

125<sup>П</sup>



**ПОЛИТЕХ**  
Физико-механический  
институт

# НЕДЕЛЯ НАУКИ ФИЗМЕХ

Сборник аннотаций докладов  
Всероссийской научной конференции

3–7 апреля 2023 года



**ПОЛИТЕХ-ПРЕСС**

Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого

2023

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

---

Физико-механический институт

# НЕДЕЛЯ НАУКИ ФИЗМЕХ

Сборник аннотаций докладов  
Всероссийской научной конференции

3–7 апреля 2023 года



**ПОЛИТЕХ-ПРЕСС**

Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого

Санкт-Петербург

2023

УДК 51;53  
ББК 22  
Н42

**Неделя науки ФизМех** : сборник аннотаций докладов Всероссийской научной конференции, 3–7 апреля 2023 г. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – 81 с.

В сборник включены аннотации докладов студентов, аспирантов, молодых ученых и сотрудников СПбПУ, университетов, научных организаций и предприятий Санкт-Петербурга, России, зарубежных стран, принятых на секционные заседания конференции «Неделя науки ФизМех». Аннотации отражают современный уровень научно-исследовательской работы участников конференции в области прикладной математики, физики и механики.

Представляет интерес для специалистов в различных областях знаний, учащихся и работников системы высшего образования и Российской академии наук.

Редакционная коллегия  
Физико-механического института СПбПУ:

*М. Е. Фролов* (директор института),  
*Я. А. Гатаулин* (отв. редактор сборника), *Е. М. Смирнов*, *Н. Г. Иванов*,  
*Е. Е. Журкин*, *С. А. Щербак*, *И. А. Шаров*, *Н. Ю. Золоторевский*,  
*А. Н. Баженов*, *А. С. Семенов*, *С. А. Галаев*,  
*А. С. Мурачев*, *Б. С. Тёрушкин*

Печатается по решению  
Совета по издательской деятельности Ученого совета  
Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

ISBN 978-5-7422-8190-0

© Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого, 2023

## **СЕКЦИЯ «ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ В ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И МЕДИЦИНСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ»**

Е.В. Банников, Я.А. Бердников, Ю.М. Митранков  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

### **ЭЛЛИПТИЧЕСКИЙ ПОТОК $\pi^0$ МЕЗОНОВ В $\text{Cu}+\text{Au}$ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ПРИ ЭНЕРГИИ 200 ГэВ**

Кварк-глюонная плазма – это форма ядерной материи, образуемая при экстремально высокой плотности энергии, в которой кварки и глюоны находятся в состоянии деконфайнмента. Свойства кварк-глюонной плазмы изучают путем анализа характерных особенностей распределения частиц при ультрарелятивистских столкновениях тяжелых ионов, одной из которых является азимутальная анизотропия рождения адронов в ядро-ядерных столкновениях. Количественной характеристикой азимутальной анизотропии в импульсном пространстве является эллиптический поток. Величина эллиптического потока показывает, насколько преобладает движение рожденных в ядро-ядерных столкновениях частиц в перпендикулярном плоскости реакции направлении по отношению к остальным направлениям. Ранее эллиптический поток для  $\pi^0$  мезонов был измерен только для симметричных систем тяжелых ядер. Измерение аналогичных величин в асимметричных столкновениях  $\text{Cu}+\text{Au}$  позволяет определить зависимость величины эллиптического потока для  $\pi^0$  мезонов от размеров и геометрии системы. В настоящей работе представлены результаты измерения величины эллиптических потоков для  $\pi^0$  мезонов в столкновениях  $\text{Cu}+\text{Au}$  при энергии 200 ГэВ как функции от их поперечного импульса и центральности. Полученные значения эллиптических потоков, масштабированные на эксцентриситет нуклонов-участников и кубический корень их числа, не зависят от размеров и геометрии системы. Кроме того, значения эллиптических потоков для  $\pi^0$  мезонов при больших поперечных импульсах ( $p_T > 5$  ГэВ/с) отличны от нуля, что может быть объяснено энергетическими потерями партонов в кварк-глюонной плазме.

Ю.М. Митранков, А.Я. Бердников  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

### **МОДЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ПОТОКОВ $\phi$ -МЕЗОНОВ В СТОЛКНОВЕНИЯХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ**

Формирование сильновзаимодействующей материи квантовой хромодинамики – кварк-глюонной плазмы – было обнаружено в столкновениях тяжелых релятивистских ядер, таких как ядра меди, золота и урана при энергиях коллайдера RHIC. Одним из основных свойств кварк-глюонной плазмы является ее легкая текучесть – свойство, присущее почти идеальной жидкости. Быстрое расширение горячей и плотной материи кварк-глюонной плазмы получило название «коллективного потока» и хорошо описывается моделями релятивистской гидродинамики. Эллиптический поток представляет собой азимутальную анизотропию второго порядка в импульсном распределении частиц, родившихся в столкновении релятивистских ядер. Сравнение экспериментально измеренных эллиптических потоков частиц с предсказаниями моделей, включающих релятивистскую гидродинамику, среди которых наиболее распространенной является модель iEVE-vishnu, позволяет произвести физическую интерпретацию экспериментальных результатов и определить параметры кварк-глюонной плазмы как почти идеальной жидкости. В работе

показано, что величины эллиптических потоков для  $\phi$ -мезонов в столкновениях Cu+Au при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ и U+U при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 193$  ГэВ, измеренных в эксперименте PHENIX, количественно описываются расчетами, выполненными с помощью вязкой гидродинамической модели iEBE-vishnu с удельной сдвиговой вязкостью  $\eta/s = 1/(4\pi)$ .

М.М. Митранкова, Я.А. Бердников  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МУЛЬТИФАЗНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ МОДЕЛИ АМРТ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ РОЖДЕНИЯ $\phi$ МЕZOHOV В ЛЕГКИХ СИСТЕМАХ СТОЛКНОВЕНИЙ

Наблюдение коллективных эффектов при изучении рождения легких адронов в сильно асимметричных системах столкновений релятивистских ядер, таких как p+Al, p+Au, d+Au и  $^3\text{He}+\text{Au}$  при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ на коллайдере RHIC, дает основания предполагать возможность формирования в них сильно взаимодействующей ядерной материи – кварк-глюонной плазмы (КГП). Установлено, что признаки образования КГП проявляются слабее во взаимодействиях более легкой системы p+Al, чем во взаимодействиях p/d/ $^3\text{He}+\text{Au}$ . До сих пор вопрос о минимальных условиях, достаточных для образования кварк-глюонной плазмы, остается открытым. Две версии мультифазной транспортной модели АМРТ позволяют, в предположениях отсутствия или наличия КГП, проводить расчет экспериментальных наблюдаемых характеристик в системе столкновения релятивистских ядер. Для интерпретации экспериментально полученных результатов по рождению  $\phi$ -мезонов в столкновениях p+Al, p+Au, d+Au и  $^3\text{He}+\text{Au}$  при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ проведено их сравнение с предсказаниями двух версий модели АМРТ. Показано, что рождение  $\phi$ -мезонов в столкновениях p/d/ $^3\text{He}+\text{Au}$  при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ может быть описано с учетом образования кварк-глюонной плазмы, в то время как рождение  $\phi$ -мезонов в столкновениях p+Al при той же энергии может быть описано с помощью модели без КГП.

Д.М. Ларионова, Д.О. Котов  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## ИДЕНТИФИЦИРОВАННЫЕ ЗАРЯЖЕННЫЕ АДРОНЫ КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СВОЙСТВ КВАРК-ГЛЮОННОЙ МАТЕРИИ

Кварк-глюонная плазма (КГП) - состояние материи, состоящее из асимптотически свободных кварков и глюонов. Одним из экспериментальных признаков формирования КГП является увеличение выходов протонов (p) и антипротонов ( $\bar{p}$ ) по сравнению с выходами мезонов в столкновениях тяжелых ионов. Данный эффект впервые наблюдался экспериментом PHENIX в Au+Au столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ и был объяснен в рамках рекомбинационных моделей адронизации КГП. Долгое время считалось, что в легких системах столкновений (p+p, p+Al, p+Au, d+Au He+Au) условия, необходимые для образования КГП, не достигаются. Однако в 2018 г экспериментом PHENIX были получены свидетельства формирования КГП в p/d/He+Au столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ. Одним из способов дальнейшего изучения минимальных условий формирования КГП является систематическое измерение выходов p и  $\bar{p}$ , а также выходов мезонов (в частности  $\pi^\pm, K^\pm$ ) в легких системах столкновений (таких как p+Al и He+Au) и тяжелых системах столкновений (таких как Cu+Au и U+U). В данной работе представлены измерения выходов идентифицированных заряженных адронов (p,  $\bar{p}, \pi^\pm, K^\pm$ ) в p+Al, He+Au,

Cu+Au столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ и U+U столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 193$  ГэВ.

М.В. Покидова<sup>1,2</sup>, Я.А. Бердников<sup>1,2</sup>, Ю.Г. Нарышкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## СТАТИСТИЧЕСКАЯ КОМБИНАЦИЯ ПОИСКОВ НЕВИДИМЫХ РАСПАДОВ БОЗОНА ХИГГСА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ АТЛАС

Поиск частиц темной материи (ТМ), является одной из актуальных задач современной физики элементарных частиц, так как стандартная модель (СМ) не описывает их природу и взаимодействия с другими частицами. В рамках СМ предсказываются распад бозона Хиггса на четыре нейтрино, который происходит только в  $\sim 0,1\%$  случаев и называются невидимым, т.к. нейтрино не могут быть обнаружены детектором напрямую. Однако некоторые расширения СМ предсказывают невидимые распады бозона Хиггса на пару частиц – кандидатов на роль частиц ТМ – слабо взаимодействующих массивных частиц (WIMP). Такие модели, где бозон Хиггса действует как частица-посредник между частицами ТМ и частицами СМ называются “порталом Хиггса” и лежат в основе исследований по поиску невидимого распада бозона Хиггса на частицы ТМ ( $H \rightarrow inv$ ) в эксперименте ATLAS. В ходе поисков  $H \rightarrow inv$  не было обнаружено отклонений от предсказаний СМ. Статистическая комбинация таких поисков была выполнена с использованием данных, полученных на Большом адронном коллайдере (БАК) за второй период его работы в 2015-2018 годах при энергии столкновений протонов в системе центра масс  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ с полной светимостью  $139$  фбн<sup>-1</sup>. Получены верхние пределы на вероятность  $H \rightarrow inv$  распада. Проведено сравнение с результатами экспериментов по прямому поиску частиц ТМ.

Д.В. Кох, Я.А.Бердников

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## ТЕНДЕНЦИИ И ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ РАДИАЦИОННОЙ РАЗВЕДКИ МЕСТНОСТИ

Исследование направлено на анализ и систематизацию подходов к воздушной радиационной разведке местности (ВРРМ) за весь период её существования. Методология исследования включает наукометрическую статистику, анализ, сравнение и обобщение. Целью работы является выявление тенденций и перспектив развития средств ВРРМ. Актуальность проблемы исследования определяется высокими темпами развития атомной промышленности и сложившейся геополитической ситуаций. В результате было выявлено, что главным направлением развития является переход к беспилотным системам. Активное освоение беспилотных систем ВРРМ ведётся по двум основным направлениям. (1) Для проведения комплексной разведки применяются крупногабаритные БПЛА вертолётного и самолётного типа с широким комплексом спектрометрического и дозиметрического оборудования на борту. Развитие подобных систем ведётся в направлении увеличения разрешающей способности оборудования и уменьшения минимального периода измерения для получения статистики. (2) Для проведения оперативной разведки и проведения разведки на труднодоступных участках со сложной геометрией исследуемого ландшафта применяются лёгкие БПЛА самолётного и мультикоптерного типа соответственно. Для подобных систем наблюдается миниатюризация детектирующего оборудования и

применение высокопроизводительных слабозащищённых вычислительных систем. Актуальность приобретает проблема защиты вычислительной аппаратуры от наведённых помех с учетом ограничений, накладываемыми их массогабаритными характеристиками. Выявленная проблема станет предметом нашего дальнейшего изучения.

С.М. Анцупов, А.Я. Бердников  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

### МЕТОДЫ ВЫДЕЛЕНИЯ СИГНАЛА $K^*(892)$ МЕЗОНОВ В Au+Au СТОЛКНОВЕНИЯХ ПРИ ЭНЕРГИИ $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ

Исследование кварк-глюонной плазмы (КГП) – вещества в состоянии деконфайнмента, представляет большой интерес в современной науке. Для исследования свойств КГП используются данные, полученные на коллайдерных установках при столкновении тяжелых ультрарелятивистских ядер. Одним из признаков образования КГП является увеличенный выход странных кварков. Данное явление можно наблюдать путем измерения факторов ядерной модификации для странных (содержащих странный кварк) частиц. В настоящей работе представлено описание метода выделения сигнала частицы  $K^*(892)$  в сталкивающейся системе Au+Au при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=200$  ГэВ для разных значений поперечного импульса (от 0.9 до 4.0 ГэВ/с) и классов событий по центральности (от 0 до 93%). Для данных, полученных с детектора PHENIX, был разработан алгоритм, позволяющий выделить сигнал  $K^*(892)$  при помощи регистрации его продуктов распада -  $\pi$  и K мезонов. При помощи Монте-Карло моделирования прохождения продуктов распада  $K^*(892)$  через установку PHENIX была получена эффективность регистрации  $K^*(892)$ . В результате работы были измерены инвариантные спектры  $K^*(892)$  в разных диапазонах по поперечному импульсу (0.9-1.1, 1.1-1.4, 1.4-1.7, 1.7-1.9, 1.9-2.1, 2.1-2.3, 2.3-2.6, 2.6-2.9, 2.9-3.4, 3.4-4.0 ГэВ/с) и по разным классам событий по центральности (0-20%, 20-40%, 40-60%, 60-93%, 0-93%).

А.Д. Селезнев, Д.О. Котов  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

### ФАКТОРЫ ЯДЕРНОЙ МОДИФИКАЦИИ $\eta$ -МЕЗОНОВ В HE+AU СТОЛКНОВЕНИЯХ ПРИ ЭНЕРГИИ 200 ГЭВ

При проведении экспериментов по столкновению тяжелых ионов основной интерес представляет изучение кварк-глюонной плазмы (КГП). Термин КГП описывает особое состояние вещества, которое характеризуется явлением деконфайнмента. Явление деконфайнмента заключается в том, что при больших плотностях энергии партоны (кварки и глюоны) практически не взаимодействуют друг с другом (становятся асимптотически свободными), при этом вещество в целом переходит в “квазибесцветное состояние”. Согласно современной научной картине, вещество ранней Вселенной, предположительно, существовало в состоянии КГП. Один из эффектов, который является следствием образования КГП, — это эффект гашения струй. Данный эффект заключается в подавлении выхода частиц, по сравнению с нормированным выходом этих частиц в протон-протонных столкновениях. Впервые данный эффект был зарегистрирован в 2005 году на ускорителе RHIC. В данной работе измеряется численная характеристика эффекта гашения струй — факторы ядерной модификации. Используя экспериментальные данные, полученные коллаборацией PHENIX в столкновениях He+Au при энергии 200 ГэВ, были измерены

первичные выходы  $\eta$ -мезонов, эффективность регистрации при помощи Монте-Карло моделирования, инвариантные спектры и факторы ядерной модификации  $\eta$ -мезонов.

П.О. Павздерин, М.М. Митранкова  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

### ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫХОДОВ ПРЯМЫХ ФОТОНОВ В ${}^3\text{He}+\text{Au}$ СТОЛКНОВЕНИЯХ ПРИ ЭНЕРГИИ $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 200$ ГэВ

Фотоны, рождающиеся в столкновениях релятивистских ионов, подразделяют на две категории: распадные – фотоны, являющиеся продуктами распада мезонов и барионов, а также прямые – все фотоны, которые не являются распадными. Вторая категория в свою очередь включает, например, фотоны, составляющие излучение кварк-глюонной плазмы (КГП) и адронного газа. Это излучение позволяет получить информацию о температуре среды, образующейся в столкновениях ионов. Образование КГП в столкновениях тяжелых ионов ( $\text{Au}+\text{Au}$ ) подтверждается различными наблюдаемыми эффектами, такими как подавление выходов различных адронов (гашение струй), увеличенный выход странных кварков, а также образование тепловых прямых фотонов. В экспериментах по столкновению малых асимметричных систем ( $p+\text{Au}$ ,  $d+\text{Au}$ ) также наблюдаются эти эффекты, что может указывать на формирование «капель» КГП. Измерение спектра тепловых прямых фотонов в системе  ${}^3\text{He}+\text{Au}$  позволит исследовать предполагаемое рождение КГП в малых системах. В данной работе рассматривается рождение тепловых прямых фотонов в системе столкновений  ${}^3\text{He}+\text{Au}$  при энергии  $\sqrt{s_{\text{NN}}}=200$  ГэВ. Обнаружен избыток числа всех зарегистрированных фотонов к числу распадных фотонов в промежутке по поперечному импульсу от 0.8 до 4 ГэВ, что указывает на образование тепловых прямых фотонов в данной системе, а значит и возможное образование КГП. Полученный избыток может быть использован для выделения спектра тепловых прямых фотонов и определения температуры образующейся среды.

А.А. Лобанов, Я.А. Бердников, Ю.М. Митранков  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА РАНЕННЫХ НУКЛОНОВ И ЧИСЛА БИНАРНЫХ НУКЛОН- НУКЛОННЫХ СТОЛКНОВЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Широкое применение алгоритмов машинного обучения вызвано их хорошими результатами. Современные модели машинного обучения способны генерировать реалистичные изображения, переводить видео «налету» и писать тексты, неотличимые от написанных человеком. Вследствие этого, представляет интерес применение машинного обучения в области физики высоких энергий. В данной работе рассмотрено применение многослойного перцептрона к задаче определения числа раненых нуклонов  $N_{\text{part}}$  и числа бинарных нуклон-нуклонных столкновений  $N_{\text{coll}}$ , характеризующих центральность, для различных сталкивающихся ядер в диапазоне начальных энергий  $\sqrt{s_{\text{NN}}}$  от 40 до 200 ГэВ. Для предсказания использовались множественность заряженных частиц  $N_{\text{charged}}$  в диапазоне псевдобыстрот  $3.1 < |\eta| < 4$  и числа нейтронов  $N_{\text{neutrons}}$  в диапазоне  $5 < |\eta| < 8$ . В результате было получено, что многослойный перцептрон может с высокой точностью предсказывать  $N_{\text{part}}$  и  $N_{\text{coll}}$  ( $R^2 > 0,9$ ) для различных систем ядер при начальных энергиях  $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 40-200$  ГэВ.



А.А. Лобанов, Я.А. Бердников  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЛУБОКОГО НЕУПРУГОГО ЭЛЕКТРОН-ПРОТОННОГО РАССЕЯНИЯ С ПОМОЩЬЮ ГЕНЕРАТИВНО-СОСТЯЗАТЕЛЬНОЙ СЕТИ

Изучение спиновой структуры протона требует широких экспериментальных исследований глубоко неупругого электрон-протонного рассеяния. Такие эксперименты и анализ их результатов, как правило, требуют использования Монте-Карло моделирования как функционирования экспериментальной установки, так и физической картины электрон-протонного рассеяния. Последнее базируется на использовании сложных физических моделей, расчет которых требует больших временных и вычислительных затрат. Возможным способом решения этой проблемы является применение методов машинного обучения, которые «обучаются» на данных. В качестве таких данных выступают результаты экспериментов или моделирования электрон-протонного рассеяния (например, инклюзивного глубоко неупругого). В итоге, можно получить модель, которая способна предсказывать конечное состояние за короткое время. В данной работе рассмотрено применение генеративно-состязательной сети с дополнительными и измененными параметрами для генерации конечного состояния электрона в глубоко неупругом электрон-протонном рассеянии при различных начальных энергиях. В результате была получена модель, которая с высокой точностью способна предсказывать конечное состояние рассеянного электрона в диапазоне начальных энергий электрон-протонного взаимодействия  $\sqrt{s_{eN}} = 20 - 100$  ГэВ.

Д.А. Берналь, А.А. Лобанов, Я.А. Бердников  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИЦЕЛЬНОГО ПАРАМЕТРА В СТОЛКНОВЕНИЯХ ЯДЕР ЗОЛОТА ПРИ ЭНЕРГИИ 600 МЭВ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

В работе исследована возможность применения нейронной сети для определения прицельного параметра столкновения Au+Au при энергии пучка 600 МэВ. Моделирование столкновений проводилось на основе ультррелятивистской молекулярной динамики с использованием пакета UrQMD. В качестве наблюдаемых величин были рассмотрены: поток (FLOW), направленность (DIR), отношение энергий в системе центра масс (ERAT) и множественность протонов (MULT). Была проанализирована точность предсказания прицельного параметра с помощью нейронной сети на основе каждой из выше приведенных величин и их комбинаций. Кроме того, было рассмотрено влияние конфигурации нейронной сети на точность предсказания. В результате были определены оптимальная архитектура нейронной сети и набор наблюдаемых величин для предсказания значения прицельного параметра столкновений ядер золота при энергии 600 МэВ.

Д.Н. Стекачева, Ю.М. Митранков, А.Я. Бердников  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ РОЖДЕНИЯ МЕЗОНОВ В D+D СТОЛКНОВЕНИЯХ ПРИ ЭНЕРГИИ $\sqrt{s} = 27$ ГЭВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯДЕРНО-МОДИФИЦИРОВАННЫХ ФУНКЦИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРТОНОВ

Исследование процессов рождения мезонов является методом изучения спиновой структуры нуклона. В настоящее время считается, что вклад в спин нуклона вносят спины кварков и глюонов и их орбитальные моменты. Компоненты спина нуклона исследуются в различных экспериментах. Планируются также исследования в предстоящем эксперименте SPD (Spin Physics Detector) на NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility), результаты которого, как ожидается, ликвидируют кинематический разрыв между низкоэнергетическими и высокоэнергетическими измерениями. Кроме спиновых эффектов в столкновениях релятивистских ионов, всегда наблюдаются эффекты холодной ядерной материи, описываемые ядерно-модифицированными функциями распределения партонов, которые используются в качестве входных данных для моделирования жестких процессов, партонных ливней и множественных партонных взаимодействий. В настоящей работе исследуется влияние ядерно-модифицированных функций распределения партонов на процессы рождения мезонов  $\pi_0, J/\Psi, D^+$  и  $D^-$  в d+d столкновениях при энергии  $\sqrt{s} = 27$  ГэВ. Полученные данные могут быть использованы для описания и трактовки результатов измерений выходов частиц в будущем эксперименте SPD NICA, а именно помогут отделить влияние эффектов холодной ядерной материи от влияния спиновых и других эффектов, проявляющихся в столкновениях ионов.

Д.Н. Куницына, Я.А. Бердников, Ю.М. Митранков  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## РАСЧЕТ ИНКЛЮЗИВНОГО СЕЧЕНИЯ ГЛУБОКО-НЕУПРУГОГО ЭЛЕКТРОН-ПРОТОННОГО РАССЕЙЯНИЯ С УЧЕТОМ ВКЛАДА СКАЛЯРНОГО ДИКВАРКА

Изучение внутренней структуры нуклонов возможно с помощью лептон-нуклонного глубоко-неупругого рассеяния. Для описания такого взаимодействия в данной работе используется кварк-дикварковая модель. В барионах дикварк — низкоэнергетическая конфигурация двух кварков, несущая заряд антицвет. В настоящей работе были рассчитаны инклюзивные сечения глубоко-неупругого электрон-протонного рассеяния с использованием функций партонного распределения NNPDF2.3 в предположении существования валентного скалярного дикварка и в стандартной трехкварковой модели. Проведено сравнение рассчитанных значений сечения неупругого рассеяния электронов на неполяризованных протонах с измеренными коллаборацией HERMES. Расчеты представлены в диапазонах от 1 до 10 ГэВ<sup>2</sup> по переданному импульсу и от 0.05 до 0.4 по переменной Бьоркена. На основе сравнительного анализа сделан вывод об улучшении сходимости модельных расчетов (достигаемый p-уровень значимости в кварковой модели принимает значение 0.06, в кварк-дикварковой модели — 0.802) и результатов эксперимента HERMES при введении в рассмотрение валентного скалярного дикварка.

С.И. Воробьев<sup>1</sup>, А.Л. Геталов<sup>1</sup>, Е.Н. Комаров<sup>1</sup>, С.А. Котов<sup>1</sup>,  
Г.В. Щербаков<sup>1</sup>, М. Балашою<sup>2,3</sup>, Ф.В. Степанов<sup>4</sup>, В.С. Лобин<sup>5</sup>,

<sup>1</sup> НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ,

<sup>2</sup> Объединенный институт ядерных исследований,

<sup>3</sup> Horia Hulubei National Institute of Physics and Nuclear Engineering, Bucharest, Romania,

<sup>4</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

<sup>5</sup> ДИТИ НИЯУ МИФИ

## ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛАСТОМЕРОВ С РАЗЛИЧНОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ НАНОЧАСТИЦ $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ С ПОМОЩЬЮ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ МЮОНОВ

Для исследования магнитных свойств  $\mu\text{SR}$ -методом магнитореологических эластомеров были изготовлены образцы в виде дисков диаметром 64 мм и толщиной 9 мм. Подготовлено два набора образцов с концентрацией 0, 5, 10 и 15% с неупорядоченной и с упорядоченной ориентацией магнитных моментов наночастиц  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ . Измерялись временные спектры позитронов, рождённых при распадах мюонов, остановившихся в образцах.  $\mu\text{SR}$ -методом было проведено исследование магнитных свойств эластомеров в зависимости от концентрации наночастиц  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  в магнитном поле 512Гс при температуре 290 К. Было показано, что проводящие свойства образцов не зависят от концентрации примеси. Положение магнитных моментов примесных наночастиц в  $P_m$  образцах не влияет на величину наблюдаемой асимметрии.

