сенсорах и др.).

Целью данной работы являлось исследование изменения строения композитов после лазерной обработки методом спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) и растровой электронной микроскопией. В работе использовались образцы МУНТ/ПЭ с варьируемым содержанием МУНТ (0,75; 1,5; 2,5; 4; 6; 8; 10 вес%) в матрице ПЭ LH3750m (*DaelimPoly*). Установлено, что лазерная обработка позволяет контролируемо удалять с поверхности композита часть полимера (до 70–80 %). По данным спектров КР лазерная обработка, наряду с испарением полимера, приводит к изменению доли аморфного углерода, появляющегося при его термической деструкции. При этом МУНТ практически не изменяли своего строения, что подтверждается постоянством и/или ростом соотношения  $I_{2D}/I_D$ , характеризующего дефектность МУНТ. Полученные контакты обеспечивают снижение электрического сопротивления контактов на 1–2 порядка, что может обеспечивать практическое использование лазерной обработки для создания эффективных контактов в электропроводящих композитных полимерах на основе МУНТ.

Научные руководители — канд. хим. наук В. Л. Кузнецов,  
канд. хим. наук С. И. Мосеенков, д-р хим. наук Б. А. Колесов

## Получение наноразмерных пленок платины, обладающих фрактальными свойствами

Д. В. Иванов, К. Р. Щербатых, В. С. Степанов, А. С. Стречень  
Тверской государственной университет

Целью настоящей работы является комплексное исследование морфологии поверхности, включая фрактальную размерность, для наноразмерных по толщине пленок платины на подложке из слюды. Были определены морфологические характеристики поверхности образца (см. таблицу): среднее арифметическая шероховатость  $S_a$ , среднеквадратичное отклонение  $S_q$ , максимальная высота от пика до впадины на поверхности образца  $S_z$ , коэффициент эксцесса  $S_{ku}$ , коэффициент асимметрии  $S_{sk}$ . Кроме того, приведены значения фрактальной размерности для наноразмерных пленок платины, полученные в режимах АСМ и СТМ.

### Средние значения морфологических характеристик пленок платины на слюде, полученные с использованием оптического интерференционного профилометра NanoMap WLI 1000

Толщина пленки	$S_a$ , нм	$S_q$ , нм	$S_z$ , нм	$S_{ku}$	$S_{sk}$	АСМ	СТМ
						$\bar{D}_c^*$	$\bar{D}_c^*$
63 нм	6,66	8,46	29,9	0,28	-0,05	$2,35 \pm 0,03$	$2,26 \pm 0,04$
135 нм	4,25	5,38	20,1	0,20	0,07	$2,28 \pm 0,02$	$2,12 \pm 0,02$

\* Значение выбиралось из серии измерений на одном образце.

Косвенно наши результаты могут быть подтверждены результатами работы [1]. Полученные значения фрактальной размерности для поверхности пленки платины составили  $D_f = 2,5 \pm 0,1$  (значение  $D_f$  получено с использованием соотношения между фрактальной размерностью профиля и поверхности  $D_L = D_f - 1$ ).

*Исследования выполнены при поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения ГЗ в сфере научной деятельности (проект № 0817-2020-0007).*

1. Gómez-Rodríguez J.M. et all. Fractal surfaces of gold and platinum electrodeposits: dimensionality determination by scanning tunneling microscopy // J. Phys. Chem. 1992. Vol. 96. Iss. 1. P. 347–350.

Научный руководитель — канд. физ.-мат наук Н. Ю. Сдобняков

**Рентгеноспектральное исследование углеродных частиц  
луковичной структуры после облучения ионами азота  
и термического напыления натрия**

А. О. Калганова

Институт неорганической химии  
им. А. В. Николаева СО РАН, Новосибирск

Графитовые материалы традиционно используются при изготовлении анодов для литий-ионных аккумуляторов и могут также использоваться в натрий-ионных аккумуляторах. Включение азота в решетку углеродного материала применяют для увеличения электроемкости щелочно-ионных батарей. В данной работе было проведено внедрение азота в структуру углеродных частиц с луковичным строением графитовых слоев в результате их бомбардировки ионами азота и исследовано взаимодействие натрия с исходными и азотосодержащими частицами. Исследование электронного строения материалов проводилось методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) и рентгеновской спектроскопии поглощения (NEXAFS). Измерения проводились на станции Российско-Германской лаборатории синхротронного источника BESSY II в Берлине. Для интерпретации спектров NEXAFS были проведены квантово-химические расчеты для фрагмента графена  $C_{216}H_{36}$  и фуллеренов  $C_{80}$  и  $C_{320}$  с атомами натрия адсорбированными на поверхностях. Расчеты проводились в рамках теории функционала плотности методом B3LYP в базисе 6-31G.

Из анализа РФЭС и NEXAFS-спектров было выявлено четыре основные формы азота: пиридиновый, гидрированный, графитовый и молекулярный. Обнаружено, что осаждение натрия на облученные азотом углеродные частицы приводит к адсорбции натрия на их поверхности. Моделирование C K- и N K-спектров NEXAFS выявило, что натрий связывается с атомами углерода и азота, расположенными на вакансионных дефектах. Таким образом, дефекты и азотосодержащие группы являются центрами, которые связывают натрий и препятствуют его проникновению вглубь образца. В экспериментальных NEXAFS C K-спектрах было замечено увеличение  $\pi^*$ -резонанса после напыления натрия. Из анализа молекулярных орбиталей было выявлено образование связей между C  $2p_z$  и Na  $3p$ -орбиталями, которые дают более сильный вклад в  $\pi^*$ -резонанс при адсорбции натрия на искривленной поверхности.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Ю. В. Федосеева

## Исследование влияния условий синтеза на структурно-фазовое состояние и свойства майенита

А. В. Капишников

Новосибирский государственный университет  
Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск

Майенит  $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$  (C12A7) является одним из перспективных материалов для электронных устройств и катализаторов. За счет вариации условий синтеза можно влиять на функциональные свойства данного сложного оксида, в частности получать его электридную форму, обладающую высокой электронно-ионной проводимостью. В данной работе исследована методом рентгенофазового анализа эволюция майенита, получаемого при прокалке гидроксидных прекурсоров на воздухе и в атмосфере аргона, в широком диапазоне температур, а также изучено формирование электрида в условиях карботермического и алюмотермического восстановления исходного C12A7. Образование хорошо окристаллизованной фазы майенита в аргоне происходит при 900 °С, в то время как на воздухе при этой же температуре образцы еще содержат около 30 % аморфной фазы. Наблюдаемое вблизи 1100 °С разложение C12A7 носит обратимый характер независимо от среды прокаливания, и дальнейшее повышение температуры сопровождается увеличением доли фазы майенита, а также активным спеканием частиц. Показано, что предложенный простой метод синтеза майенита позволяет получать материал с высокой (~ 30 м<sup>2</sup>/г) удельной поверхностью при температурах до 900 °С, что дает возможность его использования в адсорбционных и каталитических технологиях. Отмечен эффект зауглероживания поверхности C12A7 при длительном карботермическом восстановлении до электридной формы. Рассмотрено влияние температуры синтеза и концентрации восстановительного реагента (Al) на фазовый состав майенита при алюмотермическом восстановлении.

*Работа поддержана грантом Минобрнауки РФ FSUS-2020-0029.*

Научные руководители — Dr. Tech. Sci. П. В. Гейдт,  
канд. хим. наук Р. М. Кенжин

## Исследование влияния $TiB_2$ на механические свойства алюминиевого сплава АМг5

Н. И. Кахидзе, В. В. Платов, В. Д. Валихов  
Томский государственный университет

Известно, что высокомодульные нано- и микрочастицы, вводимые в расплав алюминия, могут посредством дисперсного упрочнения структуры существенно повысить механические характеристики исходного сплава. Цель работы заключалась в исследовании влияния частиц  $TiB_2$  на структуру и механические свойства сплава АМг5.

Введение частиц  $TiB_2$ , полученных методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, в расплав алюминия сопровождалось ультразвуковой обработкой (УЗО) с последующей разливкой в стальной кокиль. Были получены отливки исходного сплава АМг5 и сплава АМг5, упрочненного 0,5 мас %  $TiB_2$ .

Плотность полученных сплавов определялась методом гидростатического взвешивания. Средний размер зерна определяли методом случайных секущих по изображениям микроструктуры, полученными на оптическом микроскопе. Твердость определялась по методу Бринелля с нагрузкой 15,625 кг на стальной индентор диаметром 2,5 мм. Для определения механических характеристик были проведены эксперименты по растяжению плоских образцов на испытательной машине Instron 3369 при скорости движения подвижной траверсы 0,2 мм/мин.

Плотность всех полученных сплавов составила  $2,65 \pm 0,03$  г/см<sup>3</sup>, следовательно, введение частиц не привело к возникновению дополнительной пористости. Средний размер зерна исходного сплава АМг5 после УЗО составил  $205 \pm 30$  мкм. Введение частиц  $TiB_2$  привело к измельчению зеренной структуры полученных сплавов с 205 до  $163 \pm 18$  мкм. Из обработки диаграмм нагружения установлено, что значения предела текучести, предела прочности и максимальных деформаций литого сплава АМг5 с УЗО составили  $57 \pm 4$  МПа,  $155 \pm 11$  МПа и  $11,5 \pm 0,8$  % соответственно. Показано, что механические характеристики сплава АМг5, упрочненного 0,5 мас %  $TiB_2$ , повышаются по сравнению с исходным сплавом без частиц: предел текучести — с 57 до  $71 \pm 6$  МПа, предел прочности — с 155 до  $201 \pm 12$  МПа, максимальная деформация до разрушения — с 11,5 до  $18,8 \pm 0,6$  %.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ  
в рамках научного проекта № 19-38-90020\19.*

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. А. Б. Ворожцов



## Развитие моделирования взаимодействия наночастиц с релятивистскими электронами

А. А. Кичигин

Институт химической кинетики и горения  
им. В. В. Воеводского СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

При изучении оптических свойств плазмонных наночастиц ученые проводят эксперименты, в которых наночастица сканируется электронным пучком. Основное преимущество электронного пучка перед оптическими методами (ограниченными дифракционным пределом) в том, что он позволяет локализовать плазмонные резонансы на поверхности наночастицы с точностью до 1 нм. При сканировании наночастицы быстрые электроны теряют энергию (*electron energy loss spectroscopy* — EELS), а сама частица излучает свет (*cathodoluminescence* — CL). В результате эксперимента для каждого положения луча на сечении частицы строятся спектры EELS и CL.

Чтобы правильно интерпретировать полученные в эксперименте данные, необходимо промоделировать эксперимент на компьютере. Существующая теория покрывает случай только взаимодействия в вакууме, когда кроме частицы и электрона ничего нет. Но в реальности частица помещена на пластину (или внутрь пластины), чтобы противостоять гравитации и столкновениям с быстрыми электронами.

В рамках данной работы была решена объемно-интегральная формулировка уравнений Максвелла через тензор Грина, в результате чего было получено обобщенное решение для взаимодействия в произвольной (в том числе поглощающей) бесконечной среде, включая случай черенковского излучения. Данное решение не было известно ранее, а его частный случай вакуума совпадает с известной ранее теорией.

Полученные в данном решении выражения для моделирования EELS и CL были реализованы в открытом ПО ADDA (<https://github.com/alkichigin/adda>). При тестировании кода результаты моделирования для шаров в вакууме показали отличное совпадение с точным решением (теория Лоренца — Ми). Для серебряного шара в непоглощающей среде (пластина SiNx, скорость света  $0,55c$ , где  $c$  — скорость света в вакууме) и электронов с энергией 120 кэВ (скорость  $0,59c$  — присутствует черенковское излучение) получено отличное совпадение промоделированного спектра с экспериментальным.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук М. А. Юркин

**Моделирование адсорбционных свойств в зависимости от распределения Si в системе H<sub>2</sub> — SAPO-11 при 77 К**

Н. Д. Клишкин

Новосибирский государственный университет  
Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск

Микропористые кремнийалюмофосфаты (SAPO) широко применяются в гетерогенном катализе как в качестве катализаторов, так и носителей активных компонент. Изоморфное замещение атомов Al и P на атомы Si обуславливает появление нескомпенсированных зарядов, и в H<sup>+</sup> форме SAPO содержат кислотные центры, которые играют ключевую роль в кислотно-основном катализе. Сила таких кислотных центров напрямую связана с количеством и конфигурацией размещения Si в структуре. Существующие физические методы для количественного анализа концентрации Si могут быть формально разделены на брутто и поверхностные методы, однако не существует универсального подхода, позволяющего получать информацию о распределении Si непосредственно внутри кристаллического объема. В этой связи адсорбционные методы могут оказаться эффективным инструментом.

В данной работе проведено моделирование всех возможных конфигураций размещения кремния в структуре SAPO-11 для случая «одинокного» размещения 1Si, 2Si, 3Si и «островкового» размещения 5Si на элементарную ячейку (ЭЯ). С использованием методов молекулярного моделирования для всех рассматриваемых структур была проведена процедура оптимизации полученных ЭЯ и рассчитана их энергия. На основе распределения Больцмана определены соответствующие вероятности обнаружить структуру с определенной конфигурацией Si. Для наиболее вероятных конфигураций размещения Si была дополнительно проведена процедура геометрической оптимизации структуры методом DFT. Для выбранных структур «одинокного» и «островкового» размещения методом Монте-Карло были рассчитаны модельные изотермы адсорбции H<sub>2</sub> при 77 К. Проведен анализ корреляции адсорбционных свойств и концентрации Si как для расчетных результатов, так и для ранее полученных экспериментальных данных. Полученные результаты позволяют оценить возможность создания методики по определению концентрации Si внутри объема кристаллита на основе данных по адсорбции водорода при 77 К в SAPO.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук И. В. Гренев

## **Электродуговой синтез металл-углеродных наноматериалов для высокоэффективных ХИТ**

Д. В. Козлачков

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

Литий-ионный аккумулятор (ЛИА) — наиболее распространенный тип электрохимического накопителя энергии в современных электроустройствах. В качестве наиболее типичного анодного материала в ЛИА используется графит (массовая емкость заряда 372 мАч/г), поскольку он стабилен в процессе заряда-разряда за счет относительно малого объемного расширения (~ 10 %).

Олово — перспективный анодный материал для ЛИА, поскольку обладает значительно большей емкостью (вплоть до 994 мАч/г), но значительное изменение объема (~ 254 %) при заряде-разряде приводит к разрушению структуры оловянного анода и нестабильности слоя межфазного электролита на его поверхности. Материал в виде наночастиц меньше подвержен разрушениям от колебаний объема в процессе заряда-разряда. Изоляция наночастиц друг от друга предотвращает их контакт и коагуляцию. Таким образом, оловянные наночастицы могут повысить емкость и обеспечить достаточную стабильность анода в ЛИА.

В данной работе методом электродугового распыления были синтезированы металлические наночастицы олова, инкапсулированные в углеродную матрицу. Синтез проходил в атмосферах гелия, аргона, азота при давлении 25 Торр, токе разряда 120 А и напряжении 25 В. В качестве реагентов для синтеза использовались анодные графитовые стержни с аксиальной забивкой смеси порошков олова и графита в массовом отношении 40 %.

В результате были синтезированы порошкообразные материалы, состоящие из пористых углеродных наноструктур, модифицированных наночастицами олова с размерами в диапазоне 5–100 нм. Согласно предыдущим исследованиям, удельная электрохимическая емкость подобных материалов составляет 150–500 мАч/г в диапазоне плотностей тока 100–1000 мА/г. В дальнейшем электрохимические свойства выборки синтезированных анодных материалов будут изучаться в литий-ионных электрохимических ячейках методами заряд-разрядного циклирования, циклической вольтамперометрии и импедансной спектроскопии.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Д. В. Смовж

**Синтез карбидов вольфрама в плазме дугового разряда  
постоянного тока**

А. И. Кокорина, А. А. Гумовская  
Томский политехнический университет

Карбиды вольфрама обладают рядом перспективных физических и физико-химических свойств (высокой электро- и теплопроводностью, высокой температурой плавления, высокими твердостью и износостойкостью, химическим сопротивлением коррозии, инертностью к воздействию кислот и щелочей), поэтому их применяют в ряде областей: в катализе реакций, при создании абразивных материалов, режущих инструментов и штампов и т. д. [1]. С увеличением потребления карбида вольфрама растет актуальность проблемы поиска наиболее эффективного метода синтеза карбида вольфрама.

В данной работе была применена перспективная модификация электродугового синтеза, отличительной особенностью которой является отсутствие вакуума или защитной газовой среды, что возможно благодаря эффекту самоэкранирования реакционного объема угарным и углекислым газами CO и CO<sub>2</sub>, интенсивно выделяющимися в процессе синтеза [2].

Были проведены серии экспериментов, в которых изменялись различные параметры синтеза: время синтеза, исходные материалы, соотношение масс графита и порошка вольфрама, длина и диаметр катода, сила тока. Фазы карбидов вольфрама в продуктах синтеза были идентифицированы методами рентгенофазового анализа, растровой электронной микроскопии и просвечивающей электронной микроскопии.

---

1. Kuz'michev E. N., Nikolenko S.V., Balakhonov D.I. Preparation of Tungsten Carbide from Scheelite Concentrate using Concentrated Energy Fluxes // Theor. Found. Chem. Eng. 2018. Vol. 52. № 4. P. 619–623.

2. Pak A. Ya., Shanenkov I. I., Mamontov G. Y., Kokorina A. I. Vacuumless synthesis of tungsten carbide in a self-shielding atmospheric plasma of DC arc discharge // Int. J. Refract. Met. Hard Mater. 2020. Vol. 93. P. 105343.

Научный руководитель — канд. техн. наук А. Я. Пак

***In situ* дифракционные исследования Mn-Zr оксидных катализаторов в реакциях окисления СО и пропана**

В. П. Коновалова

Новосибирский государственный университет  
Институт катализа им Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск

Высокая каталитическая активность Mn-содержащих оксидов в реакциях полного окисления СО и углеводородов обусловлена способностью катионов марганца легко менять степень окисления. Каталитические свойства оксидов значительным образом зависят от условий процесса, например от состава используемого топлива. Поэтому целью работы было определение строения Mn-содержащих оксидных катализаторов в условиях реакции окисления СО и пропана при варьруемом соотношении кислорода и субстрата.

Mn-Zr катализаторы, полученные методом соосаждения, были протестированы в реакциях окисления СО и пропана. Показано, что в зависимости от условий получения, соотношения катионов марганца и циркония формируются различные типы активных компонентов. Наблюдается как образование оксидов марганца ( $Mn_2O_3$  и  $Mn_3O_4$ ), так и формирование Mn-Zr твердого раствора. Превращения в данных катализаторах были изучены методами *in situ* рентгеновской дифракции и масс-спектрометрии в среде с различным соотношением СО и  $O_2$ , а также в пропане.

Оказалось, что в зависимости от соотношения СО и  $O_2$  меняется состояние активного компонента катализатора. При составе газовой смеси  $CO : O_2 = 1 : 1$  и  $300\text{ }^\circ\text{C}$  по данным масс-спектрометрии происходит окисление СО (конверсия 20 %), при этом активный компонент катализатора не изменяется. При обработке в смеси, не содержащей газообразного кислорода, происходит взаимодействие СО с кислородом оксида и, соответственно, восстановление оксидов марганца до MnO. Данный процесс обратим, при реокислении происходит рост количества  $Mn_3O_4$  в катализаторе, что сопровождается увеличением конверсии СО до 55 %.

Исследованы изменения в структурных параметрах при непрерывном нагревании Mn-Zr катализатора в среде с  $C_3H_8$ . Наблюдается значительный рост параметра решетки твердого раствора в несколько стадий, а также восстановление оксида  $Mn_2O_3$  до MnO. Так как изменения параметра решетки при охлаждении необратимы, то можно предположить, что при взаимодействии с пропаном происходит либо восстановление катионов Mn в объеме твердого раствора, либо выход катионов марганца на поверхность.

Научный руководитель — канд. хим. наук О. А. Булавченко

**Влияние температуры и времени отжига на кристаллизацию тонких пленок  $a\text{-SiO}_{0,2}$ , индуцированную золотом**

Н. А. Лунев

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

Тонкие пленки поликристаллического кремния (poly-Si), получаемые на легкоплавких подложках, широко используются при изготовлении дисплеев, сенсоров и солнечных элементов. Метод металл-индуцированной кристаллизации является перспективным подходом для получения такого материала. В недавних исследованиях была показана возможность использования тонких пленок аморфного субоксида кремния ( $a\text{-SiO}_x$ ,  $0 < x < 2$ ) в качестве исходного кремнийсодержащего прекурсора в процессе алюминий-индуцированной кристаллизации вместо широко используемого аморфного кремния [1]. В данной работе изучался процесс золотом-индуцированной кристаллизации тонких пленок  $a\text{-SiO}_{0,2}$ , а также структурные свойства получаемого материала в зависимости от температуры и времени отжига.

Были получены образцы в компоновке «подложка/Au/ $a\text{-SiO}_{0,2}$ ». Методом термовакuumного напыления на подложки были нанесены слои золота толщиной около 30 нм. Далее на слои Au методом газофазного плазмохимического осаждения были нанесены тонкие пленки  $a\text{-SiO}_{0,2}$  толщиной около 150 нм. Полученные образцы отжигали в высоком вакууме ( $10^{-5}$  Па) при температуре 250–350 °С в течение 3–50 ч. Структурные свойства отожженного материала были исследованы методами оптической и сканирующей электронной микроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния, рентгеноструктурного анализа (РСА). Отжиг при температурах выше 300 °С приводит к формированию poly-Si. С помощью метода РСА было показано формирование силицидов золота [2] при температурах выше 250 °С, которые распадались при увеличении температуры и времени отжига.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке  
Российского научного фонда (проект № 19-79-10143).*

---

1. Zamchiy A. O. et al. Aluminum-induced crystallization of silicon suboxide thin films // Appl. Phys. A. 2018. Vol. 124. No. 9. P. 1–4.

2. Hultman L. et al. Crystallization of amorphous silicon during thin-film gold reaction // J. Appl. Phys. 1987. Vol. 62. No. 9. P. 3647–3655.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. О. Замчий

**Изучение атомной диффузии на структурированных подложках Si  
методом молекулярной динамики**

Ма Синьжуй

Новосибирский государственный университет

Основой многих микроэлектронных приборов и устройств, таких как лазеры на квантовых точках (КТ), спинтронная память и логические элементы для квантовых вычислений, служат пространственно-упорядоченные массивы КТ. Устоявшимся методом для получения таких массивов является гетерозепитаксиальный рост на структурированных (*pre-patterned*) подложках, т. е. на подложках с паттернингом в виде системы пространственно-упорядоченных ямок. Обычно наноостровки зарождаются в центрах ямок. Но если ямки частично пересекаются, то зарождение возможно и в местах пересечений, и тогда формируются сверхплотные массивы с более чем одним наноостровком на ямку. Механизм атомной диффузии, сопровождающей рост на структурированных подложках, не достаточно изучен. В данной работе методом молекулярной динамики рассчитан потенциальный рельеф в области пересечений квадратных ямок на подложке Si. С помощью анализа полученного потенциального рельефа определены энергия активации поверхностной атомной диффузии и характерные маршруты миграции атомов Ge по стенкам ямки. Показано, что в вершинах квадратных ямок расположены минимумы потенциальной энергии. Предположено, что в этих точках в процессе осаждения Ge возможна его преципитация с последующим образованием наноостровков. Приведены данные экспериментов, в которых наноостровки росли в местах пересечений квадратных ямок.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук П. Л. Новиков

## **Влияние гидрофобных свойств фторполимерных покрытий мембраны на процесс сепарации водонефтяной эмульсии**

А. В. Мельник

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Сепарация нефтепродуктов и воды — важная область не только для научных исследований, но также для решения экологических, экономических и социальных вопросов. Разливы нефти и сброс промышленных нефтесодержащих сточных вод представляют большой риск для окружающей среды и здоровья человека. Кроме того, вода почти гарантированно присутствует в нефти при нефтедобыче. Поэтому стадия обезвоживания является неотъемлемой частью нефтепереработки. И потому разработка передовых технологий и материалов для эффективного и устойчивого разделения воды и нефти имеет важное значение.

Недостатками применения традиционных методов сепарации являются высокое энергопотребление, низкая эффективность сепарации, образование вторичных загрязнителей и большие размеры. Эти трудности побуждают людей разрабатывать более эффективные методы. В последние годы технология мембранной сепарации получила дальнейшее развитие для достижения максимальной эффективности разделения водонефтяных эмульсий.

Механизм сепарации основан на различных свойствах смачивания гидрофобных покрытий водой и нефтепродуктами, что приводит к их разделению. Сепарационная мембрана представляет собой металлическую сетку с нанесенным фторполимерным покрытием, полученным с помощью метода HW CVD. С использованием изготовленных мембран были проведены исследования по изучению влияния свойств смачивания покрытий на эффективность и скорость сепарации эмульсий.

Проведенные эксперименты показали, что полученные мембраны могут использоваться для эффективной сепарации. Были проведены эксперименты на сетках с разными свойствами смачивания, согласно которым эффективность сепарации увеличивалась с увеличением контактного угла смачивания. Было определено, что гидрофобные мембраны применимы для разделения богатых нефтью водонефтяных эмульсий, но менее эффективно работают для разделения эмульсий с высокой концентрацией воды.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. И. Сафонов



**Ускорение термического разложения PETN с помощью метода ионизации аэродинамическим/термическим распадом капель**

И. А. Молчанов  
Институт неорганической химии  
им. А. В. Николаева СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Тетранитрат пентаэритрита (PETN) является токсичным и канцерогенным взрывчатым веществом, а его широкое производство приводит к загрязнению почвы и грунтовых вод. В связи с этим востребованы методы принудительного разложения PETN с целью очистки окружающей среды от этого загрязнения. Каталитические подходы тоже востребованы.

Целью данной работы является изучение механизма термического разложения PETN с помощью метода ионизации аэродинамическим термическим разрывом капель (ATBDI), в котором ионизация аналита происходит в нагреваемом капилляре. В работе оцениваются каталитических свойств как капель, так и материала капилляра (меди, стекла, железа, керамики). Эксперименты проводились на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 6130 с дальнейшей обработкой в среде Agilent ChemStation.

В ходе эксперимента получены масс-спектры при различных температурах капилляра, были измерены относительные интенсивности всех пиков, определены пики масс-спектров, предложены наиболее вероятные ионы для отношения  $m/z$ .

В ацетонитриле при разрыве капель в нагретом капилляре происходит процесс денитрации PETN, в ходе которого образуются денитрированные ионы (нитрогруппа замещается водородом). Это подтверждается наличием в масс-спектре пика, принадлежащего денитрированным ионам.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Д. Г. Шевень

## **Формирование доменов на неполярном срезе кристаллов MgOLN и PMN-PT в результате облучения сфокусированным ионным пучком**

Е. А. Пашнина

Уральский федеральный университет  
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург

Изучение эволюции доменной структуры в результате облучения сегнетоэлектрических кристаллов сфокусированным ионным пучком представляет интерес для создания регулярной доменной структуры. Для изучения прорастания доменов в полярном направлении использовалось облучение пластин с направлением спонтанной поляризации в плоскости.

Проводилось облучение пластин Y-среза ниобата лития  $\text{LiNbO}_3$ , легированного MgO (MgOLN), и (100)-среза PMN-PT в тетрагональной фазе. На облучаемую поверхность был нанесен слой фоторезиста, а противоположную поверхность покрыли медным электродом. Облучение производилось с помощью двухлучевой рабочей станции *Auriga Crossbeam Workstation* (Carl Zeiss NTS), интегрированной с литографической системой *Elphy Multibeam* (Raith GmbH). Домены визуализировались при помощи сканирующей микроскопии пьезоэлектрического отклика. Известно, что нанесение слоя резиста позволяет улучшить регулярность доменной структуры [1]. Показано, что в результате точечного облучения формируются и растут в полярном направлении клиновидные домены. Длина доменов увеличивается с дозой облучения.

Для объяснения эволюции доменной структуры была предложена модель роста доменов в созданном ионами электрическом поле [2]. При этом увеличение ширины доменов рассматривается как результат генерации ступеней на доменной стенке, а удлинение — как результат движения кинков в поле заряженных кинков.

