

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

4–9 апреля 2022 года



ПОЛИТЕХ-ПРЕСС

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Санкт-Петербург

2022

УДК 51;53
ББК 22
Н42

Неделя науки ФизМех : сборник аннотаций докладов Всероссийской научной конференции, 4–9 апреля 2022 г. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – 72 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. Немов*, *А. С. Семенов*, *С. А. Галаев*,
А. С. Мурачев, *Н. В. Филимоненкова*

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

ISBN 978-5-7422-7713-2

© Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого, 2022

**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

**АЗИМУТАЛЬНАЯ АНИЗОТРОПИЯ РОЖДЕНИЯ π^0 МЕЗОНОВ В АСИММЕТРИЧНОЙ
СИСТЕМЕ СТОЛКНОВЕНИЙ CU+AU**

Азимутальная анизотропия частиц является одной из основных наблюдаемых, характеризующих кварк-глюонную плазму (КГП) – такое состояние вещества, при котором кварки и глюоны находятся в состоянии деконфайнмента. Одна из основных количественных характеристик анизотропии частиц в импульсном пространстве – это эллиптический поток (v_2).

Выбор нейтральных пионов (π^0) обусловлен тем, что они состоят из кварков и антикварков первого поколения (u, d). Из-за этого π^0 мезоны рождаются в большом количестве, а также их выходы хорошо измеримы при высоких значениях поперечного импульса (p_T).

В данной работе были проведены измерения v_2 π^0 мезонов с помощью двух методов. Первый метод заключался в том, что значения эллиптического потока извлекались из аппроксимации распределения v_2 по азимутальному углу относительно плоскости реакции ($\varphi - \Psi_R$). Значения эллиптического потока во втором методе извлекались с помощью среднего значения косинуса двойного азимутального угла $\varphi - \Psi_R$ нейтральных пионов.

Полученные с помощью двух методов значения эллиптического потока находятся в согласии друг с другом с учетом неопределенностей, что говорит о возможности измерения эллиптического потока для π^0 мезонов в асимметричной системе столкновений Cu+Au при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ в области p_T от 1 до 10 ГэВ/с.

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

**ОСОБЕННОСТИ ВЫДЕЛЕНИЯ $\Lambda(1520)$ В СТОЛКНОВЕНИЯХ AU+AU ПРИ ЭНЕРГИИ
 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГЭВ**

Кварк-глюонная плазма (КГП) - состояние вещества, при котором кварки и глюоны находятся в несвязанном состоянии при очень высокой энергетической плотности. Исследование свойств КГП может помочь изучить свойства ранней вселенной, так как утверждается, что на ранних ее этапах основным составляющим была КГП. Для исследования её свойств используются данные, полученные на коллайдерных установках, в которых сталкивают различные высокоэнергетичные ядра. Одним из методов изучения КГП является измерение рождения странных барионов. Странность - квантовое число, присущее странным кваркам, которые не встречаются в обычной материи. Пары странных кварков и антикварков рождаются в большом количестве в КГП в основном за счёт процесса слияния глюонов. В результате адронизации КГП образуются частицы, содержащие странные кварки. По их количеству можно получить информацию о свойствах КГП.

В работе представлено описание особенностей выделения сигнала частицы $\Lambda(1520)$ в сталкивающейся системе Au+Au при энергии $\sqrt{s_{NN}}=200$ ГэВ с разными значениями поперечного импульса и центральности. Для этого была разработана методика отбора, позволяющая выделить значимый сигнал от $\Lambda(1520)$. Эта частица является странным

барионом с исследуемым в данной работе каналом распада: протон - отрицательный каон. Из детектируемых сигналов этих частиц на детекторе PHENIX был получен спектр инвариантой массы их пар, в котором можно выделить сигнал от $\Lambda(1520)$. Полученная масса и ширина распада бариона совпадают с данными других экспериментов и теоретическими предсказаниями.

С.А. Буланова^{1,2}, В.Т. Ким²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
²НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ

ВОЗМОЖНОСТИ ПОИСКА ТЕМНЫХ ФОТОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ FLAP НА УСКОРИТЕЛЕ ЛИНАК-200 (ОИЯИ, ДУБНА)

Целью работы является оценка возможностей поиска новых темных фотонов - гипотетических частиц Темной материи на линейном ускорителе электронов LINAC-200 в эксперименте FLAP (ОИЯИ, Дубна).

Предполагается, что такие частицы могут рождаться в процессе торможения быстрых электронов в поле ядер мишени.

Проведено моделирование в GEANT4 прохождения пучка электронов через beam-dump мишень для 9 случаев: для трех различных материалов мишени (Pb, W, Fe) и трех энергий пучка налетающих электронов (20 МэВ, 40 МэВ и 200 МэВ). В результате моделирования получены распределения числа электрон-позитронных пар в зависимости от их инвариантной массы. Эти распределения характеризуют интенсивность фоновых событий.

Для расчета предполагаемого числа сигнальных событий использовано приближение Вайцеккера-Вильямса для расчета тормозного излучения обычных фотонов, где параметрами являются масса темного фотона и его константа нового взаимодействия с электронами.

В результате получена оценка чувствительности на величину константы связи темного фотона в зависимости от его массы в рамках эксперимента FLAP.

А.В. Сергеев^{1,2}, В.Т. Ким²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
²НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ

ВОЗМОЖНОСТИ ПОИСКА ЛЕГКИХ СКАЛЯРНЫХ ЧАСТИЦ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ FLAP НА УСКОРИТЕЛЕ ЛИНАК-200 (ОИЯИ, ДУБНА)

Целью работы является оценка возможностей поиска легких скалярных частиц Новой физики за пределами Стандартной модели на линейном ускорителе электронов ЛИНАК-200 в эксперименте коллаборации FLAP (ОИЯИ, Дубна). Предполагается, что такие частицы могут рождаться в процессе торможения быстрых электронов в поле ядер мишени.

Проведено моделирование прохождения пучка электронов через толстую мишень для 9 случаев (3 различных вида материала мишени: железо, вольфрам и свинец, и 3 энергии пучка налетающих электронов: 20, 40 и 200 МэВ) в программе Geant4. В результате моделирования получены распределения числа пар фотонов в зависимости от их инвариантной массы, характеризующие интенсивность фоновых событий.

Для расчета предполагаемого числа сигнальных событий использовано приближение Вайцеккера-Вильямса для тормозного излучения фотонов. Параметрами считались константа связи гипотетических скалярных частиц и их масса.

В результате применения условия преобладания сигнальных событий над фоновыми, получена оценка чувствительности на константу связи новой скалярной частицы в зависимости от ее массы в рамках эксперимента FLAP.

В.С. Борисов, М.М. Митранкова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

К*(892) МЕЗОНЫ В ЛЕГКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ СИСТЕМАХ

Квантовая хромодинамика предсказывает существование горячей и плотной сильно взаимодействующей материи – кварк-глюонной плазмы (КГП). Минимальные условия образования КГП изучаются экспериментально путем измерения рождения частиц в малых системах столкновений, таких как $p+Al$, $p+Au$ и ^3He+Au при $\sqrt{s_{NN}}=200$ ГэВ в эксперименте PHENIX.

Благодаря свойствам и наличию \bar{s} кварка в составе К*(892) мезона, его рождение в столкновениях релятивистских ядер чувствительно к проявлению различных эффектов, свидетельствующих об образовании КГП.

В данном докладе представлены результаты изучения рождения К*(892) мезонов в столкновениях $p+Al$, $p+Au$, and ^3He+Au при энергии $\sqrt{s_{NN}}=200$ ГэВ в области малых быстрот, измеренного в эксперименте PHENIX.

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

МОДЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ РОЖДЕНИЯ ϕ МЕЗОНОВ В МАЛЫХ СИСТЕМАХ СТОЛКНОВЕНИЙ

Систематическое изучение рождения частиц в конечном состоянии в малых системах столкновений является одним из главных способов исследования эволюции системы, образованной в результате взаимодействия, и минимальных условий, достаточных для формирования кварк-глюонной плазмы (КГП).

Согласно модели Глаубера, при отсутствии коллективных эффектов, взаимодействие релятивистских ядер можно представить в виде суперпозиции элементарных нуклон-нуклонных взаимодействий. Однако различные эффекты как горячей (предполагающей образование КГП), так и холодной (отражающей начальные и конечные условия взаимодействия) ядерной материи могут влиять на эволюцию системы сталкивающихся ядер. Изучение рождения ϕ мезонов, обладающих закрытой странностью, представляет особый интерес, так как оно позволяет наблюдать широкий спектр этих эффектов.

Для физической интерпретации результатов, полученных в эксперименте, необходимо их сравнение с предсказаниями различных теоретических моделей.

В данном докладе представлены экспериментально полученные результаты измерения рождения ϕ мезонов в столкновениях $p+Al$, $p+Au$, and ^3He+Au при энергии $\sqrt{s_{NN}}=200$ ГэВ в области малых быстрот, измеренного в эксперименте PHENIX. Рассматривается их сравнение с расчётами, выполненными с помощью программных пакетов RYTHIA/Angatur, RYTHIA+ERPS16, RYTHIA+nSTEQ15 и AMPT.

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

МЕТОДЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦЕНТРАЛЬНОСТИ В СТОЛКНОВЕНИЯХ УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР

Число раненых нуклонов и число бинарных нуклон-нуклонных столкновений в событии – параметры, характеризующие центральность, невозможно измерить в реальном эксперименте. В данной работе применяются методы машинного обучения для определения этих параметров как функций от наблюдаемых величин - числа заряженных частиц и числа нейтронов в событии. Для обучения моделей используются данные, сгенерированные пакетом Pythia8. Проводится сравнительный анализ предсказаний трех моделей машинного обучения - дерево решений, random forest и полиномиальная регрессия. На основе результатов анализа предлагается выбрать наиболее точную модель для определения величин, характеризующих центральность столкновений в ядерно-физических экспериментах.

М.В. Покидова^{1,2}, Д. Пуджа¹, Ю.Г. Нарышкин¹
¹НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПОИСК ЧАСТИЦ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ В КАНАЛЕ МОНО-Z В ЭКСПЕРИМЕНТЕ АТЛАС

Гипотеза о существовании Темной материи (ТМ) была впервые выдвинута Фрицом Цвикки в 1930-х годах, но природа частиц ТМ и их взаимодействие с частицами Стандартной модели (СМ) до сих пор неизвестны. Поиски частиц ТМ проходят в разных экспериментах, в том числе и на Большом адронном коллайдере (БАК) в эксперименте ATLAS. Одним из основных кандидатов на роль частиц ТМ является слабовзаимодействующая тяжелая частица (WIMP). Частицы ТМ не регистрируются в современных детекторах непосредственно, поэтому в экспериментах на БАК рождение таких частиц изучается в процессах моно- X , где X – это дополнительно регистрируемый Z - или W -бозон, фотон или струя, которые излучаются до взаимодействия кварков.

В работе были проанализированы данные эксперимента ATLAS, полученные во втором периоде работы БАК (2015–2018 годах) при энергии столкновений протонов в системе центра масс $\sqrt{s} = 13$ ТэВ, и соответствующие интегральной светимости 139 фбн^{-1} . В ходе работы отклонений от предсказаний СМ не обнаружено. Интерпретация данных проводилась в рамках упрощенной модели и двухдублетной модели Хиггса с дополнительным псевдоскалярным медиатором (2HDMa). Получены верхние пределы на массу частиц ТМ в зависимости от массы промежуточной частицы (медиатора), для аксиально-векторного и векторного медиаторов. Исключены массы медиатора до 975 ГэВ. Проведено сравнение с результатами экспериментов по прямому поиску частиц ТМ.

СПЕКТРЫ ПО ПОПЕРЕЧНОМУ ИМПУЛЬСУ -МЕЗОНОВ В СТОЛКНОВЕНИЯХ ГЕЛИЙ-ЗОЛОТО ПРИ ЭНЕРГИИ $\sqrt{s} = 200$ ГЭВ/НУКЛОН

Квантовая хромодинамика предсказывает эффект конфайнмента – невозможность наблюдать кварки в свободном состоянии. При крайне больших плотностях энергии возможно нарушение конфайнмента – деконфайнмент. Близкорасположенные кварки практически не взаимодействуют с друг другом, становятся асимптотически свободны и переходят в особое «квазибесцветное» состояние вещества, характеризующегося хаотичным движением свободных партонов и глюонов – кварк-глюонная плазма (КГП). Энергии, необходимые для получения КГП, можно получить на ускорителях тяжелых ионов, таких, как RHIC, расположенный в Брукхейвенской Национальной Лаборатории США. В 2005 году на RHIC впервые было экспериментально подтверждено образование КГП. Основным эффектом, с помощью которого можно изучать характеристики КГП, является эффект гашения адронных струй, заключающийся в подавлении выходов адронов в столкновениях тяжелых ионов по сравнению с нормированным выходом адронов в протон-протонных столкновениях. Для получения количественных характеристик эффекта гашения струй – инвариантных спектров и, в дальнейшем, факторов ядерной модификации η -мезонов в столкновениях ядер гелий и золота – в ходе исследования были проведены: первичная обработка данных, включающая в себя отбор сегментов данных, калибровка детекторов, калибровка калориметра по энергии; моделирование взаимодействия адронов с веществом детектора для изучения эффективности регистрации; обработка полученных распределений по эффективной массе с целью получения инвариантных спектров рождения η -мезонов по поперечному импульсу.

А.Ю. Арутюнова¹, Е.М. Маев²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова (ПИЯФ)

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПТОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ НА ЯДРАХ ВОДОРОДА И ГЕЛИЯ

Исследование рассеяния гамма-квантов (комптоновского рассеяния) на протонах и легких ядрах позволяет определить одну из фундаментальных характеристик нуклона — поляризуемость. В ПИЯФ разработан новый метод исследования этого процесса с использованием активной мишени, которая одновременно является газовой мишенью и детектором ядер отдачи. В настоящий момент готовятся два эксперимента: на ядрах водорода и гелия. Эксперименты планируются провести на ускорителях MAMI и MESA (Майнц, Германия).