П.Р. Шаяхметова<sup>1</sup>, В.А. Бакаев<sup>1</sup>, А.М. Червяков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский клинический научно-практический центр специализированных видов медицинской помощи (онкологический)

## ПЛАНИРОВАНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ ПАЦИЕНТОВ МЕТОДОМ IMRT НА МЕДИЦИНСКОМ УСКОРИТЕЛЕ ЭЛЕКТРОНОВ

В настоящее время в дистанционной лучевой терапии часто применяется тормозное излучение высокой энергии. Возможности такого лучевого лечения значительно расширил современный метод IMRT (intensity-modulated radiation therapy). Данная методика позволяет создавать поле облучения требуемой формы (соответствующее опухоли сложной локализации) во время одного сеанса и снижать нагрузку на здоровые органы и ткани при радикальных дозах ионизирующего излучения в опухоли. Цель настоящей работы – анализ возможностей планирующей системы Eclipse и накопление опыта работы с оптимизатором в программе дозиметрического планирования дистанционной лучевой терапии на ускорителе Varian TrueBeam. При постановке работы предполагалось применение физико-технических ресурсов ГБУЗ «Санкт-Петербургский клинический научно-практический центр специализированных видов медицинской помощи (онкологический)». В ходе выполнения работы были посчитаны лечебные дозиметрические планы дистанционного облучения молочной железы с использованием метода IMRT и программы планирования облучения Eclipse. Благодаря усовершенствованию методики работы с оптимизатором удалось обеспечить равномерное изодозное распределение в облучаемом объёме с минимальной лучевой нагрузкой на критических структурах.

А.А. Васильев<sup>1</sup>, И.Г. Голиков<sup>2</sup>, Ф.А. Пак<sup>1</sup>, А.И. Халиков<sup>1</sup>, И.И. Шевченко<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>«Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова» Национального  
исследовательского центра «Курчатовский институт»  
<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДИОХРОМНЫХ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПРОФИЛЯ ПУЧКА ПРОТОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 1000 МэВ

На протонном синхроциклотроне СЦ-1000 НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ на энергию протонов 1000 МэВ с интенсивностью выведенного протонного пучка 1 мкА осуществляется исследовательская деятельность. Лучевая терапия с применением пучка протонов, получаемого на синхроциклотроне СЦ-1000, проводилась с 1975 по 2013 г. Важной задачей при планировании лучевой терапии, в частности терапии протонами с энергией 1000 МэВ, является моделирование и расчет дозных полей. Для этого необходимо знать распределение дозы протонов в пучке. В данной работе проведены измерения профиля пучка протонов с помощью радиохромных дозиметрических пленок. Эти пленки являются удобным инструментом для получения распределения дозы с высоким пространственным разрешением. Показано, что функция Гаусса является недостаточно точной аппроксимацией распределения.

## **СЕКЦИЯ «ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД И НАНОСТРУКТУР»**

А.А. Гольдберг, В.В. Давыдов, Р.В. Давыдов, И.Д. Кочетков  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

### **ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ ПРОДОЛЬНОЙ РЕЛАКСАЦИИ В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ МЕТОДОМ ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДУЛЯЦИОННОГО МЕТОДА В СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ**

Одной из задач ядерного магнитного резонанса (ЯМР) при исследовании конденсированных сред является определение времен продольной и поперечной релаксации, что особенно важно при использовании малогабаритных ЯМР-релаксометров для экспресс-контроля состояния конденсированных сред. В случае экспресс-контроля регистрация сигнала ЯМР происходит в слабом магнитном поле с использованием независимого источника питания. В связи с этим возникают проблемы при использовании импульсных методов в небольших портативных ЯМР-релаксометрах для измерения времен релаксации, для их измерения в малогабаритных ЯМР-релаксометрах регистрируется сигнал с применением метода модуляции. В этом случае ЯМР-сигнал формируется в виде затухающего непериодического колебания. Определить время поперечной релаксации можно по затуханию огибающей, построенной по вершинам пиков. Неоднородность магнитного поля учитывается в области, где расположена регистрирующая катушка. Трудности возникают с измерением продольной релаксации, поскольку для её определения в конструкции малогабаритного ЯМР-релаксометра чрезвычайно сложно использовать измерения частоты по методу Джулотто. Кроме того, формула для определения продольной релаксации по методу Джулотто была получена из уравнения Блоха без учета особенности регистрации ЯМР-сигнала в слабом магнитном поле с использованием метода модуляции. Уравнения Блоха не учитывали влияние модуляции магнитного поля на намагниченность конденсированной среды. Учитывая все факторы в уравнениях Блоха, мы получили формулу для определения продольной релаксации по двум измерениям амплитуды сигнала на разных частотах модуляции.

О.С. Плешаков<sup>1</sup>, С.А. Щербак<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Академический университет им. Ж.И. Алфёрова

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОННОГО ТРАНСПОРТА В СТЕКЛАХ В ПРОЦЕССЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ**

Термоэлектрическая поляризация стекла является перспективным методом изготовления структур для интегральной и дифракционной оптики, микрофлюидики, а также для зарядовой литографии. В процессе поляризации к образцу стекла, разогретому до температуры активации ионной подвижности (обычно, 200-300 °С), прикладывается постоянное электрическое поле, под действием которого из субнанодной области происходит дрейф катионов, содержащихся в стекле. Последующее охлаждение образца под приложенным напряжением приводит к «заморозке» локально-неравновесного сформировавшегося в результате дрейфа распределения катионов за счет снижения их подвижности. В данной работе построена модель дрейфа ионов в стекле в процессе

поляризации в так называемом режиме «открытого анода», приводящего к инжекции частиц из окружающей среды в стекло. Рассмотрен случай одного типа ионов в составе стекла ( $\text{Na}^+$ ) и одного типа имеющих меньшую подвижность инвазивных ионов ( $\text{H}^+$ ). В модели процесс поляризации рассмотрен как протекание ионного тока через эквивалентную электрическую цепь. Это позволило получить аналитическую зависимость ионного тока от времени. Более того, в предложенной аналитической модели впервые учтено накопление электрического заряда в процессе поляризации. Полученные аналитически величины накопленного заряда с высокой точностью совпали с результатами проведённого численного моделирования задачи дрейфа-диффузии методом конечных элементов. Показано, что заряд, накопленный в процессе поляризации, на много порядков меньше суммарного заряда ионов, прошедших через образец.

И.В. Решетов<sup>1</sup>, Г. Кан<sup>1</sup>, С.А. Щербак<sup>1,2</sup>, В.В. Журихина<sup>1,2</sup>, А.А. Липовский<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup>Академический университет им. Ж.И. Алфёрова  
<sup>2</sup>Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого

### УСИЛЕНИЕ СИГНАЛА ВТОРОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ГАРМОНИКИ ПОСЛЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПОЛЕВОЙ ОБРАБОТКИ СИЛИКАТНОГО СТЕКЛА, ПОДВЕРГНУТОГО ТЕРМИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

В настоящей работе продемонстрировано, что дополнительное электрополеное воздействие на многокомпонентное силикатное стекло, предварительно подвергнутое термической поляризации (полинга), приводит к значительному увеличению сигнала второй оптической гармоники (ВГ). Измерены динамические характеристики эффекта усиления сигнала ВГ в процессе дополнительного электрополевого воздействия в различных режимах. Проведенные эксперименты позволяют сделать вывод о том, что сигнал ВГ генерируют дипольные структуры, проникшие в стекло в процессе первичного термического полинга из воздушной атмосферы. Это указывает на то, что механизмом генерации ВГ в многокомпонентном силикатном стекле, подвергнутом термическому полингу, является не только внутреннее «замороженное» электрическое поле (так называемая модель EFISH - electric-field induced second harmonic), как считалось ранее во многих работах, но также и дипольная поляризация. Полученные результаты представляют интерес для физики стеклообразного состояния, т.к. дают лучшее понимание микроскопических процессов, ответственных за генерацию ВГ в стеклах, подвергнутых термическому полингу.

Н.А. Земляков<sup>1,2</sup>, А.И. Чугунов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

<sup>2</sup>Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН

### УМЕНЬШЕНИЕ МОДУЛЯ СДВИГА ВНУТРЕННЕЙ КОРЫ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД ИЗ-ЗА ЭФФЕКТОВ КОНЕЧНОГО РАЗМЕРА ЯДЕР

Упругие свойства коры нейтронных звезд важны для адекватной интерпретации наблюдательных данных (например, квазипериодические осцилляции в хвосте вспышек магнетаров). Они не могут быть исследованы в земных лабораториях, и для их количественного описания необходимо полагаться на теоретические расчеты. Наиболее распространены расчеты в рамках модели кулоновского кристалла (точечные ядра на однородном фоне электронов). Однако приближение точечных ядер является слишком грубым для наиболее глубоких слоев внутренней коры, где размеры ядер сопоставимы с расстоянием между ними. В данной работе мы, в рамках сжимаемой капельной модели, показываем, что при деформации коры вблизи узлов кристаллической решетки наводится квадрупольный потенциал, приводящий к изменению равновесной формы атомных ядер. Данный эффект ведет к уменьшению модуля сдвига коры, достигающего 25% в наиболее глубоких слоях. Отметим, что полученные результаты не зависят от конкретного выбора модели межнуклонного потенциала. Результаты опубликованы [MNRAS 518, 3813 (2023)].

А.Ю. Меркулова<sup>1</sup>, А.К. Павлов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

<sup>2</sup>Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН

### ОБРАЗОВАНИЕ КЛАТРАТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ $\text{CO}_2+\text{O}_3+\text{O}_2$ КАК ПРИЧИНА СЕЗОННЫХ ВАРИАЦИЙ КИСЛОРОДА В АТМОСФЕРЕ МАРСА

С помощью инструмента «Анализ проб на Марсе» марсохода Марсианской научной лаборатории Curiosity наблюдалось, что кислород демонстрирует значительную сезонную и межгодовую изменчивость, что указывает на неизвестный атмосферный или поверхностный процесс. В качестве возможной причины возникновения сезонных вариаций кислорода мы рассматриваем возможность образования клатратных соединений  $\text{CO}_2+\text{O}_3+\text{O}_2$  зимой в полярных шапках. Каждый марсианский год до одной трети массы  $\text{CO}_2$  затвердевает и накапливается в виде снега или инея в полярных регионах Марса. Лабораторные эксперименты показывают, что твердый диоксид углерода является эффективной ловушкой для озона при температурах до 156 К. Спектры поглощения озона при ультрафиолетовом отражении в твердом  $\text{CO}_2$  при 127 К указывают на то, что озон, наблюдаемый над полярной шапкой Марса, может быть захвачен твердым  $\text{CO}_2$ . При наступлении весны из-за повышения температуры данный озонсодержащий клатрат разрушается, озон высвобождается и диссоциирует до кислорода. Отсюда возникает обнаруженный избыток кислорода. В данной работе, в рамках термодинамической модели клатрата  $\text{CO}_2+\text{O}_3+\text{O}_2$ , мы показываем возможность его образования зимой в сезонных полярных шапках Марса. В результате расчетов было выявлено, что в твердый  $\text{CO}_2$  мы можем включить достаточное количество озона для обеспечения выявленных сезонных вариаций кислорода.

А.К. Павлов<sup>1,2</sup>, А.А. Щепкин<sup>1,2</sup>, Г.И. Васильев<sup>2</sup>, В.М. Остряков<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
<sup>2</sup>Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН

## ВОЗМОЖНОСТЬ МУТАЦИЙ И МАССОВЫХ ВЫМИРАНИЙ ЖИВЫХ ОРГАНИЗМОВ НА ЗЕМЛЕ ВСЛЕДСТВИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ БЛИЗКОЙ СВЕРХНОВОЙ ЗВЕЗДЫ

Взрывы сверхновых (СН) периодически происходят в нашей Галактике и вблизи Солнечной системы. В среднем, в радиусе 50 пк от Солнца СН вспыхивают приблизительно раз в 25 млн лет. Однако, по измерениям концентрации изотопа железа  $^{60}\text{Fe}$  в глубоководных донных отложениях было обнаружено два больших сигнала, датированных последними 10 млн лет. Учитывая, что данный изотоп мог быть синтезирован при взрыве СН, существует свидетельство о прохождении вблизи Солнечной системы звёздной ассоциации, в связи с чем была повышена частота вспышек СН. Последнее событие датируется 2,5 млн лет, что совпадает с границей эпох Плиоцен-Плейстоцен, когда 36% морской мегафауны подверглось вымиранию, и началась эволюция человека. Однако, до сих пор точно не известно, как именно вспышки близких СН воздействуют на биосферу Земли. В данной работе рассматривается моделирование повышения радиационного фона на Земле от воздействия космических лучей (КЛ), ускоренных на ударной волне от взрыва сверхновой звезды с целью выяснить возможность мутаций и массовых вымираний земных организмов в этом случае. Космические лучи – это потоки высокоэнергичных частиц в космическом пространстве. Попадая в атмосферу Земли, они производят каскад ядерных реакций, в ходе которого появляются 2 фактора повышения фона: вторичные частицы ( $\gamma, \mu^\pm, e^\pm, n, p$  и др.) и радионуклиды ( $^{14}\text{C}, ^{10}\text{Be}, ^{36}\text{Cl}, ^3\text{H}$  и др.). Среди космогенных радиоизотопов рассматривается  $^{14}\text{C}$ , поскольку углерод содержится в органических молекулах, тем самым вызывает внутреннее облучение организмов и повреждение ДНК, что повышает скорость мутаций. Результаты моделирования показали возможность значительного повышения радиационного фона на Земле. Прямое облучение даёт большой вклад в радиацию на поверхности Земли и в перемешанных слоях океана, а радиоуглерод приводит к повышению фона во всей биосфере, в том числе и глубоководной, где нет прямого облучения. Необходимые условия возникновения мутаций организмов, а также их массовых вымираний, могут быть выполнены при вспышке СН в радиусе 50 пк от Земли.

М.К. Буц, М.Ю. Кантор  
Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН

## РЕНТГЕНОВСКАЯ ДИАГНОСТИКА С ВЫСОКОЙ СКОРОСТЬЮ СЧЕТА ФОТОНОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ БЫСТРОЙ ДИНАМИКИ СПЕКТРОВ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ НА ТОКАМАКЕ ФТ-2

Для исследования режимов нижнегибридного нагрева и генерации тока плазмы на токамаке ФТ-2 была разработана диагностика мягкого рентгеновского излучения, позволяющая измерять спектры излучения плазмы от энергии 1 кэВ при больших потоках на детектор – более 106 квантов в секунду. Это позволяет снизить время измерения спектра более чем в 10 раз по сравнению с лучшими промышленными образцами спектрометров, что играет большую роль при работе на установках с малой длительностью разряда, а также при исследовании быстрых процессов. Диагностическая система состоит из кремниевого дрейфового детектора FASTSDD фирмы АМРТЕК с предусилителем, блока управления и обработки сигнала детектора РХ-5 АМРТЕК, усилителя-формирователя, разработанного для



измерений при высоких потоках излучения, АЦП с частотой оцифровки 250 МГц и разрешением 14 бит и Gigabit Ethernet коммутатора. Для управления диагностикой и сбора данных был разработан пакет программ. Спектрометр установлен на подвижном столе, позволяющим собирать излучение вдоль различных хорд, проходящих между центром и периферией плазменного шнура. В настоящее время с помощью новой рентгеновской диагностики на токамаке ФТ-2 проводятся измерения динамики спектров тормозного излучения с высоким временным разрешением в омической стадии разряда. Изучается возможность измерения электронной температуры по ‘тепловой’ части спектра излучения.

В.С. Михайлов, А.Н. Зиновьев, П.Ю. Бабенко, А.П. Шергин  
Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН

### КОЭФФИЦИЕНТЫ РАСПЫЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ РЕАКТОРА ТОКАМАК ИЗОТОПАМИ ВОДОРОДА

Представлены результаты моделирования коэффициентов распыления вольфрама и бериллия изотопами водорода в диапазоне от энергии порога до 20 keV. Приведена зависимость коэффициентов распыления от угла падения пучка на поверхность. Также представлены коэффициенты отражения изотопов водорода для вышеуказанного диапазона. В работе также приведена зависимость средней энергии распылённых частиц от энергии налетающих изотопов водорода. Для всех расчетов использовался вариант планарного и сферического поверхностного барьера, что позволяет рассмотреть предельные случаи зависимости коэффициента распыления от степени шероховатости поверхности. Продемонстрирована значимость выбора типа барьера для вычисления коэффициентов распыления и энергий распыленных частиц. Как правило, на современных токамаках обращенным к плазме материалом является вольфрам или бериллий. В частности, в случае токамака ITER планируется использовать вольфрамовый дивертор и бериллиевая стенка вакуумной камеры. Полученные нами результаты позволяют более точно оценить поступление примеси бериллия в горячую зону плазмы, что в свою очередь является важным условием для моделирования параметров плазмы во всем объеме реактора токамак.

К.В. Владимирова<sup>1</sup>, А.К. Павлов<sup>2</sup>, Г.И. Васильев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
<sup>2</sup>Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН

### МЕТОД ДИСТАНЦИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ ОБЛУЧЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЕВРОПЫ МЕТОДАМИ РЕНТГЕНОВСКОЙ И ГАММА-СПЕКТРОСКОПИИ

В данной работе был разработан метод дистанционного определения степени облучения поверхности одного из галилеевых спутников – Европы. Этот метод позволит оценить выживаемость биомаркеров в зависимости от локального места, чтобы с его помощью определить, где сохранность биомаркеров максимальна. Данный метод может использоваться зондом с целью определения локального места и последующей высадки на локальную область, где вероятность обнаружить биомаркеры, не облучённые радиацией, наиболее высока. В исследовании использовался пакет программ Geant4, разработанный в ЦЕРНе и использующийся для широкого круга задач. Этот пакет программ основан на принципе моделирования процессов взаимодействия энергичных частиц любой природы по принципу Монте-Карло. Выбранные методы – рентгеновская и гамма-спектроскопия, –

позволили оценить степень облучения поверхностного льда Европы и определить, до какой глубины облучался лёд. Результаты проведённого исследования помогут в дальнейшем в изучении на наличие жизни спутника Юпитера – Европы.

В.А. Шенявский<sup>1</sup>, И.А. Барышников<sup>2</sup>, В.В. Клименко<sup>3</sup>, А.В. Иванчик<sup>2,3</sup>  
<sup>1</sup>«Высшая школа экономики»,  
<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
<sup>3</sup>Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН

## СПОСОБЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЛИКТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПО КОСМОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Исследованы методы измерения температуры реликтового излучения  $T_0$  в современную эпоху с использованием космологических данных. На сегодняшний день известны и реализованы два метода: один использует эффект Сюняева-Зельдовича, второй – анализ заселенностей энергетических уровней атомов и молекул в плотных межзвездных облаках. В работе предложена и исследована новая процедура в первом методе, отличающаяся от используемой аппроксимирующей функцией и аппроксимирующими параметрами. Работа выполнена с помощью генерации синтетических данных в рамках  $\Lambda$ CDM модели со стандартной зависимостью температуры реликтового излучения  $T_z$  от космологического красного смещения  $z$ :  $T_z = T_0(1+z)$ , где  $T_0 = 2.7255\text{K}$ . В результате обнаружено, что новая процедура восстанавливает в пределах одного — двух  $\sigma$  значение  $T_0 = 2.7255\text{K}$ , в то время как используемая процедура дает смещенную на три  $\sigma$  оценку. Также в работе показано, какие измерения необходимо выполнить, чтобы достичь той точности измерений  $T_0$ , которая определялась не по космологическим данным, и является лучшей на сегодняшний день:  $T_0 = 2.7255 \pm 0.0006\text{K}$  (Фиксен, 2009). Независимые наблюдения являются чрезвычайно важными для подтверждения или развития стандартной модели, поскольку их расхождения свидетельствуют о возможности выйти за пределы стандартной физики.

А.Р. Ничик, И.Ю. Сениченков, В.А. Рожанский  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА ASDEX UPGRADE С НАПУСКОМ КРИПТОНА

При осуществлении термоядерного синтеза недопустим контакт материальных стенок с высокотемпературной плазмой термоядерного реактора. Чтобы избежать этого, используется конфигурация поля, при которой поток энергии уходит в основном не на камеру, а на дивертор. Однако дивертор также нужно обезопасить от потока энергии – необходимо охлаждение плазмы вблизи диверторных пластин, – и для решения этой задачи используют напуск излучающей примеси. Успешные эксперименты по напуску различных видов примесей (N, Ar, Ne, Kr) были проведены на токамаке ASDEX Upgrade. Kr рассматривается как излучающая примесь в реакторах следующего поколения (DEMO), где может возникнуть необходимость обеспечить излучение из области удержания, а не только из дивертора. В данной работе исследовано влияние напуска излучающей примеси Kr на поведение плазмы в обдирочном слое токамака ASDEX Upgrade. Впервые проведено с помощью кода SOLPS-ITER численное моделирование пристеночной плазмы токамака с разным напуском Kr и определено, при каких параметрах мощность на дивертор будет достаточно низкой для стабильной и наиболее долгой работы токамака. Ожидается, что Kr должен удерживаться

лучше, чем другие исследуемые газы (N, Ar, Ne). Это связано с тем, что K<sub>g</sub> имеет наименьший потенциал ионизации и наибольшее сечение ионизации. Можно ожидать, что в реакторе DEMO K<sub>g</sub> сможет обеспечивать необходимый уровень излучения и из дивертора, и из центральной области токамака.

А.Ю. Токарев, А.Ю. Яшин, К.А. Кукушкин, А.В. Петров, А.М. Пономаренко  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОЧАСТОТНОГО ДОППЛЕРОВСКОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ELM НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

Основной режим работы токамаков – H-мода, характеризуется большим градиентом давления на периферии, из-за чего возникают краевые локализованные моды (ELM), приводящие к импульсным выбросам частиц и энергии. Поэтому исследование ELM является важной задачей, а наиболее сложная ее часть - измерения во внутренней области плазмы, которые возможны только бесконтактными методами, в частности, доплеровским обратным рассеянием (ДОР). В данном докладе представлены результаты использования ДОР для исследования ELM на сферическом токамаке Глобус-М2. На нем установлено два многочастотных рефлектометра. Первый позволяет зондировать плазму на четырех частотах: 20, 29, 39 и 48 ГГц, что соответствует периферийной области  $0.8 < \rho < 1$ . Вторым рефлектометром используется шесть частотных каналов: 50-75 ГГц с шагом 5 ГГц, что позволяет исследовать внутренние плазменные области  $0.4 < \rho < 0.8$ . Используя широкие возможности установленной на Глобусе-М2 ДОР, было показано, что амплитуда флуктуаций концентрации и их скорость сильно меняются во время ELM, причем имеется зависимость от радиуса. Был определен профиль скорости вращения плазмы в разные фазы ELM и исследованы свойства возникающих в это время нитевидных структур – филаментов.

А.Б. Сербин<sup>1,2</sup>, С.Л. Курдубов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

<sup>2</sup> Институт прикладной астрономии Российской академии наук

## УЧЕТ СТРУКТУРЫ РАДИОИСТОЧНИКА ПРИ ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ РСДБ-НАБЛЮДЕНИЙ

При расчёте параметров вращения Земли (ПВЗ), а также для других задач радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) используется групповая задержка сигнала от внегалактических радиоисточников между двумя удалёнными радиотелескопами, которая является суммой задержек, обусловленных различными эффектами. Задержка сигнала от радиоисточника, обусловленная его структурой, называется структурной задержкой. Многие из источников, входящих в Международную небесную систему отсчета (ICRF), имеют пространственно-протяжённую структуру, поэтому структурную задержку необходимо учитывать при обработке результатов РСДБ-наблюдений. Однако на практике моделирование структурной задержки сталкивается со многими проблемами, одними из них являются помехи на картах радиояркости и изменчивость источника. В данной работе исследовалась возможность учёта структуры источника по картам радиояркости из базы данных [http://astrogeo.org/vlbi\\_images/](http://astrogeo.org/vlbi_images/). По различным картам источника 0014+813 за 2018-2019 годы были построены зависимости структурной задержки от звёздного времени. Было показано, что существующие карты не позволяют построить модель структурной задержки, которую можно было бы использовать на практике, так как зависимости, построенные по

разным картам, сильно различаются. Это может быть связано как с влиянием помех, так и с изменчивостью источника. Было выяснено, что использование при расчёте наиболее ярких частей источника позволяет существенно сократить различие между графиками, построенными по разным картам, на основе этого был предложен ряд способов улучшения существующих карт.

Д.А. Гузуева

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## ПОИСК ВОЗМОЖНЫХ ИСТОЧНИКОВ ВАРИАЦИЙ МЕТАНА В АТМОСФЕРЕ МАРСА ПУТЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГАЗОВЫХ ЛОВУШЕК В РЕГОЛИТЕ ПЛАНЕТЫ

Основная задача эксперимента – показать, что в слое грунта в приближенных к марсианским условиям могут сохраняться жидкие соляные растворы (перхлората натрия и дистиллированной воды), а также проверить возможную выживаемость микроорганизмов в этих растворах. Известно, что под поверхностью Марса есть большое количество воды. На поверхностном слое она представлена главным образом льдом и также может существовать в виде растворов перхлоратов (натрия, кальция или магния), высокое содержание которых (~1%) измерено в марсианском грунте. На глубине 600 метров и более температура достаточна для реализации процесса серпентизации, другим источником водорода в поверхностном слое может быть процесс радиолиза воды под действием космических лучей. Метаногены могут использовать его и углекислый газ, содержащийся в атмосфере, и в качестве продуктов жизнедеятельности выделять метан. Эксперимент включал в себя: создание подповерхностного слоя, состоящего из грунта, питательной среды и раствора перхлората натрия, подселение в данный слой бактериальной колонии, создание газовой ловушки на верхнем слое, отслеживание наличия жидкого слоя в образце и бактериальных колоний на выживаемость и размножение. В работе исследовались колонии бактерий *Deicosoccus radiodurans* и *Paracoscus*, выбранные вследствие их высокой толерантности к экстремальным условиям окружающей среды. Был проведен ряд экспериментов для различных концентраций соли в растворе перхлората натрия: для 50%, 70% и 100%. Во всех трех случаях жидкий слой сохранялся в течение длительного времени (60 мин. и более). На поверхности экспериментального образца образовывалась герметичная «ловушка» для газов. Было показано, что титр бактериальных клеток *Deicosoccus radiodurans* в ходе проведения эксперимента снижается за 2 недели минимум на 6 порядков.