Полученные результаты представляют интерес для разработки методов доменной инженерии, в частности, для создания преобразователей частоты лазерного излучения на основе нелинейно-оптических кристаллов с регулярной доменной структурой.

---

1. Chezganov D. S. et al. Influence of the artificial surface dielectric layer on domain patterning by ion beam in MgO-doped lithium niobate single crystals // Appl. Phys. Lett. 2017. No. 110. 082903.

2. Chezganov D. S. et al. Domain patterning of non-polar cut lithium niobate by focused ion beam // Ferroelectrics. 2020. No. 559. P. 66.

Научные руководители — канд. физ.-мат. наук Д. С. Чезганов,  
канд. физ.-мат. наук А. С. Нураева, д-р физ.-мат. наук В. Я. Шур

**Осаждение функциональных фторполимерных покрытий из плазмы  
тлеющего разряда на металлические поверхности**

А. В. Петрова

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Придание материалам различных функциональных свойств является одной из востребованных задач современных технологий. Особый интерес представляют материалы, обладающие различными свойствами смачивания, в частности гидрофобными и супергидрофобными. Такие покрытия могут быть использованы для интенсификации теплообмена, самоочищения, снижения гидродинамического сопротивления и т. д. Одним из способов получения заданных свойств у материала является нанесение на его поверхность тонкой пленки другого материала, обладающего необходимыми свойствами. Среди множества типов вакуумных покрытий значительный интерес представляют полимерные, а в особенности фторполимерные покрытия, которые обладают высокой гидрофобностью.

В представленной работе для осаждения фторполимерных покрытий был применен тлеющий разряд в среде различных газов. Данный метод позволяет не только производить осаждение покрытий, но и предварительно очищать поверхность перед осаждением с помощью изменения параметров разряда. В результате проделанной работы были получены фторполимерные покрытия с различными свойствами смачивания.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Правительства РФ для поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых № 075-15-2019-1888.*

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. И. Сафонов

**Фазовые переходы в системе  $ZrW_{2-x}Mo_xO_8$  ( $0 \leq x \leq 2$ )  
под воздействием давления**

М. Ю. Петрушина

Новосибирский государственный университет

Система типа  $ZrW_{2-x}Mo_xO_8$  ( $0 \leq x \leq 2$ ) представляет особый интерес как с научной, так и с практической точки зрения. Данные материалы обладают уникальным свойством — отрицательным коэффициентом термического расширения, т. е. сжимаются при нагревании. Подобное явление позволяет использовать данные материалы в качестве нанодисперсной добавки в матрице для компенсации общего теплового расширения композиционного материала. На выходе получают композиты с высокими прочностными и дилатометрическими показателями, решающие широкий спектр инженерных задач. Композиты на основе данной системы планируются использовать в экстремальных условиях: под воздействием не только высокой температуры, но и давления. Поскольку, например, в нефтяных магистральных трубопроводах высокого давления существует проблема увеличения в размере деталей арматуры в результате термоциклов, что в большинстве случаев приводит к преждевременному износу изделий и снижению энергоэффективности. В связи с этим целью данной работы является исследование поведения системы твердых растворов  $ZrW_{2-x}Mo_xO_8$  ( $0 \leq x \leq 2$ ) под воздействием высокого давления для определения возможных фазовых переходов.

В результате эксперимента с использованием угловой дисперсионной дифракции на ячейках с мембранно-управляемой алмазной наковальной с кюветами по 600 мкм и при давлении до 10 ГПа с последующей декомпрессией получены данные по трансформациям, происходящим в системе  $ZrW_{2-x}Mo_xO_8$  ( $0 \leq x \leq 2$ ) на примере составов с  $x = 0,4; 1; 1,6$ . Было обнаружено, что при приложенном давлении 5,04 ГПа кубический  $ZrW_{1,6}Mo_{0,4}O_8$  претерпевает фазовый переход в орторомбическую фазу, а для  $ZrW_{0,4}Mo_{1,6}O_8$  — уже при 1,38 ГПа, что делает W-обогащенные твердые растворы предпочтительными для создания композитов, в отличие от монофазных  $ZrW_2O_8$  и  $ZrMo_2O_8$ .

Полученные данные вносят значительный вклад в область конструирования материалов с программируемыми свойствами и являются первым исследованием фаз высокого давления смешанных оксидных твердых растворов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-33-90041).*

Научный руководитель — канд. хим. наук, доц. А. И. Губанов

**Структура и оптические свойства монокристаллов комплексов  
на основе фталоцианиноподобных молекул  
с азотсодержащими лигандами**

И. А. Ромпанен

Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка  
Высшая школа экономики, Москва

Кристаллы металлорганических комплексов на основе плоских фталоцианиноподобных молекул (фталоцианинов Pс, порфиринов и др.) и анионов представляют особый интерес как материалы с перспективными физико-химическими свойствами. В центр Pс может координироваться атом металла Me = Co, Fe, Sn и др., а модификация MePс путем присоединения к Me различных аксиальных лигандов X = CN, Im, Cl позволяет менять параметры латерального сдвига MeXPс во фталоцианиновой подрешетки и, как следствие, управлять степенью  $\pi$ - $\pi$ -взаимодействия макроциклов.

В данной работе было установлено влияние CN-лигандов на кристаллические и молекулярные структуры монокристаллов новых комплексов с анионами  $\{\text{Sn}^{\text{IV}}(\text{CN})_2[\text{TPP}(\text{CN})_3]^{-}\}^{-}$ ,  $[\text{B}^{\text{III}}(\text{CN})[\text{SubPc}(\text{CN})_2]_2]^{2-}$ ,  $[\text{Ga}^{\text{III}}(\text{CN})(\text{Pc}^{3-})]^{-}$  и  $[\text{In}^{\text{III}}(\text{CN})_2(\text{Pc}^{3-})]^{-}$ . На основе результатов рентгеноструктурного анализа были рассмотрены процессы присоединения аксиальных CN лигандов к различным фталоцианиноподобным макроциклам, а именно фталоцианинам, субфталоцианинам и тетрапорфиринам. Также было изучено влияние компонентного состава и типа металла, координирующего в центр макроцикла, на положение и ориентацию аксиального лиганда. В работе были получены оптические свойства (ИК-, УФ-диапазоны) для каждого нового анионного комплекса.

Результаты оптических и рентгеноструктурных исследований помогают прогнозировать и объяснять появление практически значимых физико-химических свойств металлорганических фталоцианиновых комплексов, что, в свою очередь, позволяет разрабатывать функциональные материалы на их основе.

Научный руководитель работы — канд. физ.-мат. наук А. В. Кузьмин

## Изучение оптических и электрических свойств пленок из дисперсий углеродных нанотрубок

О. Т. Рыжук

Новосибирский государственный университет

Углеродные нанотрубки обладают набором уникальных электрических, оптических и механических свойств. Поэтому наноматериалы на их основе в настоящее время являются чрезвычайно перспективными во многих областях науки и производства. В связи с этим актуальной задачей является развитие методов контроля параметров произведенных материалов.

В работе исследовались пленки из дисперсий углеродных одностенных нанотрубок (ОУНТ) производства компании OCIAL, а также восстановленного оксида графена (rGO), синтезированного и предоставленного В. Е. Мурadianом. Изучение материала проводилось с использованием спектрометра и спектрофотометра, также проводились измерения сопротивлений пленок. На начальных этапах были изготовлены образцы дисперсий на базе воды с добавлением поверхностно-активного вещества SDBS с заданными массовыми концентрациями, определены их коэффициенты оптического поглощения (ОП) на длине волны 500 нм и коэффициент экстинкции чистых нанотрубок ( $\approx 64100 \text{ см}^{-1}$ ). Из растворов дисперсии при помощи лабораторного аэрографа были изготовлены пленки, проводился отжиг в инертной среде азота при температуре 350 °С для удаления SDBS. Для полученных образцов были сняты спектры ОП, по которым оценены толщины пленок. По наличию максимумов поглощения в спектрах из дисперсий ОУНТ был рассчитан средний диаметр трубок, составивший  $\approx 1,4$  нм, что несколько отличается из оцененного по дыхательной моде рамановского спектра (1,6 нм).

Были получены значения электрических сопротивлений образцов, измерения проводились четырехконтактным способом для устранения влияния контактного сопротивления на границах пленок. После измерений все образцы были допированы в парах азотной кислоты. По определенным значениям толщин и сопротивлений рассчитывались показатели удельных сопротивлений допированных и недопированных образцов пленок из дисперсий ОУНТ и rGO. Допирование привело к резкому снижению (в 10–15 раз) сопротивления для пленок из ОУНТ и увеличению для пленок из rGO.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук В. О. Сайк

## Определение локальной ориентации сегнетоэлектрических доменов на основе метода каналирования электронов

Р. Ф. Сайфетдинов, М. Н. Лысаков, Е. А. Пашнина  
Уральский федеральный университет  
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург

Важной задачей физики сегнетоэлектриков является изучение доменной структуры. Представляет значительный интерес определение ориентации доменов неразрушающими методами.

Нами был использован метод, основанный на каналировании электронов (*electron channeling orientation determination*, eCHORD) [1], при котором ориентационный контраст обусловлен зависимостью коэффициента обратного отражения электронов от ориентации кристаллической решетки относительно падающего пучка электронов [2].

В данной работе для определения ориентации доменов мы использовали эффект каналирования электронов и обработку изображений с помощью индексации на основе моделирования динамического рассеяния электронов. Измерения проводились при комнатной температуре с помощью сканирующего электронного микроскопа Merlin (*Carl Zeiss*, Германия) с четырехсекционным детектором обратно-отраженных электронов с селекцией по углам при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе пучка 5 нА. Моделирование динамических картин каналирования электронов производилось в программном пакете с открытым исходным кодом EMsoft [3]. Для индексации использовались различные метрики подобия. Обработка данных и индексация кристаллографических ориентаций были реализованы с помощью оригинального программного обеспечения.

Предложенный подход позволил определять ориентацию спонтанной поляризации и характеризовать доменные стенки в сегнетоэлектрике.

---

1. Lafond C. et all. Electron CHanneling ORientation Determination (eCHORD): An original approach to crystalline orientation mapping // Ultramicroscopy. 2018. Vol. 186. P. 146.

2. Zaefferer S., Elhami N.-N. Theory and application of electron channelling contrast imaging under controlled diffraction conditions // Acta Mater. 2014. Vol. 75. P. 20.

3. Marc De Graef Research Group/Carnegie Mellon University: EMsoft. URL: <https://github.com/EMsoft-org/EMsoft> (дата обращения: 26.02.2021).

Научные руководители — канд. физ.-мат. наук Д. С. Чезганов,  
канд. физ.-мат. наук А. С. Нураева, д-р физ.-мат. наук В. Я. Шур

**Исследование вариации состава в однослойных везикулах  
DOPC/DPPC-d62 и DPPC/DPPC-d62 методом спектроскопии  
комбинационного рассеяния света**

К. П. Сараева

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Однослойные фосфолипидные везикулы используются как транспортные контейнеры в биомедицинских задачах. Свойства везикул в значительной степени определяются ее составом. Таким образом, характеристика эффектов разброса состава является актуальной задачей. Спектроскопия комбинационного рассеяния света в сочетании с оптическим пинцетом позволяет измерять состав одиночных везикул и исследовать вариацию состава в суспензии. Цель работы заключается в изучении вариации состава на примере однослойных везикул в двух смесях: гомогенной — DPPC/DPPC-d62 и смеси, склонной к фазовому разделению, — DOPC/DPPC-d62.

В работе исследованы образцы смесей DPPC/DPPC-d62, смешанных в соотношении 1 : 1, и DOPC/DPPC-d62 (1 : 2). Получены образцы липидных пленок, сформированных при высыхании хлороформа, суспензия многослойных везикул и суспензия однослойных везикул диаметром 1 мкм. Для получения однослойных везикул использовался метод экструдирования многослойных образцов. В докладе представлены спектры комбинационного рассеяния света для всех приготовленных образцов. Проведено поэтапное сравнение однородностей состава образцов, полученных из разных смесей. Представлены данные о разбросе состава, сделаны выводы об однородности состава образцов, сформированных из смеси DOPC/DPPC-d62.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 19-12-00127.*

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук К. А. Окотруб



## Структура и механические свойства магниевого сплава МЛ12, упрочненного наночастицами AlN

М. А. Селиховкин, А. А. Ахмадиева, Н. И. Кахидзе  
Томский государственный университет

Снижение общего веса конструкций с сохранением эксплуатационных свойств является важной и актуальной задачей для транспортной и аэрокосмической промышленности. Магний и его сплавы — перспективные материалы за счет высокой удельной прочности и малой плотности, при этом существует потребность в повышении эксплуатационных свойств. Цель работы заключалась в исследовании влияния высокомолекулярных наночастиц нитрида алюминия (AlN) на структуру и механические свойства магниевых сплавов МЛ12.

В качестве исходного материала в работе использовался магниевый сплав марки МЛ12, в расплав которого вводили наночастицы AlN с последующей разливкой в стальную кокиль при температуре расплава 690 °С. В аналогичных условиях были получены отливки МЛ12 + 0,1/0,3/1 мас.% AlN и без наночастиц для сравнения.

Твердость определялась по методу Бринелля с нагрузкой 250 кг на сферический индентор диаметром 5 мм с выдержкой в 30 с. Микроструктура исследовалась на микроскопе Olympus GX71, средний размер зерна исследуемых сплавов был посчитан методом случайных секущих по изображениям микроструктуры. Испытание на растяжение стандартных плоских образцов были проведены на испытательной машине Instron 40/50-20 со скоростью деформации 0,01 с<sup>-1</sup>.

Обнаружено, что в сплаве магния без наночастиц нитрида алюминия твердость составила 58 НВ. Твердость сплавов с содержанием AlN 0,1/0,3/1 мас.% составила 58, 56 и 55 НВ соответственно. Средний размер зерна у исходного сплава без частиц составил 490 мкм. При введении AlN в расплав средний размер зерна полученных сплавов уменьшается: МЛ12 + 0,1 мас.% AlN до 420 мкм, МЛ12 + 0,3 мас.% AlN до 465 мкм, МЛ12 + 1 мас.% AlN до 310 мкм. Исходя из данных, полученных при растяжении стандартных образцов исследуемых сплавов, установлено, что для исходного и модифицированного сплава с содержанием 0,1 мас.% AlN условный предел текучести составил 84 и 78 МПа, предел прочности — 152 и 174 МПа при значении максимальных деформаций до разрушения 6,9 и 7,6 % соответственно.

*Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России (проект № 0721-2020-0028).*

Научные руководители — канд. техн. наук И. А. Жуков,  
д-р физ.-мат. наук, проф. А. Б. Ворожцов

**[Pd(NH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>]XO<sub>4</sub> (X = Cr, Mo): структура, отрицательное тепловое расширение, продукты термического разложения**

П. С. Серебренникова  
Новосибирский государственный университет  
Институт неорганической химии  
им. А. В. Николаева СО РАН, Новосибирск

Комплексные соли ряда [Pd(NH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>]XO<sub>4</sub> (X = Cr, Mo) являются перспективными предшественниками металлических сплавов-катализаторов. Ожидается, что при термоллизе продукта совместной кристаллизации этих солей (ПСК) можно получить сплавы системы Pd-Cr-Mo. Однако, чтобы делать вывод об условиях получения той или иной фазы, необходимо иметь фундаментальное представление о структуре соли-предшественника. Целью работы является рентгенографическая характеристика исследуемых солей и продуктов их термоллиза.

Проведен анализ двух ПСК, полученных в результате совместной кристаллизации исходных солей при соотношениях мольных долей металлов Mo : Cr = 1 : 1 и 1 : 3. Рентгеноструктурный анализ ~ 10 монокристаллов показал, что в обоих случаях продукты синтеза неоднородны по составу и представляют собой твердые растворы [Pd(NH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>]Mo<sub>x</sub>Cr<sub>1-x</sub>O<sub>4</sub> (x от 0,04 до 0,88). Показано, что зависимость параметров элементарной ячейки (ПЭЯ) от x близка к линейной. На примере монокристалла [Pd(NH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>]Mo<sub>x</sub>Cr<sub>1-x</sub>O<sub>4</sub> (x = 0,034) протестирована разработанная ранее методика уточнения ПЭЯ, основанная на выделении K $\alpha$ <sub>1</sub>-составляющих [1]. Показано, что значения ПЭЯ, определенные по этой методике на двух разных приборах (Bruker D8 Venture и Bruker X8 Apex), отличаются не более чем на 0,001 Å. По этой же методике уточнена зависимость ПЭЯ монокристалла [Pd(NH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>]CrO<sub>4</sub> от температуры в интервале от -173 до +77 °С и установлен эффект отрицательного теплового расширения в диапазоне температур от 27 до 77 °С.

Проведен термоллиз отдельных частей ПСК в атмосфере He (в присутствии LiH) и H<sub>2</sub> при температурах от 910 до 1330 °С. При температурах ниже 1000 °С показано преимущественное образование твердого раствора на основе ГЦК-решетки, а при более высоких температурах — ОЦК-решетки. Значения ПЭЯ полученных металлических фаз позволяют предположить образование тройных твердых растворов системы Pd-Cr-Mo.

---

1. К вопросу о точности определения параметров элементарной ячейки монокристаллов на современных лабораторных дифрактометрах / П. С. Серебренникова и др. // ЖСХ. 2021. № 5. DOI: 10.26902/JSC\_id72860.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. С. А. Громилов

**Исследование комплексов  $\text{Cu}(\text{hfac})_2$  с пиридил-замещенными нитронилнитроксилами методами магнетохимии и рентгеноструктурного анализа**

К. А. Смирнова

Международный томографический центр СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Соединения  $\text{Cu}(\text{II})$  с производными пиридил-замещенных нитронилнитроксильных радикалов (L) демонстрируют эффекты, сходные со спин-кроссовером [1]. Подобные системы могут быть использованы в качестве молекулярных устройств, например индикаторов или переключателей. Температура и характер спинового перехода в таких соединениях определяются заместителями, не только в нитронилнитроксильном фрагменте, но и в пиридиновом цикле.

Целью данной работы является исследование методами магнетохимии и рентгеноструктурного анализа комплексов  $\text{Cu}(\text{hfac})_2$  с нитронилнитроксилами, содержащими тиофенил, пропил, хлор, фенил и трифторметил в качестве заместителей в пиридиновом фрагменте.

Установлено, что кристаллическая структура исследованных комплексов образована биядерными молекулами  $[\text{Cu}(\text{hfac})_2\text{L}]_2$ , в которых радикал выполняет мостиковую функцию за счет координации атомом O нитронилнитроксильного фрагмента и атомом N пиридинового цикла. Проведенное магнетохимическое исследование показало наличие фазового перехода в комплексах с тиофенил- и фенил-пиридил-замещенными нитронилнитроксилами: при понижении температуры происходит значительное изменение эффективного магнитного момента в интервале температур 220–140 К и 300–100 К соответственно.

Рентгеноструктурные исследования в интервале температур  $T = 296 - 120$  К комплекса с тиофенил-пиридил-замещенными радикалами позволили установить, что фазовые переходы обусловлены структурными изменениями внутри координационного полиэдра  $\text{Cu}(\text{II})$ , в результате которых изменяется координация нитронилнитроксила с аксиальной на экваториальную, что приводит к смене обменного взаимодействия между спинами иона  $\text{Cu}(\text{II})$  и нитронилнитроксила со слабого ферромагнитного на сильное антиферромагнитное.

---

1. Tolstikov S. E. et al. Heterospin complex showing spin transition at room temperature // Polyhedron. 2015. Vol. 100. P. 132–138.

Научные руководители — канд. хим. наук А. С. Богомяков, Г. А. Летягин

**Методы моделирования синхротронного излучения:  
от трассировки лучей до подходов волновой оптики**

А. Е. Требушинин

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

В работе рассмотрены основные методы моделирования синхротронного излучения (СИ). Особое внимание уделено процессу формирования СИ при пролете релятивистского электронного пучка через вставное устройство: ондулятор, вигглер или поворотный магнит. Приведены подходы моделирования распространения СИ через оптическую систему, такие как широко используемый метод трассировки лучей и менее распространенный подход волновой оптики, указаны границы их применимости. Рассмотрены модельные примеры использования обоих методов при проектировании рентгенооптических станций источников СИ.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Я. В. Ракшун

**Разработка полимерных композиционных материалов  
на основе политетрафторэтилена,  
армированного экологически чистыми волокнами из базальта**

А. А. Ушканов

Северо-Восточный федеральный университет  
им. М. К. Аммосова, Якутск

Разработка полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) для использования их в узлах трения техники в условиях экстремально холодного климата является актуальной задачей современного материаловедения. Несмотря на довольно широкий выбор наполнителей различной природы, современный мир нуждается в более экологичном материале. В докладе *Green Alliance*, организации в области охраны окружающей среды, углеродное волокно было названо одним из нескольких материалов, которые могут создать проблемы с отходами в будущем.

Целью работы является исследование прочности и износостойкости композитов на основе ПТФЭ, армированного базальтовыми волокнами.

Объектами исследования служили ПТФЭ и композиты на его основе, содержащие в качестве наполнителей базальтовые волокна и  $\beta$ -сиалон, общей формулой  $Si_{6-x}Al_xO_xN_{8-x}$ , где  $x = 0 \div 4,2$ . Композиты для испытаний получали сухим смешением компонентов с последующим формованием, после чего спекали в муфельной печи при температуре 375 °С и производили калибровку. Исследования проводились по стандартным методикам.

Основываясь на полученных результатах, можно сделать следующие выводы. Разработанные композиты обладают улучшенными свойствами по сравнению с ненаполненным полимером. Обнаружено, что при введении базальтового волокна свойства деформационной прочности композитов увеличиваются на 10–20 %. Установлено, что при введении наполнителей происходит увеличение износостойкости в интервале от 850 до 1000 раз по сравнению с чистым ПТФЭ. Таким образом, базальтовые волокна имеют большие потенциальные возможности улучшения характеристик ПКМ наравне с углеродными наполнителями, но при этом их производство более экологично и экономически выгодно.

Научный руководитель — канд. тех. наук, доц. С. А. Слепцова

## **Создание проводящей поверхности в мембранах пористого анодного оксида алюминия**

И. А. Харченко

Сибирский федеральный университет, Красноярск  
Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

В настоящее время в области мембранных технологий особое внимание направлено на создание материалов, обладающих высокой селективностью при проведении процессов разделения и фильтрации. Одним из перспективных способов создания мембранных материалов является анодное окисление металлов в растворяющих электролитах. Примером таких материалов является пористый анодный оксид алюминия (ПАОА).

Осаждение на стенки пор углерода из газовой фазы с помощью метода CVD позволяет получить электропроводящее покрытие. Это открывает возможности управления транспортом заряженных компонентов через мембрану путем изменения поверхностного заряда, который определяется электрическим потенциалом поверхности.

В данной работе мы использовали алюминиевую фольгу для получения мембран ПАОА. Полученные мембраны характеризуются размером пор 25–30 нм в зависимости от времени синтеза.

Реализована методика покрытия мембран ПАОА углеродным слоем. Нанесение осуществлялось методом химического осаждения из газовой фазы (CVD). Для этого использовалась установка, состоящая из трубчатой печи, системы подачи парогазовой смеси и вакуумной станции. В качестве углеродсодержащего газа использовались пары этанола, в качестве инертного газа-носителя — аргон. Синтез проводился при температурах от 650 до 850 °С, расходе этанола — от 0,08 до 0,5 мл/мин, расходах аргона — от 200 до 1000 мл/мин при давлении 0,5 бар. Время синтеза варьировалось от 20 до 240 мин.

С помощью физических методов исследований подтверждено, что толщина стенок углеродных нанотрубок прямо пропорциональна времени CVD. Можно сделать вывод, что управление временем и условиями CVD-процесса позволяет контролировать внутренний диаметр нанотрубок и, соответственно, транспортные свойства композиционных мембран.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-48-242011 р\_мк). Физико-химический анализ материалов был выполнен в ЦКП ФИЦ КНЦ СО РАН.*

Научный руководитель — канд. техн. наук М. М. Симунин

## Структурная диагностика гетерогенных катализаторов $\text{Ni/Ce}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_2$ методами рентгеновской дифракции

Н. А. Харченко

Новосибирский государственный университет  
Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск

Разработка катализаторов селективного метанирования  $\text{CO}$  для глубокой очистки водородного топлива является важной задачей в области гетерогенного катализа. Перспективными катализаторами данного процесса являются нанесенные никелевые катализаторы  $\text{Ni/Ce}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_2$ .

Неотъемлемым этапом разработки катализаторов является изучение их структуры и взаимосвязи структура — свойство. Ключевую роль в диагностике играют методы рентгеновской дифракции, позволяющие определить фазовый состав катализаторов, охарактеризовать структуру окристаллизованных компонентов.

Данная работа посвящена исследованию с помощью методов порошковой рентгеновской дифракции структурных особенностей нанесенных катализаторов  $\text{Ni/Ce}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_2$  с разным содержанием никеля, а также изучению изменения фазового состава и структуры катализаторов в ходе их активирования за счет восстановления.

Методом рентгенофазового анализа определен состав катализаторов до и после реакции метанирования  $\text{CO}$ . Показано, что материал носителя — это твердый раствор замещения  $\text{Ce}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_2$ . В исходных катализаторах нанесенный компонент представляет собой фазу оксида никеля  $\text{NiO}$ , а после каталитических испытаний — фазу металлического никеля  $\text{Ni}^0$ . В катализаторах с содержанием никеля  $\leq 10$  вес. % соединения никеля не обнаружены ввиду высокой дисперсности. Определены средние размеры ОКР кристаллических фаз, параметры элементарных ячеек. На основании правила Вегарда оценен катионный состав  $\text{Ce}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_2$ .

Методом рентгеновской дифракции в режиме *in situ* исследован процесс восстановления катализатора и исходного материала носителя. Восстановление оксидной фазы  $\text{NiO}$  до фазы металла  $\text{Ni}^0$  происходит при температуре  $350^\circ\text{C}$ . Обнаружено, что присутствие частиц металла  $\text{Ni}^0$  в катализаторе оказывает промотирующее влияние на восстановление смешанного оксида  $\text{Ce}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_2$ .

Методом распределения атомных пар (PDF) исследована локальная структура материала носителя  $\text{Ce}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_2$ . Обнаружена гетерогенность материала носителя по составу на локальном уровне структуры. Также методом PDF идентифицированы высокодисперсные соединения никеля, не фиксируемые методом РФА.

Научный руководитель — канд. хим. наук В. П. Пахарукова

**Изучение морфологий поверхностных наноструктур Ge на структурированных подложках Si методом молекулярной динамики**

Цай Сяюй

Новосибирский государственный университет

Пространственно упорядоченные массивы квантовых точек (КТ) перспективны с точки зрения применений в светодиодных матрицах, лазерах на КТ, спинтронной памяти и логических элементах для квантовых вычислений. Для создания пространственно упорядоченных массивов КТ применяется гетероэпитаксиальный рост на структурированных (*pre-patterned*) подложках. Эти подложки содержат на своей поверхности систему регулярно расположенных ямок, сформированных с помощью литографии. Ямки служат местами преимущественного зарождения КТ при последующей гетероэпитаксии. Особый интерес представляют сверхплотные массивы КТ, в частности, с числом наноструктур в ямке, превышающем единицу. Рост поверхностных наноструктур на структурированных подложках недостаточно изучен. В данной работе методом молекулярной динамики рассчитаны удельные энергии для различных местоположений наноструктур Ge на подложках Si с квадратными ямками, имеющими пересечения в вершинах. Показано, что удельная энергия минимальна для наноструктур, расположенных в местах пересечений ямок. Предполагается, что в этих точках происходит преимущественное зарождение наноструктур при гетероэпитаксии Ge на подложках Si с пересекающимися ямками. Приведены сравнения результатов моделирования МД с экспериментами, в которых удалось повысить плотность пространственно упорядоченных массивов КТ за счет зарождения 2 наноструктур на ямку.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук П. Л. Новиков



## Строение сложных композитных материалов по данным ЯМР-кристаллографии на ядрах $^1\text{H}$ , $^{27}\text{Al}$ , $^{31}\text{P}$

Н. Е. Черепанова

Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

В настоящее время актуальной проблемой является поиск активных и стабильных катализаторов для процессов переработки биомассы, одним из которых является каталитическая гидродеоксигенация эфиров жирных кислот. Обычно используются бифункциональные катализаторы на основе фосфидов переходных металлов, содержащие как металлические, так и кислотные активные центры, ими могут быть как простые оксидные, так и более сложные цеолитоподобные носители.