Электрическая и магнитная поляризуемости будут определяться с помощью измерения зависимостей дифференциальных сечений комптоновского рассеяния от энергии и угла рассеяния фотонов. Точность определения этих параметров определяется статистическими и систематическими ошибками эксперимента. Влияние ошибок измерения сечений комптоновского рассеяния на точность измерения поляризуемостей нуклона было проведено с помощью моделирования сечений методом Монте-Карло.

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

КОНВЕРСИОННЫЙ МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ ПРЯМЫХ ФОТОНОВ, РОЖДЕННЫХ В СТОЛКНОВЕНИЯХ ${}^3\text{He}+\text{Au}$ ПРИ ЭНЕРГИИ $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 200$ ГЭВ

Эксперименты по столкновению релятивистских ионов на коллайдерах позволяют изучать кварк-глюонную плазму (КГП) - состояние вещества, в котором партоны (кварки и глюоны) не связаны в адроны. Одним из инструментов по изучению таких свойств КГП, как температура, является спектр прямых фотонов. Фотоны, не являющиеся продуктами распада адронов, называются прямыми и рождаются в КГП и адронном газе.

В работе дано описание конверсионной методики регистрации прямых фотонов в системе столкновений ${}^3\text{He}+\text{Au}$ при энергии $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 200$ ГэВ на эксперименте PHENIX. В веществе детектора VTX фотоны могут конвертироваться в электрон-позитронную пару, которую можно зарегистрировать в дрейфовой камере (метод внешней конверсии). Для такого фотона ищется второй, зарегистрированный в электромагнитном калориметре и имеющий с ним инвариантную массу, согласующуюся с массой π^0 мезона. Таким образом из выборки всех фотонов, зарегистрированных методом внешней конверсией, выделяется часть, относящаяся к продуктам распада π^0 мезонов, которые являются доминирующим источником фотонов. С помощью Монте-Карло моделирования затем оценивается эффективность регистрации второго фотона в калориметре и отношение количества фотонов, образующихся в результате распадов адронов, к количеству фотонов от распадов π^0 . Все факторы вместе позволяют получить спектр прямых фотонов.

По результатам применения методики был сделан вывод о возможности измерения спектра прямых фотонов в ${}^3\text{He}+\text{Au}$ взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 200$ ГэВ в области поперечному импульсу от 0.5 до 6.0 ГэВ/с.

Е.В. Музьяев, А.Ю. Егоров, Я.А. Бердников
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

КВАРК-ДИКВАРКОВАЯ НУКЛОННАЯ МОДЕЛЬ В ПАКЕТЕ PYTHIA 8.3

Сравнение результатов Монте-Карло моделирования генератором Pythia с экспериментальными данными позволяет изучать процессы, возникающие при столкновении релятивистских нуклонов. Для описания этих процессов удобно использовать партонную модель нуклонов, в которой каждый адрон состоит из ряда точечных частиц — партонов. В рамках партонной модели особый интерес представляет модель дикварков (связанных состояний двух кварков). Моделирование происходит с использованием мягких процессов Soft-QCD, которое, в свою очередь, опирается на MPI (мульти-партонные взаимодействия). В работе было произведено внедрение дикварковой модели в Soft-QCD и были рассмотрены неупругие протон-протонные столкновения с энергией центра масс 13 ТэВ. Использование в MPI сечений и партонных функций распределения дикварков изменяет соотношение π^+ -мезонов и протонов в p+p столкновениях. В работе представлено сравнение результатов, полученных в модели с экспериментом.

Н.С. Буданов^{1,2}, П.В. Кравченко¹

¹НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПОЛУЧЕНИЕ ЧИСТЫХ ИЗОТОПНЫХ ФОРМ ВОДОРОДА И ХРОМАТОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ПО ПОИСКУ D3HE СИНТЕЗА

В настоящее время членами лаборатории криогенной и сверхпроводящей техники Петербургского института ядерной физики (г.Гатчина) проводится эксперимент по измерению сечения реакции $d-3\text{He}$ при сверхнизкой энергии (менее 0.01 эВ). Это позволит расширить понимание первичного нуклеосинтеза после Большого взрыва, а также определить, как себя ведёт астрофизический S -фактор при энергиях близких к нулю. Исследуемая реакция имеет крайне низкое сечение, потому выдвигаются высокие требования для чистоты газа, в том числе изотропной. В эксперименте в качестве мишени применяется смесь, состоящая из 92% HD и 8% 3He . Для получения изотропно чистого HD применяется метод рэлеевского исчерпывания из газовой смеси H_2 и D_2 . Суть метода заключается в разделении компонентов газовой смеси в ректификационной колонне при помощи нагревания нижней части колонны. В результате, в течение часа в колонне устанавливается стационарное распределение температуры и давления, а следовательно, и распределение концентраций изотопов внутри колонны. После этого обеспечивается сброс лишних компонентов газовой смеси, что позволяет получить газ, содержащий только интересующие изотопы водорода. Для контроля состава смеси, а также концентраций ее компонент, применяется стандартная схема газового хроматографа с дифференциальным детектором по теплопроводности. Полученные данные обрабатываются при помощи программного пакета, написанного с использованием ROOT.

О.В. Лосева, В.М. Соловьев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИЗМЕРЕНИЕ СПИНОВЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ В ПРОЦЕССЕ РОЖДЕНИЯ ПАР t -КВАРК- t -АНТИКВАРК В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ATLAS

Исследование свойств t -кварка является одной из основных задач эксперимента ATLAS. Одной из особенностей t -кварка является то, что вследствие малого времени жизни (5×10^{-25} с) он распадается до процесса адронизации. При этом продукты распада t -кварка сохраняют информация о его спине. Это позволяет исследовать корреляции спинов t -кварка и t -антикварка в их парном рождении по угловым распределениям продуктов распада.

В данной работе для изучения корреляции спинов рассматривался двухлептонный канал распада пары t -кварк- t -антикварк. Наблюдаемой величиной являлся азимутальный угол $\Delta\phi$ между двумя заряженными лептонами, измеренный в лабораторной системе координат в плоскости, поперечной направлению пучка. Дифференциальные поперечные сечения измерялись в событиях с одним электроном и одним мюоном противоположных знаков заряда в зависимости от $\Delta\phi$ и разницы их псевдобыстрот $\Delta\eta$. Полученные распределения по $\Delta\phi$ и $\Delta\eta$ сравнивались с предсказаниями Стандартной модели (СМ).

Наблюдаемая корреляция спинов оказалась несколько выше, чем предсказывает СМ. Данные согласуются с результатами вычислений в следующем за лидирующим порядке теории возмущений КХД (NLO), но хуже согласуются с результатами вычислений для более высоких порядков (NNLO). Была выполнена интерпретация полученных результатов в

рамках суперсимметрии. Выполнен поиск пары суперсимметричных t -кварков, распадающихся на t -кварки СМ и легкие нейтрино.

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

X(3872): ОБНАРУЖЕНИЕ, ПЕРСПЕКТИВЫ И МЕСТО В СОВРЕМЕННОЙ КАРТИНЕ ФИЗИКИ ЧАСТИЦ

19 января 2022 года коллаборация CMS (LHC, CERN) сообщила об образовании одного из возможных кандидатов в тетракварки — X(3872) при столкновениях ультрарелятивистских тяжелых ионов Pb-Pb с энергией $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ. Это состояние было впервые замечено в 2003 году в эксперименте Belle, а затем быстро подтверждено BaBar, CDF и D0.

Тетракварк — экзотический адрон, который представляет собой частицу, состоящую из двух кварков и двух антикварков. Тетракварки лежат за пределами обычной классификации в кварковых моделях частиц и могут обладать квантовыми числами ($J^{PC} = 0^{-}, 0^{+}, 1^{-+}, 2^{++}, 3^{-+}$ и др.) невозможными в случае кварк-антикварковых пар (мезоны). Именно поэтому поиск тетракварков представляет огромный интерес для исследователей по всему миру.

В данной работе проведен анализ последних исследований X(3872), рассмотрены строение и свойства частицы, возможные и уже подтвержденные пути образования, место в Стандартной модели и перспективы дальнейшего изучения.

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

ЭЛЛИПТИЧЕСКИЕ ПОТОКИ ϕ МЕЗОНОВ В СТОЛКНОВЕНИЯХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

В экспериментах на коллайдере RHIC и позднее на коллайдере LHC в столкновениях тяжелых релятивистских ионов было обнаружено формирование горячей и плотной материи, в которой кварки и глюоны находятся в состоянии деконфайнмента, так называемой кварк-глюонной плазмы (КГП). Изучение КГП и определение ее свойств и характеристик стало одной из главных задач современной физики высоких энергий и элементарных частиц.

Исследование особенностей рождения ϕ мезона, усредненное по азимутальному углу, в тяжелых системах столкновений предоставило экспериментальные свидетельства образования КГП путем наблюдения таких эффектов как повышенный выход странности, гашение струй и увеличенный выход барионов по сравнению с мезонами. Однако для всестороннего изучения свойств КГП требуются дальнейшие измерения особенностей рождения ϕ мезонов в столкновениях тяжелых ионов.

Эллиптический поток адронов описывает азимутальному анизотропию рождения адронов в релятивистских столкновениях ионов в плоскости, поперечной направлению пучка, и предоставляет возможность рассматривать КГП с точки зрения гидродинамики. Исследование эллиптического потока также позволяет изучать влияние начальной геометрии столкновения на эволюцию системы сталкивающихся ядер.

В данном докладе представлены результаты изучения эллиптического потока ϕ мезонов в столкновениях Cu+Au при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ и U+U при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 192$ ГэВ в области малых быстрот, измеренного в эксперименте PHENIX на коллайдере RHIC. Для

интерпретации полученных экспериментальных результатов приводится сравнение с теоретическими моделями AMPT и iEBE-VISHNU.

И.И. Шевченко, Д.М. Ларионова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОТНОШЕНИЕ ВЫХОДОВ ПРОТОНОВ К ВЫХОДАМ ПИ-МЕЗОНОВ В CU+AU СТОЛКНОВЕНИЯХ ПРИ ЭНЕРГИИ 200 ГЭВ

Кварк-глюонная плазма (КГП) – состояние вещества, состоящее из асимптотически свободных кварков и глюонов. Считается, что состояние КГП достигается в столкновениях релятивистских тяжелых ионов, таких как Cu+Au столкновения при энергии 200 ГэВ. Одним из признаков образования КГП является увеличение величины отношения выходов протонов к выходам пи-мезонов (p/p_i) по сравнению с протон-протонными столкновениями, в которых значение отношения p/p_i составляет 0.3. Данный эффект впервые был обнаружен экспериментом PHENIX в 2012 г в столкновениях симметричной системы Au+Au и объяснен в рамках модели рекомбинации, одной из моделей адронизации КГП.

В данной работе представлено сравнение результатов моделирования рождения заряженных адронов с помощью пакета AMPT, включающего процессы рекомбинации, в столкновениях асимметричной системы Cu+Au с экспериментальными данными, полученными в эксперименте PHENIX.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ РОЖДЕНИЯ НЕЙТРАЛЬНЫХ П-МЕЗОНОВ В AU+AU СТОЛКНОВЕНИЯХ ПРИ ЭНЕРГИИ $\sqrt{(sNN)}=200$ ГЭВ В PYTHIA8

В работе представлены результаты моделирования (Pythia8) инвариантных спектров по поперечному импульсу и факторов ядерной модификации нейтральных пионов в столкновениях ядер золота (Au + Au) при энергии $\sqrt{(sNN)} = 200$ ГэВ. Спектры нейтральных пионов восстанавливались из распределений по инвариантной массе двух гамма-квантов. Анализ спектров и факторов ядерной модификации нейтральных пионов проводился в пяти различных классах событий по центральности (0-20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100)% в диапазоне поперечных импульсов от 0 до 2.5 ГэВ/с. Получено, что: - подавление выходов π^0 -мезонов наблюдается в центральных соударениях и пропадает в периферийных; - подавление не зависит от величины поперечного импульса p_T π^0 -мезона в изученном диапазоне. Полученные в результате моделирования тренды близки к экспериментальным.

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

ДИНАМИКА РОЖДЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ АДРОНОВ ОТ МАЛЫХ К БОЛЬШИМ СТАЛКИВАЮЩИМСЯ СИСТЕМАМ

Рождение барионов и мезонов в протон-протонных столкновениях при энергиях 200 ГэВ успешно описывается в рамках термодинамических моделей и модели гидродинамики. В таких столкновениях отношение выходов протонов к выходам пи-мезонов (p/p_i) составляет

0.3. В 2012 г экспериментом PHENIX было обнаружено, что в столкновениях Au+Au отношение p/\bar{p} достигает значения 0.8, причем его величина проявляет сильную зависимость от центральности соударения. Данный эффект был интерпретирован как признак образования кварк-глюонной плазмы (КГП) и описан в рамках модели рекомбинации, являющейся одной из моделей адронизации КГП. Исследование зависимости величины отношения от геометрии и размера системы столкновения позволит изучить минимальные условия формирования КГП и процесс ее адронизации.

В данной работе представлены зависимости величины отношения p/\bar{p} от поперечного импульса и центральности, измеренные в $p+Al$, $p+Au$, $d+Au$, $He+Au$, $Cu+Au$, $Au+Au$ столкновениях при энергии 200 ГэВ и в $U+U$ столкновениях при энергии 192 ГэВ.

П.Р. Шаяхметова¹, В.А. Бакаев¹, А.М. Червяков²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Санкт-Петербургский клинический научно-практический центр специализированных видов медицинской помощи (онкологический)

ОСОБЕННОСТИ ПЛАНИРОВАНИЯ ОБЛУЧЕНИЯ ПАЦИЕНТОВ НА УСКОРИТЕЛЕ VARIAN TRUEBEAM

Дистанционная фотонная лучевая терапия является одним из основных способов лечения онкологических заболеваний. Благодаря достижениям в области физики и вычислительной техники методы терапии фотонами высоких энергий становятся более точными и эффективными. Одним из таких методов является дистанционное облучение пациентов на медицинском ускорителе Varian TrueBeam с применением системы планирования лучевой терапии Eclipse.