Д.Д. Коробко, В.М. Тимохин, В.Ю. Сергеев, А.М. Богданов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕЛИЕВОЙ СТРУИ С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМОЙ ТОКАМАКА

Спектроскопическая диагностика периферийной плазмы токамака с инъекцией нейтрального гелия даёт информацию о распределении электронных температуры и плотности в периферийных областях плазмы токамака из соотношений измеренных интенсивностей излучения в спектральных линиях нейтрального гелия. Понимание физических процессов, происходящих при взаимодействии нейтрального гелия с высокотемпературной плазмой токамака, позволит улучшить качество получаемых результатов и их интерпретации. Первым шагом к расчёту распределений возбуждённых атомов гелия было исследование течения нейтрального гелия в системе инъекции

спектроскопической диагностики, установленной на токамаке «Глобус-М2». Численное моделирование течения нейтрального гелия было выполнено с помощью CFD-пакета среды вычислений ANSYS Fluent. В докладе приведены результаты численных расчётов распределения атомов гелия в возбуждённом состоянии  $1s3s(^3S)$ , соответствующему излучению в линии нейтрального гелия 706 нм ( $(1s3s(^3S) - 1s2p(^3P^0))$ ). По скейлингу газодинамического разлёта газа из отверстия в вакуум [4], оценивалось распределение плотности атомов гелия  $n_{He}$  в камере токамака с учётом процессов ионизации и перезарядки. Профили электронных температуры и концентрации брались из расчёта по коду SOLPS-ITER. По известному сечению возбуждения основного состояния гелия на верхний уровень перехода  $1s3s(^3S) - 1s2p(^3P^0)$  оценивалось пространственное распределение интенсивности излучения в соответствующей линии:  $I_{706}(R, Z, \varphi) \sim n_{He}(R, Z, \varphi) n_e(R, Z, \varphi) \langle \sigma v \rangle(T_e(R, Z, \varphi))$ , где  $n_e(R, Z, \varphi)$  – электронная концентрация,  $\langle \sigma v \rangle(T_e(R, Z, \varphi))$  – сечение возбуждения из основного состояния в  $1s3s(^3S)$ .

И. Федоренко, В.М. Тимохин, В.Ю. Сергеев, Е.А. Ануфриев  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

### ИССЛЕДОВАНИЕ КРАЕВЫХ ЛОКАЛЬНЫХ МОД МЕТОДОМ ВИЗУАЛИЗАЦИИ С НАПУСКОМ НЕЙТРАЛЬНОГО ГЕЛИЯ НА ТОКАМАКЕ "ГЛОБУС-М2"

Целью работы является регистрация ELM с помощью полихроматора с высокоскоростной камерой во время инжекции гелиевой струи на токамаке «Глобус-М2». Полихроматор позволяет получать изображения струи в четырех спектральных каналах, соответствующих спектральным линиям гелия. Полученные экспериментальные изображения обрабатываются с помощью алгоритма, который позволяет выделять быстрые изменения интенсивности участков изображений, которые возможно связать с ELM. Было обнаружено, что локальные увеличения интенсивности на изображениях коррелируют по времени с характерными для ELM сигналами мониторинговых диагностик токамака – D-alpha, SXR и магнитных зондов. Необходима модернизация оптической системы для улучшения временного разрешения диагностики. Планируются стендовые эксперименты для отработки процедуры идентификации ELM и также эксперименты на токамаке с высокоскоростной камерой без полихроматора. Это позволит наблюдать плазму во всем диапазоне видимого света и значительно уменьшить время экспозиции отдельных кадров, что может сделать возможным наблюдение нитевидных структур и измерять их параметры.

А.А. Матевосян<sup>1</sup>, Д.П. Барсуков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
<sup>2</sup>Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН

### ВЛИЯНИЕ ИСКРИВЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВА НА МОМЕНТ ИНЕРЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПУЛЬСАРА

Рассматривается влияние искажения магнитного поля пульсара вследствие наличия искривления пространства в метрике Шварцшильда на вклад внешнего магнитного поля звезды в её момент инерции. Зависимость данного вклада рассмотрена в двух случаях: как от массы нейтронной звезды при фиксированном значении параметра мультипольности, так и от параметра мультипольности при фиксированной массе. Также рассмотрен вклад в момент инерции нейтронной звезды её мелкомасштабного магнитного поля. Продемонстрировано, что «увеличение» напряженности мелкомасштабного магнитного поля в 10-1000 раз по

сравнению с полем плоского пространства (E. Asseo, D. Khechinashvili 2002) не приводит к значительным изменениям: его вклад в момент инерции слабо отличим от случая, в котором метрика плоская. Это связано с тем, что учет искривления пространства приводит к "увеличению" магнитного поля в 10-1000 раз при фиксировании значения мультипольного момента на бесконечности, а при фиксировании значения поля на поверхности оно просто дополнительно уменьшается в 10-1000 раз по мере удаления от звезды. Кроме того, область значительного "увеличения" мелкомасштабного поля мала и дает малый вклад при интегрировании по всему объёму.

Ю.А. Лысый<sup>1</sup>, А.В. Иванчик<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
<sup>2</sup> Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН

### НЕЙТРИННЫЕ СПЕКТРЫ, ПОЛУЧАЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ИСПАРЕНИЯ ПЕРВИЧНЫХ ЧЕРНЫХ ДЫР

Первичные черные дыры (ПЧД) – гипотетические объекты, которые могли образоваться на самых ранних стадиях существования Вселенной. За счет квантово-релятивистских эффектов, согласно механизму излучения Хокинга, черные дыры способны излучать частицы. Однако именно для ПЧД эффект Хокинга становится значительным, что делает возможным их потенциальное обнаружение. Существование ПЧД не только приводит к интересным астрофизическим и космологическим последствиям, но и дает возможность извлечь информацию об условиях в ранней Вселенной. В данной работе исследовалась потенциальная возможность обнаружения ПЧД по детектированию испущенных ими нейтрино. С помощью открытого программного кода BlackHawk рассчитывались суммарные энергетические спектры всех типов нейтрино (и антинейтрино) от ПЧД с целью установить энергетические области, в которых нейтринные потоки достигают максимально возможных значений по величине. Расчеты производились в рамках одного из механизмов образования ПЧД, который подразумевает расширенный начальный спектр их масс в ранней Вселенной в виде функции логнормального распределения. Искомые потоки нейтрино были получены для различных параметров спектра масс с учетом существующих ограничений на долю ПЧД во Вселенной. Основным результатом заключается в том, что при определенных параметрах потоки нейтрино от ПЧД становятся сравнительно велики в области низких энергий. Это означает, что возможность подтвердить существование ПЧД посредством регистрации нейтрино появится с развитием нейтринной астрофизики низких энергий.

С.П. Шараг<sup>1</sup>, В.М. Остряков<sup>1</sup>, Г.А. Ковальцов<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
<sup>2</sup> Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН,  
<sup>3</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ

### ОСОБЕННОСТИ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

В работе получено аналитическое решение стационарного уравнения Фоккера-Планка, описывающего ускорение и утечку ионов из некоторой вспышечной области на Солнце. Полагалось, что механизм ускорения – стохастическое ускорение при взаимодействии с одномерными Альвеновскими волнами в однородном магнитном поле, а утечка происходит при пространственной диффузии частиц из области ускорения (в приближении времени

выхода). Коэффициенты пространственной и импульсной диффузии при этом зависят от отношения зарядового и массового числа ионов,  $Q/A$ , а также от показателя спектра турбулентности,  $s$ . Показано, что даже в этой простой модели удастся объяснить наблюдаемое обогащение солнечных космических лучей редкими изотопами по сравнению с их распространённостью в солнечном ветре (в 1.3 – 4.4 раза) при  $s = 2.5 - 3$ . Высокий показатель спектра турбулентности, скорее всего, соответствует неустановившемуся процессу генерации этой турбулентности в области ускорения во время самой солнечной вспышки.

М.В. Тимшина<sup>1,2</sup>, Н.В. Калинин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## РАСЧЕТ УСИЛЕНИЯ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЛАЗМЕ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

В настоящее время интерес к созданию лазеров в экстремально ультрафиолетовом (ЭУФ) и мягком рентгеновском (МР) диапазонах излучения не угасает. Одним из способов получения МР и ЭУФ лазеров является использование плазмы многозарядных ионов. Такой способ хоть и не обеспечивает рекордные характеристики излучения, является конкурентоспособным для многих приложений. Моделирование является важным инструментом для исследования выходного излучения таких лазеров. Одним из этапов подобного моделирования является расчет инверсной населенности лазерных подуровней иона для плазмы с определенными характеристиками. На основании такого расчета можно оценивать эффективность усиления активной среды на определенной длине волны в однопроходном режиме. В данной работе проводится расчет для инверсной населенности подуровней никелеподобного иона золота при различных температурах и плотностях плазмы. На базе полученных данных оценивается эффективность генерации излучения в диапазоне 1-50нм для заданных условий.

А.А. Широбоков, И.Ю. Веселова, Е.Г. Кавеева, В.А. Рожанский, П.С. Кудреватых  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОРОИДАЛЬНОГО ИНДУКТИВНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ТОКИ В SOL В ГЕОМЕТРИИ ИТЭР

В будущем токамаке ИТЭР на стадии срыва тока может появляться тороидальное электрическое поле индукционного типа, обеспечиваемое напряжением на обходе вплоть до 1 кВ. Данное электрическое поле может приводить к значительному изменению профилей токов, текущих в SOL и на пластины дивертора. Изменение токов, текущих на пластины, может привести и к изменению тепловых нагрузок, которые, будучи слишком высокими, могут привести, например, к расплавлению пластин. В данной работе предлагается простая аналитическая модель поведения профилей электрического потенциала и токов, текущих в SOL и на диверторные пластины, при появлении дополнительного напряжения на обходе в геометрии ИТЭР. Приводятся данные моделирования ИТЭР с фиксированными профилями температур и концентраций при различных напряжениях обхода, позволяющих получить насыщение вольт-амперной характеристики SOL, а также результаты моделирования самосогласованного расчёта базового варианта ИТЭР.

П.С. Кудреватых, Н.В. Штырхунов, Е.Г. Кавеева,  
В.А. Рожанский, А.А. Широбоков  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ В КОДЕ SOLPS-ITER

Код SOLPS-ITER — двумерный код, описывающий пристеночную плазму, решающий систему уравнений Брагинского для сильно ионизованной плазмы. Стационарное решение такой задачи сложным образом зависит от входных параметров расчета, что затрудняет решение обратной задачи относительно поиска входных параметров, которые бы приводили к желаемому плазменному решению. Для ускорения подбора этих параметров были введены схемы с обратной связью. Их принцип работы заключается в том, что один из входных параметров подбирается итерационно, эволюционируя вместе с решением к желаемому. К примеру, существует схема по нахождению такого напуска излучающей примеси в токамаке ТРТ, чтобы обеспечить желаемое процентное содержание её на сепаратрисе. Не ограничивая общности, такая взаимосвязь может быть введена для большого количества начальных параметров задачи. Основной фокус в этой работе был сделан на связи напуска газов и различных плазменных параметров (эффективный заряд, доля примеси на сепаратрисе, полное число частиц в расчетной области и т.д).

Е.С. Мелихова<sup>1</sup>, А.К. Павлов<sup>2</sup>, Г.И. Васильев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

<sup>2</sup>Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН

## ИЗОТОПНЫЕ СЛЕДЫ АКТИВНОСТИ РАННЕГО СОЛНЦА В АТМОСФЕРАХ ПЛАНЕТ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ

Результаты миссии Кеплер показывают, что у молодых, быстро вращающихся, солнцеподобных звезд класса G наблюдаются сверхмощные вспышки с энергиями более  $5 \cdot 10^{34}$  эрг. В работе Airapetian et al. (Nature Geoscience, 2016) на основе наблюдаемой частоты событий предполагается, что в первые 700 млн лет существования Солнца в сутки происходило до 250 вспышек с энерговыделением, сопоставимым с Каррингтоновским событием. При этом атмосферу Земли бомбардировал большой поток солнечных космических лучей (СКЛ), этим объясняется парниковый эффект на ранней Земле. В нашей работе рассматривается возможность изменения изотопных отношений  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  и  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  в атмосферах планет земной группы в результате ядерных реакций в верхних слоях атмосфер в период высокой активности раннего Солнца. Протоны СКЛ производят редкие тяжелые изотопы углерода и азота в ядерных реакциях примерно в том же количестве, как и основные  $^{12}\text{C}$  и  $^{14}\text{N}$ . Это приводит к тому, что изотопные отношения  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  и  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  в атмосферах планет увеличиваются. Зная значения изотопных отношений  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  и  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  в атмосферах Земли, Марса и Венеры, а также в марсианском метеорите ALH84001, можно поставить ограничения на активность раннего Солнца. Проведенные расчёты с использованием пакета программ GEANT показали, что в атмосфере раннего Марса изотопное отношение  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  увеличивалось бы на десятки процентов, а  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  – в несколько раз. Это противоречит экспериментальным данным. Для согласования расчётных и измеренных изотопных отношений необходимо, чтобы частота мощных вспышек на раннем Солнце была меньше или энергетический спектр - более мягким.



## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗЕРКАЛЬНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ

Прямые наблюдения солнечного ветра позволяют исследовать различные типы плазменных неустойчивостей, которые могут воздействовать на частицы, рассеивая и/или ускоряя их. Достаточно часто наблюдаются зеркальные структуры, для которых характерны сравнительно большие длины волн и существенные вариации амплитуды магнитного поля. Зеркальная неустойчивость может возникать вследствие поперечной к магнитному полю анизотропии температуры  $T_{\perp} > T_{\parallel}$ . Однако расчёт инкремента показывает, что при этом гораздо быстрее развивается альфвеновская ионно-циклотронная неустойчивость. Она приводит к уменьшению температурной анизотропии, необходимой для зеркальной неустойчивости. Таким образом, возникает вопрос о природе наблюдаемых зеркальных структур. В данной работе рассмотрено распределение ионов водорода, состоящее из максвелловской основной популяции и кольцевого распределения быстрых частиц. Такие распределения могут возникать вблизи ударных волн из-за отражения части плазмы на фронте и дальнейшего вращения в магнитном поле. Из анализа дисперсионного уравнения и при помощи кинетического моделирования приходим к выводу, что в этой ситуации будет раскачиваться зеркальная неустойчивость.

В.В. Дубов, В.Д. Серов, С.П. Рошупкин

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## РЕЗОНАНСНЫЙ ПРОЦЕСС БРЕЙТА-УИЛЛЕРА В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ

Создание все более мощных импульсных лазерных систем с релятивистской интенсивностью позволяет на новом уровне подходить к решению задач управляемого термоядерного синтеза. Используя прямой и непрямой метод облучения оболочки, содержащей ДТ смесь, такие лазеры создают высокотемпературную плазму электронов и ионов. При этом электроны испытывают многократные столкновения с ионами в сильном электромагнитном поле оптического или рентгеновского диапазона частот. В результате этого в процессе обжата ДТ смеси возникает целый каскад процессов квантовой электродинамики (КЭД), протекающих в сильном электромагнитном поле. Теоретически изучен процесс резонансного рождения ультрарелятивистской электрон-позитронной пары двумя фотонами в высокотемпературной лазерной плазме (модифицированный внешним электромагнитным полем резонансный процесс Брейта-Уиллера). В условиях резонанса промежуточный виртуальный электрон (позитрон) выходит на массовую оболочку. Детально изучена резонансная кинематика процесса. Показано, что резонансный энергетический спектр конечных частиц (электрон-позитронной пары) определяется их углами вылета, а также характерными параметрами стимулированного внешнего поля процесса Брейта-Уиллера и Комpton-эффекта. Получено резонансное дифференциальное сечение процесса, которое может значительно превышать соответствующее сечение без внешнего поля. Данный процесс может существенно повлиять на протекание лазерного термоядерного синтеза.

## РЕЗОНАНСНАЯ АННИГИЛЯЦИЯ И РОЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ПАР В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ

Появление мощных импульсных лазерных систем с релятивистской интенсивностью позволяет по-новому решать задачи управляемого термоядерного синтеза. Такие лазеры создают высокотемпературную плазму электронов и ионов при облучении оболочки, содержащей дейтерий-тритиевую смесь. В силу этого, в процессе обжатия такой смеси возникает целый каскад процессов квантовой электродинамики (КЭД), протекающих в сильном электромагнитном поле. В данной работе теоретически изучен резонансный процесс аннигиляции и рождения электрон-позитронных пар в сильном электромагнитном поле. Детально изучена кинематика процесса, а также случай резонанса, когда промежуточный фотон выходит на массовую поверхность и становится реальным. В таком случае реализуются нелинейные процессы, с поглощением и испусканием большого числа фотонов волны - обратный и затем прямой стимулированный внешним полем процесс Брейта-Уилера. Для заданных параметров установки (частоты поля, энергии частиц и углов) существует минимальная граница такого количества. Получено резонансное дифференциальное сечение, которое может значительно превышать соответствующее дифференциальное сечение взаимодействия электронов с позитронами. Данный процесс может существенно повлиять на процессы симметричного обжатия и нагрев дейтерий-тритиевой смеси.

## СЕКЦИЯ «ФИЗИКА ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ»

Л.И. Гузилова<sup>1</sup>, А.С. Гращенко<sup>2</sup>, П.Н. Бутенко<sup>1</sup>, В.И. Николаев<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН  
<sup>2</sup> Институт проблем машиноведения РАН

### МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ ОКСИДА ГАЛЛИЯ

В работе исследовались слои оксида галлия трех модификаций:  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0001),  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ( $\bar{2}01$ ),  $\epsilon(\kappa)$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (001), полученные в процессе хлоридной газовой эпитаксии на сапфировые подложки базисной (0001) ориентации. Для получения данных о механических характеристиках Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> использовался метод наноиндентирования. Получены значения твердости  $H$  и модуля упругости  $E$  для метастабильных  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и  $\epsilon(\kappa)$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, которые составили 18.7 и 283.4 ГПа, и 17.5 и 256.1 ГПа соответственно. Твердость метастабильных полиморфов оказалась существенно выше, чем у термостабильного  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ( $H \sim 6.2$  ГПа для плоскости (010), и  $\sim 12.5$  ГПа для плоскости ( $\bar{2}01$ )), что объясняется более плотной упаковкой кристаллической структуры  $\alpha$ - и  $\epsilon(\kappa)$ - полиморфов Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Испытания трением продемонстрировали, что метастабильный  $\alpha$ - Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> обладает более высокими трибологическими характеристиками. Так, коэффициент износа  $\alpha$ -полиморфа ниже, чем у слоев термостабильного  $\beta$ -полиморфа ( $2.3 \cdot 10^{-4}$  мм<sup>3</sup>/Н·м) и составляет  $4.6 \cdot 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>/Н·м, что может ставить его в ряд высоко-износостойких полупроводников. Таким образом, было продемонстрировано, что метастабильный  $\alpha$ -полиморф обладает более высокими прочностными характеристиками, чем термостабильный  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

А.В. Кремлева, А.М. Смирнов  
Университет ИТМО

### КРИТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ДИСЛОКАЦИЙ НЕСООТВЕТСТВИЯ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ ГАЛЛИЯ С ОРТОРОМБИЧЕСКОЙ И ТРИГОНАЛЬНОЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

В последние годы гетероструктуры на основе оксида галлия (широкозонного полупроводника) все чаще применяются в устройствах силовой электроники, в фотодетекторах для ультрафиолетовой области спектра, в высокомошных радиочастотных устройствах, заменяя традиционные кремниевые полупроводники. Контроль механических напряжений позволяет добиться лучшего кристаллического качества в таких гетероструктурах путем снижения плотности дефектов, и, как следствие, позволяет получать гетероструктуры с прогнозируемыми физическими свойствами. Настоящее исследование посвящено созданию теоретической модели, описывающей критические условия формирования дислокаций несоответствия (ДН) в гетероструктурах  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $\kappa$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и  $\kappa$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ $\kappa$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с учетом анизотропии полиморфных форм оксида галлия. Получены зависимости критической толщины слоя Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> от кристаллографического направления роста гетероструктуры. Показано влияние особенностей кристаллического строения полиморфных форм оксида галлия на условия формирования ДН. Дано сравнение критических параметров формирования ДН в гетероструктурах на основе Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и других широкозонных полупроводниковых материалов: GaN и AlN.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00211.*

О.Д. Боровская<sup>1</sup>, Э.А. Ушанова<sup>1,2</sup>, С.Н. Петров<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> НИЦ "Курчатовский институт" - ЦНИИ КМ "Прометей" им. И.В. Горынина

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## РЕКОНСТРУКЦИЯ ПЕРВИЧНОГО АУСТЕНИТНОГО ЗЕРНА В СТАЛЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ MTEX MATLAB НА ОСНОВЕ ДАННЫХ EBSD-АНАЛИЗА

Восстановление первичного аустенитного зерна (ПАЗ) имеет большое значение при исследовании высокопрочных сталей мартенситного и мартенситно-бейнитного класса, так как размер зерен высокотемпературного аустенита перед началом  $\gamma$ - $\alpha$ -превращения оказывает существенное влияние на полученный материал: как правило, уменьшение аустенитного зерна приводит к повышению прочности и пластичности стали. В данной работе реконструкция ПАЗ была выполнена с помощью двух методов обработки данных, полученных с помощью дифракции обратно рассеянных электронов. Оба метода основаны на известных кристаллогеометрических соотношениях при  $\gamma$ - $\alpha$  превращении, которые позволяют восстановить микроструктуру ПАЗ на основе данных об ориентировках кристаллитов превращенной структуры. В первом случае выявлялись границы зерен в диапазоне разориентировок от 20° до 50°, так как вне этого интервала образуются кристаллографически обусловленные границы, принадлежащие одному исходному зерну. Второй метод был реализован с помощью функции `parentGrainReconstructor`, позволяющей восстановить исходные аустенитные зерна в пакете MTEX. Полученные на стали 09ХН4МДФ результаты выявления микроструктуры ПАЗ показали, что оба метода восстанавливают значительную долю ПАЗ в стали мартенситного класса, результаты реконструкции на основе EBSD-данных также совпадают с результатами вакуумного травления. В стали мартенситно-бейнитного класса 09ХН2МД доля восстановленных ПАЗ больше при использовании функции `parentGrainReconstructor`, чем при выявлении границ в диапазоне от 20° до 50°, наблюдается только частичное совпадение с результатами вакуумного травления.

Д.И. Садыков<sup>1,2</sup>, Т.С. Орлова<sup>1,2</sup>, А.Е. Медведев<sup>1</sup>, М.Ю. Мурашкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет ИТМО

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРЫ НА ЭФФЕКТЫ УПРОЧНЕНИЯ ОТЖИГОМ И УВЕЛИЧЕНИЯ ПЛАСТИЧНОСТИ ДЕФОРМАЦИЕЙ В АL

Алюминий и сплавы на его основе широко распространены в различных отраслях промышленности. Основным недостатком, ограничивающим их применение, является их относительно низкая прочность. Ранее было показано, что низкотемпературный отжиг ультрамелкозернистого (УМЗ) Аl, структурированного методами интенсивной пластической деформации (ИПД), может приводить к проявлению эффекта упрочнения отжигом (ЭУО), обеспечивающему дополнительное повышение прочности, при этом пластичность падает почти до хрупкого состояния. Дополнительная деформация после отжига приводит к увеличению пластичности деформацией (УПД) при сохранении высокого уровня прочности. Оба эффекта не типичны для крупнозернистого состояния. В данной работе исследовалось влияние параметров исходной УМЗ структуры на проявление и величину вышеобозначенных эффектов в УМЗ Аl, структурированном кручением под высоким давлением (КВД), равноканальным угловым прессованием (РКУП) и комбинацией РКУП и холодной прокатки (ХП). Обнаружено, что оба эффекта проявляются во всех УМЗ

структурах, но в разной степени. В КВД-структуре эффекты велики, в РКУП- и РКУП+ХП-структурах эффекты менее выражены. Показано, что ключевую роль в проявлении этих эффектов играет характер распределения дислокаций в образце, различающийся в зависимости от способа ИПД-структурирования. Впервые была получена уникальная комбинация высокой прочности (~210 МПа), высокой электропроводности (~62 %IACS), функциональной пластичности (8-10 %) и термостабильности (до 150 °С) для УМЗ А1, структурированного методом РКУП+ХП и отожжённого при 150 °С, 1ч.

*Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 22-19-00292).*

И.Д. Гесин<sup>1,2</sup>, Е.Е. Дамаскинская<sup>2</sup>, В.Л. Гиляров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

<sup>2</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

### МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ГЕТЕРОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

На основе метода дискретных элементов (DEM - Discrete element method) построена (разработана) компьютерная модель разрушения гетерогенных материалов, позволяющая исследовать эволюцию дефектной структуры (трещин) в процессе деформирования. В работе была использована модель связанных частиц (bonded particle model – BPM). Материал представляется как совокупность сферических частиц (моделирующих зерна поликристалла), соединенных связями (моделирующими межзеренные границы) в местах контактов частиц. В модели BPM зарождение трещин определяется разрывом связей между частицами, а распространение - слиянием множества разорванных связей. Целью работы является выделение различных стадий процесса разрушения гетерогенных материалов и определение их характерных особенностей. Расчеты производились в свободно распространяемом пакете программ MUSEN. Сопоставление диаграммы нагружения компьютерного и лабораторного экспериментов позволяет говорить об адекватности предложенной модели реальному процессу. Предложен способ моделирования аналога параметров (время излучения, координата, амплитуда) сигналов акустической эмиссии (АЭ), сопровождающей образование дефектов. Анализ вида функции амплитудного распределения на различных временных промежутках процесса нагружения позволил выделить два этапа. Первый характеризуется экспоненциальным распределением сигналов, его особенностью является отсутствие очага разрушения. Второму соответствует степенное распределение. На этом этапе происходит рост магистральной трещины. Анализ компьютерного эксперимента позволил выявить (определить) особенности различных этапов накопления дефектов, и предложить признак (изменение вида амплитудного распределения АЭ), указывающий на приближение катастрофического разрушения.