В данной работе рассматриваются катализаторы на основе фосфидов никеля, нанесенных на различные силикоалюмофосфаты ( $\text{Ni}_2\text{P}/\text{SAPO-11-A}$ ,  $\text{Ni}_2\text{P}/\text{SAPO-11-B}$ ,  $\text{Ni}_2\text{P}/\text{SAPO-11-C}$ ). Носители SAPO-11-A, SAPO-11-B, SAPO-11-C получены путем темплатного гидротермального синтеза в различных условиях: образец SAPO-11-A синтезирован с использованием этанола вместо воды, в отличие от двух других SAPO-11-B и SAPO-11-C, полученных классическим методом. В отличие от SAPO-11-C, SAPO-11-B синтезирован с меньшим количеством темплата (дипропиламина). Главное преимущество выбора силикоалюмофосфата в качестве носителя — это вариативность включения атомов Si в AlPO, таким образом регулируется сила и количество кислотных центров носителя. Цель исследования заключается в определении строения и закономерностей формирования кислотных центров SAPO-11 методом ЯМР-кристаллографии, который представляет собой сочетание ЯМР-спектроскопии и квантово-химических расчетов.

Современная ЯМР-спектроскопия является эффективным методом, позволяющим исследовать локальное окружение ядер, включенных в SAPO.  $^{31}\text{P}$  MAS ЯМР-спектры SAPO-11-A и SAPO-11-B содержат суперпозицию 3 сигналов: 2 узкие линии, положение которых около  $-29$  и  $-23$  м.д., и 1 уширенный менее интенсивный сигнал, расположенный на  $-16$  м.д. В  $^{31}\text{P}$  MAS ЯМР-спектре SAPO-11-C присутствует суперпозиция 2 линий (расположены на  $-23$  и  $-29$  м.д.), уширенных по сравнению с сигналами, присутствующими в том же положении, что и для SAPO-11-A, SAPO-11-B. Отличительной особенностью образца SAPO-11-C, по сравнению с SAPO-11-A и SAPO-11-B, является то, что он не содержит сигнал, положение которого около  $-16$  м.д. Предположительно, этот сигнал можно отнести к P, который координирован с у молекулами воды  $(\text{P}(\text{OAl})_x(\text{H}_2\text{O})_y, c \cdot x = 4)$  или с у молекулами воды вместо атомов алюминия  $(\text{P}(\text{OAl})_x(\text{H}_2\text{O})_y, c \cdot x = 4 - y)$ .

Определение положения сигналов в  $^{27}\text{Al}$  MAS ЯМР-спектрах каждого носителя получено при использовании методики MQMAS (MQMAS — *Multiple Quantum Magic Angle Spinning*), она позволяет устранить уширение ЯКВ второго порядка.  $^{27}\text{Al}$  MAS ЯМР-спектры каждого из носителей SAPO-11-A, SAPO-11-B, SAPO-11-C содержат суперпозицию 4 интенсивных линий, находящихся в диапазоне, характерном для тетраэдрически координированных атомов алюминия. Для каждого из носителей возникают уширенные менее интенсивные сигналы при  $-14$  м.д., предположительно, они относятся к октаэдрически координированным атомам алюминия, которые могут быть образованы дополнительной координацией двух молекул воды с тетраэдрически координированными атомами алюминия. Отличительной особенностью  $^{27}\text{Al}$  MAS ЯМР-спектра SAPO-11-C является наличие малоинтенсивного сигнала при  $13$  м.д., он может указывать на присутствие небольшого количества пентакоординированных атомов алюминия, образованных координацией одной молекулы воды с тетраэдрически координированными атомами алюминия.

$^1\text{H}$  MAS ЯМР-спектры носителей SAPO-11-A, SAPO-11-B, SAPO-11-C имеют достаточно сильные различия между собой, это позволяет понять, что изменение условий приготовления носителей приводит к изменению строения и кислотности активных центров. Для детального описания строения активных центров необходимо провести квантово-химические расчеты.

Научные руководители — И. В. Яковлев, д-р хим. наук О. Б. Лапина

## **Определение размеров углеродных нанотрубок в водных дисперсиях**

А. А. Школдина

Новосибирский государственный университет  
Группа компаний OCSiAl, Новосибирск

В настоящее время во многих отраслях, например машиностроении и авиастроении, остро стоит проблема создания материалов с уникальными свойствами: достаточной прочностью, легкостью и электропроводностью. Углеродные нанотрубки (УНТ) являются перспективными для создания новых композитных материалов. Они выступают армирующей составляющей, значительно укрепляя материал. Однако, для того чтобы применять УНТ в композитных материалах, необходимо обеспечить их равномерное распределение в материале, что достигается путем приготовления дисперсий. Одностенные УНТ обладают рядом уникальных свойств, превосходят многостенные УНТ, но они образуют пучки и собираются в агломераты, что затрудняет их применение.

Существует множество методов, позволяющих разделить нанотрубки. Одним из способов разделения УНТ является обработка дисперсий УНТ ультразвуком, которая «разбивает» крупные агломераты на более мелкие частицы — пучки и единичные трубки. Не менее важной проблемой является анализ полученных дисперсий. Необходимо знать размеры частиц в дисперсиях и их стабильность для определения качества дисперсии.

С этой целью были приготовлены водные дисперсии одностенных УНТ, которые обрабатывались ультразвуком разное время. Качество и стабильность дисперсии определялись по ее оптическому поглощению до центрифугирования и после.

В ходе данной работы диаметры УНТ и их пучков определялись при помощи аналитической центрифуги. Длину пучков и индивидуальных нанотрубок после диспергирования определяли при помощи динамического рассеяния света на них.

В дальнейшем полученные результаты будут использованы для изучения свойств, таких как прочность, тепло- и электропроводность композиционных материалов, приготовленных с использованием УНТ.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук В. О. Сайк

**Исследование хемосорбции монооксида азота  
в радикал-содержащий ксерогель методами ЭПР-спектроскопии**

А. А. Язикова

Международный томографический центр СО РАН, Новосибирск

В настоящее время существует проблема загрязнения окружающей среды оксидом азота (II). NO образуется вследствие неполного сгорания топлива. Газ является токсичным как для человека, так и для окружающей среды. Таким образом, важной задачей является разработка новых эффективных сорбентов, способных осуществлять сорбцию монооксида азота, а также десорбцию при небольшом нагреве.

Электронный парамагнитный резонанс-спектроскопический метод используется для изучения систем с неспаренными электронами. В данной работе он был применен для анализа изменения количества парамагнитных частиц в ходе процессов сорбции и десорбции NO в пористый материал.

В данной работе была изучена сорбция NO (с последующей десорбцией) при нагревании на мезопористых кремнийорганических ксерогелях, где в качестве органического компонента используются Блаттеровские радикалы. Вследствие наличия неспаренного электрона у монооксида азота и Блаттеровского радикала возможна хемосорбция NO.

Синтез ксерогелей был выполнен реакцией поликонденсации предшественника. Обнаружено, что в зависимости от условий конденсации получают ксерогели (ксерогели А и В), которые демонстрируют существенно отличающиеся сорбционные свойства.

Установлено, что исследуемые образцы демонстрируют селективную хемосорбцию NO из смеси газов, где концентрация монооксида азота близка к реальному содержанию в отходящих газах. Обнаружено, что циклическая сорбция и десорбция в ксерогели А и В приводят к уменьшению сорбционной емкости в 3,5 и 1,1 раза соответственно.

Научный руководитель — А. С. Порываев

УДК 577

## **Application of the Marcus-Hush theory for rhodopsin absorption maxima calculations**

V. N. Mironov <sup>1</sup>, D. M. Nikolaev <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University, Institute of Chemistry

<sup>2</sup> Saint Petersburg National Research Academic University  
of the Russian Academy of Sciences

Methods for calculating absorption maxima ( $\lambda_{\text{max}}$ ) of photosensitive proteins are a key component for the *in silico* design of photosensitive proteins with desired properties. Currently, accurate methods for protein  $\lambda_{\text{max}}$  calculations are based on computationally demanding methodologies that treat the photoactive part of the system (chromophore) with quantum mechanical (QM) methods. However, the application of QM-based methods is not trivial and time-consuming. Previously, an empirical method was proposed for calculating the absorption maxima of GFP-based proteins, which is based on the Marcus — Hush theory for charge transfer. In our work, we developed a similar empirical method for calculating the absorption maxima of rhodopsins — a large family of photoactivated proteins often applied in modern biotechnologies. The developed method allows for fast estimation of rhodopsin absorption maxima, while the accuracy of the method is similar to the accuracy of QM-based methods.

The Marcus — Hush model suggests a simple equation for Frank — Condon excitation energy, which depends on a few internal parameters and the external electric field generated by the protein environment. The internal parameters can be derived by approximating the available experimental data. The experimental set included 36 rhodopsins with the retinal chromophore in all-trans conformation, the X-ray structure was available for all proteins from the experimental set.

We showed that absorption maxima values calculated using the developed empirical model are in good agreement with the experiment. The average deviation of calculated absorption maxima from the experiment is 19 nm, similar to the value obtained for QM-based methods (20 nm). We found a quantitative difference between the QM-based calculations and Marcus — Hush calculations of absorption maxima. The results of QM-based calculations tend to be blue-shifted relative to the corresponding experimental  $\lambda_{\text{max}}$  values (expectation value for  $\Delta\lambda_{\text{max}} = -14.2$  nm). On the other hand, the deviations of Marcus — Hush predictions are evenly distributed relative to experimental data (expectation value for  $\Delta\lambda_{\text{max}} = -0.2$  nm).

The developed theoretical framework can be used by researchers to predict rhodopsin absorption maxima values and the spectral shifts caused by amino acid replacements in rhodopsin without the need to perform computationally extensive QM-based calculations.

Scientific supervisor — Cand. Chem. Sci. M. N. Ryazantsev

**Исследование фотохимической активности тиосемикарбазона  
Dp44mT и его комплексов с ионами металлов методами ЯМР и ХПЯ**

А. С. Архипова

Новосибирский государственный университет  
Институт химической кинетики и горения  
им. В. В. Воеводского, Новосибирск

В 1950-х гг. была обнаружена противораковая активность тиосемикарбазонов (ТСК). ТСК способны образовывать хелатные комплексы с ионами металлов, в частности ионами железа, меди, цинка — жизненно важными элементами. С этой особенностью связан механизм противоракового действия, основанный на неконтролируемой генерации АКР. Недавние исследования показали, что некоторые ТСК демонстрируют усиление противоопухолевой активности в фотоиндуцированных реакциях, однако детальный механизм действия описан не был. В качестве исследуемого ТСК был выбран Dp44mT, проявляющий противораковую активность. Исходя из структуры Dp44mT, можно предположить, что данный хелатор может проявлять донорные и акцепторные свойства в фотохимических реакциях.

В работе исследовалось взаимодействие Dp44mT с ионами цинка, железа и меди, а также фотохимической активности Dp44mT и его комплексов в реакциях с участием доноров и акцепторов электрона. В качестве доноров были выбраны N-ацетил-замещенные L-формы тирозина и триптофана и гуанозинмонофосфат, в качестве акцептора выступил хинон AQDS. На основании данных, полученных методами ЯМР и ХПЯ, был сделан вывод, что Dp44mT и его комплексы с ионами металлов являются фотохимически активными. Показано, что Dp44mT способен вступать в реакцию переноса электрона с AQDS с образованием радикальных интермедиатов, данная реакция ингибируется в присутствии ионов цинка. Кроме того, показано, что комплекс Dp44mT с ионами металлов вступает в фотохимическую реакцию с триптофаном. Однако в присутствии тирозина и гуанозинмонофосфата Dp44mT не проявляет акцепторные свойства, радикальных интермедиатов не обнаружено.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 20-33-70019).*

Научный руководитель — В. А. Тимошников

## Исследование структурных и функциональных свойств ковалентных диад фуллерена со стабильными радикалами методами ЭПР

Ж. А. Байжикова

Международный томографический центр СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Методы импульсного электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) обладают большим потенциалом для исследования структуры и функций белков, нуклеиновых кислот и их комплексов. Принципиально новым направлением в области ЭПР является идея использования в качестве спиновой метки долгоживущей фотовозбужденной молекулы (например, порфирина или фуллерена). Преимущество в использовании фотоиндуцированных триплетных молекул по сравнению со стандартными нитроксильными спиновыми метками заключается в многократном увеличении интенсивности регистрируемого ЭПР-сигнала. Перспективные результаты в этом направлении были получены совсем недавно. В работе [1] было предложено использовать в качестве спиновой метки фотовозбужденный фуллерен (C60). Было показано, что использование фуллереновой метки позволяет ускорить в ~ 1000 раз накопление стандартного эксперимента ДЭЭР (двойной электрон — электронный резонанс) по сравнению с типичными нитроксильными радикалами. В результате удалось провести ДЭЭР-измерения при предельно низкой концентрации в X-диапазоне ЭПР. Для дальнейшего развития данного направления требуется разработка новых экспериментальных подходов с использованием передовых методов импульсного ЭПР.

В данной работе для спиновых меток на основе фотоиндуцированного триплетного состояния фуллерена были реализованы несколько новых методов дипольной ЭПР-спектроскопии. Помимо широко распространенного метода ДЭЭР, впервые на триплетном C60 были применены такие методы импульсной дипольной ЭПР-спектроскопии, как *Relaxation Induced Dipolar Modulation Enhancement (RIDME)*, *Laser Induced Magnetic Dipolar spectroscopy (Laser IMD)*. Для каждого метода проведена оптимизация параметров и выполнен сравнительный анализ разных подходов с выявлением их основных преимуществ и недостатков.

---

1. Krumkacheva O.A. et all. Triplet Fullerenes as Prospective Spin Labels for Nanoscale Distance Measurements by Pulsed Dipolar EPR Spectroscopy // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2019. No. 38(58). P. 13271–13275.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук О. А. Крумкачева



## Изучение аномального наноструктурирования в эфирах фталевой кислоты методами ЭПР-спектроскопии

О. Д. Бакулина

Новосибирский государственный университет  
Международный томографический центр СО РАН, Новосибирск

Сложные эфиры фталевой кислоты, или фталаты, широко используются в промышленности. Так, например, они нашли применение в качестве пластификаторов — веществ, добавляемых к пластикам для повышения их прочности, прозрачности и гибкости. Также фталаты содержатся в медицинских изделиях, игрушках, моющих средствах, косметике и многих других предметах быта. Поэтому имеется множество исследований их влияния на человека, окружающую среду и т. д. Однако изучению наноструктурирования эфиров фталевой кислоты не было уделено внимания.

Спектроскопия электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) помогает получить уникальную информацию о структурной организации вещества на молекулярном уровне. При таком подходе парамагнитный зонд (в большинстве случаев нитроксильные радикалы) растворяется в ИЖ в незначительных «невозмущающих» концентрациях.

Ранее нашей группой были изучены неоднородности в ионных жидкостях (ИЖ) методами ЭПР [1]. Вблизи температуры стеклования ( $T_g$ ) было обнаружено подавление молекулярной подвижности, связанное с необычными структурными перестройками ИЖ на нанометровом масштабе. Импульсный и стационарный ЭПР четко указывают на наличие неоднородностей вблизи  $T_g$  в температурном интервале  $\sim 50$  К.

Несмотря на то что структура фталатов отличается от ИЖ, подобные перестройки были обнаружены и для эфиров фталевой кислоты, чему и посвящена данная работа. При этом было исследовано их наноструктурирование, а также было проведено сравнение результатов с соответствующими им ИЖ.

*Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ 19-13-00071.*

---

1. Ivanov M. Yu. et al. Structural Anomalies in Ionic Liquids near the Glass Transition Revealed by Pulse EPR // J. Phys. Chem. Lett. 2018. Vol. 9. No. 16. P. 4607–4612.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук М. Ю. Иванов

**Изучение взаимодействия осуществляющих слияние мембран синтетических пептидов методом двойного электрон-электронного парамагнитного резонанса**

Е. А. Голышева

Новосибирский государственный университет  
Институт химической кинетики и горения СО РАН  
им. В. В. Воеводского, Новосибирск

Недавно были синтезированы так называемые гибридные пептиды слияния, имеющие аминокислотную последовательность Ac- (KIAALKE) 3-GW-NH<sub>2</sub> (пептид типа «K») и Ac- (EIAALEK) 3-GY-NH<sub>2</sub> (пептид типа «E»). Эти пептиды являются усеченными версиями осуществляющего слияние мембран белка SNARE и взаимодействуют друг с другом по механизму «скрученных спиралей» (*coiled-coil*). С помощью спектроскопии двойного электрон-электронного резонанса (DEER) были изучены конформации дважды спин-меченых пептидов K и E (обозначенных как K\*\* и E\*\*) в присутствии немеченых пептидов E и K соответственно. DEER-спектроскопия позволяет измерять расстояния между двумя спиновыми метками в диапазоне 1,5–8 нм, что, в свою очередь, дает возможность исследовать конформационные изменения для молекул K\*\* и E\*\* при формировании ими гетеродимеров K\*\*/E и E\*\*/K. Данные, полученные в застеклованных растворах, показывают, что конформации пептидов сильно зависят от присутствия пептида-партнера. Установлено, что присутствие пептида-партнера приводит к образованию альфа-спирали данного пептида. Обнаружено также, что в гетеродимерах ширина функций распределения между спиновыми метками уменьшается, т. е. конформации пептидов в присутствии партнера становятся более определенными. Полученные данные позволяют существенно уточнить литературные данные других методов (ЯМР, круговой дихроизм) относительно структуры скрученных спиралей пептидов слияния мембран и закономерностей их образования в различных средах.

*Работа поддержана Российским фондом  
фундаментальных исследований (грант № 19-33-90027).*

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. С. А. Дзюба

**Изучение вибронного взаимодействия в спектре ионизации *транс*-дихлорэтилена с использованием многоконфигурационного зависящего от времени метода Хартри (МСТДН)**

Э. К. Григоричева

Иркутский государственный университет

Полученные в рамках недавнего экспериментального и теоретического исследования фотоэлектронных спектров *транс*-дихлорэтилена [1] новые данные свидетельствуют о наличии вибронного связывания низших катионных состояний данной молекулы  $A^2A_g$ ,  $B^2B_u$  и  $C^2B_g$ , образующихся в результате ионизации молекулярных орбиталей  $10a_g$  ( $n\sigma_{Cl}$ ),  $9b_u$  ( $n\sigma_{Cl,LP}$ ) и  $2b_g$  ( $n\pi_{Cl}$ ) соответственно. Предварительные расчеты с использованием линейной вибронной модели (LVC) и вариационного подхода для стационарного уравнения Шредингера подтверждают существенное влияние неадиабатических эффектов на структуру спектра ионизации.

В целях улучшения понимания ядерной динамики задача о вибронном взаимодействии состояний А-В-С катион-радикала *транс*-дихлорэтилена рассмотрена в данной работе с использованием МСТДН. Модельный вибронный гамильтониан построен в базе диабатических электронных состояний с применением приближения LVC. Параметры модели определялись из неэмпирических расчетов на уровне приближений OVGF/cc-pVTZ и MP2/cc-pVTZ. В расчетах учитывались все колебательные степени свободы, объединенные в 4 «частицы»; пропация волновых пакетов (ВП) проводилась в течение 300 фс. Показано, что вертикальный перенос ВП на ППЭ состояния В приводит к заселению адиабатических минимумов состояний А и В. При этом, несмотря на сильные осцилляции, преимущественно заселяется состояние А. Перенос ВП на ППЭ состояния С приводит к равномерному плавному заселению ППЭ состояний А и В. Полученные результаты отражают вибронное связывание состояний А-В-С и подтверждают наличие обусловленной таким связыванием фемтосекундной ядерной динамики на ППЭ взаимодействующих состояний.

*Работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования РФ (No. FZZE-2020-0025).*

---

1. Duran A. T. et all. Vibronic interaction in *trans*-dichloroethene studied by vibration- and angle-resolved photoelectron spectroscopy using 19–90 eV photon energy // J. Chem. Phys. 2021. № 9(154). С. 094303.

Научный руководитель — д-р хим. наук, проф. РАН А. Б. Трофимов

**Изучение влияния солей, представителей ряда Гофмейстера, на полосу ОН-колебаний в спектрах комбинационного рассеяния света**

Е. А. Добрынина

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

Вода является важнейшим элементом в жизни всех живых организмов, обеспечивая обменные процессы, терморегуляцию, транспорт веществ. Молекулы воды взаимодействуют друг с другом с образованием водородных связей. Известно, что добавление тех или иных ионов по-разному влияет на белки, растворенные в воде. Одни ионы способствуют повышению их стабильности в растворе, другие приводят к денатурации. Это явление связывают с изменением сетки водородных связей под действием ионов, однако механизм этих изменений все еще не ясен. В зависимости от степени влияния ионов, растворенных в воде, на свойства белка их разделили на две категории: космотропы — ионы, создающие структурный порядок в окружающей их сетке водородных связей, и хаотропы — ионы, нарушающие порядок, и расположили в ряд, называемый рядом Гофмейстера.

Детальное исследование влияния положения иона в ряду Гофмейстера на характер внутримолекулярных связей в воде является интересным и актуальным вопросом. Подобную информацию можно получить с помощью метода комбинационного рассеяния света — бесконтактной, неинвазивной методики, суть которой состоит в анализе спектра вследствие взаимодействия излучения с собственными колебаниями молекул вещества. Настоящая работа посвящена изучению водных растворов солей из ряда Гофмейстера методом комбинационного рассеяния света, в частности исследованию вопроса: существует ли зависимость между положением ионов в ряду и характеристиками спектральной полосы ОН-колебаний раствора. В качестве объектов исследования были взяты водные растворы солей натрия ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaOAc}$ ,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{NaCNS}$ ,  $\text{NaCl}$ ), расположенные в различных частях ряда.

В ходе эксперимента было продемонстрировано, что с возрастанием концентрации раствора изменяется спектральная полоса ОН-колебаний (антисимметричное колебание ( $\omega \approx 3240 \text{ см}^{-1}$ ), симметричное колебание ( $\omega \approx 3456 \text{ см}^{-1}$ ), *dangling mode*). При этом характер изменений зависит от положения растворенных ионов в ряду Гофмейстера и отражает специфическое влияние космотропов и хаотропов на сетку водородных связей.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук В. А. Зыкова

**Исследование везикул фосфолипидов тройной смеси  
DOPC/DPPC-d62/холестерин методом комбинационного рассеяния света**

Ю. В. Зайцева

Новосибирский государственный университет  
Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

Клеточная мембрана состоит из большого количества различных липидов. В многокомпонентной мембране липиды могут не распределяться равномерно, а формировать области с различными концентрациями и фазовыми состояниями. Простейшая модель такой системы — тройные смеси из ненасыщенного и насыщенного липидов и холестерина.

В данной работе методом комбинационного рассеяния света (КРС) были исследованы многослойные везикулы, в состав которых входят DOPC, DPPC-d62 и холестерин. Использование липида с полностью дейтерированными хвостами позволяет в спектре КРС отделить соответствующие этому липиду линии от вклада других компонентов мембраны.

В спектрах КРС везикул DPPC-d62 наиболее чувствительными к фазовому состоянию являются линии симметричных CD-колебаний и линия C-C all-trans колебаний. При комнатной температуре чистый DPPC-d62 находится в упорядоченной (гелевой) фазе, но при добавлении ненасыщенного липида и холестерина DPPC-d62 частично переходит в более разупорядоченные состояния. Для определения фазового состояния бислоя были построены карты изменения с концентрацией интенсивности C-C all-trans колебаний, а также позиции, ширины и относительной интенсивности симметричных CD-колебаний.

На этих концентрационных зависимостях видны отдельные области, соответствующие гелевой и флюидной фазам, а также область, в которой возможно фазовое разделение и образование доменов.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 19-12-00127.*

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН Н. В. Суворцев

**Исследование процессов образования активной фазы и эволюции Ni-содержащих катализаторов методом ферромагнитного резонанса в режиме *in situ***

И. Т. Кандаракова

Новосибирский государственный университет

Гетерогенные катализаторы на основе наночастиц никеля широко применяются в химической промышленности, в реакциях гидрирования [1]. Ранее в Институте катализа было предложено использование метода синтеза таких катализаторов при помощи сверхкритического антирастворителя (SAS) [2]. Было показано, что в процессе восстановления в токе водорода в этих системах наблюдается образование наночастиц < 10 нм.

В ходе восстановления оксидных частиц металла водородом могут наблюдаться процессы массопереноса и агломерации частиц, что приводит к нарушению однородности распределения по размерам и уменьшению поверхности активного компонента катализатора.

Таким образом, для нахождения оптимальных условий приготовления катализатора важным становится изучение начальных стадий формирования активной фазы, в том числе роли носителя.

Метод ферромагнитного резонанса (ФМР) — это высокочувствительный метод, который успешно применяется в том числе для исследования процессов, происходящих с участием магнитных наночастиц в режиме *in situ*.

В данной работе методом ФМР в режиме *in situ* исследовался процесс восстановления в токе водорода высокодисперсных катализаторов на основе наночастиц никеля в матрице оксидов ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ), а также взаимодействие катализатора с реакционной средой в условиях реакции каталитического переноса водорода.

---

1. Jalama K. Carbon dioxide hydrogenation over nickel-, ruthenium-, and copper-based catalysts: Review of kinetics and mechanism // Catal. Rev. Sci. Eng. Taylor & Francis. 2017. Vol. 59. № 2. P. 95–164.

2. Nesterov N. S. et al. Advanced green approaches for the synthesis of NiCu-containing catalysts for the hydrodeoxygenation of anisole // Catal. Today. 2020.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук С. С. Якушкин

## Применение метода TrueFISP для визуализации гиперполяризованных сигналов ЯМР

Е. С. Кононенко

Международный томографический центр СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Методы магнитно-резонансной томографии (МРТ) могут применяться для исследований каталитических процессов в жидкой фазе, однако визуализация гетерогенных процессов в газовой фазе является относительно новой и недостаточно изученной областью. Благодаря визуализации пространственного распределения реагентов и продуктов реакции МРТ дает более детальное понимание эффективности работы гетерогенных катализаторов и реакторов. Однако, несмотря на широкий спектр возможных исследований, существует ряд проблем, которые усложняют и ограничивают проведение таких экспериментов. В частности, спиновая плотность газов на три порядка ниже, чем конденсированной фазы, что существенно снижает интенсивность сигнала ядерного магнитного резонанса (ЯМР). В дополнение к низкой спиновой плотности реагентов и продуктов, ограничения *operando* исследований гетерогенных реакций включают возмущение однородности магнитного поля твердыми катализаторами, быструю диффузию газов и короткие времена релаксации их ядерных спинов. Ограничения, вызванные низкой спиновой плотностью, можно преодолеть, используя методы гиперполяризации. Применение модельных реакторов в виде стеклянных трубок с нанесенным на них тонким слоем катализатора существенно уменьшает искажения однородности магнитного поля, а правильный выбор импульсной последовательности позволяет преодолеть ограничения, связанные с диффузией и короткими временами релаксации.

Поэтому целью данной работы является анализ применения гиперполяризации в сочетании с импульсной последовательностью TrueFISP для визуализации многокомпонентной гетерогенной каталитической системы.

В рамках данной работы было проведено сравнение экспериментальных данных и моделирования для импульсной последовательности TrueFISP в случае наблюдения равновесного и гиперполяризованного сигналов. Показана эффективность использования последовательности TrueFISP по сравнению с последовательностью FLASH. Данный анализ позволит расширить области применения гиперполяризации для МРТ.