Цель настоящей работы – ознакомление с планирующей системой Eclipse, анализ ее особенностей и оптимизация работы на ускорителе Varian TrueBeam. При этом использовались ресурсы ГБУЗ «Санкт-Петербургский клинический научно-практический центр специализированных видов медицинской помощи (онкологический)».

В ходе работы проведены расчеты лечебных планов молочной железы разной степени сложности и выполнен анализ физико-технических параметров облучения. Исследованы углы поворота гантри, изучено выставление референтных точек, позиционирование лепестков многолепесткового коллиматора и приемлемость расчета дозовых полей. В работе были определены наиболее важные особенности планирования облучения с учётом технических возможностей медицинского ускорителя Varian True Beam.

В.Е. Ларионов^{1,2}, П.В. Кравченко¹

¹НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ ИСТОЧНИКА АТОМАРНОГО ПОЛЯРИЗОВАННОГО ПУЧКА В ПРОЕКТЕ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ РЕАКЦИИ ЯДЕРНОГО DD-СИНТЕЗА С ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ ИСХОДНЫХ ЧАСТИЦ ПРИ ЭНЕРГИЯХ ДО 100 КЭВ (POLFUSION)

Эксперимент PolFusion, нацелен на исследование ядерного синтеза поляризованных дейтерия и дейтронов при энергиях пучков в лабораторной системе координат до 100 кэВ. Для данного процесса рассматривается два канала реакции: $^3\text{He} + n$ и $^3\text{H} + p$. Изучение этих каналов расширит понимание первичного нуклеосинтеза и эволюции звезд на раннем этапе их формирования.

Для проведения эксперимента необходимо создать поляризованную газовую мишень. Наиболее подходящим вариантом служит источник атомарного поляризованного пучка. Можно выделить три основных типа источников: источники, использующие лэмбовский сдвиг (LSS), источники с оптической накачкой (OPPIS), источники на основе аппарата Штерн-Герлах и ячеек сверхтонких переходов (PABS).

Для получения мишени с максимальной поляризацией и интенсивностью в эксперименте PolFusion используется PABS. Во время работы с PABS была выполнена оптимизация плотности потока дейтерия, а также исследованы зависимости интенсивности атомарного пучка от RF-мощности, потока газа в диссоциатор и температуры сопла диссоциатора.

А.Ю. Рождественский^{1,2}, П.В. Кравченко¹

¹НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В РАМКАХ ПРОЕКТА ПО ИССЛЕДОВАНИЮ РЕАКЦИИ ЯДЕРНОГО DD-СИНТЕЗА С ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ ИСХОДНЫХ ЧАСТИЦ ПРИ НИЗКИХ ЭНЕРГИЯХ (POLFUSION)

Эксперимент PolFusion, осуществляемый в Петербургском институте ядерной физики (Гатчина) при участии исследователей из Исследовательского центра г. Юлих, Германия, и Университета г. Феррара, Италия, направлен на исследование реакции dd-ядерного синтеза с поляризованными дейтронами. В эксперименте будут измерены дифференциальные сечения рассеяния реакций dd-синтеза с образованием ${}^3\text{He} + n$ либо ${}^3\text{H} + p$ в конечном состоянии при различной взаимной ориентации спинов сталкивающихся дейтронов с энергией 10-100 кэВ.

Одной из основных частей экспериментальной установки является центральная детекторная система. В ее состав входит центральный 4π-детектор, который представляет собой кубическую структуру с внутренней поверхностью, заполненной кремниевыми PIN-диодами, и система сбора данных.

Результаты тестовых сеансов эксперимента PolFusion в 2015 и 2019 годах с использованием различных мишеней показали, что в виду низкой скорости счета и высокой чувствительности детекторной системы, обусловленной условиями эксперимента, вторичное космическое излучение, которое преимущественно состоит из мюонов высоких энергий, вносит существенный вклад в результирующий энергетический спектр продуктов реакции ядерного dd-синтеза.

Для подавления данного эффекта было предложено создание системы сцинтилляционных детекторов, основной задачей которых является регистрация высокоэнергетических мюонов и их исключение из результирующего энергетического спектра продуктов реакции.

СЕКЦИЯ «ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД И НАНОСТРУКТУР»

А.И. Веретенников¹, Е.А. Лубянкина^{1,2}, И.В. Редуто³, Е.С. Бабич^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Высшая школа фундаментальных физических исследований.

²Академический университет им. Ж.И. Алферова

³Университет Восточной Финляндии

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ БИРЕЗОНАНСНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОСТРУКТУР

Металлические наночастицы находят широкое применение в оптике, химии, медицине и других областях. Это связано с возможностью оптического возбуждения коллективных электронных колебаний в металлах, так называемого плазмонного резонанса (ПР). Возбуждение ПР приводит к резкому увеличению электрического поля вблизи поверхности частицы. Это, например, позволяет усилить комбинационное (неупругое рассеянное) излучение в несколько тысяч раз, и использовать металлические наночастицы в качестве чувствительных сенсоров. Использование металлических наноструктур, в которых возможно возбуждение двух отдельных резонансов должно привести к дополнительному усилению. Таким образом, актуальной задачей является формирование и исследование бирезонансных структур. В данной работе представлен метод формирования таких наноструктур.

Путем сочетания отжига тонких плёнок металлов (Au, Cu), $\text{Ag}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$ ионного обмена натрий-кальциевого стекла и термообработки нами были получены ансамбли наночастиц различных металлов на поверхности стекла. Результаты абсорбционной спектроскопии показали, что в таких структурах действительно можно наблюдать два отдельных резонансных пика, положением которых можно манипулировать на стадии формирования структур. При этом рассмотренный метод не требует высокотехнологичного оборудования и подходит для массового производства.

Д.А. Волков^{1,2}, И.А. Горбунова¹, М.Э. Сасин¹, О.С. Васютинский¹

¹Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНФОРМАЦИЙ КОФЕРМЕНТА NADH В РАСТВОРАХ ВОДА-ЭТАНОЛ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

Компьютерное моделирование биологических флуоресцентных молекул в настоящее время широко используется в инженерных и научных приложениях для получения информации об их структурной динамике. Одной из таких важных молекул является кофермент NADH, участвующий в окислительно-восстановительных реакциях в живых клетках. Известно, что в процессе окислительно-восстановительных реакций происходят значительные конформационные изменения кофермента. Таким образом, возможность экспериментального разделения различных конформационных состояний NADH, а также понимание того, как окружение влияет на геометрическую конфигурацию NADH, представляют большой интерес. Целью настоящего исследования является изучение конформационной динамики NADH в водных растворах этанола различной концентрации методом молекулярной динамики. Моделирование было выполнено с помощью программного пакета Gromacs с использованием силового поля Charmm36. Моделирование выполнялось после уравнивания системы, при температуре 300 К и давлении 1 атм,

время симуляции составляло 300 нс. В результате моделирования был получен набор траекторий молекулы NADH для 6 концентраций этанола в растворе от 0 до 100%. В результате анализа траекторий были получены данные о расстояниях между центрами масс колец никотинамида и аденина, соотношение количества сложенных конформаций NADH и гистограммы углов между аденином и никотинамидом для сложенных конформаций кофермента. Полученные результаты могут быть использованы для интерпретации изменений квантового выхода и времени вращательной диффузии молекул NADH, наблюдавшихся в экспериментах по наблюдению затухания поляризованной флуоресценции в растворах различной вязкости и полярности.

И.А. Градусов^{1,2}, В.П. Белик¹, Д.М. Бельтюкова¹, О.С. Васютинский¹, М.К. Данилова¹
¹Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН
²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

КИНЕТИКА ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ БИОЛОГИЧЕСКОГО КОЭНЗИМА ФАД В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ ПРОПИЛЕНГЛИКОЛЯ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ПИКОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Флавин-аденин-динуклеотид (ФАД) – внутриклеточный коэнзим, который широко используется как естественный флуоресцирующий биомаркер для исследования биохимических процессов, происходящих в живых клетках и тканях. Молекула ФАД может существовать в сложенной и развернутой конформациях. В случае сложенной конформации между хромофорными группами аденином и изоаллоксазином возникает π - π химическая связь, которая отсутствует в развернутой конформации, причем соотношение конформаций зависит от состава раствора.

В работе экспериментально исследовались зависимости времен затухания флуоресценции молекулы ФАД и времен вращательной диффузии от концентрации пропиленгликоля в водном растворе. Методика эксперимента заключалась в следующем. ФАД в водном растворе пропиленгликоля облучался пикосекундными лазерными импульсами с длинами волн 355 нм и 450 нм, затем регистрировалась поляризованная флуоресценция на длине волны 530 нм. Была исследована кинетика затухания флуоресценции и по полученным данным были вычислены времена затухания флуоресценции, анизотропия флуоресценции и время вращательной диффузии.

В результате работы были определены зависимости времен жизни флуоресценции ФАД от концентрации пропиленгликоля, а также определены коэффициент анизотропии и время вращательной диффузии. Было показано, что коэффициент анизотропии зависел от длины волны возбуждающего лазерного излучения, но не зависел от концентрации пропиленгликоля в растворе. При этом время вращательной диффузии ФАД оказалось прямо пропорционально вязкости раствора в соответствии с уравнением Стокса-Эйнштейна.

А.А. Иванов^{1,2}, В.В. Чалдышев¹
¹Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН
²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОПТИЧЕСКОЕ ОТРАЖЕНИЕ РЕЗОНАНСНОЙ БРЭГГОВСКОЙ СТРУКТУРОЙ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ GAN/ALGAN

Резонансная брэгговская структура (РБС) представляет собой систему квантовых ям (КЯ) с периодом, при котором длина волны брэгговского резонанса соответствует энергии

возбуждения экситона. Такие системы примечательны тем, что в них наблюдается когерентное взаимодействие экситонов в КЯ со светом, в результате чего уменьшается их излучательное время жизни пропорционально числу периодов структуры. Данный факт выражается в усилении экситонного отражения и одновременном подавлении поглощения. Благодаря этим свойствам резонансные брэгговские структуры могут найти применение в качестве быстрых и энергоэффективных оптических модуляторов.

Мы сообщаем об экспериментальном и теоретическом анализе оптических спектров отражения периодической системы из 30 КЯ GaN, разделенных туннельно-непрозрачными барьерами AlGaIn. Образец был выращен с использованием метода газофазной эпитаксии из паров металлоорганических соединений на подложке из сапфира с градиентом толщины барьера для реализации различного положения брэгговского резонанса и энергии квазидвумерного экситона. Все измерения проводились при различных углах падения s- и p-поляризованного падающего света. Обнаружено, что величина и форма особенностей в спектре отражения заметно меняются с изменением положения брэгговского максимума отражения относительно экситонного резонанса. Компьютерное моделирование с использованием метода матриц переноса, которые строятся на основе формул экситонного отражения и пропускания, приведенных в работе, позволило определить параметры экситонов в КЯ.

Е.А. Лубянкина^{1,2}, Е.С. Бабич^{1,2}

¹Академический университет им. Ж.И. Алфёрова

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

АНАЛИЗ ФУНКЦИИ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ НАНОСТРУКТУРЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЕЁ УСИЛЕНИЯ ГКР

Спектроскопия гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) света является сверхчувствительной методикой для детектирования малых концентраций веществ. Увеличение эффективности рассеяния в данном методе по сравнению с спектроскопией КР происходит благодаря возбуждению в металлических наноструктурах плазмонного резонанса. В ГКР-спектроскопии используются наноструктуры различной формы, материала и размера, однако морфологический критерий оценки эффективности усиления рассеяния отсутствует. В нашей работе использована функция спектральной плотности мощности (ФСПМ) для характеристики морфологии наноструктур. ФСПМ описывает амплитуду шероховатости поверхностей как функцию, обратную размеру поверхностных структур, и позволяет оценить корреляционную длину, характеризующую средний латеральный размер наноструктур. На примере дендритных структур со сложной морфологией продемонстрирована возможность использования корреляционной длины для оценки ГКР активности наноструктур. В частности, установлено, что структуры, характеризующиеся меньшей корреляционной длиной, демонстрируют большее усиление КР.

Д.В. Яшков^{1,2}, И.А. Горбунова¹, М.Э. Сасин¹, А.Д. Ведяйкин², О.С. Васютинский¹
¹Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН
²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛУОРЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ NADH-ADH В СМЕСИ ЕСТЕСТВЕННЫХ ФЕРМЕНТАТИВНЫХ КОМПЛЕКСОВ МЕТОДОМ ФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ С ВЫСОКИМ ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Изучение спектральных свойств естественных внутриклеточных флуорофоров в растворах и в живых клетках методом флуоресцентной поляризационной спектроскопии с высоким временным разрешением в настоящий момент является приоритетным направлением исследований в области биомедицинских технологий. Кофермент никотинамид-аденин-динуклеотид (NAD) является важным внутриклеточным флуорофором, который участвует в регулировании окислительно-восстановительных реакций в живых клетках. В данной работе представлены результаты исследований поляризованной флуоресценции комплекса NADH-ADH в смеси естественных ферментативных комплексов при двухфотонном возбуждении на длинах волн 720 нм и 840 нм. Сигналы затухания флуоресценции образца регистрировались методом счёта фотонов с временной корреляцией (TCSPC). В результате были получены спектры флуоресценции раствора ADH при двухфотонном возбуждении на длинах волн 720 нм и 840 нм. Кривые затухания были измерены в диапазонах длин волн 426-446 нм и 470-490 нм для двух длин волн возбуждения. В результате анализа сигналов затухания поляризованной флуоресценции были получены следующие параметры: времена затухания флуоресценции, весовые коэффициенты, время вращательной диффузии и параметр анизотропии флуоресценции. Полученные параметры были проанализированы в зависимости от длины волны возбуждения и спектрального диапазона наблюдения флуоресценции. В результате впервые удалось выделить и разделить параметры затухания флуоресценции различных флуоресцирующих коферментов в растворе. Результаты исследования могут быть использованы для решения актуальных проблем, связанных с неинвазивной диагностикой онкологических и нейродегенеративных заболеваний флуоресцентными методами.