Д.С. Михеев<sup>1</sup>, М.Ю. Гуткин<sup>1,2,3</sup>, А.Л. Колесникова<sup>2,3</sup>, С.А. Красницкий<sup>1,2</sup>, А.Е. Романов<sup>3</sup>  
<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
<sup>2</sup> Институт проблем машиноведения РАН  
<sup>3</sup> Университет ИТМО

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ И МЕХАНИЗМЫ ЕГО РЕЛАКСАЦИИ В СФЕРИЧЕСКОЙ КОМПОЗИТНОЙ НАНОЧАСТИЦЕ С ЯДРОМ В ФОРМЕ УСЕЧЕННОГО ШАРА

В развитии современных нанотехнологий особый интерес представляют композитные наночастицы типа «ядро-оболочка». Неоднородность фазового состава таких частиц приводит к появлению остаточных упругих деформаций и напряжений, вызванных несоответствием решетки и разными коэффициентами теплового расширения компонентов. Приближенные расчеты показали, что образование на границе раздела ядра и оболочки круговой призматической дислокационной петли энергетически более выгодно, чем иные способы релаксации остаточных напряжений в наночастице типа «ядро-оболочка». В настоящей работе была решена граничная задача теории упругости для усеченного сферического включения, находящегося в осесимметричном положении в упругом шаре с теми же изотропными упругими постоянными, исследована возможность образования не одной, а нескольких взаимодействующих друг с другом дислокационных петель. Подробно проанализированы условия зарождения таких петель в зависимости от многочисленных параметров системы. Полученные результаты показывают, что оптимальное количество дислокационных петель зависит от соотношений параметров системы. При этом наиболее неустойчивыми к образованию петель дислокаций несоответствия оказываются наночастицы, в которых радиус ядра составляет 0,75 от внешнего радиуса наночастицы.

Д.А. Петров<sup>1</sup>, М.Ю. Гуткин<sup>1,2,3</sup>  
<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
<sup>2</sup> Институт проблем машиноведения РАН  
<sup>3</sup> Университет ИТМО

## УПРУГАЯ ЭНЕРГИЯ КРАЕВОЙ ДИСЛОКАЦИИ В ШАРЕ

На основе полученного ранее решения граничной задачи теории упругости о прямолинейной краевой дислокации, проходящей через центр упругого шара, найдено решение для упругой энергии такой дислокации. Для этого использованы два подхода: 1) интегрирование упругого потенциала по объему шара; 2) вычисление работы по зарождению дислокации в собственном поле напряжений. Аналитически показано, что при обычных допущениях, применяемых в рамках второго подхода, эти подходы дают разные результаты. Для согласования этих результатов требуется поправка, которая зависит от выбора пути введения дислокации в материал. Эта поправка имеет величину порядка энергии ядра дислокации, и в общем случае ее следует учитывать в модельных системах, где упругие поля дислокации экранируются свободной поверхностью тела или полями других дефектов. Для сравнения также рассмотрен случай краевой дислокации в бесконечном упругом цилиндре.

О.Ю. Курапова<sup>1,2</sup>, И.В. Смирнов<sup>1</sup>, Е.Н. Соловьёва<sup>2</sup>,  
Я.В. Конаков<sup>3</sup>, А.Г. Глухарев<sup>1,2</sup>, В.Г. Конаков<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

<sup>3</sup>Институт проблем машиноведения РАН

## МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ФАЗООБРАЗОВАНИЕ АЛЮМИНИДОВ НИКЕЛЯ С ДОБАВЛЕНИЕМ ВОССТАНОВЛЕННОГО ОКСИДА ГРАФЕНА (AL-NI-RGO)

Усиление интерметаллических соединений графеном представляется особенно перспективным из-за возможного решения проблемы хрупкости, являющейся основным недостатком алюминидов никеля. Основываясь на данном подходе, проведено изготовление композитов, полученных на основе системы Al-Ni с добавлением восстановленного оксида графена (reduced graphene oxide - rGO), а также исследование их механических свойств. Большинство полученных композитов характеризуются сильной фазовой неоднородностью. Для композитов с низким содержанием nNi можно выделить две основные фазы: чистый алюминий и Al<sub>3</sub>Ni. При достижении содержания никеля 31 mol.%, общее количество центров зарождения интерметаллических соединений уменьшается, при этом размер зерен значительно варьируется от 5 до 30 мкм. Увеличение содержания nNi до 51 mol.% приводит к общим изменениям структуры композита. Полученный материал состоит из крупных зерен интерметаллида, окруженных сферическими частицами никеля в межзеренном пространстве. Подобные структурные особенности характерны также для композитов с содержанием Ni 64 и 80 mol.%. Полученные результаты показывают, что добавление rGO усиливает фазообразование при 600 °С. Благодаря этому, а также упрочняющему эффекту rGO, некоторые из полученных композитов проявили выдающиеся механические свойства. Например, образцы 16nNi и 80nNi характеризуются значительно большими значениями максимального удлинения и прочности на разрыв по сравнению с аналогичными композитами без восстановленного оксида графена. Также композит 80nNi-rGO показал примерно в 3 раза более высокий модуль Юнга.

Ю.С. Седова

Институт проблем машиноведения РАН,

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## ПРИМЕНЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ МОДЕЛИ ВОДОРОДНОЙ ХРУПКОСТИ К ОПИСАНИЮ РАЗРУШЕНИЯ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Предложен новый подход к описанию разрушения насыщенных водородом металлических образцов. За основу метода взят классический механизм усиленной декогезии HEDE. Рассмотрено применение модифицированной модели к описанию поведения наводороженного металлического образца при испытании на трехточечный изгиб. Для реализации численного расчета использован собственный разработанный программный код, базирующийся на методе конечных объемов. Программный модуль также оснащен блоком, позволяющим учитывать пластичность материалов. При выполнении моделирования учтен экспериментально установленный скин-эффект насыщения металлов водородом.

По результатам проведения расчета были получены параметры распространения в материале трещины. Установлено, что применение модифицированной модели водородной хрупкости с учетом скин-эффекта насыщения веществом приводит к сложной картине

разрушения. По мере распространения в материале трещины происходит смена механизма разрушения с хрупкого, связанного с воздействием растворенного в материале водорода, на вязкий, что впервые объясняет наблюдаемый экспериментально, двойственный, хрупко-пластический характер разрушения при нагружении насыщенных водородом образцов.

А.С. Храмов<sup>1</sup>, С.А. Красницкий<sup>1-4</sup>, А.М. Смирнов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Университет ИТМО, <sup>2</sup>СПбПУ Петра Великого,  
<sup>3</sup>ИПМАШ РАН, <sup>4</sup>СПбГУ

## НАПРЯЖЕНИЯ НЕСООТВЕТСТВИЯ И УПРУГАЯ ЭНЕРГИЯ НАНОПРОВОЛОК ТИПА «ЯДРО-ОБОЛОЧКА» С ДИФFUЗНОЙ ГРАНИЦЕЙ РАЗДЕЛА

Большая часть современных теоретических моделей, описывающих напряженно-деформированное состояние в нанопроволоках типа «ядро-оболочка», построена в приближении резкой границы раздела между ядром и оболочкой, однако экспериментально установлено, что для границ раздела в таких нанопроволоках характерно взаимное проникновение атомов материала ядра в оболочку и наоборот. Настоящее исследование посвящено разработке модели, описывающей напряжения несоответствия и упругую энергию в нанопроволоках типа «ядро-оболочка» с диффузной границей раздела. В рамках предположения, что решеточное несоответствие между материалами ядра и оболочки определяется кусочно-линейной функцией, найдены аналитические выражения для компонентов тензора напряжений и построены их распределения по поперечному сечению такой нанопроволоки. Получены выражения для упругой энергии нанопроволоки с диффузной границей раздела. Построены зависимости упругой энергии от степени размытости диффузной границы и размера ядра нанопроволоки. Найдены параметры нанопроволоки, соответствующие минимуму упругой энергии, для разной степени размытости границы раздела.

Е.Д. Назарова, М.М. Пегливанова, В.Ю. Филин  
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

## ПОЛУЧЕНИЕ ИСТИННОЙ ДИАГРАММЫ НАГРУЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИСПЫТАНИЙ НА РАСТЯЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ

При проведении численных расчётов упругопластических тел возникает необходимость задавать истинную диаграмму нагружения материала, представляющую собой зависимость интенсивности напряжений от интенсивности деформаций. Экспериментальное определение данной зависимости, проводимое на образцах, испытываемых на растяжение, ограничено условием реализации одноосного напряженного состояния. Для решения задач, в которых присутствуют значения пластических деформаций, превышающих значение деформации равномерного удлинения, этого недостаточно. В связи с этим, в настоящей работе была предпринята попытка получить истинную диаграмму нагружения путем аппроксимации с использованием экспериментальных данных и численных методов. Численное решение, полученное на основе первого этапа итерационного процесса, верифицируется экспериментальными данными, полученными на реальном образце. На втором этапе параметры аппроксимации корректируются, и этот процесс повторяется до момента получения удовлетворительной аппроксимации.



Д.Р. Бараков<sup>1</sup>, В. Ю. Филин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

<sup>2</sup> НИЦ "Курчатовский институт" - ЦНИИ КМ "Прометей" им. И.В. Горынина

## ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ НУЛЕВОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ И ТРЕБОВАНИЙ К НЕЙ

На сегодняшний день актуальность использования хладостойких судостроительных сталей вышла на новый уровень. Планируется скорейшее развитие использования северных морских путей, строятся ледоколы новых типов с корпусами из стали повышенной хладостойкости. Для новых сталей разрабатываются требования по производству и определяются допускаемые температуры эксплуатации на основании специальных механических испытаний, в том числе по определению температуры нулевой пластичности (NDT) по ASTM E208. При испытаниях по методике NDT новых сталей наблюдается непредвиденное поведение развития трещины. Отсутствует расчетно-экспериментальное обоснование выдвигаемых требований. В связи с этим надлежит провести расчетное и экспериментальное исследования хладостойких сталей в контексте температуры нулевой пластичности. В рамках представленной работы планируется расчетное установление связи температуры NDT с критическим коэффициентом интенсивности напряжений (КИН) при торможении трещины, а также оценка результатов сравнительных механических испытаний и уточнение на базе этого требуемых значений температуры NDT. Будут рассмотрены известные критерии вязкого и хрупкого разрушения и решены некоторые методические проблемы испытания. В расчетной части планируется построение модели образца NDT в ANSYS Mechanical APDL в трёхмерной упругопластической постановке с равномерной сеткой в местоположении вершины трещины, последующая калибровка модели по величине КИН с теми же параметрами сетки, но в условиях маломасштабной текучести, и решение сериальных задач.

Ж.В. Гудкина<sup>1,2</sup>, М.Ю. Гуткин<sup>2,3,4</sup>, С.А. Красницкий<sup>2,3,4</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН,

<sup>2</sup>Университет ИТМО

<sup>3</sup>СПбПУ им. Петра Великого,

<sup>4</sup>Институт проблем машиноведения РАН

## НАПРЯЖЕНИЯ НЕСООТВЕТСТВИЯ ОТ ДИЛАТАЦИОННОГО ВКЛЮЧЕНИЯ В ВИДЕ БЕСКОНЕЧНОГО ЦИЛИНДРА С ПОПЕРЕЧНЫМ СЕЧЕНИЕМ В ФОРМЕ КОЛЬЦЕВОГО СЕКТОРА

Присутствие дефектов несоответствия в полупроводниковых наногетероструктурах может приводить к существенной деградации их функциональных свойств. Для определения критических условий зарождения дефектов несоответствия необходимо решать соответствующие граничные задачи теории упругости. В настоящей работе рассмотрена задача теории упругости о нахождении полей напряжения дилатационного включения в виде бесконечного цилиндра с поперечным сечением в форме кольцевого сектора (Ц-КС) в упругой бесконечной среде. Решение было найдено в замкнутой аналитической форме путем простого интегрирования известного решения для бесконечно тонкой дилатационной нити (т.е. прямой линии, подвергнутой трехмерной собственной дилатации) по поперечному сечению области включения Ц-КС. Получены карты всех ненулевых компонент напряжения области включения Ц-КС, которые позволяют увидеть новые интересные особенности

распределения напряжений внутри и вне включения. А также предложены наиболее вероятные механизмы их релаксации посредством формирования различных конфигураций дефектов.

М.К. Ланцева, С.А. Филиппов  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПАКЕТА ПРОГРАММ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПЛАСТИЧНОСТИ КРИСТАЛЛОВ DAMASK ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕКСТУРЫ ГЦК-МЕТАЛЛА

DAMASK (Dusseldorf Advanced Material Simulation Kit) – свободно распространяемый пакет с модульной структурой для моделирования поведения материалов. Изучение микромеханических явлений может подразумевать в том числе учёт фазовых превращений, нагрева, развития потенциальных повреждений. Пакет DAMASK способен решать подобные мультифизические задачи с использованием различных моделей и подходов к гомогенизации. В частности, он предоставляет функционал для получения пластического отклика кристаллов при различных начальных ориентировках. Пре- и пост-процессинг DAMASK реализуются с помощью скриптов на языке Python. На входе программе можно задавать свойства материала, геометрические характеристики, программу нагружения, а на выходе она возвращает напряжения и деформации. Расчёт производится на основе метода конечных элементов встроенным решателем. При этом, в отличие от традиционного использования метода КЭ, DAMASK позволяет предсказывать происходящие в процессе пластической деформации изменения микроструктуры и кристаллической структуры. В представляемой работе пакет DAMASK был использован для предсказания особенностей кристаллографической текстуры, формирующейся в меди в процессе пластической деформации.

С.А. Красницкий<sup>1-4</sup>, А.М. Смирнов<sup>1</sup>, М.Ю. Гуткин<sup>1-3</sup>  
<sup>1</sup>Университет ИТМО  
<sup>2</sup>СПбПУ им. Петра Великого  
<sup>3</sup>Институт проблем машиноведения РАН  
<sup>4</sup>СПбГУ

## УПРУГАЯ ЭНЕРГИЯ ПОЛИГОНАЛЬНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕ

Кристаллические композитные нанопроволоки типа «ядро-оболочка» являются типичными представителями гетероструктур пониженной размерности и благодаря своим уникальным функциональным свойствам находят широкое применение при производстве современных оптоэлектронных устройств. Напряжения несоответствия, вызванные рассогласованием кристаллических решеток материалов ядра и оболочки, сильно зависят от эффектов концентрации напряжений, связанных с формой внешней и межфазной границ. Действительно, большинство таких нанопроволок имеют фасетированную форму многоугольных призм различных поперечных сечений: треугольного, прямоугольного, шестиугольного и др. В этом случае двугранные углы ядра и оболочки выступают в роли концентраторов напряжений и во многом определяют процесс релаксации напряжений несоответствий, а именно – зарождение и развитие дислокаций несоответствия. В данной работе нанопроволока типа «ядро-оболочка» рассматривается как цилиндрическая матрица,

содержащая полигональное дилатационное включение. В рамках такого подхода определены аналитические выражения упругой энергии в таких структурах. Показано, что упругие энергии включений треугольной и прямоугольной формы сильно отличаются от упругой энергии включения цилиндрической формы.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-19-00617.*

В.Е. Бакшеев, О.И. Заяц  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОФИЛАКТИКИ НА ПОВЕДЕНИЕ ПРИОРИТЕТНЫХ СИСТЕМ ОБСЛУЖИВАНИЯ, СНАБЖЕННЫХ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫМ ВЫТАЛКИВАЮЩИМ МЕХАНИЗМОМ**

Работа посвящена детальному изучению одноканальной приоритетной СМО конечной емкости, которая согласно обозначениям Г.П.Башарина, с уточнением М.Доши, относится к классу  $\overline{M}_2/M/1/k/f_2^2/V_M$ . Данная система характеризуется: одним каналом обслуживания, емкостью  $k < \infty$ , абсолютным приоритетом, детерминированным выталкивающим механизмом, а также возможностью многократной профилактики. Система уравнений Колмогорова, описывающая финальные вероятности, здесь имеет высокий порядок, пропорциональный  $k^2$ , и не поддается аналитическому решению. При практически интересных значениях  $k$  непосредственное численное решение указанной системы также затруднительно. В настоящей работе был применен следующий гибридный подход: вначале при помощи метода производящих функций все финальные вероятности были выражены через  $k$  так называемых «опорных» вероятностей, а затем «укороченная» система для последних была решена численно. Этот прием позволил не только найти все интересующие вероятностные характеристики системы, но и еще раз подтвердить высокую эффективность метода производящих функций при решении подобного рода задачах.

В.В. Давыдов<sup>1,2,3</sup>, Р.В. Давыдов<sup>1,3</sup>, А.А. Гольдберг<sup>1</sup>, К.Д. Кочетков<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им.  
проф. М. А. Бонч-Бруевича  
<sup>3</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ КЮВЕТЕ АНДЕРСОНА**

В современном мире при проведении научных исследований, промышленном производстве, экологическом мониторинге важным элементом становится надежный экспресс-контроль. Применение экспресс-контроля необходимо для получения достоверной информации о состоянии среды в месте проведения пробы для принятия адекватного решения, в дальнейшем необходимо получить подтверждение выявленного отклонения в пробе на приборах высокого разрешения. Проведенные измерения в экспресс-режиме не должны внести в пробу среды необратимых изменений, которые изменят её состав и физическую структуру. С учетом этих условий количество методов и приборов для экспресс-контроля ограничено. Одним из приборов, который позволяет проводить экспресс-контроль состояния жидких сред с высокой точностью в месте взятия пробы, является рефрактометр. Высокие требования к проведению экспериментов требуют измерений показателя преломления жидкой среды с высокой точностью в большом диапазоне изменения значений. Дифференциальный рефрактометр на основе кюветы Андерсона, для измерений в которой используется эталонная жидкость, один из возможных вариантов решения данных задач экспресс-контроля. В данном исследовании

рассматривается конструкция дифференциальной кюветы Андерсона, строится траектория движения максимума диаграммы направленности лазерного излучения в кювете, а также ее пределами (до сенсора фотодиодной линейки, на котором происходит регистрация). Для проведения расчетов применяется новая методика исследования характера распространения лазерного излучения в дифференциальной кювете Андерсона, на ее основе выводится уравнение для исследования изменения характера распространения лазерного излучения от различных параметров системы.

Д.Г.Кожевникова<sup>1</sup>, А.Н. Баженов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

<sup>2</sup>Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН

## ПРИМЕНЕНИЕ ТВИННЫХ АРИФМЕТИК ДЛЯ АНАЛИЗА ИЗОТОПНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ

Твинные арифметики — новый метод представления данных с интервальной неопределённостью. Их важным достоинством является возможность одновременного описания внутренних и внешних оценок экспериментальных данных, а также относительная простота реализации арифметик и различных способов упорядочения твинов, как линейного, так и по включению. В последнее время атомные веса в таблице Менделеева начали выражать в интервальной форме. При этом имеется большой объём геологической и биологической информации по распределениям изотопов. Целью работы является построение и начальное применение технологической цепочки обработки данных изотопных распределений в природе на основе методов и вычислительных инструментов интервального анализа для вычислений с распределениями изотопов. В работе представлен способ вычисления масс базовых биогенных органических веществ, относящихся к разным типам фотосинтеза (С3, С4, С5) на основе изотопных данных по водороду и углероду.

А.О. Колосков<sup>1</sup>, А.А. Елисеев<sup>2</sup>, С.В. Лупуляк<sup>2</sup>, Ю.К. Шиндер<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

<sup>2</sup>Научно-исследовательская лаборатория виртуально-имитационного моделирования,  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## УЧЕТ ЯВЛЕНИЯ АДГЕЗИИ ПРИ РЕШЕНИИ КОНТАКТНОЙ ЗАДАЧИ

В работе излагается подход к моделированию явления адгезии при решении динамических контактных задач теории упругости. В первой части работы рассматривается используемая математическая модель адгезии (эволюционная интерфейсная модель Фремо) и вопросы ее встраивания в модель контактного взаимодействия вводятся адгезивные параметры, описывается общая организация вычислений на основе методов квадратичного программирования и разделенного подхода. Во второй части рассматриваются два показательных примера - одномерный колебательный процесс с липким препятствием и одномерный колебательный процесс двух тел с липким контактом, - формулируются их дискретные постановки и основанные на общем подходе алгоритмы их решения. Далее описываются различные способы временной дискретизации, сравниваются возможности метода конечных разностей и обобщенного  $\alpha$ -метода. В завершение анализируются результаты численного эксперимента по исследованию поведения

кинематических и динамических характеристик рассматриваемых систем во времени и их зависимости от параметров адгезии.

В.А. Михальчук, К.Н. Козлов  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ УЧЕТА ГЕОГРАФИЧЕСКИХ И ГЕНЕТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ФЕНОТИПИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ РАСТЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ДЕКАРТОВА ГЕНЕТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

В последнее время в биоинформатике все чаще применяют методы машинного обучения к анализу биологических данных, например, используя генетическое программирование для решения задач символьной регрессии. Предсказание фенотипа растения по климату и генотипу – очень важная задача современной агрономии. Такие прогнозы помогают селекционерам выводить новые сорта, обладающие нужными им качествами. Основным методом таких предсказаний – регрессионный анализ. Символьная регрессия – перспективный вид регрессионного анализа, позволяющий получать более качественные модели путем увеличения пространства поиска. Для решения задач символьной регрессии в данной работе используется декартово генетическое программирование – перспективная форма генетического программирования. Для прогнозирования фенотипа по климатическим данным важно иметь возможность использовать в регрессионной функции константы, ограничивающие предикторы, например температуру. Однако, в распространенных реализациях этого метода либо отсутствует поддержка констант вообще, либо эти константы реализованы в виде «эфемерных констант», применение которых для некоторых задач затруднительно. В настоящей работе предложен и реализован ряд существенных изменений в этот метод, позволяющих значительно улучшить качество предсказания, в частности была решена проблема учета констант в декартовом генетическом программировании путем введения новых элементарных операций. Улучшение предсказания было достигнуто путем применения одного из вариантов бустинга – объединением последовательно получаемых решений, построенными с помощью обучения на невязках. Данный подход был применен для прогнозирования некоторых фенотипических признаков, таких как, например, время цветения, важного сельскохозяйственного растения нут.

Д.Д. Пестряков<sup>1</sup>, А.Н. Баженов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

<sup>2</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

## РЕГУЛЯРИЗАЦИЯ ЗАДАЧ В АНАЛИЗЕ ДАННЫХ С ИНТЕРВАЛЬНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬЮ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ СОВМЕЩНОСТИ В СИЛЬНОМ СМЫСЛЕ

В ходе работы рассмотрены три подхода к регуляризации данных для задачи построения линейной регрессии, удовлетворяющей условиям сильной функциональной зависимости. А именно: решение задачи линейного программирования для нахождения оптимальных весов растяжения выходных данных и параметров линейной регрессии с различными целевыми функциями; решение задачи квадратичного программирования для нахождения оптимальных весов растяжения входных и выходных данных для приведения

данных к совместности с линейной зависимостью, построенной методом наименьших квадратов для центров брусов; решение задачи линейного программирования для нахождения оптимальных весов растяжения выходных данных и параметров линейной регрессии, при условии, что искомая прямая совместна с интервальной модой. Проведен сравнительный анализ полученных результатов, включая значений функционала качества и предсказаний моделей в заранее выбранных точках. Предложен и реализован новый метод построения регрессии по данным с неопределенностями во входных переменных: брусы расщепляются на пары интервалов, по которым проводятся регрессии. После нахождения политопов множеств решений из них формируются внутренние и внешние оценки.

С.В. Божокин, А.А. Рябоконе, Т.Д. Шохин  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

### ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ГАУССОВСКИХ ПИКОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА

Турбулентность сердечного ритма (HRT - Heart Rate Turbulence) – краткосрочные флуктуации длительностей RR-интервалов ритма сердца, вызванных единичными преждевременными сердечными сокращениями – экстрасистолами, связанными с аритмией сердца или фибрилляциями желудочков и предсердий. Стандартный способ диагностики - мониторингирование ЭКГ по Холтеру для выявления показателей HRT: начало турбулентности (TO) и наклон турбулентности (TS). Однако при использовании данных показателей не учитываются продолжительности экстрасистолы и компенсаторной паузы. Цель исследования - применить теорию вейвлетов для нахождения количественных параметров описания нестационарной последовательности гауссовских пиков, учитывающих нарушение периодичности между пиками, на примере моделирования турбулентности сердечного ритма. Для описания сердечного ритма с HRT предлагается модель нестационарного сигнала, представляющая собой суперпозицию отдельных гауссовских пиков одинаковой амплитуды, центры которых на временной шкале совпадают с истинными моментами ударов сердца. Для такой модели с сильным нарушением периодичности следования гауссовских пиков получено аналитическое выражение для непрерывного вейвлетного преобразования. С помощью непрерывного вейвлетного преобразования вычислена функция  $F_{max}(t)$ , описывающая поведение локальной частоты во всем промежутке времени, содержащем экстрасистолу и компенсаторную паузу. Усредненные по времени характеристики  $F_{max}(t)$  сравниваются с такими традиционными параметрами HRT, как TO и TS. Предлагаемый метод расчета  $F_{max}(t)$  может быть применен для анализа нестационарной ритмограммы для пациентов, страдающих аритмиями сердца, сердечной недостаточностью или фибрилляцией желудочков сердца и предсердий.

## АВТОПРОГРАММИРОВАНИЕ И АННОТИРОВАНИЕ СЦЕНАРИЕВ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В БИОИНФОРМАТИКЕ

Применение методов обработки изображений в биоинформатике приобретает все большую значимость в современных исследованиях. Однако создание пользовательских сценариев обработки изображений часто является трудоемкой и сложной задачей, требующей значительных знаний в области программирования и анализа изображений. Цель данной работы заключается в разработке системы, которая сможет на основе представления сценария в виде графа автоматически генерировать программный код для задач обработки биологических изображений, предоставляя поясняющие аннотации, чтобы помочь пользователям понять сгенерированный код, а также использовать их в научных работах. Программа автоматически генерирует исполняемый файл на языке Python, основываясь на сценарии, представленном в виде графа операторов. Этот файл содержит последовательность операторов обработки изображений, которая выполняется параллельно. Вместе с этим генерируется текстовый файл, описывающий последовательность применяемых операторов и их особенности. При наличии доступа в Интернет, данное описание подается на вход генеративной предобученной модели GPT-3 для формирования связного текста, который может использоваться в научных публикациях. Предлагаемая система обладает потенциалом для значительного повышения эффективности и точности задач обработки изображений в биоинформатике за счет сокращения требуемых ручных усилий.