Научный руководитель — д-р хим. наук, проф. И. В. Коптюг

**Молекулярная подвижность во внутренне разупорядоченном и глобулярном белках по данным импульсного ЭПР спиновых меток**

Н. А. Масленникова  
Новосибирский государственный университет  
Институт химической кинетики и горения  
им. В. В. Воеводского СО РАН, Новосибирск

Внутренне разупорядоченные белки (*intrinsically disordered proteins*) представляют собой довольно широкий класс белков, в трехмерной структуре которых присутствует значительная доля неупорядоченных фрагментов. Существование этого класса было признано совсем недавно — в начале 2000-х гг. Считается, что эти белки выполняют разнообразные и важные физиологические функции в живых организмах. Поэтому в настоящее время они активно исследуются различными методами.

Разупорядоченность структуры должна приводить к особенностям молекулярного движения. Для изучения движений молекул в неупорядоченных средах хорошо зарекомендовал себя метод наблюдения стохастических молекулярных либраций в импульсном ЭПР спиновых меток. Этот метод позволяет получать принципиально новую структурную и динамическую информацию о свойствах таких систем.

В данной работе методом импульсного ЭПР спиновых меток была исследована низкотемпературная молекулярная подвижность внутренне разупорядоченного белка казеина и взятого для сравнения глобулярного белка лизоцима. Обнаружено, что температурные зависимости параметров движения в сухом и гидратированном состояниях этих белков существенно различаются. В частности, молекулярная подвижность в казеине появляется при более низких температурах. Изученные закономерности позволяют сделать выводы о свойствах внутренне разупорядоченных белков.

Научные руководители — д-р физ.-мат. наук,  
проф. С. А. Дзюба, Е. А. Гольшева



**Исследование процесса формирования осадков асфальтенов  
в проточном реакторе в присутствии ацетона методом  
ИК-Фурье-спектроскопии с матричным детектированием**

Е. С. Милованов

Новосибирский государственный университет

Нефть в настоящее время является одним из ключевых ресурсов, обеспечивающих развитие технологий, не только в виде горючего, но и как незаменимый источник углеводородного сырья для химической промышленности. Рост потребления нефти во всем мире приводит к использованию тяжелых нефтей — ископаемых топлив, содержащих большое количество смол и асфальтенов, соединений, которые осложняют не только добычу, но и переработку и транспортировку тяжелых нефтей. Склонность асфальтенов к агрегации при изменении температуры или химического состава окружения приводит к образованию осадков, нерастворимых отложений при работе с тяжелой нефтью. Эти факторы выходят на первый план, когда речь идет о транспортировке или прокачке через трубопровод. Исследование свойств тяжелых нефтей и их асфальтеновых фракций является ключом к пониманию процессов, происходящих в ходе переработки тяжелой нефти [1, 2].

Одним из направлений развития современной ИК-Фурье-спектроскопии является применение матричного детектирования, которое позволяет получать спектральные картины с пространственным разрешением, по всей площади образца. Это позволяет применять ИК-Фурье-спектроскопию с пространственным разрешением для изучения быстропротекающих процессов.

В основной части работы методом ИК-Фурье-спектроскопии с матричным детектированием изучали процесс образования осадков асфальтенов в проточном режиме. Полученные данные, в том числе картины химической визуализации процесса и сформированных осадков, полученные методом ИК-Фурье-спектроскопии, демонстрируют, что образующиеся осадки неоднородны по своему химическому составу, что позволяет уточнить механизм коагуляции и агрегации асфальтенов.

1. Gabrienko A. A. et al. Chemical Visualization of Asphaltene Aggregation Processes Studied in Situ with ATR-FTIR Spectroscopic Imaging and NMR Imaging // J. Phys. Chem. C. 2015. Vol. 119. No. 5. P. 2646–2660.

2. Shalygin A. S. et al. Spectroscopic imaging of deposition of asphaltene from crude oil under flow // J. Pet. Sci. Eng. Elsevier B.V., 2019. Vol. 181. No. March. P. 106205.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук. С. С. Якушкин

**Определение параметров спинового гамильтониана  
и межмолекулярного обменного взаимодействия семейства  
мономолекулярных магнитов на основе ионов кобальта методом  
многочастотной ЭПР-спектроскопии**

О. В. Минакова

Новосибирский государственный университет  
Международный томографический центр СО РАН, Новосибирск

Тенденция к миниатюризации современных устройств хранения информации стимулирует поиск новых наноразмерных магнитных материалов. Одними из перспективных объектов молекулярного магнетизма являются мономолекулярные магниты (МММ). Такие соединения в перспективе могут быть использованы в качестве элементарных ячеек сверхплотного хранения информации в устройствах магнитной памяти.

Важным этапом в характеризации МММ систем является определение параметров спинового гамильтониана и межмолекулярного обменного взаимодействия  $J$ . В настоящей работе исследовалось семейство мономолекулярных магнитов на основе высокоспинового иона кобальта(II):  $[\text{Co}(\text{L})_2]$ ,  $[\text{Co}(\text{L})^{\text{Br}}_2]$ ,  $[\text{Co}(\text{L})^{\text{OCH}_3}_2]$ ,  $[\text{Co}(\text{L})^{\text{C}_4\text{H}_4}_2]$ , где  $(\text{L} = \text{N-циклогексилсалицилальдиминат})$ . Для данных комплексов был проведен ряд исследований методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Были записаны стационарные спектры X- (9,7 ГГц) и Q- (33,6 ГГц) диапазонов в интервале температур 5–80 К. Для определения энергии расщепления в нулевом поле данные комплексы были исследованы методом терагерцовой ЭПР-спектроскопии с разверткой по частоте. На основе полученных данных, а также данных DC-магнитометрии было проведено моделирование спектров и определены параметры спинового гамильтониана (компоненты  $g$ -тензора, значения  $D$  и  $E$ ). В ЭПР-спектрах X- и Q-диапазонов комплексов  $[\text{Co}(\text{L})^{\text{Br}}_2]$  и  $[\text{Co}(\text{L})^{\text{C}_4\text{H}_4}_2]$  было зарегистрировано расщепление низкочастотной линии, обусловленное межмолекулярным обменным взаимодействием  $J$  соседних парамагнитных центров. Выполненное моделирование данных особенностей и анализ рентгеноструктурных данных позволили не только определить величину обменного взаимодействия, но и установить морфологию каналов обменного взаимодействия.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 17-13-01412.*

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук С. Л. Вебер

## Исследование антиоксиданта овотиола А методами оптической спектроскопии

Н. А. Осик

Новосибирский государственный университет  
Международный томографический центр СО РАН, Новосибирск

Овотиол А (OSH) является одним из самых сильных, но малоизученных природных антиоксидантов. Обнаружение OSH в ткани хрусталика пресноводных рыб в высокой концентрации [1, 2] говорит о возможном выполнении им фотозащитной функции. Целью данной работы было охарактеризовать фотохимические свойства овотиола А, а именно изучить реакцию тушения триплетного состояния фотосенсибилизатора кинуреновой кислоты (KNA) молекулами OSH, а также исследовать антиоксидантные свойства овотиола А на примере его реакции с перекисью водорода.

Методом лазерного импульсного фотолиза была исследована кинетика гибели триплетного состояния KNA в присутствии OSH в анаэробных условиях. Для исследования кинетики окисления использовался метод оптической спектроскопии. В эксперименте по фотолизу KNA в присутствии OSH было обнаружено, что OSH является эффективным тушителем реакционно-активного триплетного состояния с константой скорости реакции  $(1,89 \pm 0,04) \times 10^9 \text{ M}^{-1}\text{c}^{-1}$ . В роли антиоксиданта OSH активно реагирует с перекисью водорода с константой скорости реакции  $3,0 \pm 0,4 \text{ M}^{-1}\text{c}^{-1}$  при  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $1,32 \pm 0,05 \text{ M}^{-1}\text{c}^{-1}$  при  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Таким образом, в работе было продемонстрировано, что OSH является сильным антиоксидантом и эффективным фотопротектором. Кроме того, OSH может поддерживаться в активной восстановленной форме за счет глутатиона — главного антиоксиданта тканей позвоночных животных. Такая функциональность OSH открывает перспективы для его возможного использования в качестве внешнего дополнительного антиоксиданта и фотопротектора для биологических систем с естественной антиоксидантной защитой на основе глутатиона.

*Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ (МК-2272.2020.3)*

---

1. Yanshole V.V. et all. Ovothiоl A is the main antioxidant in fish lens // Metabolites. 2019. Vol. 9. No. 5. P. 95.

2. Tsentalovich Y.P. et all. Most abundant metabolites in tissues of freshwater fish pike-perch (Sander lucioperca) // Sci. Rep. 2020. Vol. 10. No. 1. P. 1–12.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Е. А. Зеленцова

## **Получение димеров тетрацена в молекулярном пучке и изучение их фотодиссоциации с помощью методов времяпролетной масс-спектрометрии и визуализации карт скоростей**

В. М. Роговешко

Институт химической кинетики и горения  
им. В. В. Воеводского СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Преобразование энергии солнца в электрическую энергию является перспективным, но все еще не очень эффективным процессом. Однако использование явления деления синглетного экситона (ДСЭ), обнаруженного в полиаценах, как показывают расчеты Ханны и Нозика [1], может повысить КПД солнечных элементов, так называемый предел Шокли — Квайссера, на 30 %. В связи с этим возник большой интерес к фундаментальным основам процесса ДСЭ, в частности в тетраcene, в пленках которого процесс ДСЭ протекает очень эффективно. Структурным элементом, определяющим этот процесс, является димер тетрацена. Но для исследования ДСЭ используются преимущественно пленки или кристаллы тетрацена [2], что не позволяет изучать непосредственно димеры. Чтобы дать полное описание фотофизики происходящих в этих системах процессов, нужно произвести учет их морфологии, что является трудной задачей.

Данная работа посвящена получению и изучению димеров тетрацена в холодном молекулярном пучке с гелием в качестве буферного газа. Образование димеров в пучке подтвердилось с помощью времяпролетной масс-спектрометрии, где были обнаружены не только димеры тетрацена, но еще и их комплексы с атомами гелия. С помощью техники визуализации карт скоростей удалось получить энергию фотофрагментов димера тетрацена и его комплексов с атомами гелия. Получены спектры резонансно-усиленной многофотонной ионизации молекул тетрацена и его комплексов с гелием.

*Работа является частью совместного проекта ИХКГ СО РАН и Фрайбургского университета, поддержанного грантом РФФИ (№ 20-52-12014).*

- 
1. Hanna M. C., Nozik A. J. Solar conversion efficiency of photovoltaic and photoelectrolysis cells with carrier multiplication absorbers // J. Appl. Phys. 2006. Vol. 100. P. 074510.
  2. Smith M. B., J. Michl. Recent Advances in Singlet Fission // Annu. Rev. Phys. Chem. 2013. Vol. 64. P. 361–386.

Научный руководитель — д-р хим. наук, проф. А. В. Бакланов

**Исследование распространения пламени по слою сосновой хвои  
при различных скоростях и направлениях ветра**

А. Р. Сагитов

Новосибирский государственный университет

Институт химической кинетики и горения СО РАН, Новосибирск

Процессы горения лесных горючих материалов (ЛГМ) регулируются химическими реакциями и процессами тепло- и массообмена. Химические процессы играют важную роль в горении ЛГМ, знание кинетики и механизма термического разложения является необходимым условием для разработки адекватной модели горения и распространения лесных пожаров. Также необходимо учитывать угол наклона пламени в зависимости от скорости ветра. Разрабатываемые модели распространения пламени требуют различные типы экспериментальных данных.

Цель работы — в лабораторных условиях сравнить тепловые структуры и скорости распространения пламени по слою ЛГМ Томского и Новосибирского регионов при различной скорости, направлении ветра, влажности хвои и рассчитать кинетические параметры термического разложения сосновой хвои этих регионов.

Горение хвои изучалось в проточной камере сгорания. Тепловая структура была получена с помощью датчиков общего и радиационного теплового потока и термопар, расположенных на различной высоте от слоя хвои. Скорость распространения пламени по слою сосновой хвои была получена из обработки видеозаписи эксперимента. Кинетические параметры были рассчитаны по результатам термогравиметрического анализа с применением генетического алгоритма. Полученные в работе экспериментальные данные могут быть использованы при разработке модели распространения лесного пожара с учетом специфики сибирских лесов.

*Работа выполнена в рамках проекта РФФИ-БРИКС*

*№ 19-58-80002 (руководитель — проф. О. П. Коробейничев).*

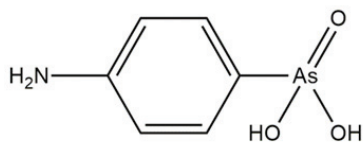
Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук А. А. Палецкий

## Исследование электронного спин-спинового взаимодействия в нитронилнитроксильных моно- и бирадикалах методом электронного парамагнитного резонанса

А. А. Самсоненко

Международный томографический центр СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Органические моно- и бирадикалы являются строительными блоками молекулярных магнитных материалов. Такие материалы могут найти свое применение в спиновой электронике, а также быть использованы при создании элементов памяти и сенсорных устройств [1].



Структурная формула  
пара-арсаниловой кислоты

Внутри- и межмолекулярное электронное спин-спиновое взаимодействие в значительной степени определяет макроскопические магнитные свойства парамагнитных веществ на основе моно- и бирадикалов [2]. Общий характер обменного взаимодействия в исследуемом веществе может быть охарактеризован методом магнитометрии. В свою очередь, метод

спектроскопии электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) позволяет с высокой точностью определить параметры  $g$ -тензора спиновой системы, величину диполь-дипольного взаимодействия и оценить величину спин-спинового обменного взаимодействия.

В настоящей работе методом ЭПР было исследовано межмолекулярное спин-спиновое обменное взаимодействие в кристаллической упаковке 2-(5-метил-1Н-имидазол-4-ил)-4,4,5,5-тетраметил-4,5-дигидро-1Н-имидазол-3-оксид-1-оксил монаорадикала. Также был определен знак и величина внутримолекулярного обменного взаимодействия в 1,1,2,3,3-пентаметиленпропан бирадикале с двумя нитронилнитроксидами [2] в кристаллической упаковке и растворе. Для растворенного бирадикала были определены параметры диполь-дипольного взаимодействия, методом импульсной ЭПР-спектроскопии измерены времена продольной и поперечной спиновой релаксации триплетного состояния. Полученные результаты важны для понимания влияния обменных взаимодействий на процессы спиновой релаксации в подобных системах.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 17-13-01412.*

---

1. Ratera I. et al. Playing with organic radicals as building blocks for functional molecular materials // *Chem. Soc. Rev.*, 2012. Vol. 41. P. 303–349.

2. Tolstikov S. E. et al., C(sp<sup>2</sup>)-Coupled Nitronyl Nitroxide and Iminonitroxide Diradicals // *Chem. Eur. J.* 2014. Vol. 20. P. 2793–2803.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук С. Л. Вебер

**Механизм фотоокисления пара-арсаниловой кислоты при фотолизе системы «оксалатные комплексы железа — персульфат калия»**

Ю. Е. Тютерева

Новосибирский государственный университет  
Институт химической кинетики и горения  
им. В. В. Воеводского СО РАН, Новосибирск

Пара-арсаниловая кислота (p-ASA, см. рисунок) является представителем мышьяксодержащих кормовых добавок и широко применяется в животноводстве и птицеводстве для борьбы с кишечными паразитами [1]. Хотя сами кормовые добавки обладают низкой токсичностью, продукты их биологического и фотохимического разложения — неорганические соединения мышьяка(III) — проявляют значительную токсичность для живых организмов [2]. В связи с этим существует устойчивый интерес к разработке методов водоочистки от органических соединений мышьяка.

Персульфат калия и оксалатные комплексы железа рассматриваются как фотоактивные добавки в водоочистке, так как при их возбуждении УФ-светом происходит генерация окислительных  $\cdot\text{OH}$  и  $\text{SO}_4^{\cdot-}$  радикалов.

В данной работе эксперименты проводились методами стационарного (эксимерная лампа XeCl, 308 нм) и лазерного импульсного фотолиза (Nd:YAG-лазера, 266 нм), в сочетании с масс-спектрометрией с индуктивно-связанной плазмой и капиллярным электрофорезом.

В ходе работы были получены данные о константах скоростей реакции  $\cdot\text{OH}$  и  $\text{SO}_4^{\cdot-}$  радикалов с p-ASA, квантовых выходах  $\cdot\text{OH}$  и фотодегradации p-ASA, а также данные о выходе различных форм неорганического мышьяка. Полученные данные важны для понимания эффективности фотодегradации p-ASA под действием УФ-облучения в процессах водоочистки с применением вышеуказанных добавок.

---

1. Jones F. T. A broad view of arsenic // *Poult. Sci.* 2007. Vol. 86. P. 2–14.

2. Cortinas I. et all. Anaerobic biotransformation of roxarsone and related N-substituted phenylarsonic acids // *Environ. Sci. Technol.* 2006. Vol. 40. P. 2951–2957.

Научный руководитель — канд. хим. наук И. П. Поздняков



**Формирование липид-холестериновых рафтов  
в модельных биологических мембранах  
по данным импульсного ЭПР спиновых меток**

В. В. Унгурян

Новосибирский государственный университет  
Институт химической кинетики и горения  
им. В. В. Воеводского, Новосибирск

Холестерин присутствует во всех клеточных мембранах животных, включая человека, и является одним из ключевых компонентов, необходимых для жизнедеятельности клеток. Известно, что с участием холестерина в мембранах образуются липид-холестериновые домены, называемые рафтами. Считается, что рафты служат «платформами» для работы некоторых белков. Однако до конца роль рафтов не ясна, а их изучение встречает значительные трудности из-за малых размеров — порядка нескольких десятков нанометров (что меньше дифракционного предела для оптических исследований).

Методы импульсного ЭПР спиновых меток обладают чувствительностью к измерению расстояний как раз в нанометровом диапазоне, что делает их перспективными для исследования структуры рафтов. В работе с помощью метода импульсного ЭПР в варианте двойного электрон-электронного резонанса изучалось распределение спин-меченого холестерина в модельных мембранах. В результате исследований получена количественная информация о соотношении концентраций холестерина в рафтах и остальном объеме мембраны. Обнаружено также формирование «предвестников» рафтов, появляющихся в мембране в присутствии уже малых концентраций холестерина.

Научные руководители — д-р физ.-мат. наук, проф. С. А. Дзюба,  
Е. А. Гольшева

## Анализ вольт-амперных характеристик пламен метана: эксперимент и численное моделирование

А. В. Черепанов

Новосибирский государственный университет  
Институт химической кинетики и горения  
им. В. В. Воеводского СО РАН, Новосибирск

Изучение токов, возникающих при приложении внешнего электрического поля, в пламенах имеет большое практическое значение, например, для разработки систем управления горением с использованием детекторов пламени. Благодаря наличию в пламени заряженных частиц внешнее поле существенно влияет на процесс горения, что может помочь решить проблему стабилизации пламени и уменьшения выбросов загрязняющих веществ. Это подчеркивает важность исследования процессов образования и превращения ионов в пламенах.

Целью данной работы являлась экспериментальная проверка представленной в литературе химико-кинетической модели горения метана, включающей реакции с заряженными частицами. Для этого экспериментально получены вольт-амперные характеристики пламен богатых предварительно перемешанных смесей  $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Ar}$  в интервале коэффициентов избытка горючего  $\phi = 1,5\text{--}2,0$ , стабилизированных на плоской горелке. Внешнее электрическое поле (от 0 до 250 В/см) прикладывалось между горелкой и расположенным над ней плоским электродом. Проведены численные расчеты химической структуры этих пламен, а также профилей скорости образования основных ионов пламени с использованием библиотеки Cantera (v.2.4.0) [1] для языка программирования Python и детальный механизм реакций, включающий ионную химию. На основе численно полученных данных рассчитано значение максимального тока пламен и сопоставлено с измеренным током насыщения (при  $E > 40$  В/см). Полученные данные позволили уточнить константу скорости хемиионизации  $\text{CH} + \text{O} \rightleftharpoons \text{HCO}^+ + \text{e}^-$ . Экспериментально показано, что в богатых пламенах вклад в ионизацию дают также другие пути реакций, в частности  $\text{CH} + \text{C}_2\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{C}_3\text{H}_3 + \text{e}^-$ .

---

1. David G. Goodwin, Raymond L. Speth, Harry K. Moffat, and Bryan W. Weber. Cantera: An object-oriented software toolkit for chemical kinetics, thermodynamics, and transport processes. 2021. Version 2.5.1. URL: <https://www.cantera.org>. doi:10.5281/zenodo.4527812

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Д. А. Князьков

## **Исследование планарных структур DOPC-DPPC-Cholesterol методом спектроскопии комбинационного рассеяния света**

Д. В. Шамаева

Новосибирский государственный университет  
Институт автоматики и электрометрии СО РАН

Фосфолипиды и холестерин составляют основу биологических мембран. Считается, что в многокомпонентных биологических мембранах возможно разделение на фазы с разным химическим составом. Смесь DOPC-DPPC-Cholesterol является распространенной модельной системой, в которой происходит фазовое разделение. Знание того, как с гидратацией меняются химический состав фаз и масштаб фазового разделения в многокомпонентных смесях синтетических липидов, может помочь в описании модификации клеточных мембран при высушивании и замораживании биологических клеток. Спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС) — бесконтактный и неразрушительный метод исследования мембранных структур, позволяющий получить высокое пространственное разрешение. Цель данной работы — исследование фазового разделения в модельной системе DOPC-DPPC-Cholesterol с помощью спектроскопии КРС.

В работе изучены высушенные и гидратированные бислои DOPC-DPPC-Cholesterol на стеклянной подложке. Измерены спектры КРС от различных пространственных точек в образцах и построены карты распределения липидов. Для увеличения химического разрешения метода КРС использовался DPPC с дейтерированными углеводородными цепочками (dDPPC). В высушенных и гидратированных образцах на микронном масштабе было выявлено разделение на обогащенную DPPC и обедненную DPPC фазы. Для высушенных образцов наблюдаются домены с высокой молярной долей DOPC и холестерина и домены с высокой молярной долей dDPPC, а для гидратированных — домены с высокой молярной долей DOPC и домены с высокой молярной долей холестерина и dDPPC. Сделана оценка локального химического состава доменов. Проведен анализ конформационного состояния dDPPC и DOPC.

Таким образом, на примере модельной смеси DOPC-DPPC-Cholesterol продемонстрирована роль воды в фазовом разделении мембран. Наблюдаемый эффект может играть важную роль в вопросах лиофилизации и криоконсервации биологических клеток.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 19-12-00127.*

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук К. А. Окотруб



# **ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ, АСТРОФИЗИКА И КОСМОЛОГИЯ**

Научный руководитель секции —  
акад. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф. А. Е. Бондарь

Председатель секции — канд. физ.-мат. наук А. Ю. Гармаш

Ответственный секретарь секции — Т. В. Мальцев

Экспертный совет секции  
д-р физ.-мат. наук М. Н. Ачасов  
канд. физ.-мат. наук А. Ю. Гармаш  
канд. физ.-мат. наук Е. А. Кравченко  
д-р физ.-мат. наук И. Б. Логашенко  
канд. физ.-мат. наук А. В. Резниченко  
д-р физ.-мат. наук К. Ю. Тодышев

# **ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS, ASTROPHYSICS AND COSMOLOGY**

Section scientific supervisor —  
Acad. RAS, Dr. Phys.-Math. Sci., Prof. A. E. Bondar

Section head — Cand. Phys.-Math. Sci. A. Yu. Garmash

Section responsible secretary — T. V. Maltsev

Section scientific committee  
Dr. Phys.-Math. Sci. M. N. Achasov  
Cand. Phys.-Math. Sci. A. Yu. Garmash  
Cand. Phys.-Math. Sci. E. A. Kravchenko  
Dr. Phys.-Math. Sci. I. B. Logashenko  
Cand. Phys.-Math. Sci. A. V. Reznichenko  
Dr. Phys.-Math. Sci. C. Yu. Todyshev



## **Изучение методов оптического считывания на основе матрицы кремниевых ФЭУ для прототипа двухфазного детектора темной материи**

О. А. Аксенов

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Работа посвящена исследованию методов оптического считывания на основе матрицы кремниевых фотоэлектронных умножителей (КФЭУ) в двухфазном криогенном детекторе темной материи. Регистрация частиц в таких детекторах производится за счет их рассеяния на ядрах атомов жидкой фазы рабочего вещества. Ядро отдачи ионизирует (первичная ионизация) или возбуждает (первичная сцинтилляция) атомы. Первичная ионизация под действием электрического поля вытягивается в газообразную фазу, где производит электролюминесценцию. Электролюминесценция и первичные сцинтилляции регистрируются фотодетекторами.

Применение КФЭУ в качестве фотодетектора обусловлено рядом преимуществ перед ФЭУ. При этом главным недостатком КФЭУ является малая активная площадь. Для покрытия всего детектора требуется матрица с большим числом размещенных на ней КФЭУ, вследствие чего увеличивается число выходных каналов. Это является главной проблемой: для каждого канала необходима *front-end* электроника, а считывание данных со всех каналов является затруднительным. Множество проводов внутри детектора приводит к увеличению теплопритока внутрь детектора, что негативно сказывается на стабильности температуры.

Чтобы решить эту проблему, принято объединять КФЭУ в сборки. При этом подача напряжения и снятие сигнала производятся со всей сборки, а не с одиночных КФЭУ. Целью данного исследования является изучение работы различных вариантовборок КФЭУ при комнатной температуре и при температуре жидкого аргона и выбор типа сборки с максимальным числом КФЭУ, при котором сохраняется возможность работы в режиме счета одиночных фотонов. Были исследованы различные вариантыборок: последовательная, параллельная и последовательно-параллельная, одиночные КФЭУ. Для каждой сборки измерены амплитудные спектры, по которым определялась зависимость амплитуды срабатывания от одного фотоэлектрона от напряжения смещения. Кроме того, была изучена зависимость формы сигнала от типа сборки.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Е. О. Борисова

## Поиск процессов $e^+e^- \rightarrow f_2(1270)$ и $e^+e^- \rightarrow a_2(1320)$ с детектором СНД на коллайдере ВЭПП-2000

А. А. Байков

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

В процессе электрон-позитронной аннигиляции в адроны доминирует однофотонный механизм. В результате адроны рождаются в  $S$ -нечетном состоянии. В данной работе проводится поиск редких процессов прямого рождения  $S$ -четных тензорных резонансов  $f_2(1270)$  и  $a_2(1320)$ . Процессы такого типа до сих пор не наблюдались. Поскольку рождение  $S$ -четных резонансов происходит через двухфотонное промежуточное состояние, то их сечения определяются величиной переходного мезон-фотонного форм-фактора и его зависимостью от  $q^2$  фотонов. Таким образом, изучаемые процессы служат важным инструментом для исследования электромагнитной структуры адронов и проверки моделей электромагнитных форм-факторов.

Для поиска процессов  $e^+e^- \rightarrow f_2(1270)$  и  $e^+e^- \rightarrow a_2(1320)$  используются экспериментальные данные, накопленные детектором СНД на  $e^+e^-$  коллайдере ВЭПП-2000 в 2010–2019 гг. Резонансы  $f_2(1270)$  и  $a_2(1320)$  ищутся в конечных состояниях  $\pi^0\pi^0$  и  $\eta\pi^0$ , которые не рождаются в однофотонной аннигиляции и поэтому имеют относительно низкий уровень фона. Основными фоновыми процессами являются реакции  $e^+e^- \rightarrow 3\gamma, 4\gamma$  и  $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ . Кроме того, вклад в фон дают реакции радиационного возврата с излучением из начального состояния  $e^+e^- \rightarrow V\gamma \rightarrow \pi^0\gamma\gamma, \eta\gamma\gamma$ , где  $V = \omega, \rho, \phi$ . В данной работе используется метод слепого анализа. Для выделения событий сигнала диапазоны энергий  $\sqrt{s} = 1,075\text{--}1,600$  ГэВ для  $f_2(1270)$  и  $\sqrt{s} = 1,1\text{--}1,5$  ГэВ для  $a_2(1320)$  разбиваются на сигнальную и контрольную области. В контрольной области с помощью моделирования фоновых и сигнальных процессов разрабатываются условия отбора. Эти условия проверяются на экспериментальных данных из контрольной области, после чего применяются к экспериментальным данным из сигнальной области.

Описаны условия отбора, проведено сравнение экспериментальных и смоделированных распределений и оценена чувствительность эксперимента к поиску процессов  $e^+e^- \rightarrow f_2(1270)$  и  $e^+e^- \rightarrow a_2(1320)$ .