А.Д. Рыбкин^{1,2}, И.С. Шашкин¹, С.О. Слипченко¹, Н.А. Пихтин¹
¹Физико-технический институт имени А.Ф.Иоффе
²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАЗОГРЕВА АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ МОЩНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ (1060 НМ) СО СВЕРХШИРОКОЙ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ АПЕРТУРОЙ (800 МКМ)

Одним из подходов, повышающих выходную оптическую мощность, является расширение излучающей апертуры. Однако увеличение выходной мощности может привести к усилению теплового разогрева лазерных диодов по сравнению с традиционными конструкциями, что негативно сказывается на их излучательных характеристиках. Данная работа посвящена методике исследования разогрева активной области лазерных диодов с временной зависимостью в режиме импульсной накачки. Методика основана на наблюдении красного смещения спектра генерации при сужении запрещенной зоны структуры из-за роста температуры активной области. Записанные оптические сигналы с временным разрешением на всем спектральном диапазоне с выборкой по длинам волн, дают нам возможность

определить моменты включения новых спектральных линий при накачке лазера. С помощью температурного коэффициента, рассчитанного для исследуемой структуры, новые длины волн переводятся в перегрев активной области. Используя данную методику, проведены исследования мощных полупроводниковых лазерных диодов на основе гетероструктуры GaAs/AlGaAs со сверхширокой излучающей апертурой.

А.Э. Ризаев^{1,2}, В.В. Золотарев¹, С.О. Слипченко¹, Н.А. Пихтин¹

¹Физико-технический институт имени А.Ф.Иоффе

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ОДНОМОДОВЫХ РБЗ ЛАЗЕРОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАТЕРАЛЬНОЙ МОДОВОЙ СЕЛЕКЦИИ

Настоящая работа посвящена исследованию спектральных характеристик и оптимизации конструкции одномодовых полупроводниковых лазеров с распределенным брэгговским зеркалом (РБЗ) первого порядка. Объектами исследования являются полупроводниковые лазеры на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs/InGaAs, излучающие в диапазоне 1-1.1 мкм, с поверхностным РБЗ, вытравленное в р-эмиттере гетероструктуры. Проанализирована возможность латеральной селекции мод в узких волноводах лазеров мезаполосковой конструкции. Основываясь на теории связанных мод, проведены численные расчеты, демонстрирующие зависимость спектра отражения РБЗ от различных геометрических параметров дизайна чипа и решетки. Наличие РБЗ позволяет осуществить селекцию латеральных мод лазера, за счет различного коэффициента отражения для TE₀₀ и TE₀₁ мод. Данный подход позволит увеличить размер латерального волновода, что приводит к увеличению выходной оптической мощности при сохранении одномодового режима генерации. Расчеты продемонстрировали, что селекция наблюдается только для последней появившейся моды, что обусловлено фактором оптического ограничения для РБЗ. Селекция сохраняется до тех пор, пока последняя мода слабо локализована под полосковым контактом. В расчетной модели это позволило увеличить ширину латерального волновода более чем на 50% с 3 мкм до 5 мкм, что должно обеспечить существенное увеличение оптической мощности в одномодовом режиме генерации.

Исследования поддержаны грантом РФФИ №19-79-30072

Д.А. Шергин, Л.Г. Аскинази
Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ПОТЕНЦИАЛА ПЛАЗМЫ ПРИ РАЗВИТИИ АЛЬФВЕНОВСКИХ СОБСТВЕННЫХ МОД С ПОМОЩЬЮ НІВР-ДИАГНОСТИКИ

В плазме может распространяться несколько разновидностей волн, одна из которых – это магнитогидродинамические (МГД) волны. МГД волны, в свою очередь, разделяют на два типа: продольные волны (магнитный звук) и поперечные волны (альфвеновские волны). Они могут приводить к потерям энергичных частиц, что ухудшает нагрев плазмы, а также представляет опасность для стенок камеры.

В плазме токамака ТУМАН-3М при омическом нагреве при помощи магнитных зондов были зарегистрированы высокочастотные альфвеновские колебания. Было выдвинуто предположение о том, что эти колебания локализованы в центре плазменного шнура, поэтому исследовать их надо при помощи диагностики, имеющей доступ к центру.

Такой диагностикой является пучок тяжелых ионов (НІВР) – метод бесконтактного невозмущенного измерения параметров плазмы, таких как: потенциал и плотность. При помощи НІВР будут исследованы альфвеновские колебания в центре плазменного шнура, которые проявляются на колебании потенциала и плотности. Для исследования альфвеновских волн был разработан прототип усилителя с полосой пропускания до 2 МГц и чувствительностью 10 нА. Амплитуда колебаний потенциала плазмы при развитии альфвеновских колебаний составляет 10 В. При обнаружении волн можно будет подтвердить их локализацию, а также исследовать их свойства в плазме токамака ТУМАН-3М.

Н.В. Штырхунов, И.Ю. Сениченков, В.А. Рожанский, П.А. Молчанов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА CFETR В РЕЖИМЕ С ИЗЛУЧАЮЩЕЙ X-ТОЧКОЙ

Целью работы является проверка возможности достижения режима с излучающей X-точкой в токамаках-реакторах на примере токамака CFETR, а также исследование физики данного режима. Данный режим является перспективным для будущих токамаков-реакторов из-за значительного уменьшения тепловой нагрузки на дивертор. В токамаках-реакторах мощность, пересекающая сепаратрису, может достигать 400 МВт, а для нормальной работы мощность не должна превышать 160 МВт, остальное должно излучиться. Этого можно достичь в режиме с излучающей X-точкой.

Сейчас этот режим экспериментально наблюдается на токамаке ASDEX Upgrade и успешно моделируется численным кодом SOLPS-ITER.

В данной работе было проведено моделирование численным кодом SOLPS-ITER с учетом дрейфов и нейтральных частиц для CFETR. В качестве излучающей примеси использовался аргон. В моделировании удалось достигнуть значительного ослабления потоков энергии, проходящих через сепаратрису и попадающих на дивертор. При мощности разряда в 300 МВт до сепаратрисы доходят около 10 МВт. Кроме того, температура на внешней и внутренней диверторной пластине меньше 1 эВ, а плотность потока энергии меньше 1 МВт/м^2 , что говорит о достижении режима отрыва. Однако Z_{eff} в данных условиях внутри сепаратрисы на границе расчётной области больше 4, что является большой

величиной для нормальной работы токамака. Также вопрос стабильности данного режима остается открытым и будет изучаться в дальнейшем.

М.В. Учаев¹, Ю.А. Кропотина^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН

ПЕРЕУСКОРЕНИЕ ПРОТОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ НА УДАРНЫХ ВОЛНАХ

В работе изучается ускорение электронов и протонов бесстолкновительными ударными волнами, возникающими в горячей плазме скопления галактик. В частности, изучается возможность переускорения этими ударными волнами нетепловых протонов. Для этого используется заранее заданное распределение, которое выглядит следующим образом:

$$f_{CR(p)} \psi f_N \left(\frac{p}{p_{inj}} \right)^{-q} \exp \left[- \left(\frac{p}{p_{max}} \right)^2 \right], f_N = \frac{n_2}{\pi^{1.5}} p_{th,p}^{-3} \exp(-Q_i^2), p_{inj} = Q_i p_{th,p}$$

Моделирование производится кодом Smilei. Этот код основан на так называемом PIC (Particle-in-Cell) методе. Согласно данному методу, фазовое пространство разбивается на ячейки, каждая из которых характеризуется своим набором макроскопических параметров (плотность, магнитное поле). На этой сетке методом характеристик решается система уравнений Власова-Максвелла для электронов и протонов. Выбор методики гарантирует учёт электронных и ионных кинетических эффектов.

В ходе работы получены и проанализированы распределения частиц за фронтом квазипродольной бесстолкновительной ударной волны. Сравнивается эффективность ускорения протонов в случае максвелловского распределения перед фронтом и в случае наличия надтепловой компоненты.

Д.А. Чирков¹, Ю.А. Кропотина^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН

ПОЛУЧЕНИЕ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНЫХ УДАРНЫХ ВОЛНАХ С РАЗЛИЧНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

В данной работе исследуется температурное отношение электронов и ионов за фронтом бесстолкновительных ударных волн. В то время как в столкновительной ударной волне температуры различных компонент выравниваются практически мгновенно, в отсутствие кулоновских соударений тепловое равновесие может устанавливаться на временах много больше времени формирования фронта. Различие температур ионов и электронов за фронтом ударной волны можно феноменологически описать, вводя разные адиабатические индексы для электронов (γ_e) и ионов (γ_i) вблизи фронта ударной волны. При этом далеко перед фронтом индексы можно считать одинаковыми и равными $\gamma = 5/3$.

В ходе работы из системы уравнений для адиабаты Гюгонио были получены уравнения для температурного отношения и степени сжатия плазмы в ударной волне с различными адиабатическими индексами компонент. Сравнивая найденные таким образом отношения температур за фронтом с полученными другими авторами в рамках кинетического Particle-in-cell моделирования, можно оценить эффективные адиабатические индексы компонент. Полученная аппроксимация может быть использована в гибридных кодах, где ионы моделируются как частицы, а электроны как безмассовая нейтрализующая жидкость с заданным уравнением состояния.

А.В. Мартынова, В.М. Остряков
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ НА ГЕНЕРАЦИЮ РАДИОИЗОТОПОВ В АТМОСФЕРЕ

Потоки галактических космических лучей (ГКЛ), падающих на земную атмосферу, генерируют в ней различные радиоактивные изотопы (^{14}C , ^{10}Be , ^{36}Cl и др.), концентрация которых отражает свойства ГКЛ (их энергетический спектр и интенсивность). Независимая дифференциальная по времени датировка образцов, в которых производятся измерения активности радионуклидов, дает возможность исследования свойств ГКЛ в прошлом (тысячи – миллионы лет).

Однако, известно, что на таких временных шкалах магнитное поле Земли менялось, что из-за эффекта экранирования также влияет на производство радионуклидов. В настоящей работе разработана процедура вычисления скорости генерации ^{14}C , ^{10}Be , ^{36}Cl в атмосфере Q (ат/см²с) зависящая от потока ГКЛ и от дипольного магнитного момента Земли $M(t)$. Используются новейшие палеомагнитные данные различных авторов для величины $M(t)$ за последние 10 000 лет с учетом ошибок такого восстановления, что позволило оценить ошибки в вычислениях Q .

С.П. Рощупкин, В.Д. Серов, В.В. Дубов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РЕЗОНАНСНЫЙ ЭФФЕКТ РОЖДЕНИЯ УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЭЛЕКТРОН- ПОЗИТРОННОЙ ПАРЫ ДВУМЯ ГАММА-КВАНТАМИ В СИЛЬНОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

Теоретически изучен резонансный процесс рождения ультрарелятивистских электрон-позитронных пар двумя жесткими гамма-квантами во внешнем электромагнитном поле (процесс Брейта-Уиллера, модифицированный внешним электромагнитным полем). Условия резонанса соответствуют выходу промежуточного виртуального электрона (позитрона) на массовую оболочку во внешнем электромагнитном поле. В условиях резонанса имеется четыре канала реакции, для каждого из которых процесс второго порядка по постоянной тонкой структуры эффективно распадается на два процесса первого порядка: стимулированный внешним полем Комптон-эффект и стимулированный внешним полем процесс Брейта-Уиллера. Резонансная кинематика процесса подробно изучена, проведено сравнение со случаем слабого внешнего поля. Резонансный энергетический спектр конечной электрон-позитронной пары существенно зависит от их углов вылета, что качественно отличает резонансный процесс от нерезонансного. Получено резонансное дифференциальное сечение процесса и показано, что оно значительно превышает соответствующее сечение без внешнего поля.

В.В. Корзуева, Е.О. Векшина, В.А. Рожанский, И.Ю. Сениченков,
Е.Г. Кавеева, И.Ю. Веселова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА ДЕМО КОДОМ SOLPS-ITER

Приведены результаты моделирования пристеночной плазмы токамака DEMO кодом SOLPS-ITER. Моделирование учитывает кинетическое описание атомов и молекул и вклад дрейфов в распределение плазмы. Приводятся сравнения результатов расчетов с напусками аргона и неона в качестве излучающей примеси. Обе примеси эффективно снижают плотность потока на диверторные пластины до требуемых $5 \frac{MBm}{m^2}$. Несмотря на давление нейтральных частиц в 20 Па в диверторной области, температура электронов в дальнем обдирочном слое на внешней диверторной пластине превышает допустимые 5 эВ. При этом в окрестности сепаратрисы на диверторной пластине получен режим отрыва. Исходя из анализа распределения примеси, было получено, что аргон лучше удерживается в диверторной области, чем неон. Также получено, что обе примеси переизлучают до 70% мощности плазмы в расчетной области. Данные результаты демонстрируют пригодность использования и аргона, и неона в качестве излучающей примеси. Однако остается неразрешенной проблема уменьшения температуры в дальнем обдирочном слое внешней диверторной пластины, что оставляет пространство для дальнейших исследований.