Т.О. Яворук<sup>1</sup>, А.Н. Баженов<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

<sup>3</sup>Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН

## ИНТЕРВАЛЬНАЯ АППРОКСИМАЦИЯ СЕМЕЙСТВА ФУНКЦИЙ КЛАССА СИГМОИД

Переходные процессы возникают в различных прикладных областях. Часто данные, их описывающие, имеют неопределённость, возможно сравнимую со значениями самих параметров. Для таких задач требуется как можно более точная оценка параметров описывающей кривой. Работа посвящена исследованию и сравнению подходов к аппроксимации переходных процессов, относящихся к семейству функций класса сигмоид, с использованием методов интервального анализа. Первый рассматриваемый подход основан на сведении задачи к линейному виду: в этом случае решались подзадачи определения множества точек, относящихся к переходному и стационарным состояниям. Второй подход основан на оценке параметров кривизны и амплитуды сеточным интервальным методом Кравчика и его модификацией – бицентрированным методом. Для применения бицентрированных оценок производится выбор центров разложения по теореме Бауманна. Для частных решений производится взятие минимума по включению, которое даёт точное решение в случае монотонности ограничений по всем переменным, и оптимальное в общем случае.



## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТВИННЫХ АРИФМЕТИК В АНАЛИЗЕ ДАННЫХ С ИНТЕРВАЛЬНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬЮ

Интервальный анализ — это классический инструмент, который используется для гарантированного решения нелинейных уравнений. Показано, что его можно использовать для построения надежных нелинейных оценок состояния динамических систем. Развитие методов и инструментов интервального анализа привело к необходимости новых структур данных. Эти структуры нужны для описания математических объектов на основе интервалов, но более гибких, позволяющих описывать различные виды неопределённости. Французские математики разрабатывают подход к обращению функций от твинов и решение систем уравнений. Алгоритм SIVIA подходит для решения нелинейных зависимых задач восстановления с интервальными неопределенностями во входных так и выходных переменных. Кроме того, она может учитывать различные типы совместности параметров с данными. Таким образом, в настоящее время весьма востребованы исследования задач с твинами, поиски новых постановок. В работе представлено решения нахождение набора множеств решения для ориентации робота по набору маяков, координаты которых известны с интервальной неопределенностью. Построены так называемые “светлая” (имеется связь со всеми маяками) и “темная” (связь отсутствует) области, а также область “полутени”, в которой связь ненадежна. Первая область соответствует допусковому множеству решения, полутень – объединённому множеству решения в терминологии линейной задачи о допусках.

Д. В. Серeda

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

### ЗАДАЧА ПРЕСЛЕДОВАНИЯ, ЕЕ ОБОБЩЕНИЯ И ПРИЛОЖЕНИЯ

Рассматривается следующая задача: пусть точка  $A$  равномерно движется по некоторой заданной кривой. Требуется найти траекторию  $\gamma$  равномерного движения точки  $P$  такую, что касательная, проведённая к траектории  $\gamma$  в любой момент движения, проходила бы через соответствующее этому моменту положение точки  $A$ . Данная задача – частный случай задачи преследования. В данной работе анализируется поставленная задача, формулируется следующее её обобщение: пусть  $L(t): \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$  – функция времени, задающая положение «жертвы» в пространстве;  $F(t): \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$  – функция времени, задающая положение «хищника» в пространстве;  $|L'(t)| = V = const$ ,  $|F'(t)| = W = const$ ;  $V < W$ . Для известной функции  $L(t)$  требуется найти такую функцию  $F(t)$ , что  $F(0) = F_0$ , а первый положительный корень уравнения  $L(t) = F(t)$  принимает наименьшее возможное значение. В работе также рассматривается связь задачи преследования с теорией игр. Автором выведены дифференциальные уравнения для нескольких видов стратегии преследования («тактика выжидания», «постоянное преследование», «развитие на упреждение»), приведен пример решения и численного анализа решения одного из них. Автор доказывает, что стратегия «развитие на упреждение» является оптимальной.

С.А. Назарова

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

### ПРИМЕНЕНИЕ ФРАКТАЛОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПАССИВНОЙ СКАЛЯРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Целью работы является исследование поведения пассивной скалярной турбулентности в газе под действием заданного переменного поля скоростей и с учетом эффекта диффузии. В работе проанализировано определение фрактала, наглядно изложен математический смысл понятия. Проанализированы свойства фракталов с целью применения при моделировании турбулентности. Дан краткий обзор фактов, позволяющих применять фракталы в гидроаэродинамике: фракталы естественным образом возникают при моделировании нелинейных процессов, таких как турбулентное течение жидкости, пламя, облака и т.п.; турбулентность включает в себя множество фрактальных аспектов, например, перемежаемость, рассеяние и самоподобие. В основной части работы проведены аналогии между моделями турбулентности и фракталами. Автором выдвинута гипотеза о прогнозировании поведения пассивной скалярной турбулентности, основанная на фрактальной геометрии и законе Бэтчелора, связывающем энергию турбулентного потока с волновым числом; а именно, указаны границы значений показателя степени волнового числа в законе Бэтчелора. Данная гипотеза доказана автором построением модели, рассматривающей турбулентность как фрактал. В качестве фрактала выбрана кривая Госпера – вариант острова Коха. Вычисление размерности фрактала дает возможность получить аналитическое приближение закона Бэтчелора, оно хорошо согласуется с экспериментальными данными.

## ПРОСТЕЙШЕЕ ШУМОПОДАВЛЕНИЕ ЗВУКА МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

В данной работе рассматривается задача определения шума при воспроизведении музыкального файла с помощью мониторов и последующей очистки данного фрагмента с помощью спектрально-частотного анализа. Разложение аккордов на составляющие их ноты позволяет определить амплитудно-фазовую частотную характеристику отдельного сигнала и в дальнейшем построить спектр сигналов. В качестве примера рассмотрен сигнал, имеющий шумовую гармонику с частотой  $> 1000$  Гц. Алгоритм предполагает построение спектра сигнала с помощью прямого преобразования Фурье, нахождение с помощью спектра гармоник, не являющихся чистыми тонами и превышающими по частоте заданный показатель. Результаты, полученные в представленной работе, позволили определить, что рассмотренный сигнал состоит из нот трезвучия си-бемоль мажор с басовыми ступенями. Так как шумоподавление является достаточно сложным процессом, следует учитывать как высокочастотные шумы, так и различные случайные шумы, а также наличие белого шума. Предложенная методика в дальнейшем заключается в создании аппарата шумоподавления звуковых файлов методом удаления всех тонов, не являющиеся чистыми музыкальными нотами в разных частотных диапазонах, что в совокупности с уже известными методами фильтрации позволит улучшить качество воспроизведения музыкальной композиции.

Ю.В. Елесина, Б.С. Тёрушкин  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## НАХОЖДЕНИЕ НАИБОЛЬШЕГО ПРОИЗВЕДЕНИЯ НАТУРАЛЬНЫХ ЧИСЕЛ, СУММА КОТОРЫХ РАВНА С

В работе приведено решение задачи о разбиении числа  $S$  на натуральные слагаемые так, что  $S = a_1 + a_2 + \dots + a_n$ , где  $a_1 \cdot a_2 \cdot \dots \cdot a_n$  наибольшее. Данная задача является обобщением олимпиадной задачи, которая была предложена в 1976 года на XVIII Международной математической олимпиаде: «Определить наибольшее число, являющееся произведением нескольких натуральных чисел, сумма которых равна 1976». При рассмотрении данной задачи на небольших числах была обнаружена закономерность, которая позволила выдвинуть гипотезу, впоследствии доказанную - число нужно разложить на максимальное количество слагаемых по 3 и одно или два слагаемых по 2. В результате получено следующее решение: 1) если  $S$  кратно 3, то  $3^{S/3}$ ; 2) если  $S$  при делении на 3 имеет остаток 1, то  $2 \cdot 2 \cdot 3^{(S-4)/3}$ ; 3) если  $S$  при делении на 3 имеет остаток 2, то  $2 \cdot 3^{(S-2)/3}$ .

У.В. Терентьева, В.В. Гарбарук  
Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АККУМУЛЯТОРА

Бесперебойность электропитания различного микроэлектронного оборудования необходима для обеспечения безопасности движения поездов. При пропадании внешнего энергоснабжения переход с основного питания на резервное обеспечивают аккумуляторные

батареи железнодорожной станции [1]. Одним из важнейших показателей готовности аккумулятора к работе является его уровень заряженности, который постоянно проверяется в процессе технического обслуживания. Известно, что напряжение аккумулятора меняется в зависимости от степени его заряженности. Для различных температур  $t$  известны эмпирические величины напряжения  $H$  аккумуляторной батареи, по которым определяется процент  $P$  степени ее заряженности после специального теста. При аппроксимации точек поверхности функцией двух переменных  $H = f(P, t)$  сначала были рассмотрены различные виды зависимости  $H = f(P, c) = g(P)$  при различных значениях  $t = c$  и функции  $H = f(c, t) = h(t)$  при постоянных значениях  $H = c$ . По наибольшему коэффициенту детерминации  $R^2$  были выбраны степенная функция  $g(P) = a \cdot P^b$  и  $h(t) = c \cdot e^{kt}$ . Искомая функция двух переменных была представлена в виде произведения степенной и экспоненциальной функций  $H = d \cdot P^b \cdot e^{kt}$ , т.к. при фиксации одной из переменных  $P$  или  $t$  характер изменения величины  $H$  соответствует выбранной ранее функции одной переменной. Логарифм данной функции  $\ln d + b \cdot \ln P + kt$  линеен относительно аргументов  $\ln P$  и  $t$ , что дает возможность построения линейного регрессионного уравнения методом наименьших квадратов. Максимальная относительная погрешность прогноза составляет всего 0,54%. Хорошие результаты аппроксимации дают возможность прогнозировать величину напряжения аккумуляторной батареи  $H$  в различных диапазонах изменения  $P$  и  $t$ .

В.А. Рожицын, И.А. Ромашов, Б.С. Тёрушкин, С.Ф. Неробова  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## ПОЛЯ ГАЛУА И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В КРИПТОГРАФИИ

В данной работе рассмотрен способ кодирования информации с использованием Полей Галуа. Этот метод позволяет восстанавливать исходный файл, даже если при его передаче были допущены ошибки. Анализируется возможное количество ошибок и необходимое количество избыточных бит информации для восстановления исходного файла.

Целью настоящей работы является исследование применения Полей Галуа для кодирования информации и последующий его анализ.

В результате работы была создана программа на языке программирования Python, реализующая этот способ кодирования информации, и демонстрационные примеры: кодирование информации, передача файла с внедрением ошибок, декодирование информации с исправлением ошибок.

Для возможности последующего использования результатов работы, весь функционал кодирования и декодирования информации был реализован в виде класса – шаблона, описывающего состояние и поведение объектов, которые создаются на его основе. Следовательно, его можно использовать при создании других программ, для которых допускается возможность появления ошибок при передаче информации.

## **СЕКЦИЯ «МЕХАНИКА И ПРОЦЕССЫ УПРАВЛЕНИЯ»**

Д.В. Авдонюшкин, А.И. Матвеева, А.Д. Новокшенов  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

### **БЕЗЫТЕРАЦИОННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ С ПОМОЩЬЮ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

В данной работе изложен способ построения решения задачи топологической оптимизации (максимизация жесткости при ограничении на объем) с применением однослойной нейронной сети. Подобный подход позволяет избавиться от конечно-элементных расчетов, тем самым значительно ускоряя топологическую оптимизацию. В качестве примера для демонстрации работоспособности подхода используется жесткозакрепленная пластина, нагруженная силой с правого края. Для полученной нейронной сети входными данными являлась вертикальная координата точки приложения силы, а в качестве выходных данных возвращается для каждого элемента вероятность его нахождения в оптимизированной конструкции. Результаты, полученные с помощью этой модели, сравниваются с топологией, полученной с помощью нейросети, которая использует стандартные функции активации, и тренировочной выборкой, полученной с помощью метода скользящих асимптот. Для рассмотренного подхода возможно применение на другие типы нагрузок, граничных условий и целевых функций.

Я.К. Астапов, А.В. Лукин  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

### **ИССЛЕДОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ ВОЛН ЛЭМБА В ОДНОРОДНОМ ИЗОТРОПНОМ УПРУГОМ СЛОЕ**

В настоящий момент идет стремительный рост востребованности технологий 5G поколения, одной из отличительных черт которых является поддержка бесперебойной работы на сверхвысоких частотах ( $> 6$  ГГц). Перспективным способом реализации такой работы является использование волн Лэмба, возбуждаемых в упругом слое. Целью настоящей работы является исследование стационарных волновых процессов в однородном изотропном упругом слое. В результате работы были построены дисперсионные кривые на основе точного аналитического решения для случаев симметричных и антисимметричных волн Лэмба в тонких пластинах и с использованием численного аппарата теории продолжения решений нелинейных уравнений. Также были найдены поля перемещений первых нескольких форм. Предложенная методика может быть в дальнейшем применена при исследовании возбуждения волн Лэмба в пьезоэластичной среде.

Е.А. Буклаков, Ру Жан-Ноэль, Е.Ф. Грекова  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН В КОГЕЗИОННЫХ ПОРОШКАХ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Доклад посвящен разработке эффективных алгоритмов, программного обеспечения и результатам моделирования двумерного варианта эксперимента Ruiz Botello, Tournat, Castellanos, 2016, Ultrasonics на основе метода дискретных элементов. С помощью программы, написанной на языке Fortran, имитируется упаковка слабо когезионного порошка, поджатого с четырех сторон, и рассматривается распространение волн в нем при задании граничных условий на левой стенке упаковки. Распространение волн происходит за малый отрезок времени, около нелинейного равновесия. Визуализация результатов эксперимента производится с помощью программных средств Python. В эксперименте выявлено, что упаковка имеет слабую дисперсию при распространении продольной волны и сильную при распространении поперечной. Поперечные волны имеют нетипичное для классической теории распространение, волна сдвига является одновременно трансляционной и поворотной.

А.Н. Гордеев, А.В. Савиковский, О.В. Антонова, А.А. Михайлов  
Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ ANSYS И PANTOCRATOR ПРИ ВЫЧИСЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

В работе рассматриваются методы вычисления параметров линейной механики разрушения на примере пластины с центральной прямолинейной трещиной, находящейся в условиях смешанных мод при жестком нагружении. В качестве исследуемых параметров механики разрушения рассматриваются компоненты векторного  $J$ -интеграла ( $J_1$  и  $J_2$ ). Представлены результаты сравнительного анализа численного определения компонент векторного  $J$ -интеграла в двух конечно-элементных программных комплексах: ANSYS и PANTOCRATOR. При проведении сравнения результатов программных комплексов рассматривается метод эквивалентного объемного интегрирования (ЭОИ) в программе PANTOCRATOR, метод интеграла взаимодействия (встроенный метод CINT) и метод прямого вычисления  $J$ -интеграла, реализованный с помощью пользовательского макроса для программного комплекса ANSYS. Результаты вычислений сравниваются с аналитическим решением. Анализируется инвариантность компонент векторного  $J$ -интеграла для различных размеров и форм контура интегрирования, влияние типов конечных элементов, учета дополнительного слагаемого по берегам трещины в методе ЭОИ и методе прямого вычисления на инвариантность и значения компонент вектора  $J$ -интеграла.

## КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ ТИТАНОВОГО СПЛАВА Ti-6Al-4V

Работа посвящена передовым цифровым технологиям в области персонализированного эндопротезирования, не теряющего актуальности на сегодняшний день. Объектом исследования является трехмерная ячейка периодичности пористой структуры импланта с армирующим волокном из биосовместимого титанового сплава Ti-6Al-4V и связующим в виде кортикального костного слоя или кровяного сгустка. Рассматриваются различные содержание волокна 20-40% в окрестности, соответствующей наилучшей остеоинтеграции. Также рассматриваются различные типы ячейки периодичности, а именно: ГЦК, ОЦК, ячейка алмаза. Основной задачей работы является многовариантное конечно-элементное моделирование, определение и исследование эффективных коэффициентов линейного температурного расширения и эффективных коэффициентов теплопроводности трехмерной ячейки периодичности. Практическая значимость работы состоит в возможности применения эффективных тепловых свойств для решения тепловых и термонапряженных инженерных задач макроуровня, для которых учет микроструктуры не представляется возможным.

М.В. Иванов<sup>1</sup>, А.А. Михайлов<sup>1</sup>, О.В. Антонова<sup>1</sup>, В.А. Кузьмин<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
<sup>2</sup>Проект «Тетрал», Санкт-Петербург

## АНАЛИЗ УПРУГОГО ПОВЕДЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОИСТЫХ ПАНЕЛЕЙ С ТЕТРАЭДРАЛЬНЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ

Композиционный материал, обладая сложной микроструктурой, представляет собой комбинацию компонентов с различными свойствами и структурой. В механике сплошных сред композиционный материал представляет собой неоднородную изотропную среду и при численном моделировании на макроуровне часто рассматривается как однородный материал с эффективными анизотропными свойствами. Показано, что слоистые панели с тетраэдральным наполнителем можно рассматривать как конструктивно анизотропный композиционный разносопротивляющийся материал. Для того чтобы аккуратно учесть эти особенности при численном моделировании конструкций, состоящих из такого рода материалов, обоснованным является применение подходов, заложенных в основу разномодульной теории упругости. Исследование направлено на определение эффективных упругих характеристик, необходимых для описания напряженно-деформированного состояния слоистых панелей с тетраэдральным наполнителем на макроуровне.

## СРАВНЕНИЕ ДВУХ СИСТЕМ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ И АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКИ УСИЛЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРВИЧНЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ ВЫСОКОДОБРОТНОГО МЭМС-ГИРОСКОПА

В настоящей работе проводится исследование двух реализаций систем фазовой автоподстройки частоты, работающих совместно с системой автоматической регулировки усиления для управления первичными колебаниями высокодобротных микромеханических резонаторов на примере гироскопа RR-типа. Для того чтобы с высокой точностью измерять угловую скорость объекта, необходимо обеспечить стабильность амплитуды и частоты первичных колебаний чувствительного элемента. Автоматическая регулировка усиления (АРУ) необходима для поддержания амплитуды первичных колебаний на изначально заданном уровне. Задачей системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) является поддержание частоты генератора, управляемого напряжением, на значении, равном резонансной частоте первичных колебаний. Рассмотрена ось первичных колебаний чувствительного элемента в контурах управления, к математической модели которой применяется метод осреднения для получения эволюции движения в медленных переменных для верификации прямого численного моделирования. Получены условия устойчивости стационарного режима в линейном приближении. Рассмотрены вопросы точности различных методов численного решения дифференциальных уравнений в Matlab. Выходным сигналом фазового детектора, который является составной частью петли ФАПЧ, является сигнал с удвоенной частотой, что приводит к появлению высокочастотных колебаний, которые нежелательны в системе управления. Чтобы избежать этого недостатка, предложена альтернативная реализация схемы ФАПЧ, которая позволяет убрать сигнал двойной частоты на выходе фазового детектора и понизить порядок системы. Представлены выходные характеристики систем управления, а также динамика чувствительного элемента по первичной оси движения. Проведено сравнение двух систем ФАПЧ по таким характеристикам как: быстродействие, область затягивания в рабочий режим, а также устойчивость к изменению параметров системы управления.

А.А. Ильин  
Санкт-Петербургский государственный университет

## О МЕХАНОХИМИЧЕСКОЙ КОРРОЗИИ ТОРОИДАЛЬНЫХ ОБОЛОЧЕК ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНУТРЕННЕГО ДАВЛЕНИЯ

В нефтегазовой и аэрокосмической промышленности получили широкое распространение тороидальные оболочки. Режимы работы этих элементов конструкций предусматривают одновременное воздействие на них механических нагрузок и агрессивных сред, которое может стать причиной механохимической коррозии. В настоящей работе исследуется долговечность тороидальных оболочек, подверженных действию внутреннего давления и механохимической коррозии. Задача решается с использованием метода конечных элементов в двухмерной осесимметричной постановке. Изменение внутренней поверхности оболочки моделируется на основе линейной зависимости скорости коррозии от механических напряжений. Анализируются зависимости скорости роста напряжений со временем от величины приложенного давления и геометрических размеров оболочки: толщины стенки и радиуса окружности тора. Результаты серии конечно-элементных



расчетов показали, что долговечность тороидальной оболочки определяется напряженным состоянием стенки в окрестности точки, наиболее близко расположенной к оси вращения тора. Определено, что с уменьшением радиуса окружности тора скорость роста напряжений увеличивается. Показано, что при фиксированном начальном коэффициенте запаса прочности большей долговечностью обладает тороидальная оболочка, нагруженная большим давлением (при прочих равных параметрах).

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 21-19-00100.*

У.П. Карасева<sup>1,2</sup>, А.Б. Фрейдин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

<sup>2</sup> Институт проблем машиноведения РАН

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ВЯЗКОУПРУГОГО МАТЕРИАЛА С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ КОЭФФИЦИЕНТОМ ВЯЗКОСТИ

В задачах механохимии, связанных с описанием окисления кремния или литизации кремния в литий ионных батареях, важен учет зависимости вязкости от напряжения. Напряжения при этом могут влиять через инварианты тензора напряжений или комбинации инвариантов. С другой стороны, причиной изменения вязкости стеклообразных материалов является неравновесность микроструктуры, которая, изменяясь сама, меняет коэффициент вязкости. В этом случае вязкое деформирование материалов описывается моделями вязкости с изменяющимся коэффициентом вязкости, зависящим от структурной температуры (степень неравновесности структуры). Однако в расчетах иногда используется прямая зависимость вязкости от времени. В связи с этим, в данной работе проводится анализ моделей с изменяющимся коэффициентом вязкости на примере решения задачи релаксации напряжения в условиях одноосного растяжения и сжатия, а также в изогнутой пластинке и в пластинке под действием температурных напряжений, и описывается эволюция вязкости со временем через зависимость от напряжения или фиктивной температуры.

А.П. Корчагин, А.С. Семёнов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

### КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛЯРИЗАЦИИ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКА В МНОГОСЛОЙНОЙ СТРУКТУРЕ ВСЛЕДСТВИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ МИКРОНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ

Тонкие сегнетоэлектрические пленки получили широкое распространение в качестве элементов памяти с высокой плотностью записи информации и быстродействием, МЭМС-системах, СВЧ-электронике, накопителях энергии. Свойства тонкого слоя сегнетоэлектрика, интегрированного в многослойную композицию, сформированную на массивной подложке, значительно отличаются от свойств объемных аналогов вследствие механического взаимодействия сегнетоэлектрического слоя с подложкой и входящими в композицию другими тонкими слоями. В работе проводится прямое математическое моделирование процесса поляризации сегнетоэлектрика в многослойной структуре PZT/SiO<sub>2</sub>/Si вследствие возникновения неоднородных полей механических напряжений при охлаждении в процессе получения пленок. На основе микроструктурной модели сегнетоэластичного материала, учитывающей многофазный состав, анизотропию физико-механических свойств и диссипативный характер движения доменных стенок, в рамках конечно-элементного

программного комплекса PANTOCRATOR получены и проанализированы результаты расчетов напряженно-деформированного состояния и поляризации для различных конфигураций представительных объемов трехслойных структур.

И.А. Кравчинский<sup>1</sup>, А.С. Смирнов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

<sup>2</sup> Институт проблем машиноведения РАН

### ОПТИМИЗАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЯЗКОГО ДЕМПФИРОВАНИЯ ПРИ ГАШЕНИИ КОЛЕБАНИЙ ДВОЙНОГО МАЯТНИКА

В докладе рассматриваются вопросы оптимального выбора диссипативных параметров двойного математического маятника в обоих его шарнирах, которые обеспечивают наиболее эффективное подавление колебаний. Строится математическая модель колебаний двойного маятника с учетом вязкого демпфирования и выводится отвечающее ей характеристическое уравнение в безразмерном виде, коэффициенты которого зависят лишь от двух безразмерных диссипативных параметров. В качестве критерия оптимизации принимается максимизация степени устойчивости, и на его основе устанавливаются наилучшие значения указанных параметров. Помимо этого, также рассматриваются задачи об определении оптимального решения и в том случае, когда имеется возможность распоряжаться выбором лишь одного коэффициента демпфирования при заданном значении другого коэффициента. Дается подробное изложение и обсуждение полученных результатов, которое сопровождается серией наглядных графических иллюстраций и приведением необходимых числовых данных. Полученные результаты представляют не только теоретический интерес в области оптимизации в теории колебаний, но также могут найти и определенное практическое применение в механике маятниковых систем.

Н.В. Можгова, А.В. Лукин, И.А. Попов, Л.В. Штукин

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

### НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА СЛАБОСВЯЗАННЫХ МИКРОБАЛОЧНЫХ РЕЗОНАТОРОВ ПРИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОМ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

В работе проведено исследование нелинейной динамики изгибных колебаний двух слабосвязанных балочных микрорезонаторов при электротепловом параметрическом возбуждении. Получено гармоническое установившееся распределение температуры в объеме резонатора в частотной области. Выведена система уравнений механически связанных балочных резонаторов с учетом осажденной частицы на один из них, а также неодинаковости массово-инерционных характеристик резонаторов. С помощью асимптотических методов нелинейной динамики получены уравнения в медленных переменных, которые были исследованы методами теории бифуркаций. Получены зоны возможной раскачки параметрических колебаний, а также амплитуды установившихся режимов для обоих резонаторов. Показано, что малое различие в массово-инерционных характеристиках резонаторов приводит к существенному изменению в амплитудах установившихся режимов для каждого резонатора, что может быть использовано с целью детектирования массы частицы, осажденной на один из чувствительных элементов.

И.Р. Муртазин, А.С. Семёнов  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СЛОЖНОГО ПАССИВНОГО НАГРУЖЕНИЯ: МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Учет эффекта накопления пластических деформаций при пассивном нагружении, игнорируемого классической теорией пластического течения, актуален при описании процессов усталостного разрушения. Наиболее заметен указанный эффект при сложном непропорциональном пассивном нагружении вблизи поверхности текучести. В качестве основы для разработки моделей материала использованы результаты экспериментальных исследований, полученные авторами на трубчатых образцах из стали и поликристаллического никеля марки НП2. Были проведены эксперименты на одноосное растяжение, на одноосное сжатие с последующим растяжением (активное нагружение), а также серия экспериментов при комбинированном растяжении с кручением (непропорциональное пассивное нагружение). Результаты сравнения результатов, полученных при моделировании поведения представительного объема поликристаллического агрегата с использованием оригинальной микроструктурной модели, с данными опытов показали хорошее соответствие.