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. В. П. Дружинин



## **Разработка и измерение характеристик двух дисковых детекторов на основе структуры micro-RWELL для детектора КМД-3**

Е. А. Баталов

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

В Институте ядерной физики СО РАН ведутся работы по прецизионному измерению сечений аннигиляции электрон-позитронной пары в адроны. Эксперименты ведутся на коллайдере ВЭПП-2000 с помощью двух детекторов элементарных частиц: сферического нейтрального детектора (СНД) и криогенного магнитного детектора (КМД-3).

Целью данной работы является разработка, сборка и измерение основных характеристик детектирующей торцевой системы на основе структуры micro-RWELL — микроструктурного детектора с газовым усилением ионизации регистрируемых частиц. Поскольку в детекторе КМД-3 на данный момент нет торцевой координатной регистрирующей системы помимо калориметра BGO, а торцы занимают большую (около трети) часть телесного угла детектора, была поставлена задача разработать такую систему в рамках программы модернизации детектора. В прошлом сезоне была завершена сборка первого координатного диска. В рамках текущей работы велась калибровка сигнала собранного диска и измерения характеристик: токовых утечек, получаемого коэффициента усиления в допустимом диапазоне напряжения с помощью радиоактивных изотопов. На основе получаемых результатов принимается решение о ходе сборки последующих систем. Помимо этого, параллельно ведется моделирование системы детектора и его параметров с помощью пакета Geant4.

Также рассматривается возможность установки такой регистрирующей системы на боковую часть детектора КМД-3, а впоследствии — использование ее в проекте Супер чарм-тау фабрики.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. Л. И. Шехтман

## Моделирование тракта регистрации гамма-денситометра

Р. Г. Гороховский

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный технический университет

В нефтяной промышленности применяются различные методы определения относительной фазовой проницаемости скважинного флюида, одним из которых является метод гамма-денситометрии. Суть данного метода состоит в следующем. Через образец пропускается поток гамма-квантов с различными энергиями. Гамма-кванты, прошедшие через вещество, регистрируются детектором, способным регистрировать каждый прошедший гамма-квант и определять его энергию. Гамма-квант, проходя через вещество, может поглотиться атомом этого вещества. Вероятность такого поглощения зависит от энергии гамма-квантов, концентрации поглощающих атомов и структуры атома. В частности, для энергий гамма-квантов от 10 до 50 кэВ вероятность поглощения гамма-квантов атомами кислорода и углерода значительно различается. По доле прошедших гамма-квантов различной энергии (ослаблению потока) определяется полная плотность и концентрация отдельных элементов (углерода и кислорода).

Увеличение потока гамма-квантов и скорости набора статистики приводит к искажению амплитудного спектра и ошибке в измерении состава флюида. Целью данной работы являлось исследование влияния скорости загрузки на точность измерения состава. В ходе работы была написана программа в среде Matlab, моделирующая прохождение токового сигнала реальных импульсов сцинтилляции через тракт регистрации гамма-денситометра. В качестве исходного токового сигнала были использованы осциллограммы реальных импульсов сцинтилляции источника Ва-133, измеренные при помощи быстрого АЦП. В результате работы были получены амплитудные спектры синтезированных сигналов с различной загрузкой и предложена схема регистрации, позволяющая проводить измерения при скорости счета до 100 кГц.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук С. В. Полосаткин

**Применение методов квантовой теории поля  
к исследованию теоретико-информационных характеристик  
оптических каналов связи с малой дисперсией  
в рамках модели нелинейного уравнения Шредингера**

В. О. Губа

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Такие информационные характеристики каналов связи, как взаимная информация и емкость канала, могут быть вычислены с помощью функционала плотности условной вероятности наблюдения сигнала на выходе канала связи при заданном сигнале на входе.

Подобная задача в рамках модели канала, описываемого нелинейным стохастическим уравнением Шредингера, уже была рассмотрена ранее в приближении канала связи с нулевой дисперсией, а также канала с малой керровской нелинейностью. Целью данной работы является вычисление функционала плотности условной вероятности и теоретико-информационных характеристик канала в виде разложения по безразмерному параметру малой второй дисперсии. Основной идеей является представление функционала условной вероятности в виде интеграла по траекториям, который далее может быть исследован в случае малого шума в квазиклассическом приближении методами квантовой теории поля.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. В. Резниченко

## Эффекты интерференции в амплитуде распада $B^+ \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-K^+$

И. В. Зезюлин

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Изучение состояния  $X(3872)$  представляет большой интерес на сегодняшний день, поскольку все еще точно неизвестно, что представляет собой внутренняя структура этого состояния. Так, среди гипотез о структуре  $X(3872)$  основными являются гипотеза о молекулярной структуре, тетракварке и адрочармонии.

Экспериментально  $X(3872)$  проявляется в распаде  $B^+ \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-K^+$ . На сегодняшний день параметры  $X(3872)$  извлекаются из распределения по инвариантной массе комбинации  $J/\psi\pi^+\pi^-$ . Однако в сложившемся подходе предполагается отсутствие влияния иных каналов распада, в то время как они могут существенно влиять на спектр и, как следствие, на извлекаемые параметры.

Таким образом, целью данной работы было определение влияния интерференции на извлекаемые параметры  $X(3872)$ .

Изучение интерференции проводилось для каналов  $B^+ \rightarrow X(3872)K^+$  и  $B^+ \rightarrow J/\psi K^+$ . В рамках *helicity*-формализма были выписаны амплитуды процессов. Были реализованы соответствующие генераторы. Была проведена проверка корректности работы генераторов: сравнивались одномерные и двумерные угловые распределения, полученные теоретически и численно; проверялось, что импульсы конечных состояний находятся в пределах кинематически допустимой области.

Было проведено исследование влияние интерференции двух каналов на извлекаемые параметры  $X(3872)$  из распределения по инвариантной массе  $J/\psi\pi^+\pi^-$ . Полученные результаты говорят о том, что интерференция может играть существенную роль и для более точного определения параметров  $X(3872)$  недостаточно изучать лишь одномерные распределения.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук В. С. Воробьев

## Изучение фона для процесса образования в мультилептонном канале с детектором ATLAS

Д. А. Зубков

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

С момента открытия бозона Хиггса на ЛHC его свойства активно изучались. В частности, измерялись константы связи взаимодействия с лептонами. Согласно Стандартной модели, наибольшей из них является константа связи с топ-кварком, так как он обладает наибольшей массой среди всех частиц Стандартной модели. Исходя из массы топ-кварка, она должна быть порядка единицы. Так как прямой распад бозона Хиггса на пару топ-кварк/антикварк кинематически невозможен, для измерения константы исследуют процесс рождения кварковой пары с бозоном Хиггса в результате протон-протонных столкновений. Измеряя сечение этого процесса в мультилептонном канале распада, можно получить константу связи топ кварка с бозоном Хиггса.

Данная работа была проведена коллаборацией ATLAS с использованием данных протон-протонных столкновений с интегральной светимостью  $80 \text{ фб}^{-1}$ . При анализе данных было обнаружено несоответствие предсказания фонового процесса рождения  $t\bar{t}W$  с экспериментом. В результате было решено провести более детальное изучение этого процесса, используя данные всего второго захода (Run 2) ЛHC с интегральной светимостью  $138 \text{ фб}^{-1}$ .

Таким образом, общей целью работы является изучение фона и его влияния на процесс  $t\bar{t}H$  в мультилептонном канале для увеличения чувствительности анализа  $t\bar{t}H$ . Одной из главных сложностей, возникающих в анализе, является определение числа «неподходящих» лептонов (*non-prompt leptons*), образованных, например, в результате распада адронов (образованных тяжелыми кварками). После определения их числа и сравнения данных моделирования с экспериментом будет возможно определение характеристик процесса  $t\bar{t}W$ , а следовательно, и  $t\bar{t}H$ .

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. М. Сухарев

**Измерение сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^0\pi^0$  с детектором КМД-3**

И. Д. Кутенев

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

На электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000 в ИЯФ СО РАН ведутся эксперименты по изучению процессов аннигиляции в адроны и лептоны. Максимальная энергия частиц в системе центра масс 2 ГэВ, при этом достигается максимальная светимость коллайдера  $10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Криогенный магнитный детектор (КМД-3) начал набирать статистику с 2011 г. и на данный момент набрал интеграл светимости порядка 200 пбн<sup>-1</sup>. Основная физическая программа этих экспериментов — измерение адронных сечений и анализ промежуточных состояний, через которые рождаются частицы в конечном состоянии. Одним из таких процессов, доступных для исследования на данном коллайдере, является процесс  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^0\pi^0$ . Была разработана методика выделения сигнальных событий и проведено моделирование и вычисление видимого сечения этого процесса.

Для вычисления сечения требуется отобрать события процесса из экспериментальных данных и вычислить эффективность отбора по данным моделирования. Отбор событий процесса производился в два этапа, на каждом из которых данные обрабатывались с использованием пакета CERN ROOT. На первом этапе события  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^0\pi^0$  отделялись от фона по критериям на параметры регистрируемых треков и фотонов, на число кандидатов в рожденные частицы в процессе электрон-позитронной аннигиляции. Основная сложность отбора событий  $K^+K^-\pi^0\pi^0$  состояла в отделении от фоновых процессов:  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ ,  $e^+e^- \rightarrow K_s^0K^+\pi^-$ ,  $e^+e^- \rightarrow K_s^0K^-\pi^+$  и  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^0$ . Данная задача решалась добавлением на втором этапе критериев на ионизационные потери заряженных частиц в дрейфовой камере и LXe-калориметре, а также условий на кинематику реконструированной системы частиц. Эффективность вычислялась с использованием моделирования генератором по фазовому объему. В результате было получено предварительное значение сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^0\pi^0$ .

Научные руководители —

д-р физ.-мат. наук Г. В. Федотович, Д. Н. Шемякин

## **Измерение пространственного разрешения для малого прототипа дрейфовой камеры Супер чарм-тау фабрики**

Д. А. Кыштымов

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

В настоящее время в ИЯФ СО РАН ведется разработка проекта Супер чарм-тау фабрики (СЧТФ), который позволит исследовать процессы рождения с-кварков и тау-лептонов при работе со светимостью около  $10^{35}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>. Один из ключевых элементов будущего детектора — дрейфовая камера (ДК), задачами которой являются реконструкция траекторий заряженных частиц, измерение их импульса и ионизационных потерь в среде. В данном проекте ДК основана на гексагональных ячейках.

Основная характеристика ДК — импульсное разрешение, которое во многом зависит от пространственного разрешения. Пространственное разрешение характеризует точность восстановления траектории частицы. В работе планируется экспериментальное измерение пространственного разрешения на малом прототипе ДК при помощи космических событий. Также важной составляющей работы ДК является процедура калибровки параметров установки, от которой зависит точность определения импульса частиц.

Для реализации алгоритма измерения пространственного разрешения была написана программа реконструкции траекторий заряженных частиц. При реконструкции происходит подбор касательных линий к изохронам проволочек и определение оптимального варианта параметров траектории частицы.

Для отладки алгоритма и выявления систематических неопределенностей, связанных с особенностями реконструкции, было проведено моделирование прохождения космических частиц через малый прототип ДК, реализована процедура восстановления  $R(t)$  (расстояния дрейфа электронного облака до анодной проволочки) и процедура получения пространственного разрешения.

Задачи данной работы:

- 1) написание программы реконструкции траекторий заряженных частиц;
- 2) отладка процедуры калибровки зависимости  $R(t)$  и получение пространственного разрешения.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук К. Ю. Тодышев

**Поиск конверсионного распада  $\omega \rightarrow \eta e^+e^-$  на детекторе КМД-3**

В. В. Мишин

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

За 2013 и 2018 гг. на детекторе КМД-3 ускорительного комплекса ВЭПП-2000 набран интеграл светимости около  $23 \text{ пб}^{-1}$  в диапазоне энергий 774–792 МэВ в системе центра масс, вблизи массы  $\omega$ -мезона. Предсказания относительной вероятности распада  $\omega \rightarrow \eta e^+e^-$ , основанные на модели векторной доминантности, дают надежду на экспериментальное наблюдение такого распада при набранной статистике данных.

Поиск и изучение конверсионных распадов необходимы для понимания физических процессов, происходящих в кварк-глюонной плазме. Важным источником информации об этих процессах являются процессы рождения дилептонов ( $e^+e^-$ ,  $\mu^+\mu^-$ ). В ряде экспериментов расчетное число пар дилептонов оказалось меньше измеренных. В расчете числа дилептонных пар используются в том числе относительные вероятности конверсионных распадов. Величина относительной вероятности распада  $\omega \rightarrow \eta e^+e^-$  пока не измерена экспериментально, а известные теоретические предсказания этой величины, основанные на модели векторной доминантности, отличаются друг от друга не менее чем в 2 раза. Экспериментальное наблюдение распада  $\omega \rightarrow \eta e^+e^-$  даст возможность проверить предсказание модели векторной доминантности.

Распад  $\omega \rightarrow \eta e^+e^-$  регистрируется в каналах распада  $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ ,  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ . Основным фоновым процессом выступает распад  $\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ ,  $\pi^0 \rightarrow e^+e^-\gamma$ . Выделяются события, содержащие четыре заряженных трека и не менее двух фотонов, суммарный заряд всех треков при этом требуется равным нулю. Типы заряженных частиц определяются с помощью кинематических особенностей распада  $\omega \rightarrow \eta e^+e^-$  и по ионизационным потерям заряженных частиц в дрейфовой камере детектора КМД-3. Геометрическая эффективность регистрации рассчитывается по моделированию Монте-Карло искомого распада. В данной работе представлена полностью разработанная методика для поиска конверсионного распада  $\omega \rightarrow \eta e^+e^-$  в модах распада  $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ ,  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$  на детекторе КМД-3. Особенностью разработанной методики является включение в ее состав метода слепого анализа.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук В. Ф. Казанин



**Изучение различных вкладов в сечение образования электрон-позитронных пар при столкновении нерелятивистских ядер**

И. В. Образцов

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

В работе изучается процесс образования электрон-позитронных пар при столкновении нерелятивистских ядер, который важен как с экспериментальной точки зрения, так и теоретической. Существуют два физических механизма, определяющих этот процесс: двухфотонный и однофотонный. В первом случае каждое ядро излучает виртуальный фотон, при аннигиляции которого образуется  $e^+e^-$  пара. Во втором случае в результате рассеяния ядер испускается один виртуальный фотон, который конвертируется в  $e^+e^-$  пару. Вклад в сечение первого механизма зависит от относительной скорости ядер ( $\beta$ ) и не зависит от их массы. Однако этот вклад сильно подавлен по  $\beta$  ( $\sim \beta^8$ ). Вклад второго механизма обратно пропорционален квадрату массы ядер, но не подавлен по  $\beta$  и усилен третьей степенью большого логарифма. В однофотонный механизм дают вклады разные мультиполи излучения. Оказалось, что вклад электрического дипольного излучения сильно подавлен по величине дипольного момента системы рассеивающихся ядер. Вклад электрического квадрупольного излучения имеет относительную малость  $\beta^2$  по отношению к вкладу электрического дипольного излучения, но не содержит высокое подавление по величине соответствующего момента. В работе проанализированы все вклады в процесс образования  $e^+e^-$  пар при столкновении нерелятивистских ядер и показано, что в широком диапазоне ( $\beta < 1$ ) доминирующим является вклад квадрупольного излучения, обусловленный однофотонным механизмом образования пар. В работе рассматривается процесс, в котором электрон и позитрон находятся в состоянии непрерывного спектра, и процесс, в котором электрон переходит в связанное состояние с одним из ядер.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. А. И. Мильштейн

## **Изучение широких атмосферных ливней с помощью мюонных счетчиков обсерватории TAIGA**

Л. А. Панасенко

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Обсерватория TAIGA (*Tunka Advanced Instrument for cosmic ray and Gamma Astronomy*) занимается изучением широких атмосферных ливней (ШАЛ), регистрируя сразу несколько компонентов ливня: заряженную компоненту, черенковское и радиоизлучение. В рамках этого гибридного подхода целью работы является включение анализа данных массива сцинтилляционных счетчиков Tunka-Grande в комплексный анализ ШАЛ обсерваторией.

Ранее была разработана методика восстановления направления прихода ШАЛ, проведен сравнительный анализ с результатами обработки данных массива черенковских счетчиков TAIGA-HiSCORE, оценено угловое разрешение Tunka-Grande и внесением поправки ко времени триггера станций достигнуто улучшение углового разрешения более чем в 2 раза. Новые результаты работы заключаются в следующем. Разработана методика поиска систематических временных сдвигов станций мюонных счетчиков. После внесения найденных поправок угловое разрешение улучшено на величину порядка 20 %. Также разработана методика восстановления оси ШАЛ и оценено пространственное разрешение Tunka-Grande. На основе экспериментальных данных получена эффективность регистрации TAIGA-HiSCORE по отношению к эффективности регистрации Tunka-Grande. В завершение была изучена возможность использования тени от Луны для измерения углового разрешения установки. На основе результатов моделирования сделан вывод о невозможности набрать необходимую статистику за разумное время (10 лет) при существующем угловом разрешении детектора.

В дальнейшем планируется анализ энергетических данных установки Tunka-Grande, поиск кластеризованных по времени и направлению событий.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, проф. А. Ю. Гармаш

## Космологический бариогенезис через асимметричный захват частиц первичными черными дырами

Н. А. Поздняков

Новосибирский государственный университет

Одной из важнейших задач космологии является объяснение наблюдаемой барионной асимметрии Вселенной. Согласно астрономическим данным, величина барионной асимметрии составляет

$$\beta = \frac{n_B - n_{\bar{B}}}{n_\gamma} \approx 6 \cdot 10^{-10},$$

здесь  $n_B$  — плотность барионов;  $n_{\bar{B}}$  — плотность антибарионов (в современной Вселенной  $n_{\bar{B}}$  практически равна 0);  $n_\gamma$  — плотность реликтовых фотонов космического микроволнового фона.

В представленной работе обсуждается новый сценарий бариогенезиса, который может быть реализован при нарушении C- и CP-симметрий и отсутствии нарушения CPT-симметрии. Асимметрия возникает за счет различия темпов поглощения барионов и антибарионов первичным черными дырами. Преимуществом предлагаемого сценария является отсутствие необходимости двух из трех условий Сахарова, а именно отклонение от термодинамического равновесия и нарушение барионного числа во взаимодействиях элементарных частиц.

Равенство масс частиц и античастиц сильно ограничивает различие подвижностей частиц, которое возникает лишь в высших порядках теории возмущений. Тем не менее при наличии определенных каналов реакций такое различие возможно и различные темпы поглощения барионов и антибарионов могут приводить к преимущественному захвату антибарионов и возникновению избытка барионов над антибарионами во внешнем мире.

Как показано в работе, существует область параметров модели, описывающей рассматриваемые частицы, которая позволяет количественно объяснить наблюдаемую величину барионной асимметрии Вселенной.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. А. Д. Долгов

**Реконструкция черенковских колец в детекторе ФАРИЧ  
с использованием методов машинного обучения**

С. И. Помулева

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

В связи с планированием использования детектора ФАРИЧ (от англ. *Focusing Aerogel Ring Imaging Cherenkov detector*, FARICH) в экспериментах ПАНДА и Супер чарм-тау фабрики большое значение имеет оптимизация и улучшение точности обработки данных с этого детектора. ФАРИЧ представляет собой детектор черенковских колец на основе аэрогеля.

Для этой цели было предложено использовать нейросети. Программа обработки была написана на языке Python с использованием библиотеки Tensorflow. Для обучения нейросети были использованы данные компьютерного моделирования детектора с помощью среды Geant4. В качестве детектируемых частиц использовались пионы и мюоны. Целью работы нейросети было определение скорости частицы по данным, полученным с детектора.

На данный момент достигнута точность восстановления скорости  $\sigma_\beta \approx 10^{-3}$ . В будущем планируется реализация классического алгоритма реконструкции и сравнение нового алгоритма с классическим по производительности и точности.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук С. А. Кононов

**Исследование многоанодного ФЭУ  
на основе микроканальных пластин**

П. А. Ржевский

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

ФАРИЧ (англ. FARICH — *Focusing Aerogel Rich Imaging Cherenkov detector*) — детектор черенковских колец на основе фокусирующего аэрогеля. ФАРИЧ планируется применить в качестве системы идентификации частиц в экспериментах на Супер чарм-тау фабрике. Система ФАРИЧ будет покрывать почти полный телесный угол и находиться в магнитном поле 1 Тл. Наличие магнитного поля налагает ограничения на выбор фотонного детектора для регистрации черенковских фотонов. Одним из возможных кандидатов на роль фотонного детектора в торцевой части системы является многоанодный ФЭУ на основе микроканальных пластин (МКП). Данный тип ФЭУ обладает высокой устойчивостью к магнитным полям, а многоанодная конфигурация позволяет достичь высокого пространственного разрешения. Помимо размеров анодов, на пространственное разрешение такого ФЭУ может влиять поперечный размер электронной лавины, выходящей из МКП. Основной целью представляемой работы было исследование размера электронной лавины в зависимости от режима работы ФЭУ с МКП.

Исследуемый ФЭУ был изготовлен новосибирской компанией АО «Катод». ФЭУ имеет фотокатод диаметром 18 мм, две МКП, соединенные по типу «шеvron», матрицу из 16 анодов размером  $3 \times 3$  мм каждый. Характеристики ФЭУ исследовались с помощью импульсного лазера в двух разных режимах: «многоэлектронном», при котором выходной сигнал с ФЭУ отвечал регистрации большого числа фотонов, и «одноэлектронном», когда основная часть сигнальных событий соответствовала регистрации одного фотона. В результате измерений получены зависимости ширины электронной лавины в плоскости анодов, а также величины выходного сигнала с ФЭУ, коэффициента усиления и временного разрешения от напряжений на фотокатод, МКП и аноде. В многоэлектронном режиме исследовано поведение амплитуды сигнала с ФЭУ и поведение размера электронной лавины в зависимости от интенсивности света лазера и размера светового пятна на поверхности фотокатода. Установлена однородность усиления ФЭУ по поверхности исследуемого участка анодной матрицы.

Научный руководитель — М. Ю. Барняков

## Идентификация заряженных частиц в детекторе КЕДР

К. А. Сагалакова

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Данная работа посвящена изучению и применению методики идентификации частиц на детекторе КЕДР, работающем на коллайдере ВЭПП-4М. Целью работы является разработка программного обеспечения для анализа данных об ионизационных потерях  $dE/dx$  в дрейфовой камере и идентификация заряженных частиц.

Были изучены принципы работы дрейфовой камеры и ионизационные потери в дрейфовой камере детектора КЕДР. Написаны программы для аппроксимации средних удельных потерь энергии на треке с помощью асимметричного распределения Гаусса. По гистограммам считалось разрешение для каждого трека как отношение ширины на полувысоте к амплитуде. По полученным разрешениям строились графики зависимости разрешения от количества отбрасываемых минимальных амплитуд. Из графика определялась точка минимума, которая соответствовала оптимальному количеству отбрасываемых амплитуд для трека. Была написана программа, вычисляющая оптимальное число отбрасываемых минимальных амплитуд, которая была включена в общую калибровку  $dE/dx$  в дрейфовой камере.

Следующим этапом была проведена работа по калибровке ионизационных потерь  $dE/dx$  в дрейфовой камере детектора КЕДР. Для калибровки использовались космические мюоны. Полученное энергетическое разрешение дрейфовой камеры составило порядка 10 %. Также была получена зависимость энергетического разрешения от числа хитов на треке и длины трека.

Для расширения области достоверной идентификации частиц по импульсу и ионизационным потерям была построена совместная кривая Бете — Блоха для электронов, мюонов и каонов.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Т. А. Харламова

## **Получение ядерно-поляризованных пучков атомов водорода/дейтерия**

Б. Б. Ульзутуев

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Атомарные ядерно-поляризованные пучки используются для создания внутренней газовой мишени для экспериментов на ускорителе ВЭПП-3. Такие пучки создаются при помощи криогенного источника поляризованных атомов, который состоит из сверхпроводящих магнитов и блоков высокочастотных переходов. Неоднородное магнитное поле сверхпроводящих магнитов разделяет атомы по проекции спина электрона (метод Штерна — Герлаха), что позволяет получить атомный пучок, поляризованный по электронному спину. Ядерная поляризация получается за счет индуцирования переходов между энергетическими уровнями атома в блоках ВЧ-переходов. Целью данной работы являлось определение оптимальных параметров работы блока высокочастотных переходов MFT (*Medium Field Transition*), при которых достигается максимальная ядерная поляризация пучка. С помощью программы Mermaid проведены численные расчеты магнитного поля в блоке MFT. Было проведено измерение магнитного поля на оси блока MFT, которое подтвердило правильность расчетов. Проведено численное моделирование процесса переходов между энергетическими уровнями атомов в блоке MFT на основе численного интегрирования уравнения Шредингера. Получена зависимость заселенностей уровней с определенной проекцией электронного и ядерного спина от координаты вдоль движения атомного пучка. В дальнейшем планируется сравнение экспериментально измеренной поляризации с расчетной.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Ю. В. Шестаков

**Изучение динамики распространения света  
в счетчике калориметра Супер чарм-тау фабрики**

Р. В. Урманов

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

В настоящий момент в Институте ядерной физики СО РАН разрабатывается проект Супер чарм-тау фабрики — электрон-позитронного коллайдера с рабочими энергиями от 3 до 7 ГэВ и светимостью  $10^{35}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>, в задачи которого будет входить исследование свойств очарованных кварков и тау-лептонов. В рамках этого проекта был создан и протестирован прототип электромагнитного калориметра на основе кристаллов чистого CsI, пластин из оргстекла со спектросмещающим люминофором и лавинных фотодиодов Hamamatsu S8664-55.

В [1] были проведены измерения коэффициента светосбора счетчика прототипа при различных формах пластин. Нижние грани пластин были матированы. Применение пластины с треугольным вырезом в верхней грани дало увеличение коэффициента светосбора по сравнению с полностью плоской пластиной на 17 %. В [2] был рассмотрен светосбор счетчика при аналогичных формах пластин, покрытых кремнийорганическим наноструктурированным люминофором NOL-9, вместо матирования. При этом применение пластины с треугольным вырезом в верхней грани привело к уменьшению коэффициента светосбора по сравнению с полностью плоской пластиной.

В настоящей работе исследуется динамика распространения сцинтилляционного света в счетчике, состоящем из кристалла чистого CsI, пластины со спектросмещающим люминофором и четырех фотодиодов, путем прямого моделирования Монте-Карло на базе пакета Geant4, объясняются упомянутые выше результаты и предлагается ряд мер по увеличению коэффициента светосбора счетчика.

---

1. Prokhorova E. Study of the fast calorimeter prototype for the Super Charm-Tau Factory // EPJ Web Conf. 2019. Vol. 212. 01007.

2. Prokhorova E. Study of the fast calorimeter prototype for modern e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> factories // JINST. 2020. Vol. 15. No. 08. C08023.



# **ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ**

Научный руководитель секции — д-р физ.-мат. наук Л. И. Шехтман

Председатель секции — канд. физ.-мат. наук П. П. Кроковный  
Секретарь секции — канд. техн. наук Г. А. Фаткин

Экспертный совет  
д-р техн. наук А. М. Батраков  
канд. техн. наук К. Ф. Лысаков  
канд. физ.-мат. наук П. П. Кроковный  
канд. физ.-мат. наук П. Ю. Шатунов

## **INSTRUMENTATION IN EXPERIMENTAL PHYSICS**

Section scientific supervisor — Dr. Ph.-Math. Sci. L. I. Shechtman

Section head — Cand. Ph.-Math. Sci. P. P. Krokovny

Section responsible secretary — Cand. Techn. Sci. G. A. Fatkin

Section scientific committee  
Dr. Techn. Sci. A. M. Batrakov  
Cand. Techn. Sci. K. F. Lysakov  
Cand. Ph.-Math. Sci. P. P. Krokovny  
Cand. Ph.-Math. Sci. P. Yu. Shatunov



# АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

УДК 535.36; 551.501.776

## Программная реализация алгоритма сопоставления лидарных и пиранометрических данных для изучения влияния облаков верхнего яруса на потоки солнечной радиации

Н. М. Андреянов

Томский государственный университет

Облака верхнего яруса (ОВЯ) состоят в основном из ледяных кристаллов. Несмотря на свою относительно небольшую (единицы километров) геометрическую толщину, могут покрывать до половины поверхности Земли [1]. Вследствие этого их влияние на климат общепризнано [2]. Тем не менее в существующих моделях атмосферы их микроструктура не учитывается по причине малой изученности и сложности расчетов рассеяния оптического излучения на ледяных кристаллах.