С.П. Рощупкин¹, А.В. Дубов¹, В.В. Дубов¹, С.С. Стародуб²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Институт прикладной физики НАН Украины

РЕЗОНАНСНЫЙ СПОНТАННЫЙ ТОРМОЗНОЙ ЭФФЕКТ УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ НА ЯДРАХ В СИЛЬНОМ РЕНТГЕНОВСКОМ ПОЛЕ

Теоретически исследована возможность излучения высокоэнергетичных гамма-квантов с энергиями порядка 100 ГэВ ультрарелятивистскими электронами при рассеянии на ядрах в сильном электромагнитном поле рентгеновского диапазона частот напряженностью вплоть до $\sim 10^{27}$ Вт·см⁻². Показано, что данный эффект может быть реализован в особых экспериментальных условиях, в процессе резонансного спонтанного тормозного излучения ультрарелятивистских электронов во внешнем поле вблизи пульсаров и магнетаров. Данные особые экспериментальные условия определяют также и характерную энергию электронов. Эта характерная энергия должна быть значительно меньше энергии исходных электронов. В представленных условиях, происходит излучение спонтанных гамма-квантов в узком конусе с энергиями, близкими к значениям энергии начальных электронов. При этом, резонансные дифференциальные сечения исследуемых процессов могут на 20 порядков превышать соответствующие дифференциальные сечения для процессов, происходящих без внешнего поля. Полученные результаты могут объяснить возникновение гамма-квантов высоких энергий вблизи пульсаров и магнетаров.

А.А. Щепкин¹, А.К. Павлов², В.М. Остряков²
¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
²Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе

ВЛИЯНИЕ БЛИЗКИХ СВЕРХНОВЫХ ЗВЁЗД НА РАДИАЦИОННЫЙ ФОН НА ЗЕМЛЕ

Космические лучи – это релятивистские потоки частиц в космическом пространстве. Как правило, они ускоряются на ударных волнах от астрофизических событий. Одни из самых мощных из них – сверхновые звёзды, которые я хочу рассмотреть в рамках своего доклада.

Космические лучи, попадая в атмосферу Земли, могут вызывать каскады ядерных реакций, в результате которых в атмосфере образуются радиоактивные изотопы. В наибольшей степени образуется углерод-14. Далее изотопы распространятся по Земле в другие резервуары (биосфера, поверхностные слои Земли, глубокий океан и др.) и в дальнейшем там распадаются, выделяя энергию. В данной работе рассматривается именно углерод-14 не только из-за наибольшего сечения образования, но и из-за очень схожих свойств с углеродом-12, который в свою очередь присутствует во всех органических соединениях. Распадаясь в живых тканях, радиоуглерод будет вызывать внутреннее облучение, которое гораздо сильнее внешнего.

Для оценки дозы облучения организмов, сначала нужно оценить количество ядер изотопа на единицу массы биосферы, затем, умножая на вероятность распада в единицу времени и на энерговыделение в результате одного распада, получить дозу облучения на единицу массы в единицу времени. Далее её нужно сравнить со среднегодовыми дозами облучения, которые регистрируются приборами по всей Земле и затем, сделать вывод о вредоносности данного излучения.

К.А. Кукушкин, А.Ю. Яшин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРИФЕРИЙНЫХ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ МОД НА НОВОМ ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

Периферийные локализованные моды (ELM) и связанные с ними нитевидные структуры - филаменты играют большую роль в аномальном транспорте частиц и энергии в плазме токамака, поэтому их исследование важно для проблемы достижения управляемого термоядерного синтеза. Модернизация установки Глобус-М до версии Глобус-М2, а также установка второго инжектора нейтральных частиц позволили создать совершенно новые условия для исследования нитевидных структур и ELM. Ранее большинство обнаруживаемых в плазме токамака Глобус-М ELM было инициировано пилообразными колебаниями в центре плазменного шнура. В свою очередь в новых разрядах Глобус-М2 согласно данным различных диагностик обнаруживаются ELM, чье формирование не связано с пилообразными колебаниями.

Данный доклад посвящен исследованию такого типа ELM и связанных с ними нитевидных неоднородностей плазмы с помощью диагностики доплеровского обратного рассеяния (ДОР), уже давно успешно используемой для исследования ELM и филаментов на токамаке Глобус-М. В докладе приводится краткое описание феномена ELM и филаментов, обнаруженных в плазме токамака Глобус-М2, а также устройства и принципов работы диагностики ДОР, установленной на этом токамаке. Приведены и проанализированы

параметры филаментов, обнаруженных во время независимых от пилообразных колебаний ELM, проведено их сравнение с филаментами, соответствующими ELM, инициированными пилообразными колебаниями.

Н.А. Земляков¹, А.И. Чугунов²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе

УСТОЙЧИВОСТЬ СФЕРИЧЕСКИХ ЯДЕР ВО ВНУТРЕННЕЙ КОРЕ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

Внутренняя кора нейтронных звезд содержит нейтронно-избыточные ядра, которые в наиболее глубоких слоях могут приобретать существенно несферическую форму (цилиндры, плоскости). Для объяснения этого перехода в литературе применялся критерий неустойчивости сферических ядер к квадрупольным деформациям, полученный Бором и Уиллером для земных условий. Предсказывалось, что сферические ядра должны терять устойчивость, когда отношение объема ядра к объему ячейки Вигнера-Зейтца (фактор заполнения) достигает величины $1/8$. Однако проведенные нами ранее расчеты в рамках сжимаемой капельной модели показали, что сферические ядра остаются энергетически более выгодными и при более большом факторе заполнения. Для объяснения этого результата в данной работе рассмотрена устойчивость сферических ядер в условиях внутренней коры нейтронной звезды. В частности, учтено, что атомные ядра во внутренней коре находятся на фоне вырожденных электронов, плотность заряда которых сопоставима с плотностью заряда ядра, что приводит к появлению электростатического потенциала, поддерживающего сферическую форму ядер. Получен критерий неустойчивости. Показано, что равновесные сферические ядра остаются устойчивыми по отношению к квадрупольным деформациям для всех значений фактора заполнения, таким образом, переход к несферическим ядрам не связан с неустойчивостью. Однако, если количество атомных ядер на единицу объема существенно меньше равновесной величины, неустойчивость может иметь место и приводить к делению ядер. Это явление может быть важно при формировании коры на ранних стадиях эволюции нейтронных звезд.

А.Г. Полетаева, Е.Г. Кавеева, В.А. Рожанский
И.Ю. Сениченков, И.Ю. Веселова

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МОДЕЛЬ ДЛЯ РАДИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОНОВ В ОБДИРОЧНОМ СЛОЕ ТОКАМАКА, ОСНОВАННАЯ НА ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ КОДОМ SOLPS-ITER

В работе представлена простая модель, описывающая распределение электронной температуры на внешнем обводе токамака в обдирочном слое (SOL) степенной функцией от радиальной координаты. Такая зависимость соответствует более медленному радиальному спаду по сравнению с экспоненциальной аппроксимацией, принятой для описания радиального профиля электронной температуры на внешнем обводе в SOL. Предлагаемая степенная функция хорошо согласуется с экспериментальными профилями, полученными на токамаках ASDEX-Upgrade и JET, в которых распределение электронной температуры в дальнем SOL существенно отличается от экспоненциальной оценки. Полученное степенное решение хорошо согласуется с результатами численного моделирования кодом SOLPS-ITER

для токамаков ASDEX-Upgrade, JET и ITER. В работе рассмотрено влияние на полученное решение факторов, связанных с механизмами переноса энергии, неучтенными в простой модели. Оценить их влияние можно на основании результатов численного моделирования кодом SOLPS-ITER. Показано, что ряд факторов может вносить в полученное решение поправки порядка единицы, но принципиально не изменит степенной характер спада радиального профиля электронной температуры.

И.В. Барановский, В.А. Рожанский, А.А. Кобелев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПЕРЕНОС В РЕЖИМАХ С ВЫСОКОЙ СТОЛКНОВИТЕЛЬНОСТЬЮ В ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЕ

В режимах с сильным отрывом, особенно в будущих токамаках-реакторах, плазма сильно столкновительная в диверторной области и таких особых регионах, как окрестность излучающей X-точки. В частности, частота ион-ионных столкновений может быть выше, чем ионная циклотронная частота. Частота ион-нейтральных столкновений может быть всё ещё меньше, чем ионная циклотронная, или же сравнима с ней. В таких режимах столкновения с нейтральными частицами могут играть значительную роль в формировании профиля концентрации и других параметров плазмы. В работе получены аналитические выражения для различных параметров плазмы в приближении частично ионизованной плазмы. Показано, что помимо продольной амбиполярной диффузии, при малых углах между магнитным полем и материальной стенкой, может играть роль поперечная диффузия, вызванная ион-нейтральными столкновениями. Рассмотрена роль скорости нейтральных частиц в переносе плазмы. Проведено сравнение аналитических результатов с результатами численного моделирования кинетическим кодом замагниченной плазмы в области вблизи материальной стенки.

К.В. Долгова, Е.О. Векшина, В.А. Рожанский
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОБНАРУЖЕНИЕ РЕЖИМА «HIGH FIELD SIDE HIGH DENSITY» НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

Данная работа посвящена анализу расчетов с различной плотностью плазмы для токамака Глобус-М2, выполненных с помощью кода SOLPS-ITER. В расчетах наблюдается формирование области с повышенной электронной плотностью со стороны сильного магнитного поля (HFS) вблизи нижнего дивертора. Аналогичная область high field side high density (HFSHD) наблюдалась в экспериментах на токамаке ASDEX Upgrade и в соответствующем моделировании. Для сферического же токамака режим HFSHD получен в расчете впервые. Для понимания влияния плотности на формирование области HFSHD были произведены расчеты с повышенной и пониженной плотностью. Показано, что главными механизмами формирования области является радиальный дрейф поперек электрического и магнитного поля в направлении HFS и рециклинг на поверхностях HFS выше диверторных пластин с последующей ионизацией. Таким образом, механизм формирования области HFSHD в сферическом токамаке Глобус-М2 аналогичен соответствующему механизму для стандартного токамака ASDEX-Upgrade.

В.Э. Хавин^{1,2}, Г.А. Трошин¹, Н.В. Теплова¹, Е.З. Гусаков¹, С.И. Лашкул¹
¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НИЖНЕГИБРИДНОГО ТОКА УВЛЕЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ДИНАМИЧЕСКОГО КОДА FRTC И КОДА ASTRA

Численное моделирование генерации тока увлечения в токамаке с помощью волн нижнегибридного (НГ) диапазона вызывает большой интерес и активно ведется в течение трех последних десятилетий. Численные коды позволяют рассчитать НГ ток, который генерируется в плазме, распределение его плотности по малому радиусу, распределение вводимой мощности и ее поглощение, отслеживание лучевых траекторий для волн НГ диапазона, напряжение на обходе плазмы в зависимости от времени.

В данной работе приведены результаты моделирования нижнегибридного тока с использованием транспортного кода ASTRA в связке с кодом FRTC, который рассчитывает трассировку лучей. Для расчета спектра продольного показателя преломления НГ волны была использована программа Grill3D. Моделирование производилось для параметров разрядов в токамаках ФТ-2 и Глобус-М2 с использованием схемы Ченга-Купера для неявной дискретизации второго порядка по пространству и первого порядка по времени с добавлением специальных весовых коэффициентов, которые не допускают возникновения отрицательных значений функции распределения и с высокой точностью сохраняют консервативность системы. Приведены сравнения с обычной разностной неявной схемой второго порядка.

В.А. Шандин, С.П. Воскобойников, Е.Г. Кавеева, В.А. Рожанский
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА КОДОМ SOLPS-ITER

Все более актуальными становятся задачи, посвященные динамическому моделированию плазмы. Интерес к исследованию таких проблем оправдан, поскольку контроль за состоянием дивертора, в особенности в токамаках-реакторах, где приходящая на пластины мощность находится в около критическом диапазоне, необходим на протяжении всего разряда, в том числе в период динамической фазы. Контроль за состоянием дивертора осуществляется за счет систем обратной связи, моделирование которых невозможно без правильного динамического описания плазмы.

SOLPS-ITER - флагман среди численных кодов, моделирующих пристеночную плазму токамака, изначально использовался при рассмотрении стационарных процессов. В нем применялись разнообразные численные схемы, обеспечивающие сходимость расчетов. Подобные численные коррекции дают неверный результат при моделировании динамических режимов, хотя и обеспечивают физически правильные стационарные решения.

В рамках лаборатории теории и моделирования плазмы под руководством В.А. Рожанского была проведена адаптация численной схемы кода с целью обеспечения корректности динамических расчетов. Удалось добиться сходимости численной схемы, отвечающей гидродинамическим уравнениям Брагинского, описывающим поведение ионов и электронов с учетом электрических дрейфов и токов в обдирочном слое токамака. В данной работе получены первые результаты динамических расчётов на примере

самоподдерживающихся колебаний - специфического режима работы дивертора в геометрии токамака ASDEX Upgrade.

Д.В. Белоусов¹, А.К. Павлов², Д.А. Цурков²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе

РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ ВО ЛЬДУ: ВОЗМОЖНЫЙ ИСТОЧНИК ВСПЫШЕК КОМЕТ НА БОЛЬШИХ РАССТОЯНИЯХ ОТ СОЛНЦА

Механизм активности ледяных тел, находящихся на большом расстоянии от Солнца, остается важным предметом обсуждения в современной планетологии. Известно, что многие кометы на больших гелиоцентрических расстояниях демонстрируют активность в виде вспышек. Аналогичные процессы наблюдались в телах пояса Койпера. Фазовый переход аморфного льда в кристаллический лед считается наиболее вероятным для объяснения активности кометных ядер. Однако нужно учесть, что данный механизм не эффективен при температуре ниже 120 К и факт, что кометы состоят из аморфного льда, не доказан прямыми наблюдениями. Кометные ядра подвержены бомбардировке галактическими космическими лучами (ГКЛ) и солнечными космическими лучами (СКЛ) при их нахождении в облаке Оорта и поясе Койпера при температурах 5–6 К и 30–60 К, соответственно. В данной работе мы рассматриваем эффект накопления радикалов при облучении льда высокоэнергетическими протонами при низких температурах и последующего выделения энергии при нагреве облученного льда. Были проведены эксперименты по облучению протонами образцов водяного льда с энергией 15 МэВ в вакуумной камере при температуре 80 К. При нагреве облученных образцов происходил дополнительный рост температуры при 84 и 106 К. Схожие процессы могут происходить в приповерхностном слое с высокой концентрацией радикалов при приближении кометы к Солнцу или в результате внешнего воздействия. Анализ полученных экспериментальных данных и результатов других научных групп показывает, что рассматриваемый механизм может быть триггером вспышек комет на больших гелиоцентрических расстояниях.