М.А. Никитин, И.А. Керестень  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТРОЛИРУЕМОГО РАЗРУШЕНИЯ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИВОДА ЗАДНЕГО ШАССИ ЛЕГКОГО МНОГОЦЕЛЕВОГО САМОЛЕТА

Работа посвящена исследованию нестационарного процесса контролируемого разрушения предохранительной пластины привода заднего шасси самолета-амфибии. Рассматривается часто используемая схема расположения шасси с задним опорным колесом: 2 передних шасси воспринимают основную нагрузку, а заднее шасси играет вспомогательную роль. На сегодняшний день, проектирование гражданских легких самолетов, включая требования к прочности и расчетные нагрузки, регламентировано Авиационными правилами. Однако, в процессе эксплуатации самолёта, возникают дополнительные требования к конструкции, обусловленные спецификой типа воздушного судна. Так, в частности при открытии шасси под водой, для последующего выхода самолета-амфибии на берег возможно возникновение ситуации, когда вся основная нагрузка будет восприниматься именно задним шасси в состоянии частичного открытия. При отсутствии предохранительной пластины это может привести к нарушению целостности композитного силового каркаса фюзеляжа. Основной задачей работы является исследование влияния материалов и геометрических размеров предохранительной пластины на нестационарный процесс ее контролируемого разрушения согласно потере устойчивости или достижению предела текучести. Рассматриваются часто используемые материалы: алюминиевый сплав АМг6, сталь марки 30ХГТ, титановый сплав ВТ6. Также рассматриваются различные толщины пластины из стандартной номенклатуры заготовок: 1, 2 и 3 мм. Результаты получены с использованием прямого конечно-элементного моделирования программного комплекса ANSYS. Практическая значимость работы состоит в выдаче рекомендаций к проектированию предохранительной пластины под фиксированную несущую нагрузку в 2.5 кН.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТНЫХ ПУЛТРУЗИОННЫХ ПРОФИЛЕЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДА КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ ГОМОГЕНИЗАЦИИ

Пултрузионные профили находят применения во многих областях, таких как гражданское и промышленное строительство, обустройство мостов и переходов, инфраструктура нефтегазовой промышленности. Технологический процесс пултрузии заключается в протягивании волокон, пропитанных полимерным связующим, сквозь систему фильер, что позволяет получать однонаправленные высоконаполненные композиционные детали с постоянной поперечной структурой. Пултрузионные профили обладают высокими эксплуатационными характеристиками и низкой плотностью. Механические свойства композиционных материалов на макроуровне прежде всего зависят от свойств отдельных компонент. На основе метода конечно-элементной гомогенизации определены эффективные свойства пултрузионных профилей для разных комбинаций материалов полимерной матрицы и армирующих волокон. Произведено сравнение с экспериментальными данными.

Д.М. Пашковский<sup>1</sup>, Е.Н. Вильчевская<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

<sup>2</sup> Институт проблем машиноведения РАН

## РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОЙ ДИФФУЗИОННОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МАТЕРИАЛА С СУПЕРЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ

Для развития технологий, промышленности и строительства требуется создавать новые материалы с заданными свойствами, а также рассчитывать их эффективные характеристики на основе данных о микроструктуре. В работе предложен численный алгоритм расчета компонент тензора эффективной диффузионной проницаемости материала с одной неоднородностью в форме суперэллиптического цилиндра. При этом учитывается эффект сегрегации, когда диффундирующее вещество скапливается на границе между матрицей материала и неоднородностью. Вариационная задача для процесса диффузии решается методом Ритца. Аппроксимация решения ищется в форме полносвязной нейронной сети с одним скрытым слоем, что позволяет приблизить решение задачи на всей расчетной области, а также учесть разрывность поля концентрации на границе с неоднородностью. Компоненты тензора эффективной диффузионной проницаемости рассчитываются из двух численных экспериментов при разных граничных условиях. Были проанализированы зависимости компонент тензора эффективной диффузионной проницаемости от размеров суперэллиптического цилиндра и параметра сегрегации.

## ФРОНТ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ТЕЛЕ В ПОСТАНОВКАХ СТАЦИОНАРНОЙ И НЕСТАЦИОНАРНОЙ ДИФФУЗИИ

Исследуется связанная нестационарная задача механохимии о распространении локализованного фронта химической реакции в упругом цилиндре. Для описания влияния напряжений на кинетику фронта используется концепция тензора химического сродства. Рассматриваемая задача является связанной: напряжения влияют на скорость фронта химической реакции, а движение фронта, сопровождающееся собственной деформацией превращения, приводит к возникновению механических напряжений, которые зависят от положения фронта. Выделены два этапа реакции: этап первоначального накопления вещества и этап распространения фронта реакции после его отщепления от границы тела. В работе приводится сравнительный анализ решений, полученных в постановках стационарной и нестационарной диффузии. Исследовано влияние параметров диффузии, константы скорости реакции и химической энергии  $\gamma$ .

А.В. Савиковский, М.М. Фролов, А.С. Семёнов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## ОСОБЕННОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ КОНТУРНЫХ ИНТЕГРАЛОВ ПРИ СМЕШАННОЙ МОДЕ РАЗРУШЕНИЯ

Рассматривается вычисление коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) на основе метода эквивалентного объемного интегрирования (ЭОИ). Задача решается для прямолинейной трещины в изотропном линейно-упругом теле в условиях смешанной моды нагружения, приводящих к комбинированному раскрытию трещины как нормального отрыва, так и продольного сдвига. КИН вычисляются для различных углов наклона трещины к направлению действия одноосной нагрузки. Для вычисления КИН используются компоненты векторного  $J$ -интеграла:  $J_1$  и  $J_2$ . Анализируется влияние учета слагаемого по берегам трещины на точность вычисления КИН. Также исследуется влияние вида конечно-элементной дискретизации области и размера конечных элементов вблизи вершины трещины на точность вычисления КИН. Расчетные значения КИН сравниваются с аналитическим решением для бесконечной плоскости. Результаты расчетов позволяют сделать вывод о необходимости учета слагаемого по берегам трещины при вычислении  $J_1$  и  $J_2$  методом ЭОИ.

А.И. Сватковский<sup>1</sup>, О.В. Антонова<sup>1</sup>, Г.Б. Уфлянд<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

<sup>2</sup> ООО «ТурбоРеф Инжиниринг»

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ КМА-2М

Объектом исследования в данной работе являются ключевые узлы газотурбинной установки КМА-2М. К ним относятся диск с рабочими лопатками и обойма. Данный агрегат производится с 1982 года, и сегодня подобному рода устройствам требуется модернизация, чтобы составлять конкуренцию более современным образцам техники. Область применения агрегата – производство слабой азотной кислоты, которая применяется в различных сферах промышленности и сельского хозяйства. Цель работы заключается в управлении величиной радиального зазора между лопатками и обоймой, непосредственно влияющей на КПД агрегата, а также поиске пути модернизации системы охлаждения (так как радиальный зазор прежде всего зависит от температур на узлах) и выбор вставок на лопатки, что позволит увеличить КПД системы на более продолжительное время. Получены напряженное и тепловое состояние узлов агрегата на различных временных промежутках; проведена проверка удовлетворения условиям прочности согласно различным отраслевым нормативным документам. Продолжается поиск оптимального технологического решения для системы охлаждения и подбор временных промежутков для запуска охлаждающего газа (в данном случае пара) для увеличения КПД.

А.А. Семёнова, А.И. Грищенко

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## ВЛИЯНИЕ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ КОРСЕТНЫХ И ПРИЗМАТИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ НА РАЗМАХ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ИНТЕНСИВНОМ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Монокристаллические сплавы являются незаменимыми материалами при производстве рабочих и направляющих лопаток газотурбинных двигателей последних поколений. Жаропрочные монокристаллические сплавы на никелевой основе обладают ярко выраженной анизотропией физико-механических свойств, высокими показателями кратковременной и длительной прочности. Важнейшим показателем жаропрочных сплавов является их сопротивление термической усталости. На основе микроструктурной модели упругопластического деформирования, учитывающей наличие октаэдрических систем скольжения, выполнено исследование влияния кристаллографической ориентации монокристаллических корсетных и призматических образцов на размах пластической деформации при интенсивном термоциклическом воздействии. Результаты вычислительных экспериментов показали значительную чувствительность размаха пластической деформации к отклонению от ориентации [001] даже на несколько градусов, что указывает на необходимость пересмотра принятого на практике допуска в 10 градусов.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ГИСТЕРЕЗИСНОГО ПОВЕДЕНИЯ ТЕТРАГОНАЛЬНЫХ ДОМЕННЫХ СТРУКТУР СЕГНЕТОЭЛЕКТРОЭЛАСТИКОВ

На основе метода конечно-элементной гомогенизации получены результаты моделирования кривых механического гистерезиса представительных объемов ламинатных доменных структур второго ранга тетрагональных сегнетоэластичных материалов. Результаты демонстрируют существенную зависимость гистерезисных кривых мультидоменных сегнетоэластичных монокристаллов от начальной топологии доменной структуры и от направления внешнего воздействия. Наблюдаемая анизотропия гистерезисного поведения монокристаллов является следствием анизотропии механических и электрических свойств отдельных доменов, а также их регулярного начального расположения, удовлетворяющего условиям механической и электрической совместности. В результате проведения многовариантных вычислительных экспериментов был установлен эффект неустойчивого поведения доменных структур {1324} и {1221} при больших абсолютных значениях напряжений при сжатии. В работе исследуется влияние топологии доменной структуры, электромеханических характеристик доменов, граничных условий и параметров численной процедуры на возникновение эффекта неустойчивости и форму гистерезисных кривых.

П.Я. Стронгин<sup>1</sup> П.С. Степанов<sup>2</sup>, Л.М. Яковис<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный технологический университет

## РАСЧЕТ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ ТИПИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИКИ

Динамические модели объектов автоматизации обычно строят по так называемым разгонным характеристикам, представляющим собой реакцию выходной переменной процесса на постоянное управляющее воздействие. Для большинства управляемых объектов разгонные характеристики имеют вид апериодических или колебательных процессов с запаздыванием. Первый тип характерен для непрерывных технологических процессов, а второй – для механических приложений. В работе предлагается простая расчетная схема для определения параметров типовых регуляторов для широкого класса объектов «апериодического» и «колебательного» типа. Она предусматривает этапы формирования модели с характеристическим полиномом второй степени, аппроксимации такой модели инерционным звеном первого порядка с запаздыванием и расчета параметров регуляторов ранее разработанным компенсационным методом.

В.А. Суворов, Б.Е. Мельников  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МОСТОВОГО КРАНА С ФУНКЦИЕЙ ПРОТИВОРАСКАЧИВАНИЯ ГРУЗА И АВТОМАТИЧЕСКОЙ НАСТРОЙКИ РЕГУЛЯТОРА

Системы управления с функцией противораскачивания довольно разнообразны. Однако применение дополнительного оборудования, требующего дополнительных вычислительных мощностей для реализации функции предотвращения раскачивания груза, делает экономически невыгодным реализацию большинства алгоритмов управления. В данной работе представлен и реализован простой и эффективный алгоритм подбора и подстройки коэффициентов усиления ПИ-регулятора мостового крана. В основе алгоритма решение системы ОДУ движения мостового крана с помощью преобразования Лапласа, решение системы алгебраических уравнений с применением теории вычетов и метода Аберта, подбор коэффициентов усиления регулятора методом роя частиц с ограничениями по времени разгона крана и мощности двигателя. Алгоритм проверен экспериментально.

В.А. Судаков, Д.Д. Ожгибесова, И.А. Михайлов  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РАВНОНАПРЯЖЕННОГО ДИСКА, НАВИТОГО ИЗ ВОЛОКОН

Работа основана на математическом и компьютерном моделировании свойств элемента конструкции из волокнистого полимерного композиционного материала (ВПКМ). Главной целью является получение расчетной методики для оптимального проектирования кинетического накопителя энергии с требуемыми характеристиками по прочности и жесткости с учетом технологии изготовления. Особенность проектирования изделий из композиционных материалов заключается в неразрывной связи материала, конструкции и технологии. Для реализации расчетной методики решается комплекс задач, связанных с получением геометрических и технологических параметров намотки через моделирование траектории армирующих волокон, задач расчета эффективных характеристик материала в зависимости от полученных технологических параметров, а также задач конечно-элементного моделирования и расчета изделия из ВПКМ. В итоге должна получиться структура, обеспечивающая равнонапряженное состояние в диске.

П.П. Удалов<sup>1</sup>, Л.В. Штукин<sup>1</sup>, И.А. Попов<sup>1</sup>, А.В. Лукин<sup>1</sup>, К.В. Полеткин<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
<sup>2</sup>Hefei University of Technology, Hefei, China

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА В МИКРОМЕХАНИЧЕСКОМ БЕСКОНТАКТНОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОДВЕСЕ

В работе выполняются построение и исследование нелинейной электромеханической модели одномерных колебаний проводящего твердого дископодобного тела в неконтактном электромеханическом подвесе. Показано, что положение равновесия системы и ее характер устойчивости возможно определить по первому приближению для величины наведенного тока. Применяя численные методы продолжения равновесия по параметрам системы,



демонстрируется факт наличия устойчивого и неустойчивого положений равновесий. Даются оценки критическим параметрам системы, выше которых положение равновесия в системе отсутствует. Проведена линеаризация системы вблизи ее положения равновесия и показано, что динамика малых возмущений системы описывается уравнением Матье, что обозначает наличия зон устойчивости и неустойчивости колебаний диска. Применяя асимптотические методы нелинейной механики, получены аналитические оценки для переходных кривых системы, которые разделяют зоны устойчивости и неустойчивости системы. Дана оценка для рабочего диапазона изменения параметров системы, которому соответствует асимптотическая устойчивость системы при внешних возмущениях.

А.Р. Усманов, В.С. Модестов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

### ЦЕНТРОБЕЖНАЯ НАГРУЗКА ВАЛА С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА ДВОЙКОЙ ИЗГИБНОЙ ЖЕСТКОСТИ

В данной работе рассмотрено выражение центробежной нагрузки вала, вызванной неточностью его изготовления, которое учитывает эффект двойкой изгибной жесткости. Взяв за основу известное аналитическое уравнение движения вала с двойкой жесткостью, можно в ряде случаев вывести выражение для центробежной нагрузки, которое можно задавать в качестве исходных данных при численном определении прогиба вала. В данной работе было получено частное аналитическое решение уравнения для случая прогиба простого ротора на двух опорах от нагрузки от дисбаланса, вызванного биением наружной поверхности вала. Показано, что решение уравнения тождественно совпадает с решением классического уравнения изгиба балки Тимошенко с альтернативным заданием исходных нагрузок. Сравнение с экспериментом показало, что предложенный метод задания центробежной нагрузки, учитывающий эффект двойкой жесткости, дает хорошее соответствие экспериментальным данным.

Р.В. Федоренко, А.В. Лукин

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

### ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ПРИСПОСОБЛЯЕМОСТИ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКИ НАГРУЖАЕМОГО СОСУДА ПОД ДАВЛЕНИЕМ В УСЛОВИЯХ УПРУГО-ИДЕАЛЬНО-ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Типичными условиями работы таких элементов реакторных установок атомных электростанций как металлоконструкции оболочек и сосуды под давлением является комбинированное действие механических и температурных нагрузок. Для обеспечения прочности подобных конструкций в 60-е годы XX века был проведен ряд научных исследований по анализу приспособляемости тонкостенных сосудов под давлением при нагружении внутренним давлением и температурным градиентом по толщине стенки. Решение задачи получено для некоторого циклического процесса, имитирующего режимы пуска и останова реактора, и представляется в виде диаграммы приспособляемости конструкции с различными характерными зонами, именуемая диаграммой Бри.В настоящей работе приводятся результаты разработки программного кода, который на основе метода конечных элементов позволяет определять параметрические диаграммы типа диаграммы Бри для различных комбинаций условий нагружения. Практическая значимость данной программы заключается в возможности варьирования любых параметров системы и анализа

изменяемости характерной диаграммы с целью выявления феноменологических особенностей влияния того или иного параметра на общее состояние конструкции, например, возможность учесть упрочнение материала, различные типы нагружения (синхронное циклическое, асинхронное), влияние температуры на параметры материала.

М.М. Фролов, А.В. Савиковский, А.С. Семёнов  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ КОНТУРА НА ЗНАЧЕНИЯ КОНТУРНЫХ ИНТЕГРАЛОВ $J_1$ И $J_2$ ПРИ СМЕШАННОЙ МОДЕ РАЗРУШЕНИЯ

Рассматривается аналитическое вычисление  $J_1$  и  $J_2$  интегралов для прямолинейной трещины в изотропной линейно-упругой среде. Исследуется влияние размеров и формы контура на значения интегралов в теле с трещиной при смешанной моде разрушения. Для вычислений используются главные члены асимптотических разложений компонент тензора напряжений и вектора перемещений в окрестности вершины трещины. Для контура в форме окружности были верифицированы формулы связи  $J_1$ ,  $J_2$  и коэффициентов интенсивности напряжений (КИН)  $K_I$ ,  $K_{II}$ , и показана независимость результатов от размеров контура. Также рассмотрены три варианта прямоугольного контура: симметричного относительно вершины трещины и два варианта с нарушением симметрии. Для прямоугольных контуров получены аналитические выражения для  $J_1$  и  $J_2$ , показана их независимость от формы, размеров и симметрии прямоугольного контура. Для всех рассмотренных круговых и прямоугольных контуров, полученные аналитические выражения в точности равны, что позволяет утверждать о независимости значений  $J_1$ ,  $J_2$  интегралов от формы и гладкости контура.

Т.Н. Хашба<sup>1</sup>, А.С. Смирнов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

<sup>2</sup> Институт проблем машиноведения РАН

## УСТОЙЧИВОСТЬ РАВНОВЕСИЯ КОНЕЧНОМЕРНОЙ МОДЕЛИ КОЛОННЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СОБСТВЕННОГО ВЕСА

Рассматривается задача устойчивости конечномерной модели колонны, находящейся под действием собственного веса, которая приближенно моделирует исходную систему с распределенными параметрами. Построение конечномерной модели осуществляется на основе схемы гантели (две точечные массы, соединенные безынерционным стержнем), и она может иметь любое конечное число степеней свободы, характеризуясь при этом сосредоточенными параметрами. В рамках этой модели записывается выражение для потенциальной энергии и находится матрица квазиупругих коэффициентов в безразмерном виде, а затем на ее основе при помощи критерия Сильвестра определяются условия устойчивости в зависимости от числа степеней свободы. Эти действия позволяют выявить изменение критического значения ключевого параметра задачи при постепенном увеличении числа степеней свободы модели и сопоставить его с аналогичным значением для исходной распределенной модели колонны. Показано, что полученная оценка для критического значения обладает хорошей точностью уже при относительно небольшом числе степеней свободы. Это свидетельствует о важности построения подобных конечномерных моделей для решения практических задач, связанных с анализом устойчивости равновесия систем с распределенными параметрами.

## СОЗДАНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА КОНСТРУКЦИЙ ХРАНИЛИЩА ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА И ТРАНСПОРТНО-УПАКОВОЧНОГО КОМПЛЕКТА ДЛЯ СЛУЧАЯ ПАДЕНИЯ САМОЛЕТА

Представляются методика и результаты конечно-элементного анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) хранилища отработанного ядерного топлива (ХОЯТ) и находящегося внутри транспортно-упаковочного комплекта (ТУК) для условий, возникающих при ударе тяжелого самолета Airbus на скорости 100 м/с. Для расчетов использован программный комплекс SIMULIA Abaqus. Проведен анализ нагрузки, действующей на сооружение ХОЯТ, эквивалентное давление получено с помощью метода Риеры. Рассмотрено 2 типовых случая воздействия: удар в боковую стену и в крышу здания ХОЯТ. Для оценки НДС ТУК рассмотрен наихудший сценарий падения самолета в крышу, который предполагает значительные деформации железобетонных конструкций, обрушающихся на находящиеся внутри ТУК. Конкретно, рассмотрен случай падения цельной железобетонной плиты крыши на конструкцию ТУК.

Е.И. Шехтман, В.А. Черняева

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I

## ПРОГНОЗ РАБОТЫ ВЕРХНЕГО СТРОЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ В РЕЗУЛЬТАТЕ ИЗНОШЕННОСТИ РЕЛЬСОВ

Актуальной проблемой в развитии инфраструктуры железнодорожного транспорта является определение прогноза работы инфраструктуры и, в первую очередь, верхнего и нижнего строения пути при изменении уровня их нагруженности. Это обуславливает разработку и внедрение вероятностных методов расчета на прочность железнодорожного пути при переменных напряжениях, учитывающих случайный характер действующих нагрузок и вариацию характеристик сопротивления усталости материалов элементов, входящих в конструкцию железнодорожного пути, на основе проведения комплекса теоретических и экспериментальных исследований. Вполне очевидно, что при интенсивных деформационных воздействиях, реализуемых при длительной эксплуатации, могут происходить различные процессы, приводящие к эволюции структурно-фазовых состояний, сопровождающейся изменением (ухудшением) механических свойств. За время работы конструкции процессы выветривания элементов пути, корродирования и искажения их геометрических форм вследствие износа и т.п. будут снижать кривую выносливости. В актуальной версии методики оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности, износ рельсов на величину 3, 6 и 9 мм учитывается только как фактор, увеличивающий динамическое воздействие в системе «колесо-рельс». При определении критериев долговечности для элементов пути (по кривой усталости Веллера), не учитывается изменения положения этой кривой с учетом износа рельсов. Результаты экспериментальных исследований, показали, что микронеровности бандажа, вызванные изменением начальной конфигурации, значительно снижают ресурс, как бы удваивая число циклов приложения нагрузки, в отдельных случаях носящей знакопеременный характер.

## **СЕКЦИЯ «ГИДРОАЭРОДИНАМИКА, ГОРЕНИЕ И ТЕПЛООБМЕН»**

Е.В. Бабич, А.В. Филатова, Е.В. Колесник  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

### **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА ВЯЗКОГО ГАЗА С УСТАНОВЛЕННЫМ НА ПЛАСТИНЕ ЗАТУПЛЕННЫМ ТЕЛОМ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УГЛАХ НАТЕКАНИЯ**

При обтекании сверхзвуковым потоком газа одиночного препятствия, установленного на поверхности и расположенного под ненулевым углом атаки, сложная трехмерная картина становится несимметричной. Настоящая работа посвящена численному исследованию влияния угла натекания потока на ударно-волновую конфигурацию, вихревую структуру в области перед обтекаемым телом и характеристики локального теплообмена. Рассматривается модельная задача обтекания сверхзвуковым потоком воздуха ( $M = 5$ ) симметричного ребра с полукруглой формой передней кромки, установленного на пластине. Численные расчеты трехмерных уравнений Навье-Стокса для вязкого совершенного газа выполнены с применением конечно-объемного «неструктурированного» программного кода SINF/Flag-S, разрабатываемого в СПбПУ. Проанализированы детальные картины течения и теплообмена для различных углов натекания потока.

*Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МК-3435.2022.1.1.*

Е.В. Бабич, Е.В. Колесник  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

### **ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ АППРОКСИМАЦИИ КОНВЕКТИВНЫХ ПОТОКОВ НА ТОЧНОСТЬ РАЗРЕШЕНИЯ СТРУКТУРЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С ОДИНОЧНЫМ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ ВИХРЕМ**

При моделировании сложных задач аэрогазодинамики, в частности, турбулентных сверхзвуковых течений, к численному методу предъявляют особые, зачастую противоречивые, требования: необходимо использовать схемы, обладающие такой диссипацией, чтобы подавить нефизические осцилляции вблизи разрывов, но при этом они не должны подавлять моделируемые вихри. Для тестирования подобных методов часто используется модельная задача о взаимодействии между ударными волнами и вихрями. В настоящей работе рассчитана двумерная нестационарная задача о взаимодействии ударной волны и изоэнтропического вихря. Численные расчеты выполнены с применением конечно-объемного «неструктурированного» программного кода SINF/Flag-S, разрабатываемого в СПбПУ. Показана эволюция течения во времени и проанализирована ударно-волновая картина, полученная при расчетах на сетках различного разрешения. Исследована зависимость решения от схемы аппроксимации конвективных потоков, продемонстрирована эффективность применения схем повышенной точности.

## ПРИМЕНЕНИЕ STR k-ε МОДЕЛИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА В ТИГЛЯХ УСТАНОВОК ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ МЕТОДОМ ЧОХРАЛЬСКОГО

Выращивание кристаллов из расплава является основным методом получения полупроводниковых материалов. Для получения кристаллов высокого качества необходимо контролировать тепло- и массоперенос в расплаве. В тиглях промышленного диаметра течение расплава является турбулентным. Наиболее точным методом моделирования турбулентности является прямое численное моделирование (DNS, Direct Numerical Simulation), нацеленное на разрешение всех пространственно-временных масштабов. Однако данный метод не применим в промышленных расчетах из-за требуемого большого количества вычислительных ресурсов. Наиболее экономичным методом на сегодняшний день является RANS подход. Однако RANS модели вихревой вязкости, как было показано в ряде публикаций, неправильно предсказывают турбулентные тепловые и массовые потоки. Основной причиной этого является неучет анизотропии турбулентного переноса. Для преодоления недостатков моделей вихревой вязкости нами ранее была разработана STR k-ε модель, которая использует обобщенную гипотезу градиентной диффузии (GGDH, Generalized Gradient Diffusion Hypothesis) для моделирования турбулентных потоков и гипотезу STR (Stress Tensor Reconstruction) для моделирования рейнольдсовых напряжений, учитывающую различные факторы анизотропии. В данной работе представляются методика и результаты валидации STR k-ε модели для расчета турбулентной конвекции расплава кремния с привлечением данныхILES, а также экспериментальных данных по температуре в расплаве и концентрации кислорода в кристалле.

А.А. Васильев, С.В. Булович

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ МИКРОКАПЕЛЬ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ С УЧЕТОМ ВНУТРЕННЕГО ОБЪЕМНОГО ИСТОЧНИКА ЗАРЯДА

Представляется математическая модель и результаты расчетов траекторий движения заряженных микрокапель в накладывающихся электрических полях и газовых потоках. Газодинамическую структуру потока формирует кольцевая струя, истекающая из капилляра. Электрическое поле формирует разность потенциалов на капилляре и транспортном противозлектроде. Поля газодинамических характеристик получены при помощи программного пакета ANSYS Fluent в результате решения системы уравнений Навье-Стокса с использованием k-ω SST модели турбулентности. Распределение потенциала и компоненты напряженности получены в результате решения уравнения для потенциала. Для учета воздействия силы Кулона и влияния внутреннего объемного источника заряда микрокапель разработана и использована UDF для программного пакета ANSYS Fluent. Приведено сравнение результатов расчетов для вариантов с учетом источникового слагаемого и без него. Выполнены параметрические исследования влияния значения разности потенциалов на электродах на картину распространения частиц.