На базе НИ ТГУ ведутся исследования оптических и геометрических характеристик ОВЯ с использованием высотного поляризационного лидара. Его уникальным свойством является возможность выполнения всех измерений, необходимых для экспериментального определения полной матрицы обратного рассеянного излучения. Совместные лидарно-пиранометрические измерения (в сотрудничестве с ИМКЭС СО РАН) позволяют изучать связи характеристик ОВЯ с изменениями потоков солнечной радиации.

Для интерпретации результатов таких измерений разработан и программно реализован алгоритм их приведения к единой временной шкале для совместного анализа. Такое приведение выполняется из-за удаленности лидара и пиранометра друг от друга и необходимости учета дрейфа исследуемых ОВЯ под действием ветра от одного прибора к другому. В докладе описывается алгоритм и разработанная на его основе программа, рассматриваются результаты лидарно-пиранометрических измерений.

---

1. Heymsfield A. J. et al. Cirrus clouds // Amer. Meteor. Soc. Meteor. Monogr. 2017. Vol. 58.

2. Дмитриева-Арраго Л. Р. и др. Роль фазового состава облаков в формировании потоков коротковолновой и длинноволновой радиации // Тр. Гидрометцентра России. 2017. Вып. 363. С. 19–34.

Научный руководитель — И. Д. Брюханов

## **Развитие системы онлайн-мониторинга данных на калориметре детектора Belle II**

Я. Н. Антонова

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Для обеспечения на электромагнитном калориметре детектора Belle II требуемых показателей временного и энергетического разрешения и обнаружения проблем в работе электроники необходимо мониторировать качество поступающих данных. Оценка качества данных отдельных заходов осуществляется путем сравнения соответствующего набора гистограмм с некоторым эталонным набором. Помимо наблюдения за каждым отдельным заходом, важно отслеживать долговременные тенденции.

Целью данной работы является разработка инструментов для мониторинга качества данных в зависимости от захода, сохранения информации об эталонных гистограммах и автоматизации сравнения текущих гистограмм с эталонными.

Реализован ROOT-скрипт на C++, извлекающий из поступающих данных информацию о среднем времени прихода сигнала в крейтах, долях сохраненных сигналов АЦП и ширине пьедестала АЦП в зависимости от положения кристалла в калориметре. С использованием фреймворка MiraBelle настроено отображение извлекаемых параметров на веб-странице в виде гистограмм и графиков зависимости от номера захода.

Разработан инструмент для структуризации эталонных гистограмм в мониторе качества данных. Для этого сконфигурирована база данных (SQLite) для хранения информации об эталонных гистограммах и разработана программа на Python, работающая с этой базой данных и собирающая файл с эталонными гистограммами по запросу пользователя.

Ведется работа по созданию системы быстрого оповещения о проблемных гистограммах: рассмотрены статистические тесты для сравнения гистограмм с эталонными, отлажено сравнение для некоторых типов гистограмм.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Д. В. Матвиенко

**Разделение близких кластеров в калориметре детектора КМД-3**

А. А. Баженов

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

В Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН проводятся эксперименты на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000. Коллайдер имеет два места встречи пучков, в одном из которых установлен детектор КМД-3 (криогенный магнитный детектор). В программу ВЭПП-2000 входит измерение сечений процессов, наблюдаемых при столкновениях электронов и позитронов в диапазоне энергий до 2 ГэВ, в том числе процессов с фотонами в конечном состоянии. Для регистрации фотонов в детекторе КМД-3 используется жидкоксереновый (LXe) калориметр. Фотон, попадая в калориметр, порождает электромагнитный ливень. Частицы ливня регистрируются сигнальными полосками, расположенными на слоях калориметра. Последовательные наборы сработавших полосок группируются в полосковые кластеры.

При столкновениях электронов и позитронов большое сечение рождения имеют процессы с нейтральным пионом в конечном состоянии, например процесс  $e^-e^+ \rightarrow \pi^0 \gamma$ . Нейтральный пион с вероятностью 99 % распадается на два фотона. При высоких энергиях пиона минимальный угол между фотонами становится мал, например, при энергии пиона 1 ГэВ этот угол составляет 0,27 радиана. Электромагнитные ливни таких фотонов в калориметре могут перекрываться, и появляется вероятность принять слившиеся вместе кластеры, образованные двумя фотонами, за одиночный кластер от одного фотона. Целью работы является создание алгоритма разделения таких кластеров. Алгоритм позволит увеличить статистику событий и повысить точность измерения параметров процесса.

Для реализации алгоритма разделения выбран метод бустинга деревьев решений (*boosted decision trees*, BDT). На данный момент проведен анализ задачи разделения, разработан алгоритм классификации кластеров, проверена эффективность метода BDT, выполнена подготовка данных моделирования процесса  $e^-e^+ \rightarrow \pi^0 \gamma$ , проведены расчеты параметров распада пиона. Ведется подбор оптимальных параметров классификации. После реализации алгоритма необходимо сравнить его с предыдущими решениями задачи разделения.

Научный руководитель — А. В. Семенов

## **Разработка параметрического моделирования эксперимента на Супер чарм-тау фабрике с использованием фреймворка Aurora**

М. С. Белозерова

Новосибирский государственный университет

Супер чарм-тау фабрика (СЧТФ) представляет собой проект ускорительного комплекса для изучения очарованного кварка и тау-лептона, предложенный в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН. Компьютерное моделирование является неотъемлемым этапом проектирования этого эксперимента. Параметрическое моделирование детектора СЧТФ — это инструмент для получения отклика детектора без детального описания взаимодействия частиц с веществом. Отклик детектора при этом получается с помощью набора случайных чисел, плотности распределения вероятностей которых задаются небольшим набором параметров. Такой подход позволяет, во-первых, имитировать отклик детектора очень быстро и, во-вторых, легко изменять характеристики детектора, варьируя параметры модели.

Программное обеспечение (ПО) для параметрического моделирования реализовано в рамках фреймворка Aurora, предоставляющего интерфейс для проектирования ПО для детектора СЧТФ. Реализованный алгоритм получает на вход частицы первичного моделирования и проводит их через подсистемы детектора: дрейфовую камеру, калориметр, ФАРИЧ (систему идентификации), мюонную подсистему. Корректность проведения частиц через объем детектора проверяется с помощью набора специальных тестов. В результате работы алгоритма получается реконструированное «событие» в формате модели данных эксперимента СЧТФ. Это позволяет работать с результатами параметрического моделирования так же, как с результатами полного моделирования эксперимента.

Программное обеспечение для параметрического моделирования разработано на языке C++. Одновременно с этим был создан и протестирован прототип на языке Python.

ПО для параметрического моделирования непрерывно развивается и тестируется. Следующее запланированное улучшение — реализация реконструкции частиц с учетом слияния электромагнитных кластеров в калориметре детектора.

Научные руководители —

канд. физ.-мат. наук В. С. Воробьев, Г. П. Разуваев

**Моделирование дрейфовой камеры детектора Супер чарм-тау фабрики**

И. С. Булыженков

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск,  
Новосибирский государственный университет

В проекте детектора новосибирской Супер чарм-тау фабрики (СЧТФ) в качестве основной подсистемы, предназначенной для измерения координат и импульсов заряженных частиц, рассматривается дрейфовая камера со стереослоями и газовой смесью  $\text{He} : \text{iC}_4\text{H}_{10} 90 : 10 \%$ . В рамках данной работы был создан пакет программ моделирования и реконструкции треков в дрейфовой камере СЧТФ.

Прежде всего был создан параметризованный генератор геометрии проволочек *full-stereo* дрейфовой камеры, знак угла наклона (стереоугол) противоположен в чередующихся слоях. Далее, в моделирование была заложена возможность подсчета числа кластеров ионизации (*cluster counting*) в каждой ячейке, а также измерения их времен дрейфа (*cluster timing*). Предполагается, что по сравнению с обычным измерением удельного энерговыделения  $dE/dx$  подсчет числа кластеров  $dNcl/dx$  позволит значительно улучшить возможности камеры по идентификации типа частиц, а измерение времени дрейфа отдельных электронов ионизации позволит улучшить координатное и импульсное разрешения. Далее, с помощью пакета Garfield++ были получены: спектры передачи энергии в акте взаимодействия с атомами газовой смеси  $\text{He} : \text{iC}_4\text{H}_{10} 90 : 10 \%$ ; карта времен дрейфа (изохроны) электронов ионизации; распределение коэффициента усиления лавин; характерное время спада сигнала от ионной компоненты лавины ( $t_0 = 1,08$  нс).

Модуль оцифровки сигналов с проволочки реализован в двух вариантах: 1) опции со сканированием сигналов с двух сторон проволочки с частотой 2 ГГц (используется для *cluster timing*); 2) опции с полным интегрированием заряда с двух сторон проволочки. Наконец, был реализован простейший вариант реконструкции треков, в котором используется информация из моделирования о принадлежности кластера к треку конкретной частицы. Аппроксимация (фит) измеренных координат пролета частицы («хитов») производится в два этапа. Первый — предварительный фит — реализован в виде так называемого римановского фита, в котором используется проекция хитов в  $x$ -плоскости на поверхность кругового параболоида. На втором этапе производится фит с фильтром Калмана (пакет GenFit), результаты римановского фита используются в качестве начального приближения.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. И. Б. Логашенко

## **Структура и алгоритм функционирования регистрирующей аппаратуры электромагнитного калориметра Супер чарм-тау фабрики**

А. А. Глушак

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный технический университет

С 2011 г. в ИЯФе ведется работа над проектом нового ускорительно-накопительного комплекса — Супер чарм-тау фабрикой. Для данного проекта был выбран ряд новых технических решений, в частности использование быстрых неорганических кристаллов CsI в калориметре. Использование быстрых кристаллов позволяет снизить вероятность наложения фонового и полезного сигнала, но в то же время требует создание набора специализированных электронных блоков для работы с быстрыми сигналами. Задачами электронных блоков являются непрерывная обработка сигналов со счетчиков, вычисление основных характеристик и передача полученных сведений в общую систему сбора данных.

Регистрирующая аппаратура электромагнитного калориметра состоит из модулей сбора данных и модулей коллекторов. Задачами модулей сбора данных являются формирование и оцифровка сигналов с кристаллов калориметра, анализ формы сигнала и вычисление характеристик. Основные задачи коллектора — получение данных с модулей сбора данных и их передача на следующий уровень системы сбора данных.

Целью работы является разработка регистрирующей электроники электромагнитного калориметра Супер чарм-тау фабрики. В ходе работы был разработан дизайн печатной платы и алгоритм работы модуля сбора данных, рассчитаны необходимые численные параметры, написан проект определения параметров сигналов в модуле сбора данных на языке VHDL.

Научный руководитель — канд. техн. наук В. В. Жуланов



## **Архитектура базового микроконтроллерного узла для процесс-ориентированных распределенных систем**

В. А. Дроботун

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

В области контроля различных, в том числе и распределенных, систем, таких как производственно-фабричные линии и физические установки, широкое распространение приобрели встраиваемые системы на основе микроконтроллеров. Одними из основных причин такого распространения стало удешевление «умных» датчиков и исполнительных устройств, а также экономия на количестве аналоговых и силовых линий управления. Использование распределенного подхода для систем управления приводит к сокращению трудоемкости разработки, упрощению отладки и повышению общей ремонтопригодности и надежности систем.

Для управления такими системами в основном применяется программное обеспечение, реализующее объектно-ориентированный подход. В качестве альтернативы, исследуется вопрос применимости процесс-ориентированного подхода, в связи с чем имеется потребность в унифицированной платформе для отработки/проверки возникающих в этих исследованиях гипотез.

В ходе работы была разработана архитектура и схемотехника базового модуля распределенной системы, использующего для подключения к сети интерфейс CAN. Модуль имеет гальваническую развязку общей шины, что защищает систему от выхода из строя при возникновении неисправностей на одном из базовых блоков. В качестве микроконтроллера используется STM32F103, поскольку он аппаратно поддерживает интерфейсы CAN и USB. USB используется для подключения распределенной системы к ПК оператора и непосредственного контроля над параметрами системы.

Дополнительно к базовому модулю разработаны архитектурные и схемотехнические решения для основных модулей расширения: модули АЦП, ЦАП, а также модули управления силовой нагрузкой, которые являются минимальным необходимым комплектом для управления экспериментальными установками.

В дальнейшем планируется изготовление электронных плат базовых блоков и модулей расширения, а также реализация программного обеспечения для подключения базовых блоков к общей шине. Использование разработанных решений позволяет создавать распределенные системы, надежные, в том числе и программно, за счет процесс-ориентированных языков программирования.

Научные руководители — д-р. техн. наук В. Е. Зюбин, А. С. Розов

**Изучение свойств закрученного дифракционного излучения  
от геликоидальной мишени  
с помощью компьютерного моделирования**

А. А. Дышеков

Томский политехнический университет

«Закрученные» фотоны — это фотоны, обладающие ненулевой проекцией момента импульса на ось, направленной вдоль поступательного движения частицы [1]. Другими словами, фотон совершает не только поступательное движение, но и вращательное. Однако существует малое число методов генерации закрученного излучения, что сильно ограничивает возможности исследования его свойств.

В работе предлагается использовать механизм генерации на основе дифракционного излучения (ДИ) от спиральной мишени. В ходе подготовки эксперимента на микротроне ТПУ по генерации «закрученного» излучения было произведено моделирование данного процесса на основе ранее разработанного численного кода. Для этого была разработана модель геликоидальной мишени и добавлена возможность расчета ДИ от данной мишени. В ходе данной работы мишень и код были оптимизированы для использования численных методов Монте-Карло, что ускорило расчеты и в целом повысило возможности модели.

В ходе моделирования были получены спектральные и спектрально-угловые распределения для различных параметров спиральной мишени. Геликоидальная мишень имеет 3 основных параметра: внутренний и внешний радиусы и ширину шага разрыва. Было определено влияние данных параметров на свойства генерируемого излучения, например влияние ширины шага разрыва геликоида на интенсивность излучения. Подбор оптимальных размеров мишени являлось одной из важных задач. Также в модели были учтены продольные размеры пучка и возможные ошибки в юстировке. Таким образом, в ходе предварительного моделирования были получены свойства «закрученного» ДИ от спиральной мишени, с опорой на которые будет произведен эксперимент на микротроне ТПУ.

---

1. Князев Б. А., Сербо В. Г. Пучки фотонов с ненулевой проекцией орбитального момента импульса: новые результаты // УФН. 2018. Т. 188, № 5. С. 508–539.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Д. А. Шкитов

**Разработка программного комплекса для тестирования  
триангуляционных методов измерения трехмерной формы объекта  
с использованием структурированного освещения**

В. О. Зуев

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Актуальность исследований в области измерения трехмерной формы объекта обусловлена потребностью в науке, промышленности и других областях измерения трехмерной геометрии статичных и динамично движущихся объектов. Среди методов измерения трехмерной геометрии объекта особенно перспективны триангуляционные методы с использованием структурированного освещения, что обусловлено высокой точностью и скоростью сканирования. Разработка и тестирование этих методов является одной из главных задач в данной области.

Цель работы — разработка универсального программного комплекса для разработки и тестирования триангуляционных методов с использованием структурированного освещения для измерения трехмерной формы объектов в сложных условиях внешнего освещения. В процессе анализа программных решений в данной сфере подобное ПО в открытом доступе не найдено. Были сформулированы требования к разрабатываемому ПО: возможность добавления на сцену и гибкая настройка внешних источников освещения, источника структурированного освещения на основе синусоидальных полос, проектора произвольной структурированной засветки; возможность загрузки модели объекта из внешнего файла, гибкой настройки его параметров с последующим размещением на сцене; реализация теней; возможность работы в режимах формирования сцены и эксперимента. Создано ПО, удовлетворяющее заявленным требованиям. Освещение реализовано по модели Фонга. Обеспечена возможность настройки параметров сцены во внешнем XML файле. Реализован метод предварительной загрузки объектов для оптимизации работы ПО. Предложен и реализован ускоренный метод создания карт теней.

В результате работы создан программный комплекс для тестирования триангуляционных методов измерения трехмерной формы объекта с использованием структурированного освещения. Комплекс работает в режиме формирования сцены и режиме эксперимента. Реализована загрузка конфигурации сцены из внешнего XML-файла. Обеспечена возможность гибкой настройки параметров объектов и источников освещения.

## Моделирование процесса формирования фрактальных металлических пленок

Д. В. Иванов, С. А. Васильев, В. А. Анофриев, В. А. Кошелев  
Тверской государственной университет

Целью настоящей работы является изучение в рамках компьютерного эксперимента зависимости морфологии получаемых наноразмерных металлических пленок золота на медной подложке от фрактальной размерности и управляющих параметров в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии. Использовались следующие параметры молекулярно-динамического эксперимента: время процесса роста и последующей релаксации пленки 100 000 шагов (время одного шага 1 фс), атомы поступали в систему по одному раз в 10 шагов. Рассматривались следующие параметры пучка: диаметр 72 и 144 нм, энергия 0,5 и 3,0 эВ соответственно. Ячейка моделирования представляла собой куб со стороной 10 нм, под нижней гранью которого находилась подложка толщиной в 7 атомных слоев. Для описания межатомного взаимодействия используется потенциал сильной связи, параметры которого взяты из [1]. Установлено, что при получении наноразмерных пленок золота на поверхности меди методом электронно-лучевой эпитаксии существует возможность формирования высокоразвитого фрактального рельефа, даже притом, что для наноразмерных пленок золота сам рельеф поверхности в большей степени соответствует типу «плато». Очевидно, что изучение и описание механизма образования фрактальных структур, в том числе за счет механизма ассоциации, тесно связано как с учетом поля твердой поверхности (в нашем случае определяется параметрами потенциала сильной связи), так и с влиянием ряда начальных условий эксперимента — шероховатости подложки, энергии и плотности атомного пучка. Вывод о том, что при заданных температуре и параметрах подложки наноразмерные гетероструктуры, формирующиеся в результате кристаллизации нанок капель на поверхности твердого тела с использованием процесса молекулярно-лучевой эпитаксии, являются практически идентичными для фрактальных структур, нуждается в дополнительной апробации.

*Исследования выполнены при поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения ГЗ в сфере научной деятельности (проект № 0817-2020-0007).*

---

1. Cleri F., Rosato V. Tight-binding potentials for transition metals and alloys // Phys. Rev. B. 1993. V. 48. I. 1. P. 22–33.

## **Разработка программно-аппаратного комплекса для управления и сбора данных со сканирующего проточного цитометра**

М. А. Калиниченко

Институт химической кинетики и горения СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Оптические методы являются одними из наиболее популярных методов изучения дисперсных сред. Методы, основанные на поштучном анализе пробы (например, метод проточной цитометрии), позволяют измерять светорассеяние от одиночных частиц с высокой скоростью и точностью путем решения обратной задачи светорассеяния для каждой частицы пробы. Данные методы требуют программно-аппаратного комплекса, способного регистрировать данные с высокой скоростью и сохранять большие объемы данных.

Метод сканирующей проточной цитометрии предъявляет следующие требования к системе сбора данных: при концентрации исследуемых частиц  $10^6 \text{ см}^{-3}$  для каждой частицы требуется оцифровать данные с трех каналов на частоте 800 кГц. Для каждой частицы необходимо записать 100 точек триггерного сигнала, 800 точек сигнала светорассеяния и измерить время между триггерным сигналом и сигналом светорассеяния. Система должна регистрировать не менее 30 частиц в секунду. Также необходимо в реальном времени отображать графики зависимости интенсивности рассеянного света от времени для одной частицы. В качестве управляющего сигнала должен передаваться коэффициент усиления сигнала.

В работе представлена концепция программно-аппаратного комплекса для сбора данных со сканирующего проточного цитометра. Для оцифровки сигналов используется разработанная ранее в лаборатории система из трех сканирующих модулей. Подключение сканирующих модулей к ПК осуществляется по USB. Программное обеспечение разработано с использованием языков C++ и Python.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук К. В. Гилев

## **Разработка программного обеспечения контроллеров источников питания синхротрона СКИФ**

А. А. Кононов

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Контроллеры источников питания синхротрона СКИФ должны предоставлять возможность управления источниками питания и контроль их работы в реальном времени, а также синхронизацию всех источников синхротрона (~2000 шт.) с точностью порядка 1 мкс. Для удовлетворения этим требованиям выбрано использование операционной системы реального времени — FreeRTOS. Для взаимодействия с системой управления контроллеры должны поддерживать стандартный интерфейс EPICS — *Channel Access*, что требует применения Linux в качестве операционной системы. Для разрешения противоречия была выбрана система на кристалле (SoC), содержащая несколько гетерогенных ядер, на одном из которых выполняются задачи реального времени под управлением FreeRTOS, на остальных ядрах — задачи, относящиеся к EPICS под управлением Linux.

Целью работы является создание программного обеспечения для SoC, удовлетворяющего всем перечисленным требованиям. Для передачи данных между ядрами создан протокол, основанный на механизме RPMsg, измерена его пропускная способность. Сформулированы требования к объему оперативной и энергонезависимой памяти и количеству вычислительных ядер. Проведено сравнение различных дистрибутивов Linux, совместимых с используемой аппаратной платформой, собран минимальный образ ОС Linux, удовлетворяющий требованиям системы.

Научный руководитель — П. Б. Чеблаков

## **Влияние метеорологической обстановки на временную трансформацию микроструктуры конденсационных следов самолетов**

О. Ю. Локтюшин

Томский государственный университет

Конденсационные следы самолетов и образованные ими перистые облака являются единственным искусственным типом ледяных облаков [1]. Как и естественные облака верхнего яруса (ОВЯ), следы влияют на радиационный баланс Земли. Они преимущественно состоят из ледяных кристаллов несферической формы, которые могут иметь горизонтальную пространственную ориентацию. Это приводит к аномально («зеркальному») обратному рассеянию оптического излучения. Среди всех форм облаков вклад перистых в парниковый эффект наибольший [2]. В моделях атмосферы, используемых при расчетах прогнозов погоды и климата, ориентация частиц в облаках никак не учитывается, что негативно сказывается на их точности.

Обнаружение и изучение «зеркальных» ОВЯ возможно при их поляризационном лазерном зондировании. Самолетные следы исследуются в Томске на высотном поляризационном лидаре НИ ТГУ. В измерениях определяется полная матрица обратного рассеяния света исследуемых облаков, содержащая информацию об их микроструктуре.

Для выявления связей между метеорологической обстановкой и ориентацией ледяных кристаллов в самолетных следах проанализированы данные более 120 лидарных экспериментов с сентября 2019 г. по октябрь 2020 г. В течение 64 из них зарегистрированы следы, около половины из которых содержали горизонтально ориентированные ледяные кристаллы. «Зеркальные» следы сгруппированы по длительности существования, для каждой группы оценены средние значения метеорологических величин по данным аэрологического зондирования. Установлено, что более долгоживущие «зеркальные» следы зарегистрированы при более низких средних значениях температуры и точки росы, а также при более высокой относительной влажности воздуха. Случаев горизонтальной ориентации кристаллов льда в самолетных следах, зарегистрированных более чем 1,5 ч после их формирования, не зафиксировано.

---

1. Kärcher D. Formation and radiative forcing of contrail cirrus // Nature Commun. 2018. No. 9. 1824.

2. Wylie D.P., Menzel W.P., Woolf H.M. et al. Four years of global cirrus cloud statistics using HIRS // J. Clim. 1994. Vol. 7. P. 1972–1986.

**Разработка архитектуры системы мониторинга  
состояния детектора СНД**

И. Г. Мосейков

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

В Институте ядерной физики (ИЯФ) СО РАН проводятся эксперименты в области физики высоких энергий с помощью сферического нейтрального детектора (СНД). Метаданные, конфигурация и актуальное состояние эксперимента (например, температуры оборудования, режим ускорительного комплекса и системы сбора данных) хранятся в базах данных (БД). Целью работы является создание системы мониторинга состояния эксперимента на основе данных из БД и других источников.

В результате была разработана архитектура системы. На языке Python с использованием фреймворка *Django* реализован прототип, состоящий из клиент-серверного приложения с веб-интерфейсом. Прототип предоставляет следующий функционал: интуитивно понятное текстовое и графическое отображение состояния эксперимента, анализ состояния по заданным параметрам с проверкой предустановленных и конфигурируемых пользовательских условий на упомянутые параметры. Имеется интеграция с системой звуковых оповещений СНД. Данная система позволяет упростить работу операторов детектора и экспертов, которым предоставляет средства для поддержания эксперимента в корректном состоянии и отслеживания аварийных ситуаций.

Научный руководитель — К. В. Пугачев



## **Разработка системы внесения модификаций в цилиндрические микрорезонаторы лазерным излучением**

А. С. Нестерок

Новосибирский государственный университет

Одним из перспективных типов оптических микрорезонаторов является стандартное телекоммуникационное волокно. Как было показано в [1], оно подходит для создания микрорезонаторов с качеством поверхности стеклянной оболочки, достаточным для поддержки долгоживущих мод шепчущей галереи (МШГ). При этом скорость осевого движения МШГ напрямую зависит от локальных вариаций эффективного радиуса волокна, которые играют роль одномерных потенциальных ям для волновых пакетов мод шепчущей галереи. Таким образом, актуальной является разработка метода, позволяющего вносить вариации эффективного радиуса с необходимой точностью.

В работе реализован программный комплекс, автоматизирующий процесс внесения модификаций на поверхность волокна с помощью локального нагрева фокусированным излучением  $\text{CO}_2$ -лазера. Программа управляет мощностью лазера, оптическим затвором, задающим длительность нагрева, набором моторизированных микроподвижек, передвигающих образец волокна относительно фокуса излучения.

Программный комплекс реализован на языке программирования Python и включает в себя модули управления  $\text{CO}_2$ -лазером и оптическим затвором, модули управления микроподвижками, алгоритмы процесса модификации, а также графический интерфейс. Все это позволяет задавать и реализовывать произвольное наперед заданное распределение эффективного радиуса микрорезонатора вдоль оси волокна.

Работоспособность программного комплекса была проверена в экспериментах по внесению трапециевидного и параболического профилей вариации эффективного радиуса, а также в экспериментах по внесению отрицательных вариаций [2].

---

1. Sumetsky M. et al. Surface nanoscale axial photonics: robust fabrication of high-quality-factor microresonators // *Opt. Lett.* 2011. Vol. 36(24). 4824.

2. Krisanov D. et al. Introducing negative effective radius variations to control whispering gallery modes propagating on optical fibers // *Nanophotonics and Micro/Nano Optics VI. SPIE.* 2020. Vol. 36. P. 35.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук И. Д. Ватник

## **Разработка программного интерфейса системы сбора данных детектора КЕДР**

А. А. Николаев

Институт ядерной физики им Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

В настоящее время в Институте ядерной физики (ИЯФ) СО РАН на детекторе КЕДР производится обновление системы сборки данных (ССД). Разрабатывается новая электроника считывания оцифрованных данных. Соответственно, с обновлением электроники требуется оснастить ее программным обеспечением.

Целью работы является разработка программного интерфейса ССД, который позволит получать данные от ССД конечному пользователю. Система сбора данных обрабатывает события, произошедшие с регистрирующими подсистем детектора, и оцифровывает их. События могут приходиться с разных подсистем, это может быть дрейфовая камера, калориметры и т. д. Все подсистемы можно объединять в разделы — абстрактный объект для взаимодействия с ССД. С помощью разделов предполагается настраивать процесс чтения событий с детектора и получать данные событий как от всего детектора в целом, так и от отдельных его подсистем. Разрабатываемая библиотека должна реализовывать доставку данных до конечного пользователя и настройку работы с потоками данных и осуществлять обработку ошибок.