С.П. Рощупкин, Д.В. Дорошенко, В.В. Дубов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РЕЗОНАНСНОЕ РОЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫХ ПАР ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ С ПОЗИТРОНАМИ В СИЛЬНОМ МОНОХРОМАТИЧЕСКОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

Теоретически изучен резонансный процесс рождения электрон-позитронных пар при аннигиляции электронных пар во внешнем сильном электромагнитном поле с интенсивностями вплоть до 10^{25} Вт/см². В условиях резонанса исходный процесс второго порядка распадается на два последовательных процесса первого порядка по постоянной тонкой структуры – обратный и затем прямой стимулированный внешним полем процесс Брейта-Уилера. Детально изучена резонансная кинематика процесса. Показано, что число испущенных (поглощённых) фотонов волны должно превышать характерный параметр, зависящий от частоты поля, энергии начальных частиц и угла между начальными частицами и направлением распространения лазерной волны. Найдена зависимость энергий конечных частиц от угла вылета позитрона. Получено и исследовано резонансное дифференциальное сечение процесса. Показано, что максимальное резонансное дифференциальное сечение во

внешнем поле может превышать соответствующее сечение в его отсутствии до семи порядков величины. Полученные результаты могут быть проверены в международных лазерных лабораториях (ELI, PHELIX).

Д.Н. Ткаченко¹, В.Ю. Горяинов^{1,2}, А.В. Воронин²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ ФИЛЬТРОВЫМ СПЕКТРОМЕТРОМ

В настоящей работе представлены методы исследования плазмы токамака с помощью диагностики мягкого рентгеновского излучения. Такая диагностика может быть применена для измерения электронной температуры плазмы, для изучения внутренних МГД колебаний плазмы и определения расположения магнитных поверхностей, оценки потери электронов за счет электронно-циклотронной эмиссии (ECE) и убегаящих электронов, и др. Подробно разобраны проблемы, возникающие при измерении электронной температуры плазмы и способы их решения. Представлено краткое техническое описание фольгового спектрометра установленного на токамаке Глобус-М2. Результаты измерения температуры сопоставляются с данными диагностики томсоновского рассеяния.

СЕКЦИЯ «ФИЗИКА ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ»

О.Д. Боровская, Э.А. Ушанова, С.Н. Петров
НИЦ "Курчатовский институт" - ЦНИИ КМ "Прометей" им. И.В. Горынина

ВЫЯВЛЕНИЕ ГРАНИЦ ИСХОДНОГО АУСТЕНИТНОГО ЗЕРНА В СТАЛЯХ ТИПА АБ МЕТОДОМ EBSD-АНАЛИЗА

Высокопрочные низколегированные стали используются в судостроении, машиностроении, энергетике, металлургической промышленности, а также при производстве особо износостойких деталей машин для сельского хозяйства. Одной из наиболее важных характеристик, определяющих особенности таких сталей, является размер зерен высокотемпературного аустенита перед началом γ - α -превращения. Существует несколько методов выявления границ исходного зерна высокотемпературного аустенита: метод травления, метод цементации, метод окисления, метод сетки феррита или цементита. Один из наиболее распространенных – метод вакуумного травления. Он имеет ряд ограничений, связанных с дополнительным α - γ превращением, происходящим при нагреве образца, а также с укрупнением структуры во время последующей высокотемпературной выдержки. В данной работе для выявления границ исходного аустенитного зерна использовался развиваемый в ЦНИИ КМ «Прометей» метод, основанный на анализе дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD-анализ). Данный метод основывается на определении разориентировок кристаллитов превращенной структуры и учете особенностей кристаллогеометрических соотношений при γ - α превращении. Исследовалась эффективность EBSD-метода при выделении границ исходного аустенитного зерна в сталях типа АБ, проводилось сравнение карт границ исходного аустенитного зерна, полученных методом вакуумного травления и EBSD-методом.

А.Р. Галяутдинова^{1,2}, А.К. Беляев^{1,2}, С.А. Смирнов^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Институт проблем машиноведения Российской академии наук

УРАВНЕНИЕ ДИФFUЗИИ ВОДОРОДА ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ УПРУГОМ ТЕЛЕ, НАХОДЯЩЕМСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

В данной работе исследуется распределение концентрации водорода во вращающихся цилиндрических упругих телах, подверженных сжатию распределенными нагрузками, приложенными в двух диаметрально противоположных областях внешней окружности. Данное исследование позволит определить характер распределения водорода и области его максимального накопления в телах качения роликовых подшипников. Задача направлена на поиск решения проблемы отказа подшипников из-за водородного охрупчивания во время их эксплуатации.

Для нахождения распределения водорода в нагруженном теле рассматривалось уравнение диффузии водорода в поле упругих напряжений, записанное во вращающейся системе координат. Напряжения, входящие в данное дифференциальное уравнение, предварительно были найдены с помощью аппарата теории функций комплексной переменной, основываясь на известном решении задачи о сжатии двух упругих цилиндров с использованием контактной теории Герца. Из данного решения были заимствованы выражения для площадки контакта соприкосновения двух цилиндров и напряжения,

действующие на данной площадке. В результате было построено аналитическое решение уравнения диффузии водорода в исследуемом теле с использованием приближенных методов решения краевых задач для дифференциальных уравнений в частных производных.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 18-19-00160).

А.Н. Матвиенко

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗОМЕРОВ ФУЛЛЕРЕНА

В докладе представляется классификация изомеров фуллерена, а также их структура и энергия, в диапазоне от C40 до C44. Эти фуллерены могут быть получены с использованием трех наиболее естественных механизмов их образования: соединение углеродных куполов одинаковой симметрии; слияние фуллеренов, имеющих совместимую симметрию; встраивание димеров углерода в исходные фуллерены. Представлено строение фуллеренов для двух крайних электронных конфигураций: только с одинарными связями либо с одинарными и двойными связями, причем максимальное число возможных двойных связей расположено симметрично. С помощью молекулярной механики рассчитаны энергии фуллеренов. Установлено, что в большинстве случаев фуллерены с минимальной энергией обладают симметрией четвертого порядка. Фуллерены с максимальной энергией обладают T-симметрией третьего порядка.

Д.А. Петров, М.Ю. Гуткин, А.Л. Колесникова

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

КРАЕВАЯ ДИСЛОКАЦИЯ В УПРУГОМ ШАРЕ

Впервые решена граничная задача теории упругости о краевой дислокации, проходящей через центр упругоизотропного шара. За основу берется решение для случая краевой дислокации в бесконечной упругой среде, а влияние свободной поверхности шара учитывается введением дополнительного упругого поля, обеспечивающего выполнение граничных условий на этой поверхности. Для его получения используется известный метод решения граничных задач для сферических тел с представлением неизвестного вектора перемещений в форме Треффца. Результаты представлены в аналитическом виде бесконечных сходящихся рядов и визуализированы с помощью карт напряжений, построенных численно в различных сечениях шара, перпендикулярных линии дислокации. Показано, что строгий учет свободной поверхности шара приводит к качественным отличиям в полях напряжений дислокации по сравнению со случаем бесконечной среды. Кроме того, появляются две дополнительные ненулевые компоненты сдвиговых напряжений, которые в бесконечной среде тождественно равны нулю. Решение этой задачи открывает большие возможности для его практического использования, в частности, для изучения диффузии точечных дефектов в наночастицах с дислокациями и для построения теоретических моделей релаксации напряжений несоответствия в композитных наночастицах различной архитектуры с плоскими участками межфазных границ.

КИНЕТИКА ЭВОЛЮЦИИ ВНУТРЕННЕЙ ПОЛОСТИ В ИКОСАЭДРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦАХ

В данной работе предложена теоретическая модель, описывающая кинетику эволюции внутренней полости в малых икосаэдрических частицах. В первой части работы найдено аналитическое решение граничной задачи теории диффузии для сферической оболочки в поле остаточных напряжений икосаэдрической частицы в квазистационарном приближении. На внутренней и внешней поверхностях частицы заданы линейризованные условия Гиббса-Томсона. Построены зависимости равновесной концентрации вакансий внутри частицы при разных значениях параметров материала и температуры. Во второй части работы полученная равновесная концентрация вакансий используется для решения уравнения эволюции радиуса внутренней поры. Построены зависимости изменения радиуса полости от времени при заданных начальных условиях. Показано, что полости в икосаэдрических частицах являются неустойчивыми и имеют тенденцию к стягиванию.

Д.С. Михеев¹, М.Ю. Гуткин^{1,2,3}, А.Л. Колесникова^{2,3}, А.Е. Романов³
¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
² Институт проблем машиноведения РАН
³ Университет ИТМО

КРУГОВЫЕ ПРИЗМАТИЧЕСКИЕ ПЕТЛИ ДИСЛОКАЦИЙ НЕСООТВЕТСТВИЯ 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. Механизмы релаксации напряжений несоответствия включают образование дислокаций несоответствия вокруг ядра, призматических и скользящих петель дислокаций в оболочке, трещин в ядре или в оболочке, отслоение ядра от оболочки и смещение ядра из центра частицы. Приближенные расчеты показали, что образование на границе раздела ядра и оболочки круговой призматической дислокационной петли энергетически более выгодно, чем другие способы релаксации напряжений. 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. Полученные результаты показывают, что с ростом несоответствия энергетически выгодно образование все большего количества петель. При этом наиболее неустойчивыми к образованию петель дислокаций несоответствия оказываются наночастицы, в которых радиус ядра составляет 0.75 от внешнего радиуса наночастицы.

А.К. Жуков, С.В. Крашенинников
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

**РАЗРАБОТКА СЕРВИСА ДЛЯ АНАЛИЗА И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДАННЫХ ПО
РОССИЙСКОМУ СЕГМЕНТУ РЫНКА ТРУДА В СФЕРЕ ИТ**

Предметным фоном для описанного в докладе исследования служит широко распространенная проблема поиска работы выпускниками вузов. Доклад посвящен созданию альтернативного специализированного сервиса для поиска вакансий на рынке труда в сфере ИТ. Обычные широкополосные сервисы (такие как hh.ru) не имеют достаточной гибкости и четкой предметной направленности. В докладе будет рассмотрен выбор базовых структур хранения и инструментального окружения проекта, сбор базы реальных данных с вакансиями, особенности обработки и хранения этих данных, а также визуализация получаемых результатов с возможностью для пользователя выбирать свои параметры отображаемой статистики. В работе представлено исследование ИТ-вакансий с 2007 и его сравнение с исследованием команды Яндексa и hh.ru последних лет. Разработанный программный продукт может быть развернут на специализированном сервере СПбПУ для оперативного мониторинга вакансий и помощи в поиске работы в ИТ сфере.

Д.А. Курносов, А.Н. Баженов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

**РЕГУЛЯРИЗАЦИЯ В ЗАДАЧЕ ПОСТРОЕНИЯ РЕГРЕССИИ ПО ДАННЫМ С
ИНТЕРВАЛЬНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬЮ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ
СОВМЕЩНОСТИ В СИЛЬНОМ СМЫСЛЕ**

Рассматривается задача построения линейной регрессии для данных, обладающих интервальной неопределённостью. Работа выполнена с данными, описывающими работу шаговых двигателей. Шаговые двигатели широко используются в промышленности и экспериментальной работе. В связи с этим представляет интерес изучить их особенности, которые не представлены в документах, сопровождающих поставку этих устройств. Рассматривая полный шаг такого двигателя как процесс, обладающий свойством гистерезиса, мы ставим себе целью построить модель, описывающую этот процесс при дробных шагах. Интерес построения модели для такого процесса мотивирован желанием прогнозирования состояния двигателя в точках неполного шага, что важно при тонкой юстировке устройств.

Нестандартность проблемы состоит в том, что основная погрешность содержится не в результатах измерения, а параметрах модели двигателя при дробных шагах. Для описания данных этот подход несёт в себе идею увеличения допусков во входных данных. Такой подход требует коррекции матрицы модели и ещё недостаточно изучен математически. Одной из возможностей является применение аппарата линейного программирования к обратной зависимости “угол-код.” При построении корректной модели подход позволит уменьшить погрешность прогноза значений угла поворота при дробном шаге двигателя.

РЕАЛИЗАЦИЯ МОДУЛЯ РАБОТЫ С ТВИННОЙ АРИФМЕТИКОЙ В СТИЛЕ НЕСТЕРОВА

Практически все алгоритмы на выходе выдают не точные решения задачи, а значения, в том или ином смысле близкие к искомым. Этому может быть множество причин, например неточность входных данных, невозможность точной реализации алгоритма и т. п. Поэтому очень актуальны методы оценки качества полученного решения. Для того, чтобы можно было строить вычислительные алгоритмы, которые одновременно с получением результата выдают и гарантированную оценку погрешности, была высказана идея интервальных вычислений. Но и этого тоже бывает недостаточно. Тогда становится актуальным подход двусторонней оценки неизвестных интервалов и на помощь приходит твинная арифметика. В настоящее время не существует реализации твинной арифметики на высокоуровневых языках, например C, C++, Python, Java. Поэтому задача реализации твинной арифметики на современном популярном языке достаточно актуальна. Представлена реализация модуля работы с твинной арифметикой в стиле Нестерова.

М.Л. Смольский, А.Н. Баженов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МЕТОД РАСПОЗНАЮЩЕГО ФУНКЦИОНАЛА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ИНТЕРВАЛЬНОЙ ЛИНЕЙНОЙ ЗАДАЧИ О ДОПУСКАХ КАК ЗАДАЧА ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Работа посвящена интервальной линейной задаче о допусках, которая имеет множество практических приложений. Рассматривается метод распознающего функционала, который позволяет полностью исследовать разрешимость интервальной линейной задачи о допусках. Метод распознающего функционала заключается в безусловной максимизации распознающего функционала, который является вогнутой функцией. В настоящее время для безусловной максимизации распознающего функционала используются суперградиентные методы для максимизации вогнутых функций. В работе показывается, что безусловная максимизация распознающего функционала является задачей линейного программирования. Как следствие, для безусловной максимизации распознающего функционала могут быть применены развитые, хорошо изученные и эффективные методы для решения задач линейного программирования. Постановка рассматриваемой интервальной задачи как задачи линейного программирования позволит естественным образом обобщить максимизацию распознающего функционала на случай линейных ограничений.