А.А. Галузина, А.А. Смирновский, Е.В. Колесник  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРАЖЕНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ОТ КЛИНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТОВ OPENFOAM И SINF/FLAG-S

В работе рассматривается задача о нестационарном распространении ударной волны, отражающейся от плоского клина. Среда предполагается невязкой и удовлетворяющей уравнению состояния совершенного газа. Рассматриваются такие наборы определяющих параметров задачи, при которых реализуются различные типы отражения ударной волны, включая двойное и тройное маховское отражение. Сопоставительные расчеты выполнены с применением пакетов OpenFOAM и SINF/Flag-S. Исследуются некоторые численные аспекты, включая сеточную сходимость и оценку влияния схем аппроксимации конвективных потоков на точность решения. Результаты расчетов сравниваются с известными экспериментальными данными. Даются выводы о применимости рассматриваемых вычислительных инструментов для моделирования подобного класса задач.

В.Д. Голубков, Е.К. Владимиров, А.В. Гарбарук  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА КРЫЛОВОМ ПРОФИЛЕ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНОЙ ТЕОРИИ

Традиционно для анализа устойчивости ламинарных пристеночных течений используется метод линейной теории устойчивости, построенный в предположении, что течение является строго или приближенно параллельным; при этом анализ сводится к решению одномерной краевой задачи на поиск собственных значений. Альтернативным подходом, активно развивающимся в последние годы, является глобальный анализ устойчивости двумерных решений полных уравнений Навье-Стокса, автоматически учитывающий непараллельность течения. В данной работе с применением метода глобального анализа устойчивости исследуется развитие волн Толлмина-Шлихтинга в пограничном слое на крыловом профиле. Практическим результатом проведенного анализа является построение зависимости показателя роста возмущений (N-фактора) от координаты вдоль поверхности профиля. При задании критического значения N-фактора построенная зависимость позволяет определить точку ламинарно-турбулентного перехода на профиле.

А.А. Зуев<sup>1,2</sup>, А.Г. Абрамов<sup>1</sup>, В.В. Калаев<sup>2</sup>  
<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
<sup>2</sup> ООО «Софт-Импакт»

## ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ ФРОНТА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕПЛООБМЕНА В УСТАНОВКАХ МЕТОДА ЧОХРАЛЬСКОГО

В работе исследуется возможность применения искусственных нейронных сетей (ИНС) для повышения качества результатов численного моделирования теплообмена и кристаллизации в установках выращивания монокристаллов кремния по методу Чохральского. Конкретной целью данного исследования является улучшение моделирования

геометрии фронта кристаллизации при помощи технологий машинного обучения. Форма фронта зависит от распределения тепловых потоков на интерфейсе со стороны расплава и кристалла. Распределение теплового потока в расплаве определяется картиной диффузионно-конвективного течения в расплаве, которое является существенно турбулентным. Основная идея работы состоит в моделировании влияния конвективного теплопереноса на распределение теплового потока из расплава при помощи ИНС. Расчеты по проблеме выполнялись с помощью разработанного в компании «Софт-Импакт» CFD-пакета CGSim с задействованием двух программных модулей для моделирования турбулентного течения в области расплава кремния и кристалла (Flow Module), и глобального теплообмена в установке метода Чохральского с зафиксированным фронтом кристаллизации (basic CGSim). Полученные расчетные данные были использованы для обучения специально разработанной ИНС, которая оказалась способной предсказывать с приемлемой точностью дополнительные тепловые потоки в промежуточных позициях по высоте кристалла в ростовом процессе. Произведенное сравнение фронтов кристаллизации, рассчитанных модулем Flow Module, с фронтами, полученными с помощью basic CGSim при добавлении корректирующего теплового потока, показало улучшение результатов моделирования относительно использования встроенной в basic CGSim модели турбулентности.

В.А. Игнатенко<sup>1,2</sup>, В.А. Талалов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
<sup>2</sup> ООО «Софт-Импакт»

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ, РЕАЛИЗОВАННЫХ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ПАКЕТАХ ОБЩЕГО И СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В установках с высокими температурами, более 1000К, основным каналом теплопереноса является излучение, так как тепловой поток пропорционален четвертой степени температуры. Примером таких установок могут служить реакторы для газофазной эпитаксии полупроводниковых монокристаллов. При таких условиях особую значимость приобретает точный расчет излучения, для которого широко применяется метод конфигурационных факторов. Однако данный метод не предназначен для учета прохождения радиационного потока через полупрозрачные материалы. Также дополнительные ограничения на модели накладывает необходимость учета зеркального отражения и зависимости коэффициента поглощения материала от длины волны (модель не-серого тела). В данной работе на простейших постановках исследуется применимость наиболее популярных моделей излучения для решения тех или иных задач. Проведена кросс-верификация реализации моделей между различными доступными вычислительными пакетами. Рассматривается также вопрос корректной аппроксимации коэффициента поглощения. Нелинейная зависимость коэффициента поглощения материала (например, кварца) усложняет процесс аппроксимации этого коэффициента. Исследование показало, что для описания упомянутых выше эффектов применимы только три модели: «Discrete Ordinates», «Discrete Radiative Transfer» и «Monte-Carlo». Эти модели показывают одинаковые результаты в 1D расчетах, однако «Discrete Ordinates» проявляет слишком сильную численную диффузию на тестах с зеркальным отражением, что делает ее неприменимой в ряде задач. Оставшиеся модели реализованы не во всех доступных пакетах.

И.А. Игнатъев, В.В. Рис  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛЕ С ОРЕБРЕННОЙ СТЕНКОЙ

Один из способов интенсификации теплообмена в каналах охлаждения лопаток высокотемпературных газовых турбин – внутреннее оребрение стенок. В работе представлены результаты численного моделирования турбулентного ( $Re \sim O(10^5)$ ) течения и теплообмена вязкого несжимаемого газа ( $Pr = 0.7$ ) в канале прямоугольного сечения ( $W/H = 1.5$ ) с одной оребренной стенкой. Ребра прямоугольного сечения расположены на стенке периодически и наклонены на угол  $60^\circ$  относительно оси канала. Принята модель развитого течения и установившегося теплообмена, поэтому задача решается в периодической постановке на участке канала с одним ребром (шаг периодичности – расстояние между ребрами). Теплообмен моделируется с заданной температурой стенок. Расчеты выполнены в пакете ANSYS Fluent. Исследовано влияние на результаты размерности расчетных сеток и выбора модели турбулентности. Интенсификация теплообмена и увеличение потерь давления оцениваются сравнением с результатами собственных расчетов и каноническими данными для установившегося течения и развитого теплообмена в канале с гладкими стенками. Получены данные для нескольких вариантов, отличающихся значениями числа  $Re$ . Результаты расчета сопоставлены с имеющимися в литературе данными эксперимента.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 23-29-00094.*

В.Ю. Коёкин, С.В. Булович  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РОТОРНО-ЛОПАСТНОМ ДВИГАТЕЛЕ С ВНЕШНИМ ПОДВОДОМ ТЕПЛА НА ОСНОВЕ МЕТОДА СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ

В работе разработана нульмерная математическая модель роторно-лопастного двигателя с внешним подводом тепла; термодинамические параметры рабочего тела в каждой из секций двигателя представляются в виде узловых значений. Работа двигателя основана на последовательной коммутации и организации процесса газообмена изменяющих свой размер камер с элементами теплообменной системы. На основе принятой модели разработана программа на языке Fortran. Проведен анализ происходящих в двигателе теплофизических процессов и расчет основных мощностных характеристик. Полученные результаты сравниваются с результатами двумерного расчета и экспериментальными данными.

В.Ю. Коёкин, С.В. Булович  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОГАЗОДИНАМИКИ РОТОРНО-ЛОПАСТНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ВНЕШНИМ ПОДВОДОМ ТЕПЛА

В работе при помощи пакета ANSYS Fluent проводилось численное моделирование теплофизических процессов в роторно-лопастном двигателе с внешним подводом тепла.



Рассматривалось ламинарное течение вязкого сжимаемого газа. Процессы теплообмена в нагревателе и холодильнике описаны в упрощенной постановке с использованием коэффициента объемной теплоотдачи. В процессе решения задачи, в зависимости от угла поворота, путем изменения топологии вычислительной области адекватно учитывался размер и положение рабочих камер внутри корпуса двигателя. Возникающие в процессе решения задачи коммутации объектов в расчетной области обеспечивались применением процедуры интерфейсов. Деформация сетки проводилась методом динамического наслоения. Получено представление о процессах, которые происходят в рабочих камерах двигателя и теплообменных аппаратах. Выполнено сопоставление интегральных характеристик с результатами, полученными по методу сосредоточенных параметров.

А.В. Масюкевич<sup>1</sup>, Н.А. Монахов<sup>1</sup>, Е.В. Бабич<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С ТРЕХМЕРНЫМИ ПРЕПЯТСТВИЯМИ

Исследование взаимодействия пограничного слоя и выступающих затупленных элементов высокоскоростных летательных аппаратов является одной из важнейших задач прикладной и фундаментальной газодинамики. В настоящей работе исследования такого класса течений проводятся с использованием прямоугольной ударной трубы ФТИ им. А.Ф. Иоффе, которая разработана для изучения плоских сверхзвуковых течений. Для диагностики потока используется высококачественная теневая система на основе теневого прибора ИАБ-451 с импульсным полупроводниковым лазером в качестве источника подсветки и датчики импульсного давления с высоким временным разрешением. Проводится экспериментальное исследование взаимодействия ударной волны с трехмерным препятствием, установленным на пластине. Проведен анализ рабочих режимов установки с оценкой основных газодинамических параметров, определяющих характер взаимодействия. Представляются теневые фотографии, на которых визуализирована ударно-волновая картина течения.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-29-00286.*

М.А. Олисов, Д.С. Пашкевич, А.А. Плетнев, В.В. Капустин, А.Р. Зимин  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

### РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИ РАВНОВЕСНОГО СОСТАВА ВЕЩЕСТВ В СИСТЕМЕ ЭЛЕМЕНТОВ В-F-H-O-C

При производстве изотопов бора – В-10 для ядерной энергетики и В-11 для микроэлектроники, – используют летучий  $\text{BF}_3$ . Изотопно модифицированный бор применяют в виде  $\text{B}_4\text{C}$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$ , элементного бора и т.д. Поэтому регенерация фтора из трифторида изотопно модифицированного бора для его последующего использования при получении трифторида природного бора является актуальной задачей. В настоящей работе расчетным методом исследован термодинамически равновесный состав веществ в системе элементов В-F-H-O-C, с целью определить возможность регенерации фтора из  $\text{BF}_3$  в виде  $\text{HF}$  при его взаимодействии с метаном и кислородом в режиме горения. Был разработан расчетный код, основанный на поиске минимума энергии Гиббса смеси веществ. Также использовались коммерческие коды «АСТРА-4» и «Chemical WorkBench», основанные на

поиске максимума энтропии смеси веществ. На основе полученных результатов сделан вывод, что регенерация фтора в виде HF из  $BF_3$  по рассматриваемой схеме термодинамически не запрещена при температуре выше 1500 К. Тепловыделение достаточно для реализации этого процесса в режиме горения при температуре порядка 2000 К.

Д.С. Осадчий, А.В. Махнов, Е.В. Колесник  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

#### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ЛАМИНАРНОГО ОБТЕКАНИЯ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ ПОТОКОМ ВЯЗКОГО ГАЗА

Работа посвящена численному моделированию сверхзвукового ламинарного обтекания тел вращения потоком вязкого газа. Расчеты проведены с использованием свободно-распространяемого CFD-кода Eilmer, который входит в пакет GDTk (Gas Dynamics Toolkit), разрабатываемый в университете Квинсленда (Австралия). Данный код предназначен для расчета двух- и трехмерных течений сжимаемого газа, в том числе с учетом реальных свойств газа и химических реакций. Результаты расчетов сопоставляются с прошедшим многолетнюю апробацию конечно-объемным неструктурированным кодом SINF/Flag-s, разрабатываемым в СПбПУ. Представлены результаты численного моделирования сверхзвукового обтекания конуса при числе Маха  $M = 5$ , результаты расчетов сопоставлены с известными аналитическими оценками. Показана сильная чувствительность теплового потока к сеточному разрешению вблизи поверхности конуса. Проведены расчеты ламинарного обтекания двойного конуса при числе Маха  $M = 12.5$ . Проанализирована сложная ударно-волновая картина течения, которая включает систему косых скачков уплотнения, взаимодействующих с пограничным слоем. Проведено сопоставление коэффициентов давления и теплового потока с известными из литературы экспериментальными данными.

А.Д. Подмаркова, М.А. Засимова  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

#### ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ И ПОЛОЖЕНИЯ ТЕПЛООВОГО МАНЕКЕНА НА ТЕЧЕНИЕ В ВЕНТИЛИРУЕМОМ ПОМЕЩЕНИИ

В работе представлены результаты URANS и LES расчетов неизоэтермических вентиляционных течений, формирующихся в помещении, внутри которого расположен нагретый ( $34^\circ\text{C}$ ) тепловой манекен. Моделирование выполнено в гидродинамическом пакете ANSYS Fluent. Базовая конфигурация помещения и теплового манекена соответствуют представленным в статье Nilsson H.O. et al. 2007 года. Воздух ( $20^\circ\text{C}$ ) поступает в помещение – параллелепипед ( $2.44 \times 2.46 \times 1.2$  м) – через одну из торцевых границ и покидает помещение через два круглых отверстия, расположенных на противоположной стенке. В работе проведен параметрический анализ влияния на структуру формируемого течения и теплоотдачу геометрических параметров помещения и теплового манекена, а также режимных параметров. Форма, положение и ориентация в помещении теплового манекена варьировались. Варьировался также размер помещения: базовые размеры были увеличены в 1.5 и 2 раза по каждому направлению. Изучалось влияние размера входного отверстия на вентиляционное движение внутри помещения: отверстие либо занимает всю торцевую стенку, либо частично загромождено. Проведено исследование влияния уровня входной скорости на получаемое в помещении течение: значения скорости задавались в диапазоне от

0.01 м/с, в этом случае преобладает естественно-конвективное движение, вызванное действием сил плавучести, до 0.3 м/с, когда преобладает вынужденно-конвективное движение. Изучалось влияние на глобальную структуру течения учета дыхания теплового манекена. Для рассчитанных вариантов выполнены оценки эффективности вентиляции.

*Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МК 1762.2022.1.1.*

А.Д. Подмаркова, М.А. Засимова, Н.Г. Иванов  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ВЕНТИЛИРУЕМОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ С ТЕПЛОВЫМ МАНЕКЕНОМ

Представляются результаты расчетов воздухораспределения в климатической камере размерами 1.88×3.01×2.01 м, для которой имеются данные измерений полей скорости и температуры, проведенных в Софийском техническом университете. Камера разделена на две части решетчатым полом. В пространство под полом через два круглых входных отверстия подается воздух с расходом в диапазоне от 18 до 50 л/с. В верхней части камеры, где размещен сидящий за столом тепловой манекен, под потолком расположены четыре квадратных выходных отверстия. Расчеты на основе RANS-подхода проводились как в изотермической, так и в неизотермической постановках. Для камеры, свободной от загромождений, показано, что расчетные данные удовлетворительно коррелируют с результатами измерений, однако сопоставительный анализ данных показал, что предварительно выбранное число экспериментальных точек недостаточно для описания локальных неоднородностей поля скорости. Для случая камеры с размещенным в ней тепловым манекеном без нагрева проанализировано влияние загромождения на поле скорости. Для камеры с нагреваемым манекеном, имитирующим тепловыделение от тела человека, показана степень влияния нагрева на поле скорости в камере.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-58-18013.*

Д.К. Попова<sup>1,2</sup>, Н.Н. Кортиков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

<sup>2</sup> АО «ОДК-Климов»

## УПРАВЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫМ СОСТОЯНИЕМ И ПОТЕРЯМИ В СТУПЕНИ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ РЕГУЛИРОВКОЙ ПОЛОЖЕНИЯ ФОРСУНОК КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

Возможным способом уменьшения температурной неоднородности на рабочих лопатках газовой турбины (уменьшение температурной сепарации) и связанного с ним уменьшения потерь кинетической энергии в ступени является регулировка положения форсунок камеры сгорания (clocking effect). В настоящей работе представляются методика и результаты расчетного исследования эффективности данного способа. Расчет газодинамических процессов в турбинной ступени проводился в программном комплексе STAR CCM+ в трехмерной постановке. Решалась система уравнений Навье-Стокса и энергии, осредненных по Рейнольдсу, описывающая нестационарное течение совершенного сжимаемого газа по методу скользящих сеток. Расчеты показали, что эффект температурной сепарации минимален при расположении форсунки по центру межлопаточного канала соплового аппарата. При таком положении форсунки отношение осредненного по времени числа Нуссельта на «корытной» части лопатки к осредненному по времени числу Нуссельта

на «спинке» составляет 1.21. При смещении форсунки к «корыту» лопатки данное отношение возрастает до 1.49, а при смещении к «спинке» – до 1.44. На основе энергетического подхода для оценки коэффициента потерь в венцах турбины получено, что потери минимальны при расположении форсунки по центру межлопаточного канала соплового аппарата. Для рабочего колеса потери кинетической энергии возрастают на 15.6% при смещении форсунки к «спинке» лопатки и на 6.2% при смещении к «корыту» относительно центрального положения.

А.А. Ручкина, М.А. Засимова  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕНТИЛЯЦИОННОГО ТЕЧЕНИЯ В САЛОНЕ ПАССАЖИРСКОГО САМОЛЕТА

В работе представлены результаты численного моделирования вентиляционного течения в тестовой модели салона пассажирского самолета. Геометрические характеристики салона и режимные параметры соответствуют условиям эксперимента, выполненного методом PIV в 2021 году T. van Hooff et al. Модель салона – ограниченное помещение высотой 0.2 м, длиной и шириной 0.3 м. В модели имеются загромождения, имитирующие багажные полки. Подача среды осуществляется либо через щелевые припотолочные отверстия, расположенные над багажными полками, либо через щелевые отверстия, расположенные под багажными полками. Модель салона является симметричной относительно продольной центральной плоскости и однородной по длине – поперечные сечения модели одинаковы. Число Рейнольдса, вычисленное по высоте щелевого отверстия (0.1 м) и средней скорости на его срезе (0.101 м/с) составило 3450, что соответствует натурным условиям воздухораспределения в салоне пассажирского самолета. Задача решалась в 2D и 3D постановках. Рассмотрена расчетная область, полностью воспроизводящая геометрию модели салона, и область, включающая одну половину салона, при этом в продольной центральной плоскости задавалось условие симметрии. Расчеты выполнены в пакете ANSYS Fluent. Турбулентное течение описывалось на основе RANS подхода в сочетании со стандартной k-ε моделью. Распространение углекислого газа в салоне моделировалось с помощью точечного источника. Показано, что картина течения, полученная в расчетах, имеет хорошее согласие с результатами измерений: расчетные поля скорости и интенсивности турбулентности схожи с экспериментальными. Проведены оценки чувствительности решения к используемой расчетной сетке и влияния на решение выбора модели турбулентности. Сделаны выводы о влиянии положения точечного источника распространения углекислого газа на эффективность вентиляции в салоне самолета.

А.С. Савельев  
Санкт-Петербургский государственный университет

## ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ПОУРОВНЕВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ СКОРОСТИ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ

При решении задач высокоскоростной аэродинамики, моделировании входа в атмосферы планет и тепловой защиты летательных аппаратов важную роль играет корректное описание неравновесных химических реакций и процессов релаксации внутренней энергии. Точность получаемых решений зависит как от надежности используемых вычислительных алгоритмов, так и от детальности описания процессов,

происходящих в окружающей газовой среде. Современный уровень развития вычислительных технологий позволяет реализовывать не только достаточно простые однотемпературные и многотемпературные модели химического взаимодействия, но и более точные, учитывающие колебательное и электронное возбуждение молекул. Однако большинство существующих моделей не позволяет учитывать колебательное и электронное возбуждение продуктов реакции и партнеров по столкновению, а также приоритетный порядок протекания реакций из высоких возбужденных состояний. В работе представляется обобщение формулы Кнаба для поуровневых химических реакций с целью учета колебательного и электронного возбуждения как двухатомных, так и многоатомных молекул, а также приоритетного протекания химических реакций из более высоких возбужденных состояний. Предложенная модель сравнивается с моделями Старика, Тринора-Маррона и Алиата.

Е.В. Садикова, А.А. Плетнев  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

### РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ТВЭЛОВ В БАССЕЙНЕ ВЫДЕРЖКИ ЭНЕРГОБЛОКА № 4 БЕЛОЯРСКОЙ АЭС ПРИ ЗАПРОЕКТНЫХ АВАРИЯХ

Представляется методика и результаты расчета стационарных полей температуры в элементах конструкции бассейна выдержки (БВ), предназначенного для хранения отработавшего ядерного топлива реактора БН-800 в условиях запроектной аварии, связанной с внезапным осушением БВ вследствие «большой течи». Вычислительная модель построена в пакете прикладных программ ANSYS Fluent. Учитывается реальная геометрия тепловыделяющих сборок (ТВС), а также все основные особенности происходящих в них процессов теплообмена: неоднородное внутреннее тепловыделение, естественная конвекция воздуха в полостях и зазорах, тепловое излучение. Расчеты проводятся для различных граничных условий и значений остаточного тепловыделения в сборках с отработавшим топливом (ОТВС). На первом этапе исследования рассматривалось тепловое состояние одной ОТВС. Рассчитана зависимость максимальной температуры поверхности твэла от фиксированной температуры оболочки ОТВС, которая варьировались в диапазоне от 50 до 800°C. Для трех значений мощности остаточного тепловыделения (3,3; 5,26 и 11,2 Вт/твэл) определена максимально допустимая температура поверхности оболочки ОТВС – 773, 717 и 638°C, соответственно. На втором этапе рассматривался один чехол, включающий в себя 54 пенала (трубы) для ОТВС. Реальная геометрия ОТВС внутри каждой трубы заменялась эквивалентным источником внутреннего объемного тепловыделения. Установлено, что для двух значений мощности остаточного тепловыделения (3,3 и 5,26 Вт/твэл) температура стенки чехла не должна превышать 614 и 430°C, соответственно. Расчет показал также, что в условиях рассматриваемой запроектной аварии при значении тепловой мощности 11,2 Вт/твэл обеспечить безопасный температурный режим ОТВС в чехле невозможно. Представленные результаты будут в дальнейшем использованы авторами для расчетного анализа нестационарных полей температуры в отсеке БВ, заполненном чехлами с ОТВС.

## РАСЧЕТ ТОКСИЧНОСТИ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ, РАБОТАЮЩЕГО НА ПРОПАН-БУТАНОВОЙ СМЕСИ С ДОБАВКОЙ ВОДОРОДА

В современном мире большое внимание уделяется экологии, ставится задача минимизировать выбросы парниковых газов, планируется постепенный переход с углеводородного топлива на водород. Однако, горение водорода происходит при более высоких температурах, чем природного газа, и уменьшение содержания окислов углерода в выхлопе может сопровождаться ростом содержания окислов азота. С целью выявления зависимости адиабатной температуры горения и содержания вредных примесей в выхлопе от состава топливной смеси и недостатка или избытка окислителя в данной работе был произведен расчет токсичности выхлопных газов двигателя внутреннего сгорания, работающего на газовом топливе. Для базового расчета была выбрана «зимняя» пропан-бутановая смесь с объемным содержанием компонентов 95% пропана на 5% бутана. Затем проводились расчеты для смесей пропан-бутанового топлива и водорода с объемным содержанием водорода 20, 40, 50 и 60%. Для расчетов использовался коммерческий код «АСТРА-4», основанный на поиске максимума энтропии смеси веществ. По результатам расчетов сделаны выводы о том, что: (1) добавка водорода в пропан-бутановую смесь повышает адиабатическую температуру реакции не более чем на 1%; (2) с увеличением доли водорода в топливной смеси содержание CO и CO<sub>2</sub> в выхлопе слабо падает, а содержание NO (преимущественно образующегося окисла азота) слабо растет; (3) содержание всех вредных примесей существенно увеличивается в режимах с недостатком окислителя, однако не превышает норм Евро-6.

Е.Д. Степашева, М.А. Засимова  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОГО РЕЖИМА ТЕЧЕНИЯ ПРИ ПОДАЧЕ ПЛОСКОЙ СТРУИ ВОЗДУХА В ТЕСТОВОЕ ВЕНТИЛИРУЕМОЕ ПОМЕЩЕНИЕ

Рассматривается распространение плоской струи в полости высотой и шириной  $H = 0.2$  м, длиной –  $L = 0.5$  м. Струя подается со стороны открытой границы полости через щелевое сопло  $0.05H \times H$ , расположенное по центру этой границы. Остальные границы полости – твердые стенки. Средняя скорость воздуха на срезе сопла 6 м/с ( $Re = 4000$ ). Постановка задачи соответствует условиям эксперимента (Mataoui A., et al., 2001). Расчеты проводились в 2D и 3D постановках, а также в квазидвумерной постановке с шириной области  $1/3H$ . Моделирование турбулентного движения проводилось в пакете ANSYS Fluent на основе вихререзающего метода LES и метода URANS в сочетании со стандартной  $k-\epsilon$  и  $k-\omega$  SST моделями. Показано, что в полости формируются низкочастотные автоколебания воздушной струи, при этом картина формируемого течения оказывается близкой к двумерной. 2D постановка задачи дает качественно схожие результаты с данными 3D и экспериментом, так период колебаний струи по данным URANS моделирования в 2D и 3D постановках равен 1.5 и 1.6 с соответственно, в эксперименте – 1.6 с. Мгновенные и осредненные картины течения, полученные по данным LES и URANS моделирования, схожи. Период колебаний, полученный методом LES, выше на 12% в сравнении с

полученным в URANS. Показано, что на частоту колебаний существенное влияние оказывает условие на открытой границе (отличия достигают 30%). Исследование сеточной чувствительности решения проведено для результатов 2D URANS моделирования (использовались сетки 20, 40 и 60 тыс. ячеек), 3D URANS (2 и 6 млн ячеек) и квази-2D LES (6.5, 17, 20 млн ячеек). Изменение размерности сетки оказало слабое влияние на получаемое решение. Выполнены оценки влияния на частоту и амплитуду колебаний используемой в URANS расчетах модели турбулентности, подсеточной модели и генератора синтетической турбулентности в LES расчетах.