Архитектура проекта состоит из клиентской библиотеки на языке Си, предоставляющей интерфейс для взаимодействия с ССД, и серверной части на языке Python, которая реализует функционал интерфейса. Язык Си для клиентской части был выбран для возможности использования библиотеки в пользовательских программах, работающих с действующей ССД. Язык Python в серверной части использован для облегчения интеграции с разрабатываемой ССД.

На данный момент в проекте реализован интерфейс на языке Си и ведется разработка серверной части. После завершения написания проекта необходимо будет произвести тестирование библиотеки.

Конечной целью данной работы является использование разработанной библиотеки в регулярной работе детектора.

Научный руководитель — Д. А. Максимов

**Моделирование теплообмена при кипении  
на поверхности с контрастной смачиваемостью  
методом решеточных уравнений Больцмана**

А. Е. Остапченко

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Являясь эффективным механизмом отвода тепла от нагретой поверхности, процесс кипения широко используется в технических приложениях, связанных с тепло- и массообменом. Значительное влияние на локальные и интегральные характеристики кипения оказывают свойства смачиваемости поверхности, модифицируя которые, можно повысить эффективность теплообмена.

Целью исследования является изучение теплообмена при кипении на поверхностях с контрастной смачиваемостью (чередующимися лиофобными и лиофильными зонами) методом решеточных уравнений Больцмана. Данный метод позволяет не только анализировать динамику одиночных пузырей, но и исследовать эволюцию двухфазной системы с ансамблем паровых пузырей без необходимости задания дополнительных условий на нуклеацию.

В результате исследования проведено двумерное моделирование процесса роста и отрыва одиночных паровых пузырей над одиночной лиофобной зоной, расположенной на гладкой лиофильной поверхности. Было также проведено двумерное моделирование процесса кипения на лиофильной поверхности с несколькими лиофобными зонами. В качестве варьируемых параметров использовалась ширина лиофобных зон  $d$  и расстояние  $L$  между зонами. Установлено, что наличие лиофобных зон способствует образованию паровых пузырей в области малых тепловых перегревов, при которых не наблюдалось образование паровой фазы на однородной лиофильной поверхности. Кроме того, на поверхности с контрастной смачиваемостью возникает больший тепловой поток по сравнению с потоком на однородной лиофобной поверхности. При высоких тепловых перегревах наибольший критический тепловой поток достигается на однородной лиофильной поверхности, а размещение лиофобных зон приводит к его уменьшению. На основе проведенных расчетов определена оптимальная конфигурация поверхностей с контрастным смачиванием для интенсификации теплообмена при кипении модельной жидкости.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. В. Федосеев

## **Программно-аппаратный комплекс системы визуализации отложений внутри вихревой камеры**

Д. О. Семенов

Новосибирский государственный университет

Вихревые камеры служат для смешения и сжигания различных веществ в энергетических установках. Эксперименты на таких установках сопровождаются сложными физическими условиями внутри самой камеры, что затрудняет обзор внутренней полости вихревой камеры.

В ИТ СО РАН разрабатывается система визуализации отложений внутри вихревой камеры, предназначенная для работы в условиях сильного загрязнения поверхностей и температуры, достигающей 1200 °С.

Целью данной работы является создание полного комплекса ПО для работы системы визуализации отложений внутри вихревых камер. Данный модуль представляет из себя корпус, внутри которого установлена камера, осветители и внешний микроконтроллер, управляющий аппаратной частью системы. Дистанционное наблюдение осуществляется с ПК. Необходимо создать ПО для управления всей системой визуализации. Микроконтроллер должен осуществлять синхронизацию затвора камеры с включением осветителей, контролировать датчики температуры и передавать данные по сети Ethernet. Требуется создать ПО для компьютера, которое будет демонстрировать изображение с камеры, и наладить связь между компьютером и микроконтроллером. В связи со сложными условиями работы требуется программная постобработка кадров для повышения качества визуализации.

Разработано ПО микроконтроллера. Связь с компьютером осуществляется по сети Ethernet. Микроконтроллер осуществляет управление затвором камеры, включением и выключением осветителей и опрос датчиков температуры ds18b20. Учтены все задержки драйверов питания осветителей. Для компьютера создано приложение, открывающее пользователю доступ к органам управления аппаратной частью системы и демонстрирующее изображение с камеры. Также реализованы алгоритмы обработки изображений для улучшения визуальной оценки геометрии наблюдаемых объектов.

Был разработан программный модуль для работы с системой визуализации отложений внутри вихревых камер, создано ПО для управляющего микроконтроллера и приложения для ПК. Реализованное ПО позволяет проводить эксперименты при высоких температурах в реальном времени.

Научный руководитель — д-р техн. наук С. В. Двойнишников

## **Повышение скорости снаряда в условиях электротермохимической технологии воспламенения**

А. Д. Сидоров, А. Ю. Саммель

НИИ прикладной математики и механики ТГУ, Томск

Перспективным направлением в области высокоскоростного метания является схема выстрела с применением электротермохимической (ЭТХ) технологии воспламенения пороха при помощи электроразрядной плазмы (ЭП). В результате удастся сократить длительность периода воспламенения и уменьшить влияние начальной температуры пороха на баллистические параметры выстрела.

Цель работы — определение возможностей выстрела с использованием ЭТХ-технологии применительно к модельной баллистической установке среднего калибра. Расчетно-теоретический анализ выполнен с использованием ПО, разработанного в НИИ ПММ ТГУ.

Пороховой заряд состоит из зерненого и трубчатого порохов. Введение ЭП влияет на неравномерное инициирование и горение зерненого пороха. Фракция зерненого пороха, окружающая плазматрон, воспламеняется в момент электроввода и горит в режиме ускоренного газообразования. Образовавшийся газ спустя некоторое время воспламеняет вторую фракцию, которая горит в обычном режиме. В связи с этим в расчетах зерненный порох делится на две фракции с разными параметрами горения.

Прогнозирование зависимостей параметров горения зерненого пороха от уровня введенной энергии применительно к установке среднего калибра проведено на основе расчетных данных 30-мм выстрела. Это позволило провести параметрическое исследование по определению возможностей ЭТХ-выстрела в широком диапазоне уровня введенной энергии.

В результате достигнут положительный эффект применения ЭТХ технологии воспламенения. Максимальный прирост дульной скорости снаряда, по сравнению с базовым выстрелом, составляет более 5 % при введении ЭП с энергией до 1 % от общей потенциальной энергии пороха.

*Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания  
Минобрнауки России, проект № 0721-2020-0032.*

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук А. Н. Ищенко

**Разработка программного комплекса для управления малым космическим аппаратом «Норби» с получением, хранением и обработкой телеметрической информации**

Л. Д. Сеницына

Новосибирский государственный университет

На сегодняшний день среди искусственных спутников Земли особое распространение получили сверхмалые космические аппараты (СмКА). Такой большой спрос на данный вид космических аппаратов обуславливается их доступностью, ведь суммарная стоимость их разработки, производства и эксплуатации сокращается в сотни раз по сравнению с традиционными космическими аппаратами. Одной из ключевых задач при летной эксплуатации спутника является обеспечение канала связи между спутником и наземной станцией. Кроме того, большинство малых спутников функционирует на низкой околоземной орбите (НОО), где время видимости спутника с единичной антенны не превышает 15 мин. Для получения максимального объема данных со спутника предлагается использовать сети наземных станций управления, а именно разработать общедоступный распределенный наземный комплекс управления.

Описанную выше задачу решает лаборатория малых космических аппаратов НГУ. Отдельно отметим, что СмКА «Норби», разработанный в лаборатории, успешно выведен на НОО 28 сентября 2020 г. на ракете-носителе «Союз-2.1б». На данный момент радиоканал организован на базе радиомодуля со встроенной (аппаратной) модуляцией. Для расширения функционала предусмотрена работа с SDR.

Целью данной работы является реализация телекомандного радиоканала связи с СмКА «Норби» средствами SDR. Это включает в себя следующие задачи: осуществление связи с использованием различных типов модуляций (LoRa и GFSK), реализация алгоритмов управления СмКА «Норби» и реализация получения, хранения, анализа и отображения телеметрической информации с СмКА «Норби».

В рамках данной работы было создано программное обеспечение (ПО), написанное на языке Python, позволяющее производить автоматический сбор радиосигналов с СмКА «Норби», их декодирование для последующего хранения и анализа телеметрии спутника. Также данное ПО позволяет обеспечивать управление СмКА, а именно: производить кодирование команд и модулирование пакетов радиосвязи для последующей отправки на спутник.

Научный руководитель — В. Ю. Прокопьев

**Алгоритм машинного обучение для распределенного измерения температуры с помощью волоконно-оптического датчика**

Н. А. Шабалов

Новосибирский государственный университет

К основным преимуществам оптических датчиков на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) можно отнести их компактность (диаметр волокна  $\sim 100$  мкм), невосприимчивость к электромагнитным помехам, химическую инертность и широкие возможности мультиплексирования. Это позволяет использовать их в ряде областей, где применение электрических датчиков затруднено. Анализ спектров отражения сенсорной линии, в составе которой наблюдается несколько брэгговских резонансов, позволяет распределенно восстанавливать температуру/напряжение вдоль оптического волокна. Когда количество датчиков относительно мало, каждый резонанс может быть проанализирован независимо, при этом смещение резонанса определяется такими методами, как поиск максимума, интерполяция пика, кросс-корреляция и т. д. В то же время для увеличения пространственного разрешения или длины сенсорной линии приходится увеличивать количество датчиков. Это, в свою очередь, приводит к зашумлению и искажению ее спектра, а использование традиционных алгоритмов обработки становится затруднительным. Применение алгоритмов машинного обучения для анализа спектров волоконно-оптических датчиков имеет большой потенциал при решении данной задачи.

Целью данной работы является разработка алгоритмов машинного обучения для анализа спектров отражения сенсорной линии с высокой плотностью ВБР. Объектом исследования выступала 50-мм волоконно-оптическая сенсорная линия, состоящая из 50 ВБР. Система контроля представляла собой 5 эталонных линий той же длины, каждая из которых содержала 10 ВБР, смещенных друг относительно друга таким образом, чтобы воспроизводить положение брэгговских резонансов исследуемого образца. В работе были протестированы различные архитектуры искусственных нейронных сетей, включая сверточные нейронные сети и рекуррентные нейронные сети, и найдены оптимальные параметры модели. В результате был разработан алгоритм на основе искусственных нейронных сетей, который обрабатывает спектр отражения сенсорной линии с высокой плотностью датчиков и предсказывает положение брэгговских резонансов с точностью  $R^2 = 0,99$ .

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. А. Вольф

## РАДИОФИЗИКА И УСКОРИТЕЛИ

УДК 537.6

### **Разработка и исследование квадрупольных магнитных линз для каналов транспортировки ионов для FAIR**

С. А. Быков

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

В Институте ядерной физики идет работа над элементами проекта НЕВТ для GSI FAIR. НЕВТ — *High Energy Beam Transport*, перепускной канал между ускорительными кольцами SIS18, SIS100 и экспериментальными установками.

Целью данной работы является разработка и исследование магнитных квадрупольных линз для перепускного канала НЕВТ. Квадрупольная магнитная линза должна иметь основную вторую гармонику магнитного поля, но присутствуют паразитные гармоники высшего порядка. Наибольшее влияние на прохождение пучка из всех высших гармоник оказывает третья секступольная гармоника.

Для измерения использовались вращающаяся катушка и каретка с массивом датчиков Холла. Было измерено и исследовано магнитное поле квадрупольных магнитных линз канала от SIS18 до SIS100.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук И. И. Морозов



**Разработка структуры предускорителя — группирователя  
для нерелятивистского пучка**

К. А. Гришина

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный технический университет

Для многих приложений, связанных с линейными СВЧ-ускорителями, является актуальной задачей захват в режим ускорения непрерывного нерелятивистского пучка, который поступает из источника электронов. В этом случае необходимо устройство, которое позволит преобразовать непрерывный пучок в отдельные сгустки с частотой последующих ускоряющих структур и увеличить их энергию до релятивистских значений. Такой пучок можно инжектировать в регулярные ускоряющие структуры с высоким коэффициентом захвата в режим ускорения.

Настоящая работа посвящена созданию такой согласующей секции. На данный момент сделан расчет амплитуд поля в ускоряющих ячейках и длин резонаторов для структуры предускорителя — группирователя. В работе посчитана продольная динамика частиц, получены графики распределения продольной скорости частиц и группировки сгустков при разных токах пучка с учетом кулоновских полей пучка в программе ASTRA, получена энергия, приобретаемая частицами на выходе из структуры и процент захвата частиц, сделано моделирование ускоряющих ячеек для определения рабочих частот.

В данный момент секция предускорителя — группирователя изготовлена и сделаны измерения частот, добротностей, КСВ.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. Е. Левичев

## Магнитные измерения 38-полюсного прототипа ондулятора на основе натянутой проволоки с импульсным током

Ф. П. Казанцев

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Важнейшие характеристики поля в вигглерах и ондуляторах — его первый и второй интегралы, которые определяют угловое отклонение пучка и его смещение (по оси X) соответственно. Метод измерения интегралов поля на основе нити с импульсным током основан на том, что проводник с током взаимодействует с магнитным полем так же, как пучок заряженных частиц.

Основное преимущество данного метода в сравнении с измерениями датчиком Холла — скорость получения данных: доли секунды (у датчика Холла — единицы часов). Еще одно преимущество — отсутствие требований к апертуре магнитного устройства. Однако есть и такие особенности, как, например, дисперсия волн, распространяющихся вдоль проволоки, из-за которой сигнал, получаемый датчиком положения нити, отличается от реальной картины поля в ондуляторе.

Цель данной работы — внедрение и развитие принципиально иного метода измерения интегралов поля для замены или дополнения измерений датчиком Холла и получения возможности значительно ускорить процесс корректировки поля ондулятора.

Вдоль ондулятора натягивается проволока, к ее концам подключается источник коротких импульсов, управляемый микроконтроллером. При подаче импульса нить деформируется, далее эти деформации распространяются по проволочке в виде бегущей волны поперечной деформации проволоки. Вне ондулятора расположен датчик положения нити, подключенный к осциллографу. Получаемые данные обрабатываются и таким образом находятся картины интегралов поля.

Для тестирования и отработки метода задействован 38-полюсный прототип ондулятора для DLS (Великобритания) с периодом 1,56 см, полем 0,75 Тл,  $K \sim 1,1$ . Диаметр проволоки 140 мкм, материал — бериллиевая бронза. Перед испытаниями была проведена калибровка оптического датчика, а также математическое моделирование провисания проволоки.

Полученные результаты говорят о том, что импульсный метод может быть использован параллельно с холловскими измерениями, имеет потенциал для дальнейших усовершенствований, хотя на текущем этапе точность измерений ниже, чем у датчика Холла.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук Н. А. Мезенцев

## **Разработка кода для трехмерного моделирования плазменного кильватерного ускорения LCODE 3D**

И. Ю. Каргаполов

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Ускорители заряженных частиц являются ценными инструментами исследования окружающего мира. Возникающие в современной физике вопросы и существующие технические ограничения требуют разработки новых методов ускорения, одним из которых является плазменное кильватерное ускорение. Благодаря использованию плазмы ускоряющее поле в данном методе может на порядки превышать максимально возможное в классических резонаторах.

Использование плазмы затрудняет прямое измерение необходимых величин внутри установки, а невозможность их аналитического вычисления означает, что численное моделирование является незаменимым инструментом изучения протекающих процессов. Актуальные задачи требуют от вычислительных алгоритмов устойчивости по отношению к численным шумам, высокой точности и разумного потребления компьютерных ресурсов. Удовлетворить данные требования одновременно возможно при использовании упрощенных моделей, таких как квазистатическое приближение.

Разрабатываемый PIC (*particle-in-cell*) код LCODE 3D эффективно решает поставленные перед ним задачи, в том числе благодаря использованию квазистатического приближения. Структура кода формально разделена на две части: плазменный и пучковый решатель. Основной сложностью разработки плазменного решателя являлось построение вычислительной схемы с малыми численными шумами. Стабильность по отношению к шумам была значительно улучшена после подробного анализа их природы и выбора наиболее подходящего вычислительного алгоритма. Для получения результатов моделирования за разумное время требовалось обеспечить возможность эффективного использования систем с распределенными вычислениями. Адекватных показателей скорости работы кода удалось добиться после распараллеливания устойчивых алгоритмов с использованием современных библиотек. Результаты работы кода на тестовых задачах сравнивались с предсказаниями других кодов.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. К. В. Лотов

## Исследование устойчивости компенсированных встречных пучков

Ш. Б. Лачынов

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Светимость коллайдера пропорциональна плотности частиц в пучке. Она ограничена фокусировкой частиц полем встречных сгустков, в результате которой падает плотность частиц в пучке, и, как следствие, светимость.

Компенсация нелинейной фокусировки в кольце-накопителе противоположно заряженным пучком, циркулирующим в другом кольце-накопителе, была предложена и протестирована много лет назад [1]. Я. С. Дербенев показал [2], что такая схема не позволяет существенно повысить светимость. Однако современная техника значительно продвинулась вперед, появился новый тип ускорителей — ускорители-рекуператоры.

В данной работе исследованы условия устойчивости когерентных бетатронных колебаний в простой модели жестких сгустков. В частности, рассматривается коллайдер в форме восьмерки, в котором сталкиваются встречные электрон-позитронные пучки с одинаковым током, но различными энергиями. Другая конфигурация коллайдера [3] со встречными пучками представляет собой описанную выше установку, в которой часть накопительного кольца с электронами заменена на электронный ускоритель-рекуператор.

---

1. Koutchouk J.P., Shiltsev V. Beam-beam compensation schemes // Handbook Accelerator Phys. Eng., 2<sup>nd</sup> ed. / A. W. Chao, K. H. Mess, M. Tigner, F. Zimmermann. Singapore: World Scientific, 2013. P. 391–394.

2. Derbenev Ya. S. Collective instability of compensated colliding beams // Proc. 3rd All-union Conf. Charge Particle Accel. M., 1972. P. 382–385. SLAC TRANS-151, 1973.

3. Lachynov S.B., Vinokurov N.A. Beam-beam compensation in a collider based on energy recovery LINAC and storage ring // AIP Conf. Proc. 2020. 2299. 020011.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. Н. А. Винокуров

## **Диагностика параметров пучка 3-й очереди Новосибирского лазера на свободных электронах**

Г. О. Маргынов

Новосибирский государственный университет

В последние годы проводится активная работа по созданию станции оптической диагностики параметров пучков 3-й очереди Новосибирского лазера на свободных электронах. До внедрения станций оптической диагностики существовало пять основных систем контроля пучков: мониторы положения пучка, датчики среднего тока пучка, датчики температуры, вакуума и приемники излучения.

Создание станций оптической диагностики на Новосибирском ЛСЭ не простая задача ввиду низкой энергии пучка, а также высокого уровня наведенной радиоактивности в зале ускорителя. На 3-й очереди уже успешно функционируют две станции диагностики поперечных размеров пучка: до и после ондуляторов. Первая станция используется для измерения параметров Твисса перед ондуляторами ЛСЭ, вторая — для контроля поперечных размеров пучка после ондуляторов. Для объяснения полученных второй станцией данных требуется измерение энергетического разброса пучка.

Для измерения энергетического разброса пучка предлагается проводить измерение спектра ондуляторного излучения, по которому возможно провести определение энергетического разброса пучка. Перед проведением экспериментов была произведена калибровка монохроматора МДР-41. Для этого сравнивался известный спектр поглощения пленки из полистирола со спектром, измеренным с помощью пироэлектрического датчика ввиду слабой мощности излучения.

Кроме того, были проведены эксперименты по изучению спектра лазерного излучения, а также электронного вывода лазерного излучения.

Научный руководитель — В. М. Борин

## **Охлаждение электронного сгустка в режиме секционированного нерезонансного захвата**

И. В. Мартьянов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского

В настоящей работе исследуются возможности использования многосекционного режима взаимодействия для «охлаждения» электронного пучка (т. е. уменьшения скоростного разброса в нем). Исследуется процесс энергетического «сжатия» электронного ансамбля на фазовой плоскости, обусловленный многократно повторяющимся процессом захвата и адиабатического торможения частиц с относительно большой энергией. Выявлены основные характеристики такого процесса (степень и скорость охлаждения).

В «классической» версии реализации режима захвата и адиабатического торможения частиц на входе в пространство взаимодействия должен быть обеспечен точный резонанс электронов с волной. Более «поздняя» версия реализации захвата частиц волной — так называемый режим нерезонансного захвата. Этот режим сочетает в себе, с одной стороны, такое важное преимущество «традиционного» режима захвата и адиабатического торможения электронов, как возможность достижения высокого электронного КПД, и, с другой стороны, отсутствие требования электронно-волнового синхронизма на входе в пространство взаимодействия.

В данной работе приведен вывод основных формул, описывающих приборы, основанные на группировке электронов, а также описание электронно-волнового взаимодействия с помощью фазовой плоскости. Разобраны особенности различных типов инерционной группировки электронов, приведены численные расчеты и рассмотрены их результаты.

*Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований  
(проект № 18-02-40009 мега).*

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. А. В. Савилов

## Управляемый выпрямитель с улучшенными показателями качества

А. С. Околович

Новосибирский государственный технический университет

Управляемый выпрямитель (УВ) — это электротехнические устройства, преобразующее переменное напряжение в постоянное напряжение с помощью управляемых вентилях. Классический способ регулирования среднего значения выпрямленного напряжения базируется на изменении угла управления  $\alpha$ . Однако данный способ имеет ряд недостатков: ограничение угла управления  $\alpha$  в пределах от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ ; изменение выпрямленного напряжения только в сторону уменьшения его от номинального значения; низкое быстродействие.

Данная работа состоит из двух разделов. Целью первого раздела является проектирование нового, простого транзисторного УВ с регулируемым средним значением выходного напряжения и повышенным входным коэффициентом мощности. Регулирование напряжения осуществляется путем изменения глубины модуляции  $M$  силовых ключей (ШИМ). Полученная в ходе выполнения данного раздела схема УВ базируется на принципах работы импульсных повышающих (*boost*) и понижающих (*buck*) преобразователей. Целью второго раздела является исследование влияния разработанного УВ, выступающего в качестве источника питания для трехфазного автономного инвертора напряжения (ТАИН), и исследование влияния амплитудного регулирования ТАИН на показатели качества выходного тока и напряжения.

Разработанная схема УВ имеет улучшенные показатели качества по сравнению с другими аналогичными схемами выпрямления. В сравнении с аналогичными западными схемами УВ величины затрат на полупроводниковые элементы в разработанной схеме снижаются примерно в 2 раза, а значит, стоимость исследованного выпрямителя снизится примерно на 15–25 % при доле стоимости полупроводников в общей стоимости выпрямителя порядка 35–50 %.

Научный руководитель — д-р техн. наук, проф. Г. С. Зиновьев

## **Проектирование криогенной системы сверхпроводящего соленоида PANDA**

А. Е. Орлова

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный технический университет

Эксперимент PANDA проводится в Европейском исследовательском центре ионов и антипротонов, FAIR, в г. Дармштадт, Германия. Целью проекта является изучение фундаментальных свойств и структуры материи. Это единственный в мире реализуемый в настоящее время проект, который будет использовать антипротонный пучок высокой интенсивности. Его сложность сопоставима с экспериментами ATLAS и ALICE на Большом адронном коллайдере, а для его проведения требуются уникальные условия, получение которых является сложнейшей задачей ускорительной и детекторной физики.

В изучении фундаментальных свойств материи важнейшим инструментом современной экспериментальной физики высоких энергий служат сверхпроводящие детекторы. Широко применяемые в настоящее время проводники требуют низких температур для поддержания режима сверхпроводимости. Поэтому для создания сверхпроводящего магнита требуется эффективная и надежная криогенная система.

В данной работе приведены расчеты и анализ параметров криогенной системы сверхпроводящего соленоида PANDA. Представлен метод охлаждения и расчет тепловых нагрузок элементов криостата и распределительного бокса. Рассчитаны параметры охлаждения жидкого гелия в теплообменнике. На основании полученных данных приводится обоснование конструкции холодной массы и криостата соленоида PANDA.

В Новосибирском институте ядерной физики проводится разработка и тестирование сверхпроводящего соленоида PANDA. На данном этапе работы осуществляется проектирование и расчет параметров экспериментального стенда для проведения тестирования работы магнита.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. А. Краснов



## Разработка корректора орбиты электронного пучка для сверхпроводящего ондулятора

А. А. Седов

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Создание источников синхротронного излучения (СИ) в наше время является актуальной научно-технической задачей. Наибольшее распространение получили источники СИ 3-го поколения благодаря их высокой яркости.

В Институте ядерной физики СО РАН ведется разработка сверхпроводящего ондулятора для национального синхротрона *Diamond Light Source* (DLS) в Великобритании. По требованиям заказчика первый интеграл на выходе из ондулятора не должен превышать значение порядка  $10^{-4}$  Тл\*м, причем вся магнитная система должна помещаться в криостат заданных размеров. Для решения данной проблемы на конце вставного устройства необходима установка квадрупольного магнитного корректора, способного создавать поля по двум направлениям одновременно.

Целью данной работы является разработка квадрупольного магнитного корректора оси пучка синхротронного излучения. При помощи программы для моделирования магнитных полей *Mermaid* были проведены расчеты и оценки параметров модели корректора. Прототип корректора был изготовлен с использованием четырех катушек из NbTi с железным сердечником. Для измерения распределения магнитных полей прототипа корректора вдоль и поперек катушек с помощью датчика Холла был собран специальный стенд. По результатам измерений были рассчитаны первые интегралы полей.

Результаты работы согласуются с полученными в программе *Mermaid*. Измеренные первые интегралы и геометрические параметры прототипа корректора удовлетворяют требуемым условиям от DLC.

Научный руководитель — д-р. техн. наук В. А. Шкаруба

**Моделирование системы передачи мощности для устройств,  
расположенных под высоким потенциалом**

П. Д. Селиванов

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

При эксплуатации ускорителей заряженных частиц прямого действия нередко возникает потребность в передаче электрической мощности на устройства, расположенные под потенциалом от нескольких киловольт до нескольких мегавольт. Одним из возможных методов решения этой задачи является использование трансформатора с зазором, обеспечивающим высоковольтную изоляцию на требуемое напряжение.

Данная работа посвящена изучению методов улучшения передаточных свойств такого устройства с использованием компенсирующих конденсаторов. В работе также предложен метод расчета их емкостей. Данный метод был протестирован для двух различных наборов конденсаторов, предложена теоретическая модель и проведено сравнение экспериментов с расчетными значениями. Экспериментальные данные с хорошей точностью совпали с результатами компьютерного моделирования, подтвердив верность предложенной модели и применимость метода.

Для получившейся системы из модельного трансформатора и компенсирующих конденсаторов построены зависимости мощности и передаточного коэффициента от величины нагрузки. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании высоковольтных устройств.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук В. Б. Рева

## **Разработка метода диагностики расстояния между электронными сгустками ТГц-частоты следования на основе переходного излучения**

М. М. Токтаганова  
Томский политехнический университет

В настоящее время электромагнитное излучение в терагерцовом диапазоне частот (0,1–10 ТГц) широко применяется в современной медицине, биологии, химии, физике для проведения фундаментальных и прикладных исследований [1]. В частности, для генерации ТГц-излучения используют, а также разрабатывают новые технологии на основе электронных ускорителей [2]. Известно, что спектрально-угловые свойства излучения определяются как геометрией излучения, так и временной структурой электронного пучка. Например, количество электронных сгустков, их длительность и расстояние между ними напрямую влияют на спектральные характеристики излучения. По этой причине возникает необходимость в диагностике временной структуры таких электронных пучков.

Наша работа направлена на исследование интерферометрии когерентного переходного излучения с целью диагностики расстояния между сгустками. В данной работе представлены результаты численного моделирования когерентного сложения импульсов переходного излучения при их прохождении через интерферометр Майкельсона. Сравнение результатов моделирования с предварительными данными экспериментальных измерений показывает принципиальную возможность извлечения информации о расстояниях между сгустками и количестве сгустков в пучке на основе анализа автокорреляционной зависимости без преобразования Фурье, как это принято делать при спектральных измерениях, и без дальнейшего восстановления продольного распределения последовательности сгустков на основе, например, соотношения Крамерса — Кронига.