А.Н. Баженов^{1,2}, Н.В. Суханов¹
¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
²Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН

ТРЕХМЕРНАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ СВЕТИМОСТИ ПЛАЗМЫ ДЛЯ СФЕРИЧЕСКОГО ТОКАМАКА

Работа посвящена применению методов вычислительной геометрии и интервального анализа к задачам физики управляемого термоядерного синтеза. Проведена трехмерная реконструкция светимости объема плазмы сферического токамака “Глобус-М2” в интервальной постановке в геометрии одноракурсного наблюдения. Разработан программный комплекс подготовки данных для изучения распределения светимости в объеме токамака.

Работа состоит из двух частей. В первой части рассмотрены геометрические аспекты проблемы, получены проекции различных областей сферического токамака (volume spread functions) на плоскость детектора в геометрии камеры-обскуры. Во второй части рассмотрены алгебраические аспекты задачи. Применен метод разбиения исходной матрицы на набор квадратных матриц. Полученные частные задачи решены субдифференциальным методом Ньютона в полной интервальной арифметике Каухера. На основе набора частных решений строится полное решение путем взятия минимума по включению. На модельных задачах получено хорошее качество восстановления светимости.

А.Н. Баженов^{1,2}, Т.О. Яворук¹
¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
²Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ФОРМАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ ИНТЕРВАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ

Применение интервального анализа при решении задач с интервальной неопределённостью требует развития эффективных методов вычислений. Одним из способов достичь высокой эффективности является применение многомерных ньютоновских методов с быстрой скоростью сходимости. При этом существуют проблемные ситуации, в которых не наблюдается устойчивого решения. Одной из таких является осциллирующее поведение итераций.

Работа посвящена исследованию решения интервальных систем линейных алгебраических уравнений (ИСЛАУ) субдифференциальным методом Ньютона в полной интервальной арифметике Каухера, которая получается из полной интервальной арифметики путем добавления неправильных интервалов.

Рассмотрена известная задача с осциллирующим поведением при последовательных итерациях. Проанализировано поведение с разными параметрами метода, а также проведено соотнесение допускового множества решений с полученными итерациями. Исследовалась возможность получения не осциллирующих итераций – достижения разрешимости ИСЛАУ - с помощью коррекции матрицы и правой части.

ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛИЧНОСТИ ПО ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММЕ

В настоящее время IT-технологии и промышленность активно сближаются. Вследствие этого рождается все больше новых передовых технологий, облегчающих жизнь огромного числа людей. Например, сейчас все чаще используются биометрические технологии, позволяющие определять личность человека по отпечаткам пальцев, сетчатке глаза, чертам лица. Наиболее перспективной является технология распознавания человека по электрокардиограмме (ЭКГ).

Цель работы: создание и тестирование биометрической системы на основании нейронной сети, позволяющей определить личность человека с помощью ЭКГ.

ЭКГ является уникальной для каждого человека, поскольку она зависит от множества индивидуальных особенностей человека, таких как: расположение, объем и строение сердца, наличие патологии и т. д. Кроме того, ЭКГ практически невозможно подделать, потому как этот сигнал связан с образованием физических полей в организме.

Метод исследования и разработки: Разработка системы идентификации личности производилась с помощью сверточной нейросети. Разработанная сверточная нейросеть состоит из 5 слоев. Каждый из них содержит свёрточный слой, слой активации Relu, слой подвыборки (Max-pooling) и пакетную нормализацию. Для обучения нейронной сети использовалась открытая база данных PhysioNet, а также данные собранные со студентов СПбПУ, которые впоследствии были деперсонализированы.

В процессе исследования и разработки были получены следующие результаты: (1) собрана деперсонализированная база данных пациентов, для обучения и тестирования сверточной нейросети; (2) создана система на основе нейросети, позволяющая идентифицировать личность с помощью ЭКГ с точностью более 95%.

И.С. Барынкин¹, А.С. Смирнов^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский политехнический институт Петра Великого

² Институт проблем машиноведения Российской академии наук

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АКТИВНОГО ЭКЗОСКЕЛЕТА НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ

В докладе рассматривается вопрос о построении математической модели реального объекта – экзоскелета *Hatsune* собственной разработки, который представляет собой электромеханическое устройство, предназначенное для помощи человеку в подъеме тяжестей или в движении парализованными конечностями. Подобные системы активно применяются при реабилитации людей, в военной и гражданской сферах, в качестве помощи грузчикам на складах и во многих других областях. Поэтому исследование таких биоморфных механизмов является задачей крайне актуальной и заслуживающей серьезного внимания. В настоящей работе показано, что рассматриваемый экзоскелет имеет 14 степеней свободы, и для построения его достаточно простой и адекватной математической модели производится упрощение исходной реальной системы на основе наблюдения за движением человека. В результате исследования делается вывод, что данная задача может быть сведена к плоской, а количество степеней свободы снижено до трех. При помощи уравнений Лагранжа второго рода составлены уравнения движения системы в удобной матричной форме с учетом управляющих моментов, создаваемых приводами в шарнирных сочленениях. Эти уравнения служат основой для последующих исследований управляемого движения активного экзоскелета нижних конечностей.

С.А. Булов¹, А.С. Смирнов^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский политехнический институт Петра Великого

² Институт проблем машиноведения Российской академии наук

УПРАВЛЕНИЕ ФОРМАМИ КОЛЕБАНИЙ ТРЕХЗВЕННОГО МАЯТНИКА

В докладе рассматривается применение коллинеарного управления для разгона трехзвенного математического маятника по каждой из его собственных форм колебаний в отдельности. Использование такого управления не нарушает форм малых колебаний системы и позволяет осуществлять их постепенный переход из линейного варианта в нелинейный, который обладает уже более сложным характером. Построены уравнения управляемого движения системы при наличии коллинеарного управления в матричном виде и осуществлен анализ ее малых колебаний в консервативном варианте. На основе этих выражений был проведен численный эксперимент по раскачиванию системы по первой, второй и третьей формам колебаний, начиная с малых отклонений и вплоть до достаточно больших амплитуд. Показано, что после отключения управляющих воздействий можно наблюдать выход системы на консервативный режим, который обладает периодичностью и соответствует движению по нелинейной форме колебаний, имеющей заметные отличия от линейной. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что коллинеарное управление является весьма эффективным способом разгона механических систем, обладающих несколькими колебательными степенями свободы.

ДИНАМИКА КОНЕЧНОМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ЦЕПНОГО МАЯТНИКА С УПРУГО-ПОДВИЖНОЙ ТОЧКОЙ ПОДВЕСА

В докладе обсуждаются вопросы об оценке адекватности конечномерных моделей с сосредоточенными параметрами, предназначенных для приближенного моделирования систем с распределенными параметрами, которые обладают бесконечным числом степеней свободы. В качестве конкретного примера рассматривается цепной маятник (ЦМ) с упруго-подвижной точкой подвеса, для которого конечномерные модели строятся на основе схемы гантели (две точечные массы, соединенные безынерционным стержнем). Приведено частотное уравнение для исходной модели ЦМ, а также получены выражения для частот колебаний двух упрощенных моделей, состоящих из одной и двух гантелей соответственно. В ходе анализа поднимается проблема возникновения т. н. «паразитных частот», которые не дают адекватного представления о частотах исходной распределенной системы. На основе проведенного исследования построены зависимости частот колебаний от безразмерного параметра задачи для всех рассмотренных моделей и осуществлено сравнение результатов. В конечном счете был сделан вывод о минимальном количестве гантелей, необходимом для получения корректного приближения к значению n -ной частоты исходной модели ЦМ с упруго-подвижной точкой подвеса.

УСТОЙЧИВОСТЬ ПЛАВАНИЯ СУДНА С СЕЧЕНИЕМ В ФОРМЕ ПАРАБОЛИЧЕСКОГО СЕГМЕНТА

В докладе рассматривается задача о плавающем бруске, поперечное сечение которого представляет собой параболический сегмент. Эта система служит приближением к реальным плавающим средствам, которые могут иметь различное назначение. Излагаются общие принципы статического анализа бруска, погруженного в жидкость, которые необходимы для решения задачи о нахождении его положений равновесия и исследовании их устойчивости. На их основе составляется выражение для потенциальной энергии плавающего бруска для той конфигурации его погружения, когда обе его вершины находятся выше ватерлинии. Пользуясь данной формулой, можно выявить условие устойчивости плавания тривиального (т. е. симметричного) равновесия бруска в терминах безразмерных параметров задачи, а также определить и его наклонное положение равновесия. Показано, что это равновесие всегда отвечает указанной конфигурации и при этом является устойчивым, и оно существует лишь в случае неустойчивости симметричного положения равновесия. Полученные результаты имеют не только важное теоретическое значение, но могут оказаться полезными и для практических приложений.

В.А. Суворов^{1,2}, Б.Е. Мельников¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
²ООО «Троицкий крановый завод», Москва

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ СУДОВОГО КРАНА-МАНИПУЛЯТОРА ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Задача снижения веса судовых конструкций остается актуальной. Появление новых полимерных композиционных материалов, развитие технологий их производства и средств компьютерного моделирования позволяет решать задачи оптимизации судовых конструкций на новом уровне. В работе представлена инженерная методика оптимизации стержневой конструкции стрелы судового крана-манипулятора, основанная на современных средствах компьютерного моделирования и методах численной оптимизации. На первом этапе получены и уточнены нагрузки на кран вследствие качки судна, выведены требования к конечно-элементной модели для расчета прочности и устойчивости. На втором этапе выведены конструкторские, технологические и ресурсные ограничения для снижения количества независимых параметров оптимизации. На третьем этапе поставлена и решена задача снижения массы стрелы с последовательным использованием метода скрининга и Джая. В результате применения разработанной методики для конструкции стрелы крана манипулятора, содержащей 465 параметров, получено снижение массы на 20%.

Н.К. Ястребов, А.А. Суханов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ РАЗБИЕНИЕ ГРАФА ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ КОММИВОВАЖЕРА ВЫСОКОГО ПОРЯДКА

Уже более полувека задача коммивояжера является одной из важнейших задач оптимизации. Помимо ее очевидной прикладной значимости в таких дисциплинах, как логистика и процессы управления, регулярно у этой проблемы находят новые смыслы и области применения. С развитием вычислительных технологий в работах по данной теме произошла своеобразная смена приоритетов: внимание исследователей переключилось от отыскания точного решения задач ограниченного размера на синтез субоптимальных решений задач повышенного объема. Как и во всех приближенно решаемых на ЭВМ задачах, основной проблемой является отыскание компромисса между быстротой поиска субоптимального решения и его близостью к истинно оптимальному. В данной работе обобщены представленные в литературе методы оптимального разбиения графа с целью понижения вычислительной сложности задачи, а также составлен алгоритм разделения задачи коммивояжера на подзадачи меньшего размера. Данный алгоритм можно применять в составе комплексного алгоритма решения коммивояжера любым из методов.

А.В. Савиковский, А.С. Семенов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ВЛИЯНИЕ АНИЗОТРОПИИ УПРУГИХ СВОЙСТВ НА РАСКРЫТИЕ НАКЛОННОЙ ТРЕЩИНЫ ПРИ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ

Рассматривается вычисление коэффициентов интенсивностей напряжений (КИН) в ортотропном материале, а также материале с кубической симметрией. Исследуется влияние

анизотропии упругих свойств на раскрытие трещины при смешанной моде разрушения. Для вычисления КИН в ортотропном материале и материале с кубической симметрией используются методы экстраполяции перемещений и напряжений в вершину трещины. В случае метода экстраполяции перемещений получено аналитическое решение для КИН, включающее зависимость от упругих констант материала и перемещений в окрестности вершины трещины. При выводе формул используется формализм Лехницкого.

Рассматривается задача с центральной наклонной трещиной при одноосном растяжении в ортотропном материале и материале с кубической симметрией. Численные результаты для КИН в случае ортотропного материала и материала с кубической симметрией хорошо сходятся с аналитическим решением. Выведены формулы зависимости перемещений от КИН и упругих свойств материала в случае ортотропного материала и кубической симметрии материала для задачи с центральной наклонной трещины. Проанализировано влияние упругих свойств материала на раскрытие трещины. Результаты аналитического решения для раскрытия трещины верифицированы на основе конечно-элементного решения задачи.

Д.О. Прихна, А.С. Семенов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОСТИ КЕРНА НА ЕГО УПРУГИЕ, УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИЕ И ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Создание цифрового двойника поровой структуры горной породы с помощью цифровой реконструкции позволит прогнозировать упругие и прочностные свойства породы, а также точное содержание углеводородов, которое возможно извлечь из продуктивного коллектора и повысить эффективность разработки новых и эксплуатируемых месторождений углеводородов. Создание реальной трехмерной модели ядра при помощи рентгеновской томографии, позволяет получить достоверные данные о продуктивном коллекторе и всей структуре горных пород.

В данной работе представлены результаты воссоздания цифровой структуры порового пространства, с помощью созданной программы, обрабатывающей данные рентгеновской томографии ядра. Реконструкция горной породы произведена с помощью метода марширующих кубов, на основе обработки полигональной сетки изоповерхности трехмерного скалярного поля. Входными данными для алгоритма являются сделанные послойно томографические снимки ядра, которые оцифрованы с помощью методов компьютерного зрения, основанные на машинном обучении. Машинное обучение направлено на обработку изображений: структуру порового пространства, каверн, удаления шумов и других помех, вызванных работой томографа.

Произведено сравнение зависимости физико-механических характеристик от процентного содержания пор в горной породе, а именно упругих, упруго-пластичных и вязко-пластичных свойств.