*Исследование выполнено при поддержке гранта РФФ № 22-29-00224.*

А.Е. Тихомиров, М.А. Засимова  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСНОЙ СТРУИ, ФОРМИРУЕМОЙ В ПРОЦЕССЕ КАШЛЯ

Представляются результаты численного моделирования турбулентного течения, формируемого при импульсной подаче нагретой воздушной струи (34°C) из отверстия диаметром 2 см в окружающее пространство (15°C). Задавались различные варианты условий подачи струи: варьировалось среднее значение скорости (2.4...9.6 м/с) и времени подачи (0.1...0.4 с) струи. Фиксированным параметром для рассмотренных вариантов был объем выпущенной среды (0.3 л). Во время подачи импульсной струи моделировалось распространение капель воды (диаметром 4...256 мкм) из входного отверстия. Выбранные условия характерны для процесса кашля. Задача решалась в осесимметричной (2D) и 3D постановках. Для моделирования турбулентного движения использовался URANS подход (k-ε RNG модель). Распространение капель моделировалось на основе подхода Лагранжа, учитывались силы сопротивления и тяжести. Расчеты проведены в пакете ANSYS Fluent. Установлено, что в результате импульсной подачи струи в начальные моменты времени формируется вихревое облако, содержащее легкие капли (до 32 мкм), которое значительно отдалается от источника. Так, к моменту времени 10 с от начала подачи струи, капли распространяются на 1 м и более. Под действием силы плавучести облако смещается вверх (к 10 с на 0.5 м). Проведено исследование влияния сил плавучести на формирование и движение вихревого облака. Получено, что безразмерные профили скорости в продольном и поперечном сечении облака в различные моменты времени одинаковые. Кроме того, профили скорости, полученные в решениях с различными входными условиями, совпадают между собой. Размерные величины, такие как характерный размер облака и его дальность, зависят от условий формирования импульсной струи.

А.О. Уманский  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛОПАСТИ ВЕРТОЛЕТА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СО СПУТНОЙ СТРУЕЙ В 2.5D ПОСТАНОВКЕ

Представляются результаты численного исследования аэродинамических характеристик лопасти вертолета с профилем NACA 23012 до и после взаимодействия со спутной струей от передней лопасти. Для решения задачи разработаны 2.5D вычислительные модели в программном комплексе ANSYS CFX 2019R1. Решались осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса, замкнутые моделями турбулентности SST и SST-SAS.

Модели верифицированы на типовой задаче обтекания одиночного профиля NASA 23012. Показано, что спутная струя приводит к падению подъемной силы на лопасти. Численное моделирование с использованием обеих моделей турбулентности предсказало периодическое отбрасывание крупномасштабных вихрей и качественное соответствие экспериментально наблюдаемому потоку. Модель SST предсказывает формирование картин течения, соответствующих высокопериодичному и стабильному потоку, в то время как модель SST-SAS предсказала незначительные неустойчивости в рециркулирующем пограничном слое. Таким образом, примененная методика позволяет провести оценку влияния спутной струи с передней лопасти на летно-технические характеристики следующей за ней лопасти при относительно низких вычислительных затратах, что имеет важное значение при проектировании профиля для вертолетного винта. Численные 2.5D модели требуют значительно меньше вычислительных ресурсов по сравнению с полным 3D моделированием лопасти вертолета и позволяют рассчитать течение вблизи лопастей с более высоким разрешением.

Т.А. Федорова, Д.С. Пашкевич, П.А. Попов  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

#### ВЛИЯНИЕ МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕКСАФТОРИДА УРАНА С МЕТАНОМ И КИСЛОРОДОМ В РЕЖИМЕ ГОРЕНИЯ

Гексафторид урана, обедненный по изотопу U-235 (ОГФУ), является побочным продуктом процесса производства ядерного топлива. Одним из способов его переработки является взаимодействие ОГФУ с метаном и кислородом в режиме горения. Для численного исследования этого процесса была построена математическая модель турбулентного диффузионного горения, реализованная в программном комплексе ANSYS Fluent. Для моделирования турбулентности ранее использовалась низкорейнольдсовая модель турбулентности  $k-\omega$  SST, которая описывает течение во всем объеме моделируемого реактора без использования аппроксимирующих пристеночных функций. В настоящей работе исследовано влияние различных моделей турбулентности (модель Спаларта-Аллмараса, низкорейнольдсовая  $k-\epsilon$  модель и SST-модель) на предсказываемые поля параметров процесса – температуры, скорости потока, скорости реакции, концентрации компонентов, функции тока, теплового потока и др.

А.В. Федотов, А.М. Левченя  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

#### РАСЧЕТЫ КАВИТАЦИОННОГО ОБТЕКАНИЯ ГИДРОПРОФИЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА ANSYS FLUENT

Представлены результаты численного моделирования двумерного течения воды в канале с установленной в нем моделью гидропрофиля Вальхнера №7 (Walchner Profile 7), полученные с применением гидродинамического кода ANSYS Fluent. Расчеты турбулентного течения выполнены по уравнениям Рейнольдса с использованием SST модели турбулентности Ментера. Для моделирования эффектов кавитации используется модель Zwart-Gerber-Belamgi. Псевдоструктурированная расчетная сетка, существенно сгущенная к поверхности профиля, обеспечивает среднее значение величины  $y^+$  около 0.2. При достаточно высокой степени детализации (около 300 ячеек по обводу профиля, сгущение



сетки с коэффициентом 1.05-1.1) сетка состоит из 270 тысяч ячеек. Сетка построена в программе ICEM CFD. В тестовом расчете при значении числа кавитации около 1 у стороны разрежения профиля формируется обширная кавитационная каверна. Полученное решение нестационарно: с течением времени каверна пульсирует. Ниже по течению от каверны на поверхности профиля имеется зона отрыва. Наблюдается нестационарность и в следе за обтекаемым телом.

Ю.В. Шерстобоев<sup>1,2</sup>, В.В. Калаев<sup>2</sup>, В.В. Тимофеев<sup>2</sup>, Н.Г. Иванов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
<sup>2</sup> ООО «Софт-Импакт»

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В КВАДРАТНОЙ И КУБИЧЕСКОЙ ПОЛОСТЯХ

Представляются результаты численного решения задачи о свободно-конвективном течении расплавленного железа ( $Pr = 0.1$ ) в квадратной и кубической полостях с двумя разнонагретыми вертикальными стенками. Горизонтальные стенки и (в трехмерной постановке) две другие вертикальные стенки полагались адиабатическими. Расчеты проводились для чисел Рэлея  $Ra = 10^3, 5 \times 10^3, 10^4, 5 \times 10^4, 10^5$ , что соответствует ламинарному режиму течения. Использовался конечно-объемный пакет CVDSim3D, разрабатываемый в ООО «Софт-Импакт». Для получения решений использовались неструктурированные сетки Вороного. Такие сетки обладают двумя особенностями, важными для проведения CFD расчетов: во-первых, центры любых двух соседних ячеек находятся на одинаковом расстоянии от грани, разделяющей их, и, во-вторых, отрезок, соединяющий центры любых двух ячеек, перпендикулярен разделяющей их грани. В 2D и 3D постановках были получены сошедшиеся по сетке решения. Проведена кросс-верификация полученного решения с результатами, полученными с применением модуля Flow Module пакета CGSim, использующего структурированные гексагональные сетки. Представлен сопоставительный анализ полей скорости и температуры, а также распределений числа Нуссельта вдоль стенок. Сопоставление решений, полученных в разных программных продуктах, показало их совпадение с высокой точностью; это дает основание утверждать, что использование неструктурированных сеток Вороного обеспечивает получение столь же качественных результатов, что и использование сеток структурированных.

К.К. Забелло, Н.А. Щур  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ КОМАРА С ЗАДАНЫМИ  
КИНЕМАТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ДВИЖЕНИЯ КРЫЛЬШЕК**

На сегодняшний день существует целый класс задач – задач биоморфного движения за счет крупномасштабной деформации частей тела или тела целиком. Особый интерес в данном классе задач представляет полет насекомых. Особенности полёта насекомых являются: высокая степень управляемости в полёте, что, в частности, проявляется в возможности летать под дождём, а также возможность взлетать и садиться, практически, на любые поверхности. Таким образом, изучение данного вида движения является перспективным для развития малых воздушных летательных аппаратов. С этой целью предлагается сопряжённый расчёт течения вблизи комара и динамики его полета с заданными кинематическими параметрами движения крыльшек. Характерное число Рейнольдса - 120, что соответствует ламинарному режиму течения. Расчеты проводятся с применением оригинального алгоритма деформации сетки в пакете ANSYS Fluent. В настоящей работе приводятся распределения давления и положения вихрей на крыле. Кроме того, получены характеристики силового воздействия со стороны жидкости на машущее крыло. Проведен ряд параметрических исследований влияния частоты и кинематики движения крыльев, а также размеров крыла на подъёмную силу. Определена характерная частота, обеспечивающая зависания комара (820 Гц). Полученное значение попадает в диапазон литературных данных ([400; 1000] Гц).

М.И. Костина, Д.Н. Циганков  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ГАНГЛИОЗНЫЕ КЛЕТКИ  
В СЕТЧАТКЕ ГЛАЗА ДЛЯ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНЫХ  
РЕШЕНИЙ ЭВОЛЮЦИОННЫХ ЗАДАЧ**

Ганглиозные клетки, нейроны отвечающие за обработку оптических сигналов разных угловых направлений, распределены по разному в сетчатке разных животных. Можно выделить три основных класса пространственных распределений вдоль поверхности сетчатки: однородное (муха), выделенная горизонтальная полоса с высокой плотностью клеток посередине и убывающая к периферии по вертикали (лошадь) и распределение с фoveей, выделенной областью высокой плотности посередине и убывающей во всех направлениях. В данной работе анализируются факторы, влияющие на выбор типа распределения и закона его спадания на периферии глаза с точки зрения эволюционного развития. Формулируется математическая задача локализации нового объекта в визуальном поле на участке сетчатки с достаточно высокой плотностью ганглиозных клеток с помощью вращений глаза резкими скачками - саккадами. Находятся распределения, оптимизирующие время, то есть количество саккад, необходимое для разрешения нового объекта с заданной угловой точностью при ограниченном полном количестве ганглиозных клеток доступных организму. Результаты, полученные с помощью симуляций методом Монте-Карло, показывают, что пространственная статистика появления новых объектов влияет на то какой тип распределения является оптимальным для скорейшей локализации. При повышенной

вероятности появления новых объектов вдоль горизонта оптимальное решение сменяется от однородного до распределения с полосой и дальше до распределения с фовеей, при увеличении необходимой точности углового разрешения.

Л.В. Мальсагова, Л.Г. Тихомолова  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

### ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В МОДЕЛИ ОТВЕТВЛЕНИЯ СОСУДИСТОГО ПРОТЕЗА ОТ АРТЕРИИ МЕТОДОМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВЕКТОРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Цель работы состоит в получении экспериментальных данных о структуре пульсирующего течения в модели ответвления протеза от бедренной артерии при различной доле расхода в протез методом ультразвуковой векторной визуализации. Для проведения эксперимента на 3D принтере была напечатана упрощенная среднестатистическая 3D модель ответвления протеза, имеющего внутренний диаметр 8 мм, от общей бедренной артерии диаметром 6 мм, с углом ответвления 40 градусов. Максимальное входное число Рейнольдса равнялось 1000. Исследование структуры течения проводилось при 30%, 50% и 70% расходе в протез, ультразвуковым сканером Mindray Resona 7 в режиме векторной визуализации. Обнаружено вихревое рециркуляционное течение, локализованное у внешней стенки протеза (за местом ответвления протеза от сосуда), которое уменьшается в размерах с увеличением доли расхода в протез. В фазу обратного потока зона рециркуляции отсутствует. Получено удовлетворительное согласование измеренных полей и профилей скорости с полученными при численном решении уравнений Навье-Стокса с применением пакета Ansys CFX.

*Работа выполнена при поддержке РФФ, грант № 20-65-47018, и при технической поддержке ООО «Миндрей Медикал Рус» и ООО «Сонар-Медикал».*

А.А. Маринова<sup>1</sup>, Л.Г. Тихомолова<sup>1</sup>, А.Д. Юхнев<sup>1</sup>, А.А. Врабий<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
<sup>2</sup>Первый Санкт-Петербургский медицинский университет им.акад.И.П.Павлова

### ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КРОВОТОКА В ПЕРСОНИФИЦИРОВАННЫХ МОДЕЛЯХ АНАСТОМОЗА БЕДРЕННОЙ АРТЕРИИ

В ходе операции бедренно-подколенного шунтирования в обход закупоренного участка общей бедренной артерии пришивают шунт для восстановления кровотока. Анастомоз представляет собой ответвление шунта от артерии для формирования пути обходного кровотока. В области анастомоза может возникать гиперплазия неоинтимы – зарастание внутренней стенки сосуда. Проведение пациент-ориентированного математического моделирования позволяет исследовать трехмерный поток крови, оценить гемодинамические параметры и может помочь в оценке риска зарастания протеза после операции в каждом индивидуальном случае. С применением средств пакета ANSYS CFX в данной работе было проведено численное моделирование кровотока в месте ответвления шунта от бедренной артерии для пациента через один месяц и через семь месяцев после операции. Для задания геометрии сосудов использовались данные, полученные посредством компьютерной томографии, а для задания граничных условий – зависимости от времени скорости кровотока на входе в общую бедренную артерию и на выходе из шунта, полученные с помощью ультразвуковых измерений. По результатам сравнительного анализа проведенных расчетов сделан вывод о сильном изменении структуры течения при существенном изменении

соотношения выходных расходов. Расчетные векторные поля, а также распределения продольной скорости в нескольких сечениях сравнены с результатами измерений методом ультразвуковой векторной визуализации.

*Работа выполнена при поддержке РФФ, грант № 20-65-47018, и при технической поддержке ООО «Миндрей Медикал Рус» и ООО «Сонар-Медикал».*

А.В. Машошина, Д.Э. Сеницына

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЗАКРУЧЕННОГО ТЕЧЕНИЯ В МОДЕЛИ КРОВЕНОСНОГО СОСУДА

Представляются результаты численного моделирования ламинарного, стационарного закрученного кровотока в модели кровеносного сосуда (цилиндрическая трубка диаметром 6 мм и длиной 200 мм). Входная закрутка различной интенсивности создается завихрителем, который включен в расчетную область и представляет собой скрученную ленту с поворотом выходной кромки на 180°, 270° или 360° относительно входной. Расчеты выполнены с применением пакета ANSYS CFX. Дается анализ эволюции профилей скоростей и изменения локальной степени закрутки по длине сосуда в широком диапазоне изменения числа Рейнольдса  $Re$  – от 100 до 2000, при расчете по среднерасходной скорости и диаметру сосуда. Параметрические расчёты показали, что в исследуемой области при всех числах Рейнольдса возникает двуспиральная структура закрученного течения. Вниз по потоку закрутка кровотока уменьшается и течение приближается к осесимметричному. Местная степень закрутки ( $S$ ), определяется как отношение максимальной окружной скорости к максимальной осевой. Установлено, что значение параметра  $S$  вблизи выхода из завихрителя отличается (возрастает) примерно в два раза с изменением числа Рейнольдса от 100 до 2000. При этом на выходе из модели сосуда значения  $S$  близки к нулю при  $Re < 500$ , и не превышают  $0.1$  при  $Re > 1000$ .

А.О. Охотников<sup>1</sup>, О.В. Антонова<sup>1</sup>, О.И. Охотников<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

<sup>2</sup>Курский государственный медицинский университет

## АНАЛИЗ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ПОКРЫТОГО ЭНДОБИЛИАРНОГО СТЕНТА

Объектом исследования в данной работе является покрытый эндобилиарный стент из материала с памятью формы, использующийся при стентировании стриктур желчного протока. Работа направлена на математическое моделирование поведения стента под действием различных нагрузок. Для эндобилиарных стентов наиболее критическим является циклическое воздействие, моделирующее перистальтику двенадцатиперстной кишки. Были рассмотрены три различные положения стента в просвете двенадцатиперстной кишки и соответствующие им постановки задачи: стент выступает от дуоденального сосочка на 25%, 30% и 50% от всей длины стента. Перистальтическое движение двенадцатиперстной кишки моделировалось как сочетание радиального сжатия в последовательных сегментах двенадцатиперстной кишки и волнообразного движения стенки кишки. Численное моделирование проводилось с использованием системы конечно-элементного анализа ANSYS.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УПРУГОСТИ СТЕНОК НА СТРУКТУРУ ПРОСТРАНСТВЕННОГО КРОВОТОКА В БИФУРКАЦИИ БРЮШНОЙ АОРТЫ

Методом численного моделирования, с применением технологии FSI (Fluid Structure Interaction), проведён анализ влияния упругости стенки на пространственно-временную структуру кровотока в области сосудистого русла, включающего три бифуркации: брюшной аорты и двух общих подвздошных артерий. Используемая модель кровеносного сосуда среднестатистической конфигурации построена на основе клинических данных около 1000 пациентов и учитывает характерные геометрические параметры сосудов: углы ветвления и диаметры. Наибольший практический интерес при оценке допустимости приближения жёсткой сосудистой стенки представляют распределения сдвиговых напряжений. Установлено, что рассчитанные осреднённые по сердечному циклу распределения сдвиговых напряжений на стенках для случая упругой и жёсткой стенок незначительно отличаются друг от друга. Таким образом, приближение жёсткой стенки с достаточной точностью позволяет определить места наиболее вероятные для развития атеросклеротических поражений, характеризующиеся малыми значениями осреднённых по циклу сдвиговых напряжений и большими значениями индекса колебаний сдвиговых напряжений. В рассматриваемом участке сосудистого русла это внешние стенки общих подвздошных артерий, задние стенки в области бифуркации брюшной аорты и наружных подвздошных артерий в областях изгибов сосудов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №20-31-90071.*

М.К. Тишков, Д.Н. Журавлев  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## МОДЕЛИРОВАНИЕ БАЛЛОННОЙ АНГИОПЛАСТИКИ КОАРКТАЦИИ АОРТЫ С УЧЕТОМ ВЯЗКО-ГИПЕРУПРУГИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА

Коарктация аорты является основной причиной ранней смертности и заболеваемости, связанной с сердечной недостаточностью. Безопасным методом устранения данной патологии является баллонная ангиопластика, как самостоятельная процедура, так и с дополнительным стентированием. В настоящее время широкое распространение получило описание материала аорты с помощью анизотропной гиперупругой модели Holzapfel-Gasser-Ogden (HGO), показывающей хорошее совпадение с экспериментальными данными. Но данная модель является абсолютно упругой и не может корректно описать процесс ангиопластики без стентирования. Цель работы заключалась в создании модели материала стенки аорты на основе HGO, позволяющей учитывать изменение деформированного состояния с течением времени для моделирования ангиопластики. В результате была предложена модель с учетом вязкости, выполнена её реализация в пакете ABAQUS, а также проведено моделирование процесса ангиопластики. Проанализировано изменение деформированного состояния аорты с течением времени при различных значениях вязкости.

РАСЧЕТ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОФИЛЯ, ДВИЖУЩЕГОСЯ  
ВДОЛЬ НЕПРОНИЦАЕМОЙ ГРАНИЦЫ И СОВЕРШАЮЩЕГО ВЗМАХОВЫЕ  
КОЛЕБАНИЯ

В настоящей работе рассматриваются взмаховые колебания двумерного профиля вблизи плоскости симметрии (данное условие равносильно непроницаемой границе), что является наиболее простой моделью движителя с двумя плавниками. Такой механизм движения вдохновлен механикой плавания рыб, при этом использование пары плавников позволяет избежать колебаний по курсу. Колебания профиля моделируется с использованием метода деформируемых сеток, позволяющего численно решать уравнения Навье-Стокса в областях с изменяющейся геометрией, используется оригинальный алгебраический алгоритм деформации сетки. Движение профиля происходит при числах Рейнольдса порядка 200000, относительная скорость профиля в направлении, перпендикулярном потоку, достигает 1. Основу настоящего исследования составляет оценка влияния плоскости симметрии на КПД взмаха плавника и его силовые характеристики. Установлено, что при параметрах колебаний и свойствах жидкости, обеспечивающих КПД порядка 50-60%, добавление плоскости симметрии приводит к уменьшению полезной работы по сравнению со случаем обтекания профиля в свободном потоке.

## **СЕКЦИЯ «МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА И КОНВЕРСИИ ЭНЕРГИИ»**

Б.С. Борисенков  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОЦЕССОВ В СОСТАВНОМ КРИСТАЛЛЕ**

Рассматривается модель одномерного кристалла - точечных масс, соединенных линейными пружинками. Под составным кристаллом понимается два последовательно соединенных кристалла, обладающие разными свойствами (в данном случае - массами). Проводится численный эксперимент прохождения большого количества фононов через интерфейс. Этот процесс соответствует переносу тепла в полупроводниках. Под фононом понимается локализованное возмущение в виде волны, распространяющееся со скоростью звука среды, мало меняя свою форму. Рассматривается равновесное (поток через интерфейс равен нулю) и неравновесное состояние. Моделирование производится с помощью двух подходов: методом динамики решетки и с помощью кинетического описания в виде обособленных частиц. Делается вывод о возможности сопоставления результатов моделирования, произведенного разными методами. С помощью кинетического подхода исследуется состояние системы через большой промежуток времени.

Е.С. Бутузова, С.Д. Ляжков  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

### **ПЕРЕНОС ЭНЕРГИИ В ПОЛУБЕСКОНЕЧНОЙ ЦЕПОЧКЕ ГУКА ПРИ КИНЕМАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

Предлагается к рассмотрению перенос энергии в полубесконечную цепочку Гука со свободным концом, движущимся по периодическому закону. С использованием точного решения уравнений динамики решетки найдена асимптотика поля перемещений на больших временах при частоте нагружения, находящейся выше спектра, и получено точное выражение для полной энергии для частоты, лежащей в спектре цепочки. Исследована асимптотика энергии, закачиваемой в цепочку на больших временах, в зависимости от частоты нагружения. Найдено значение частоты, при которой скорость закачки энергии максимальна.

И.Е. Груздев, А.М. Кривцов  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

### **ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ В ПЛОСКОЙ КВАДРАТНОЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКЕ**

В данной работе проводится исследование движения энергетического центра и расплывание энергетического возмущения в плоской двумерной квадратной кристаллической решетке с одинаковыми жесткостями пружин и массами частиц. Рассмотрены поток и суперпоток энергии; показано в чем заключается отличие их определения в одномерных системах: поток энергии – векторная величина, а суперпоток –

тензорная. Для квадратной кристаллической решетки выведены законы сохранения энергии, потока энергии и суперпотока энергии для произвольного возмущения, обладающего конечной энергией. Выведенные законы сохранения дают более полное понимание эволюции развития возмущения в двумерных системах. С помощью них можно ввести аналог второго закона Ньютона и обобщенной силы, а также аналог тензорной величины, которая связана с инерцией энергетического возмущения.

А.А. Кедров, С.А. Щербинин  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В КАРБИНЕ

Работа посвящена исследованию тепловых процессов в углеродной цепочке кумулена с помощью квантово-механического моделирования на основе метода Density functional based tight binding (DFTB). Данный метод является приближением к Теории функционала плотности (ТФП). Он позволяет значительно ускорять расчёты, сохраняя при этом точность, сравнимую с точностью расчётов на основе оригинальной ТФП. В ходе моделирования было построено дисперсионное соотношение для продольных колебаний углеродной цепочки, а также исследован переходной процесс, соответствующий изменению кинетической энергии (температуры) системы во времени при однородном начальном её распределении. Предложена линейная модель для описания исследуемой системы. Проведено сравнение результатов численных экспериментов с аналитическими результатами, полученными ранее В.А. Кузькиным и А.М. Кривцовым.

С.Д. Ляжков  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Институт проблем машиноведения РАН

## ПЕРЕНОС ЭНЕРГИИ В $\beta$ – ФПУТ ЦЕПОЧКЕ ПРИ СИЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Исследуется динамика слабо нелинейной  $\beta$  – ФПУТ цепочки со свободным концом, подверженным силовым нагружением по синусоидальному закону и изменение её полной энергии на больших временах. В гармоническом приближении ( $\beta = 0$ ) энергия, закачиваемая в цепочку, возрастает (как функция времени) по линейному закону при частотах нагружения, соответствующих ненулевой групповой скорости и возрастает пропорционально корню из времени при нулевой групповой скорости. С использованием найденного Гершгориным эффективного дисперсионного соотношения для  $\beta$  – ФПУТ цепочки, получена асимптотика полной энергии на больших временах в случае нелинейного межатомного взаимодействия. Асимптотика позволяет оценить перенос энергии как при частотах, лежащих в границах дисперсионного соотношения, так и в запрещённой зоне. Обсуждается сравнение результатов аналитических выкладок с данными численного моделирования.



## СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ «ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ В ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И МЕДИЦИНСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ» .....	3
СЕКЦИЯ «ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД И НАНОСТРУКТУР» .....	12
СЕКЦИЯ «ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И КОСМОСА» .....	14
СЕКЦИЯ «ФИЗИКА ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ» .....	26
СЕКЦИЯ «ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА» .....	35
СЕКЦИЯ «МАТЕМАТИКА И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ» .....	41
СЕКЦИЯ «МЕХАНИКА И ПРОЦЕССЫ УПРАВЛЕНИЯ» .....	44
СЕКЦИЯ «ГИДРОАЭРОДИНАМИКА, ГОРЕНИЕ И ТЕПЛООБМЕН» .....	59
СЕКЦИЯ «БИОМЕХАНИКА» .....	73
СЕКЦИЯ «МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА И КОНВЕРСИИ ЭНЕРГИИ» .....	78

# НЕДЕЛЯ НАУКИ ФИЗМЕХ

Сборник аннотаций докладов  
Всероссийской научной конференции

3–7 апреля 2023 года

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции  
ОК 005-93, т. 2; 95 3004 – научная и производственная литература

---

Подписано в печать 26.06.2023. Формат 60×84/16. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 5,25. Тираж 32. Заказ 3170.

---

Отпечатано с готового оригинал-макета,  
предоставленного организационным комитетом конференции,  
в Издательско-полиграфическом центре Политехнического университета.  
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
Тел.: (812) 552-77-17; 550-40-14.