- 
1. Гареев Г. З., Лучинин В. В. Применение ТГц-излучения для обеспечения жизнедеятельности человека // *Биотехносфера*. 2014. № 6(36). С. 71–79.
  2. Müller A. S., Schwarz M. *Synchrotron Light Sources and Free-Electron Lasers*. Cham: Springer International Publishing, 2016. P. 83–118.

Научные руководители — канд. физ.-мат. наук Д. А. Шкитов,  
канд. физ.-мат. наук М. В. Шевелев

## Расчет рентгенооптического тракта экспериментальной станции 1-3 «Быстропротекающие процессы» ЦКП «СКИФ»

Ю. В. Хомяков

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

ЦКП «СКИФ» будет специализированным источником СИ поколения 4+ с эмиттансом лучше, чем у лидирующих мировых установок, таких, например, как MAX-IV, NSLS-II, PETRAIII, Diamond и др.

Одной из экспериментальных станций первой очереди является станция 1-3 «Быстропротекающие процессы», которая будет использована для решения ряда научных задач: исследования свойств энергетических материалов, структуры ударного и детонационного фронтов, фазовых переходов при сжатии, скоростного деформирования и разрушения материалов и др.

Целью данной работы являлось исследование способов достижения оптимальных для проведения экспериментов на станции 1-3 параметров излучения путем использования рентгеновской оптики.

С учетом специфики экспериментов, планируемых к проведению на станции 1-3, осуществлен оптимизационный расчет параметров вставного устройства — сверхпроводящего вигглера. Проведен сравнительный анализ потоков излучения в 1 канал детектора на станции 8 источника СИ ВЭПП-4 и станции 1-3 ЦКП «СКИФ» без фокусировки, который дал обоснование необходимости использования фокусирующей оптики. Обоснован выбор системы фокусировки, состоящей из пары рентгеновских зеркал с золотым покрытием — плоского и тороидального; рассчитана геометрия этих устройств, в том числе оптимизирован угол наклона. Кроме того, проведены тепловые расчеты: оптимизированы параметры выходного окна фронтэнда станции, которое будет пропускать лишь треть тепловой мощности без снижения потока фотонов на детекторе; для достижения необходимого спектрального распределения излучения подобрана конфигурация фильтров. С помощью программных пакетов Shadow3, XOPPY и SRW проведен *ray-tracing* рентгенооптического тракта с выбранной фокусирующей системой, рассчитаны потоки излучения в 1 канал детектора. Полученные потоки превосходят потоки без фокусировки на 2–3 порядка.

Результаты расчетов были использованы при подготовке концептуально-го дизайна станции.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Я. В. Ракшун

## **Измерение частот бетатронных колебаний на комплексе ВЭПП-4М**

И. С. Якимов

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

В данной работе рассматриваются классические методы спектрального анализа сигналов и их применение к модельным сигналам комплекса ВЭПП-4М, полученным в приближении линейной динамики пучка. Для работы с реальными ускорительными системами и их последующего анализа (измерения частоты и оптических функций) необходим анализ более простых модельных систем. В качестве инструмента для обработки данных использовалось программное обеспечение Wolfram Mathematica.

В работе рассматривается точное определение частот бетатронных колебаний пучка на комплексе ВЭПП-4М. На основе модели линейного движения изучались особенности анализа сигналов колебаний пучка и проведена их последующая обработка. Для обработки сигналов найден наилучший способ определения частоты, основанный на дискретном преобразовании Фурье. В качестве начальных данных использовался модельный сигнал (в приближении линейной оптики) из значений координат пучка. Используя модельные значения, с помощью специальных функций Wolfram Mathematica для нахождения дискретного преобразования Фурье были вычислены частоты колебаний. Было проведено исследование точности методов уточнения частоты на основе добавления нулей в исходный сигнал и локальной интерполяции вблизи максимума спектра на основе дробного дискретного преобразования Фурье. После интерполяции спектра было проведено уточнение частоты с помощью поиска максимума интерполяционной функции. Для уменьшения эффекта расплывания спектральной плотности применялась оконная функция Ханна. Полученные результаты предлагается использовать для дальнейшего численного моделирования значений оптических функций и работы с экспериментальными данными комплекса ВЭПП-4М.

Научный руководитель — И. А. Морозов

## **Устройство для регистрации электрической активности головного мозга**

Н. П. Якимов

Иркутский государственный университет  
Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических  
и радиотехнических измерений, Иркутск

Главное требование к устройству для регистрации электрической активности головного мозга следующее: точность измерения напряжения должна быть порядка 1 мкВ. Частота измеряемых сигналов находится в диапазоне до 100 Гц. При проведении измерений важно обеспечить защиту испытуемых от поражения электрическим током. Электробезопасность обеспечивается гальванической развязкой. Гальваническая развязка также снижает уровень помех от внешних наводок.

Основой разработанного устройства является сигма-дельта АЦП. АЦП данного типа обладают низким уровнем собственного шума, что позволяет добиться требуемого уровня точности. Для управления АЦП и передачи данных используется микроконтроллер PIC18F252, обеспечивающий достаточное быстродействие для регистрации напряжения с 8 каналов с частотой дискретизации 470 Гц. За гальваническую развязку отвечает чип ADUM1201.

В данной работе проведены испытания макета по разработанной схеме. Представлены измерения напряжения в отведении Cz при гипервентиляции легких, полученные результаты соответствуют исследованиям [1].

---

1. Мурик С. Э. Омегаэлектроэнцефалография: становление нового метода, диагностические возможности // Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. Биология. Экология. 2018. Т. 26. С. 69–85.

Научный руководитель — доц. канд. физ.-мат. наук С. Н. Колесник

## Указатель авторов

### АЭРОФИЗИКА

Афанасьев Л. В. ....	7
Гребнева В. А. ....	8
Кан Н. ....	9, 10
Кирюшкин А. Е. ....	11
Колпаков М. Е. ....	12
Комаров В. И. ....	13
Меркулова Е. А. ....	14
Мищенко Н. А. ....	15
Николаев М. С. ....	16
Овчинников Р. А. ....	17
Полянский Т. А. ....	18
Сайдазимов И. А. ....	19
Ткачев И. В. ....	9, 10
Фролов М. В. ....	20
Хайбуллина С. Р. ....	21

### ФОТОНИКА И КВАНТОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Альянова Н. В. ....	25
Бетлени П. И. ....	26
Бычкова С. А. ....	27
Волоси В. М. ....	28
Глухова С. А. ....	29
Жилин М. А. ....	30
Калмыков Н. И. ....	31
Коваленко Д. В. ....	32
Колесникова А. Ю. ....	33
Коновалова А. О. ....	34
Красионов И. И. ....	35
Лабунцов В. ....	36
Мулладжанов И. И. ....	37
Назаров Р. С. ....	38
Поддубровский Н. Р. ....	39
Рыбак А. А. ....	40
Сапожникова Е. В. ....	41
Чернявский А. Е. ....	42
Шепелин А. В. ....	43

### ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Байструков М. А. ....	47
Бибилова С. А. ....	48
Вагапов С. А. ....	49
Воинцев В. А. ....	50
Горбун М. С. ....	51
Горенков И. А. ....	52
Кардаш Д. Ю. ....	53
Колесниченко К. С. ....	54
Крохалев О. Д. ....	55
Кузнецов А. А. ....	56
Ломов К. А. ....	57
Мейстер А. К. ....	58
Охотников Н. В. ....	59
Рыжков Г. А. ....	60
Сандомирский А. В. ....	61
Саранча Г. А. ....	62
Толкачев М. С. ....	63
Шишкин Е. А. ....	64
Шмигельский Е. А. ....	65

### ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

Андреев Г. Ю. ....	69
Ахмеров Д. М. ....	70
Баженов А. О. ....	71
Бойко Е. В. ....	95
Бондаренко С. В. ....	72
Бухарова В. В. ....	73
Винарский В. П. ....	74
Воронцова Ю. А. ....	75
Гензе И. Ю. ....	76
Гумовская А. А. ....	77
Дмитриев Д. В. ....	85
Дрофа М. А. ....	78
Дураков Д. Е. ....	79
Залялов Т. М. ....	80
Капитан Д. Ю. ....	86
Капогузов К. Е. ....	81
Карманчук Л. А. ....	82

Кобелева Е. С. ....	83
Ковзик В. М. ....	84
Кокорина А. И. ....	77
Колосовский Д. А. ....	85
Король А. О. ....	86
Краснова И. А. ....	87
Кузнецов В. А. ....	97
Кукенов О. И. ....	88
Макеева А. А. ....	89
Мамаева М. П. ....	90
Назаров Н. А. ....	91
Пономарев С. А. ....	92
Разживина М. Э. ....	93
Русецкий В. С. ....	70
Рыбин А. Е. ....	86
Соловьёва Е. О. ....	94
Сорокин Д. В. ....	95
Толмачев К. А. ....	96
Третьяков А. Ю. ....	88
Трофимов М. С. ....	100
Федоров А. А. ....	97
Чжан Фань ....	98
Шумилов Н. А. ....	99
Щербаков И. Д. ....	100

### ТЕПЛОФИЗИКА

Батуева М. А. ....	103
Бикмулин А. В. ....	104
Бобылев П. Г. ....	104
Боднева Н. И. ....	105
Борискин А. А. ....	106
Васильев М. М. ....	107
Виноградов М. Д. ....	104
Гудько А. С. ....	108
Дашапилов Г. Р. ....	109
Жидков Н. А. ....	121
Кикоть Н. Е. ....	104
Кинзин К. С. ....	110
Кундашкин А. Д. ....	111
Михайлов А. В. ....	105, 114
Пещенюк Ю. А. ....	112
Родионов А. А. ....	113
Рябов В. О. ....	114
Самошкин Д. А. ....	115

Северин А. С. ....	116
Селезнева М. Д. ....	121
Семенов А. А. ....	112
Сероштанов В. В. ....	121
Ситников В. О. ....	117
Сластная Д. А. ....	118
Созинов Д. А. ....	119
Суслов Д. А. ....	120
Сучок В. В. ....	121
Хайрулин А. Р. ....	115, 122
Хлюстов Д. А. ....	123
Черкасова А. В. ....	123
Шупик А. А. ....	109

### ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУКАХ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

Belanova A. ....	152
Belozerova N. M. ....	151
Bugaev A. L. ....	156
Burachevskaya O. A. ....	152
Butova V. V. ....	152
Gorban I. E. ....	152
Guilherme Buzanich A. ....	153
Habibimarekani F. ....	153
Lis O. N. ....	154
Medvedev P. V. ....	152
Mironov V. N. ....	203
Nikolaev D. M. ....	203
Orlova E. D. ....	155
Pnevskaya A. Y. ....	156
Radtke M. ....	153
Reinholz U. ....	153
Soldatov A. V. ....	152
Soldatov M. A. ....	152
Zolotukhin P. ....	152
Айдаков Е. Е. ....	157
Архипова А. С. ....	205
Асгашова А. М. ....	127
Ахмадиева А. А. ....	158, 191
Байжикова Ж. А. ....	206
Бакиров Б. А. ....	159
Бакулина О. Д. ....	207
Баскакова К. И. ....	160



Батурина Г. С. ....	138	Ма Синьжуй.....	181
Бикчурина М. И. ....	161	Масленникова Н. А. ....	214
Богословцева А. Л. ....	162	Мельник А. В. ....	182
Бутюгина А. А. ....	163	Милованов Е. С. ....	215
Буянов Д. А. ....	128	Минакова О. В. ....	216
Валихов В. Д. ....	164, 174	Михеев В. А. ....	141
Верховод Г. Д. ....	165	Молчанов И. А. ....	183
Верхошанский Я. Ю. ....	166	Муравлев С. Б. ....	142
Владимиров Р. С. ....	129	Осик Н. А. ....	217
Гисич А. В. ....	130	Пашнина Е. А. ....	184, 189
Говоров Н. М. ....	167	Петрова А. В. ....	185
Гольшева Е. А. ....	208	Петрушина М. Ю. ....	186
Горкуша А. С. ....	168	Платов В. В. ....	174
Григоричева Э. К. ....	209	Пономарев А. А. ....	143
Гумовская А. А. ....	178	Прохорова Е. С. ....	144
Гурко М. А. ....	131	Роговешко В. М. ....	218
Добрынина Е. А. ....	210	Ромпанен И. А. ....	187
Дыльков Б. Ц. ....	169	Рыжук О. Т. ....	188
Жуковская А. А. ....	132	Сагитов А. Р. ....	219
Журавлева К. В. ....	133	Сайфетдинов Р. Ф. ....	189
Забодаев С. В. ....	128	Самсоненко А. А. ....	220
Задорожный А. М. ....	134	Сараева К. П. ....	190
Зайцева Ю. В. ....	211	Селиховкин М. А. ....	158, 191
Зайцев В. А. ....	135	Серебренникова П. С. ....	192
Золотарев Н. А. ....	170	Синицын С. А. ....	145
Иванов Д. В. ....	171	Смирнова К. А. ....	193
Калганова А. О. ....	172	Спирева Д. В. ....	146
Кандаракова И. Т. ....	212	Степанов В. С. ....	171
Капишников А. В. ....	173	Стречень А. С. ....	171
Касатова А. И. ....	143	Суюндукова А. Т. ....	147
Каткова Л. Е. ....	138	Ткачев Д. А. ....	166
Кахидзе Н. И. ....	158, 164, 174, 191	Торохов Т. Н. ....	148
Кичигин А. А. ....	175	Требушинин А. Е. ....	194
Климкин Н. Д. ....	176	Тютерева Ю. Е. ....	222
Козлачков Д. В. ....	177	Унгуриян В. В. ....	223
Кокорина А. И. ....	178	Ушканов А. А. ....	195
Коновалова В. П. ....	179	Харченко И. А. ....	196
Кононенко Е. С. ....	213	Харченко Н. А. ....	197
Кононова П. А. ....	136	Хоряк М. Н. ....	149
Кошман В. Е. ....	137	Цай Сяюй. ....	198
Кузовлева М. А. ....	138	Цибулина А. О. ....	150
Курбатова Я. Е. ....	139	Черепанова Н. Е. ....	199
Лагунов Т. А. ....	140	Черепанов А. В. ....	224
Лунев Н. А. ....	180	Шамаева Д. В. ....	225
Лысаков М. Н. ....	189	Школдина А. А. ....	201

Щербатых К. Р. ....	171
Язикова А. А. ....	202

**ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ  
ЧАСТИЦ,  
АСТРОФИЗИКА И КОСМОЛОГИЯ**

Аксенов О. А. ....	229
Байков А. А. ....	230
Баталов Е. А. ....	231
Гороховский Р. Г. ....	232
Губа В. О. ....	233
Зезюлин И. В. ....	234
Зубков Д. А. ....	235
Кутенев И. Д. ....	236
Кыштымов Д. А. ....	237
Мишин В. В. ....	238
Образцов И. В. ....	239
Панасенко Л. А. ....	240
Поздняков Н. А. ....	241
Помулева С. И. ....	242
Ржевский П. А. ....	243
Сагалакова К. А. ....	244
Ульзутуев Б. Б. ....	245
Урманов Р. В. ....	246

**ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ  
И ТЕХНИКА  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ**

Андреянов Н. М. ....	249
Анофриев В. А. ....	258
Антонова Я. Н. ....	250
Баженов А. А. ....	251
Белозерова М. С. ....	252

Булыженков И. С. ....	253
Быков С. А. ....	270
Васильев С. А. ....	258
Глушак А. А. ....	254
Гришина К. А. ....	271
Дроботун В. А. ....	255
Дышеков А. А. ....	256
Зуев В. О. ....	257
Иванов Д. В. ....	258
Казанцев Ф. П. ....	272
Калининченко М. А. ....	259
Каргаполов И. Ю. ....	273
Кононов А. А. ....	260
Кошелев В. А. ....	258
Лачынов Ш. Б. ....	274
Локтюшин О. Ю. ....	261
Мартынов Г. О. ....	275
Мартыянов И. В. ....	276
Мосейков И. Г. ....	262
Нестерок А. С. ....	263
Николаев А. А. ....	264
Околович А. С. ....	277
Орлова А. Е. ....	278
Остапченко А. Е. ....	265
Саммель А. Ю. ....	267
Седов А. А. ....	279
Селиванов П. Д. ....	280
Семенов Д. О. ....	266
Сидоров А. Д. ....	267
Синицына Л. Д. ....	268
Токтаганова М. М. ....	281
Хомяков Ю. В. ....	282
Шабалов Н. А. ....	269
Якимов И. С. ....	283
Якимов Н. П. ....	284

## СОДЕРЖАНИЕ

### АЭРОФИЗИКА

Афанасьев Л. В. ....	7
Гребнева В. А. ....	8
Кан Н., Ткачев И. В. ....	9
Кан Н., Ткачев И. В. ....	10
Кирюшкин А. Е. ....	11
Колпаков М. Е. ....	12
Комаров В. И. ....	13
Меркулова Е. А. ....	14
Мищенко Н. А. ....	15
Николаев М. С. ....	16
Овчинников Р. А. ....	17
Полянский Т. А. ....	18
Сайдазимов И. А. ....	19
Фролов М. В. ....	20
Хайбуллина С. Р. ....	21

### ФОТОНИКА И КВАНТОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Альянова Н. В. ....	25
Бетлени П. И. ....	26
Бычкова С. А. ....	27
Волоси В. М. ....	28
Глухова С. А. ....	29
Жилин М. А. ....	30
Калмыков Н. И. ....	31
Коваленко Д. В. ....	32
Колесникова А. Ю. ....	33
Коновалова А. О. ....	34
Красионов И. И. ....	35
Лабунцов В. ....	36
Мулляджанов И. И. ....	37
Назаров Р. С. ....	38
Поддубровский Н. Р. ....	39
Рыбак А. А. ....	40
Сапожникова Е. В. ....	41
Чернявский А. Е. ....	42
Шепелин А. В. ....	43

## ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Байструков М. А. ....	47
Бибилова С. А. ....	48
Вагапов С. А. ....	49
Воинцев В. А. ....	50
Горбун М. С. ....	51
Горенков И. А. ....	52
Кардаш Д. Ю. ....	53
Колесниченко К. С. ....	54
Крохалев О. Д. ....	55
Кузнецов А. А. ....	56
Ломов К. А. ....	57
Мейстер А. К. ....	58
Охотников Н. В. ....	59
Рыжков Г. А. ....	60
Сандомирский А. В. ....	61
Саранча Г. А. ....	62
Толкачев М. С. ....	63
Шишкин Е. А. ....	64
Шмигельский Е. А. ....	65

## ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

Андреев Г. Ю. ....	69
Ахмеров Д. М., Русецкий В. С. ....	70
Баженов А. О. ....	71
Бондаренко С. В. ....	72
Бухарова В. В. ....	73
Винарский В. П. ....	74
Воронцова Ю. А. ....	75
Гензе И. Ю. ....	76
Гумовская А. А., Кокорина А. И. ....	77
Дрофа М. А. ....	78
Дураков Д. Е. ....	79
Залялов Т. М. ....	80
Капогузов К. Е. ....	81
Карманчук Л. А. ....	82
Кобелева Е. С. ....	83
Ковзик В. М. ....	84
Колосовский Д. А., Дмитриев Д. В. ....	85

Король А. О., Капитан Д. Ю., Рыбин А. Е. ....	86
Краснова И. А. ....	87
Кукенов О. И., Третьяков А. Ю. ....	88
Макева А. А. ....	89
Мамаева М. П. ....	90
Назаров Н. А. ....	91
Пономарев С. А. ....	92
Разживина М. Э. ....	93
Соловьева Е. О. ....	94
Сорокин Д. В., Бойко Е. В. ....	95
Толмачев К. А. ....	96
Федоров А. А., Кузнецов В. А. ....	97
Чжан Фань ....	98
Шумилов Н. А. ....	99
Щербakov И. Д., Трофимов М. С. ....	100

## ТЕПЛОФИЗИКА

Батуева М. А. ....	103
Бобылев П. Г., Виноградов М. Д., Кикоть Н. Е., Бикмулин А. В. ....	104
Боднева Н. И., Михайлов А. В. ....	105
Борискин А. А. ....	106
Васильев М. М. ....	107
Гудько А. С. ....	108
Дашапилов Г. Р., Шупик А. А. ....	109
Кинзин К. С. ....	110
Кундашкин А. Д. ....	111
Пещенюк Ю. А., Семенов А. А. ....	112
Родионов А. А. ....	113
Рябов В. О., Михайлов А. В. ....	114
Самошкин Д. А., Хайрулин А. Р. ....	115
Северин А. С. ....	116
Ситников В. О. ....	117
Сластная Д. А. ....	118
Созинов Д. А. ....	119
Суслов Д. А. ....	120
Сучок В. В., Сероштанов В. В., Жидков Н. А., Селезнева М. Д. ....	121
Хайрулин А. Р. ....	122
Черкасова А. В., Хлюстов Д. А. ....	123

# ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУКАХ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

## БИОМЕДИЦИНСКАЯ ФИЗИКА

Асташова А. М. ....	127
Буянов Д. А., Забодаев С. В. ....	128
Владимиров Р. С. ....	129
Гисич А. В. ....	130
Гурко М. А. ....	131
Жуковская А. А. ....	132
Журавлева К. В. ....	133
Задорожный А. М. ....	134
Зайцев В. А. ....	135
Кононова П. А. ....	136
Кошман В. Е. ....	137
Кузовлева М. А., Каткова Л. Е., Батурина Г. С. ....	138
Курбатова Я. Е. ....	139
Лагунов Т. А. ....	140
Михеев В. А. ....	141
Муравлев С. Б. ....	142
Пономарев А. А., Касатова А. И. ....	143
Прохорова Е. С. ....	144
Синицын С. А. ....	145
Спирева Д. В. ....	146
Сююндукоева А. Т. ....	147
Торохов Т. Н. ....	148
Хоряк М. Н. ....	149
Цибулина А. О. ....	150

## ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И НАНОСИСТЕМ

Belozerova N. M. ....	151
Gorban I. E., Soldatov M. A., Butova V. V., Medvedev P. V., Burachevskaya O. A., Belanova A., Zolotukhin P., Soldatov A. V. ....	152
Habibimarekani F., Guilherme A. Buzanich, Reinholz U., Radtke M. ....	153
Lis O. N. ....	154
Orlova E. D. ....	155
Pnevskaya A. Y., Bugaev A. L. ....	156
Айдаков Е. Е. ....	157
Ахмадиева А. А., Селиховкин М. А., Кахидзе Н. И. ....	158

Бакиров Б. А.....	159
Баскакова К. И. ....	160
Бикчурина М. И. ....	161
Богословцева А. Л. ....	162
Бутюгина А. А. ....	163
Валихов В. Д., Кахидзе Н. И. ....	164
Верховод Г. Д. ....	165
Верхошанский Я. Ю., Ткачев Д. А. ....	166
Говоров Н. М.....	167
Горкуша А. С. ....	168
Дылыков Б. Ц.....	169
Золотарев Н. А.....	170
Иванов Д. В., Щербатых К. Р., Степанов В. С., Стречень А. С. ....	171
Калганова А. О. ....	172
Капишников А. В.....	173
Кахидзе Н. И., Платов В. В., Валихов В. Д. ....	174
Кичигин А. А. ....	175
Климкин Н. Д.....	176
Козлачков Д. В.....	177
Кокорина А. И., Гумовская А. А. ....	178
Коновалова В. П. ....	179
Лунев Н. А.....	180
Ма Синьжуй.....	181
Мельник А. В. ....	182
Молчанов И. А.....	183
Пашнина Е. А. ....	184
Петрова А. В.....	185
Петрушина М. Ю.....	186
Ромпанен И. А. ....	187
Рыжук О. Т. ....	188
Сайфетдинов Р. Ф., Лысаков М. Н., Пашнина Е. А. ....	189
Сараева К. П.....	190
Селиховкин М. А., Ахмадиева А. А., Кахидзе Н. И. ....	191
Серебренникова П. С. ....	192
Смирнова К. А.....	193
Требушинин А. Е.....	194
Ушканов А. А.....	195
Харченко И. А.....	196
Харченко Н. А.....	197
Цай Сяоюй.....	198
Черепанова Н. Е.....	199
Школдина А. А. ....	201
Язикова А. А. ....	202

## ХИМИЧЕСКАЯ И БИОЛОГИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Мironov V. N., Nikolaev D. M. ....	203
Архипова А. С. ....	205
Байжикова Ж. А. ....	206
Бакулина О. Д. ....	207
Гольшева Е. А. ....	208
Григоричева Э. К. ....	209
Добрынина Е. А. ....	210
Зайцева Ю. В. ....	211
Кандаракова И. Т. ....	212
Кононенко Е. С. ....	213
Масленникова Н. А. ....	214
Милованов Е. С. ....	215
Минакова О. В. ....	216
Осик Н. А. ....	217
Роговешко В. М. ....	218
Сагитов А. Р. ....	219
Самсоненко А. А. ....	220
Тютерева Ю. Е. ....	222
Унгуриян В. В. ....	223
Черепанов А. В. ....	224
Шамаева Д. В. ....	225

## ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ, АСТРОФИЗИКА И КОСМОЛОГИЯ

Аксенов О. А. ....	229
Байков А. А. ....	230
Баталов Е. А. ....	231
Гороховский Р. Г. ....	232
Губа В. О. ....	233
Зезюлин И. В. ....	234
Зубков Д. А. ....	235
Кутенев И. Д. ....	236
Кыштымков Д. А. ....	237
Мишин В. В. ....	238
Образцов И. В. ....	239
Панасенко Л. А. ....	240
Поздняков Н. А. ....	241
Помулева С. И. ....	242



Ржевский П. А. ....	243
Сагалакова К. А. ....	244
Ульзутуев Б. Б. ....	245
Урманов Р. В. ....	246

## **ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ**

### **АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ**

Андреянов Н. М. ....	249
Антонова Я. Н. ....	250
Баженов А. А. ....	251
Белозерова М. С. ....	252
Булыженков И. С. ....	253
Глушак А. А. ....	254
Дроботун В. А. ....	255
Дышеков А. А. ....	256
Зуев В. О. ....	257
Иванов Д. В., Васильев С. А., Анофриев В. А., Кошелев В. А. ....	258
Калиниченко М. А. ....	259
Кононов А. А. ....	260
Локтюшин О. Ю. ....	261
Мосейков И. Г. ....	262
Нестерок А. С. ....	263
Николаев А. А. ....	264
Остапченко А. Е. ....	265
Семенов Д. О. ....	266
Сидоров А. Д., Саммель А. Ю. ....	267
Синицына Л. Д. ....	268
Шабалов Н. А. ....	269

### **РАДИОФИЗИКА И УСКОРИТЕЛИ**

Быков С. А. ....	270
Гришина К. А. ....	271
Казанцев Ф. П. ....	272
Каргаполов И. Ю. ....	273
Лачынов Ш. Б. ....	274

Мартынов Г. О. ....	275
Мартьянов И. В. ....	276
Околович А. С. ....	277
Орлова А. Е. ....	278
Седов А. А. ....	279
Селиванов П. Д. ....	280
Токтаганова М. М. ....	281
Хомяков Ю. В. ....	282
Якимов И. С. ....	283
Якимов Н. П. ....	284
Указатель авторов.....	285

Научное издание

МНСК-2021

АЭРОФИЗИКА • ФОТОНИКА И КВАНТОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ  
ТЕХНОЛОГИИ • ФИЗИКА ПЛАЗМЫ • ФИЗИКА ТВЕРДОГО  
ТЕЛА • ТЕПЛОФИЗИКА • ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ  
В ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУКАХ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ •  
ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ, АСТРОФИЗИКА  
И КОСМОЛОГИЯ • ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ  
И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

Материалы

59-й Международной научной студенческой конференции

12–23 апреля 2021 г.

Корректор *Д. И. Ковалева*  
Верстка *А. С. Терешкиной*  
Обложка *Е. В. Неклюдовой*

Подписано в печать 5.05.2021 г.  
Формат 60 × 84/16. Уч.-изд. л. 18,5. Усл. печ. л. 17,2.

Тираж 51 экз. Заказ № 62.

Издательско-полиграфический центр НГУ  
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2



Секция  
ФИЗИКА

ISBN 978-5-4437-1182-9



**N\*** Новосибирский  
государственный  
университет  
**\*НАСТОЯЩАЯ НАУКА**