На основе данных компьютерной томографии ядра были разработаны трёхмерные конечно-элементные модели, с помощью которых были решены краевые задачи с использованием программной системы ANSYS. Произведено сравнение полученных результатов с данными экспериментов.

ДИФфуЗИОННЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА С НЕОДНОРОДНОСТЯМИ ЭЛЛИПСОИДАЛЬНОЙ ФОРМЫ

В данной работе получены выражения для эффективных диффузионных характеристик двухфазного композита с изотропной матрицей и неоднородностями эллипсоидной формы, имеющими преимущественную ориентацию. При диффузии в неоднородных материалах концентрация не является непрерывной функцией на границе раздела фаз, что, тем не менее, чаще всего игнорируется при определении эффективных коэффициентов диффузии. Разрыв функции концентрации на границе между матрицей и неоднородностью обусловлен скоплением на ней диффундирующего вещества. Данное явление называется эффектом сегрегации. Учету эффекта сегрегации при определении коэффициентов диффузии посвящено незначительное количество публикаций.

Для модели двухфазного композита решена задача гомогенизации с учетом эффекта сегрегации. Взаимодействие между неоднородностями учитывается при помощи схемы Мори-Танака, в которой каждое из включений помещается в однородное поле градиента концентрации, осредненное по матрице материала. В результате получены соотношения для эффективного тензора диффузии, зависящего от обобщенных микроструктурных параметров: объемной концентрации неоднородностей, параметра сегрегации, параметра формы неоднородностей и вектора преимущественной ориентации неоднородностей.

В данной работе эффективный тензор диффузии получен для общего случая неоднородностей эллипсоидальной формы, тогда как в других работах по данной тематике форма неоднородностей исключительно сфероидальная. Для вычисления тензора Хилла эллипсоидальной неоднородности используются эллиптические интегралы в симметричной форме Карлсона. Построенная математическая модель позволяет определять эффективные диффузионные свойства широкого класса материалов с зернистой структурой.

А.В. Мамин, А.А. Михайлов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАДЕНИЯ СФЕРЫ В ВОДУ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ЛАГРАНЖА-ЭЙЛЕРА

На сегодняшний день одним из наиболее эффективных способов, обеспечивающих комплексный подход к описанию взаимодействия твёрдых тел с жидкой средой, является применение метода конечных элементов (МКЭ). В данной работе с помощью МКЭ, реализованного в программном комплексе LS-DYNA, производится численное моделирование свободного падения шара с последующим соударением и вхождением в водную среду. Описание движения в пространстве основывается на методе Лагранжа-Эйлера. Ключевые моменты данной работы состоят в анализе варьирования плотности шара на получаемые результаты, а также в исследовании особенностей численного моделирования воздушных полостей, образующихся вслед за погружающимся в водную среду шаром. Результаты численного моделирования сравниваются с экспериментальными данными, представленными в литературе. Результаты исследования имеют практическую значимость и могут быть использованы при решении широкого класса задач в области моделирования столкновения с водной поверхностью и погружения объектов с различными свойствами, в том числе деформируемых.

С.А. Смирнов^{1,2}, А.Р. Галяутдинова^{1,2}, А.К. Беляев^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Институт проблем машиноведения Российской академии наук

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ДИФФУЗИИ ВОДОРОДА ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ УПРУГИХ ТЕЛАХ, ПОДВЕРЖЕННЫХ СЖАТИЮ РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ СИЛАМИ

В данной работе рассматривается численное решение уравнения диффузии водорода во вращающихся упругих цилиндрических телах, подверженных сжатию двумя распределенными нагрузками, приложенными в противоположных точках внешней окружности. Задача рассматривается в предположении о плоской деформации. Данная постановка имеет важное практическое значение, так как задача в такой постановке может рассматриваться как модель распределения водорода во вращающихся подшипниках качения, находящихся под действием внешних нагрузок.

Численное решение задачи диффузии водорода получено при помощи метода конечных разностей. Для проведения численного решения уравнение диффузии водорода, предварительно полученное методами ТФКП, было приведено к безразмерному виду. Было принято, что рассматриваемое тело вращается с постоянной скоростью, что позволило перейти к рассмотрению статической задачи. Задача рассматривается в цилиндрической системе координат. Поскольку распределение концентрации водорода в рассматриваемом образце явным образом зависит и от радиальной координаты, и от угловой, была построена двумерная равномерная разностная сетка. Для решения полученной разностной задачи был использован метод матричной прогонки. В качестве модельных задач были рассмотрены первая и третья краевые задачи. В результате численного решения было получено распределение концентрации водорода в исследуемом образце для разных значений угловой скорости.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 18-19-00160).

В.К. Болотова, С.А. Красницкий

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОСЕВОЙ НАГРУЗКИ РАЗЪЕМНОГО СОЕДИНЕНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ С ПЛОСКИМИ ПРИВАРНЫМИ ФЛАНЦАМИ

В данной работе представлен конечно-элементный (КЭ) анализ коэффициента осевой нагрузки, показывающего приращение усилия в болтах разъемного соединения под действием внешней осевой нагрузки. На первом этапе исследования подготовлена КЭ модель одноболтового фланцевого соединения, состоящего из тарелки и болта. Показано, что расхождение величины коэффициента осевой нагрузки, полученной численно, с аналитическим решением для такого соединения составляет менее 5%. На втором этапе исследования проведен КЭ анализ распределения внутренних усилий в элементах разъемного соединения трубопровода DN400 с плоскими приварными фланцами под действием усилия от предварительной затяжки соединения и осевой составляющей гидростатического усилия от внутреннего давления. В КЭ модели соединения заданы контактные поверхности между головкой болта и тарелкой фланца, между тарелкой фланца и уплотнением. Построены зависимости коэффициента осевой нагрузки от отношения

модулей нормальной упругости материалов уплотнения и фланца, а также размеров соединения. Показано, что коэффициент осевой нагрузки убывает при увеличении модуля упругости уплотнения, и возрастает при увеличении толщин тарелки фланца и присоединяемой трубы.

Е.А. Варшавчик^{1,2}, В.А. Полянский^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Институт проблем машиноведения Российской академии наук

МНОГОКАНАЛЬНАЯ ДИФФУЗИЯ В МОДЕЛИ МАКНАББА И ФОСТЕРА

Диффузия водорода в твердом теле представляет собой сложный процесс. Существует множество аналитических и численных моделей, описывающих данный процесс. Однако, каждая модель имеет свои недостатки, из-за которых недостаточно точно описывает экспериментальные данные. Целью данной статьи является объединение двух моделей диффузии водорода: модели МакНабба и Фостера с моделью Фишера. Модель МакНабба и Фостера предполагает наличие водородных ловушек в материале, имеющих определенные энергии связи и влияющих на процесс диффузии. Модель Фишера рассматривает многоканальную диффузию без влияния водородных ловушек. Многоканальная диффузия позволяет рассматривать диффузию водорода по различным каналам, каждый из которых соответствует определенной энергии связи. Каждая из моделей в отдельности имеет свои преимущества, однако некоторые экспериментальные данные объяснить не в силах. С помощью объединения данных моделей появляется возможность с большой точностью описать экспериментальные данные.

В качестве эксперимента рассматривались цилиндрические образцы из алюминиевого сплава Д16, диаметром от 4 до 8 мм и высотой 15 мм. Данные образцы помещались в прогретую экстракционную камеру экспериментальной установки, где с помощью метода масс-спектрометрии определялись десорбционные кривые водорода. Затем, полученные экспериментальные десорбционные кривые сравнивались с кривыми, полученными объединенной моделью. На основании сравнения делались выводы о преимуществах и недостатках объединенной модели.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 18-19-00160).

А.Н. Гордеев, А.А. Михайлов, О.В. Антонова

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ КОНТУРА ИНТЕГРИРОВАНИЯ НА ХАРАКТЕР ПОВЕДЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ J ИНТЕГРАЛА НА ПРИМЕРЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИ НАГРУЖЁННОГО ТЕЛА С КРАЕВОЙ ТРЕЩИНОЙ

Интеграл Черепанова-Райса (J-интеграл) является одним из ключевых параметров механики разрушения. В данной работе на примере решения задачи термоупругости проведено сравнение численных значений J-интеграла в зависимости от различной формы и размеров контура интегрирования - рассматривается выпуклый П-образный контур, а также ряд невыпуклых контуров с вогнутостями различной формы.

В качестве методов вычисления применяются, реализованный в программном комплексе конечно-элементного анализа ANSYS, интеграл взаимодействия (CINT), а также вычисление J-интеграла с использованием разработанного пользовательского макроса.

Метод вычисления J-интеграла (CINT) использует принцип суперпозиции для линейных систем и основан на теореме Бетти о взаимности работ. В пользовательском макросе реализовано вычисление J-интеграла, предложенного Райсом для плоского случая, в модифицированной формулировке, учитывающей температурные нагрузки.

Особенности каждого из методов вычислений продемонстрированы на примере решения задачи Вилсона – жесткозакрепленной пластины с краевой трещиной, находящейся в поле линейного распределения температур. Для контуров выпуклой формы продемонстрирована инвариантность J-интеграла.

С.А. Удовенко, С.Б. Вахрушев, А.В. Филимонов, Д.Ю. Чернышов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

СИСТЕМА ДЛЯ ОДНОВРЕМЕННОГО ПРИЛОЖЕНИЯ ОДНООСНОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ К ОБРАЗЦАМ В ШИРОКОМ ТЕМПЕРАТУРНОМ ИНТЕРВАЛЕ ДЛЯ РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Создание передовых электронных устройств тесно связано с пониманием механизмов процессов, происходящих в материалах при изменении внешних факторов. На эксперименте для исследования свойств материалов под действием внешних факторов (температура, электрическое поле, механическая нагрузка) используются специальные устройства – ячейки образцов. Экспериментально выявляются аномалии в параметрах материала (диэлектрической проницаемости, пьезоэффекта). Большинство экспериментальных работ ограничиваются исследованиями при варьируемых температурах. Такие измерения производятся относительно легко. Образец может быть нагрет как с использованием простого нагревателя, так и бесконтактно (обдув образца струей газа определенной температуры, лазер).

Варьирование же двух параметров, например, температуры и электрического поля требуют применения, как было сказано выше специальных ячеек образца, обеспечивающих контролируемость воздействия внешних факторов на образец, тепло- и электро- изоляцию частей экспериментальной установки. Ранее нами была разработана методика проведения дифракционных экспериментов с монокристаллами цирконата-тианата свинца с использованием миниатюрной ячейки, пригодной для использования как на синхротронном источнике, так и на малогабаритном лабораторном дифрактометре. Для поддержания заданной температуры образца использовался обдувной нагреватель. Электрическое поле создавалось при помощи дистанционно управляемого источника высокого напряжения.

В данной работе описана система для одновременного приложения одноосной деформации растяжения, электрического поля в широком температурном интервале. Данная система является расширенным вариантом созданной нами ранее системы для исследования монокристаллических образцов в умеренных электрических полях.

А.А. Ильин, С.А. Красницкий
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ПОДАТЛИВОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПОД ДЕЙСТВИЕМ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ НАГРУЗОК

В данной работе представлен конечно-элементный (КЭ) анализ податливости цилиндрических оболочек под действием сосредоточенных нагрузок. С этой целью

подготовлена параметризованная КЭ модель, представляющая собой свободно опертую цилиндрическую оболочку, в центральном сечении которой приложена сосредоточенная радиальная сила или изгибающий момент. Построены зависимости прогиба узлов модели вдоль образующей оболочки. Полученные в расчете перемещения сравниваются с соответствующими аналитическими решениями теории балок и тонких оболочек. Кроме этого, КЭ перемещения используются для определения податливостей оболочки в зависимости от её размеров. Показано, что общая податливость оболочки может быть вычислена как сумма податливостей, определяемых вкладом от прогиба оболочки как балки и вкладом от локального прогиба оболочки. Впоследствии представленный подход определения податливости оболочки планируется применить в задачах определения гибкости тройниковых узлов трубопроводов и оборудования.

Р.В. Федоренко, А.В. Лукин

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

АНАЛИЗ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОСТЕЙШИХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ В УСЛОВИЯХ НАКОПЛЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ И ПОЛЗУЧЕСТИ

С начала 21 века в мире существенно возрос интерес к созданию атомных реакторов замкнутого цикла использования ядерного топлива. На данный момент в России начато строительство подобного реактора на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем БРЕСТ-ОД-300.

Проведение исследований по обоснованию прочности металлоконструкций реактора показало, что в рабочих режимах может возникнуть потеря устойчивости тонких, но больших по площади металлических листов, из которых формируются внутренние полости, заполняемые свинцовым теплоносителем. Устойчивость теряется вследствие совместной работы металла и бетона под действием температурных нагрузок. В дополнение к данному эффекту рабочая температура теплоносителя составляет 420°C, а в режиме нарушения нормальной эксплуатации и вовсе может достигать 500°C. Наличие таких температур может вызывать возникновение деформаций ползучести в металле, которые могут привести к изменению критических нагрузок потери устойчивости.

Введение подкрепляющих конструкций в виде шпангоутов и стрингеров решает проблему потери устойчивости в расчетах, проводимых с учетом пластических свойств материалов. Однако вопрос исследования влияния деформаций ползучести на устойчивость подкрепленной оболочки остается открытым.

Данная работа отражает результаты решения ряда модельных задач о потере устойчивости механических систем с учетом неупругих деформаций, для которых могут быть получены аналитические решения. Получены первые данные для дальнейшей систематизации сценариев потери устойчивости элементов конструкций, работающих в подобных условиях.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ПРОЦЕССЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО БЕТОНИРОВАНИЯ

Работа представляет собой конечно-элементный анализ термонапряженного состояния бетонных фундаментных плит в период твердения с использованием программного комплекса ABAQUS. Рассматриваются различные варианты бетонирования плит. Проводится варьирование граничных условий на границах плит и исследуется влияние внешних факторов на процесс тепловыделения: теплоизоляции разной толщины, времени задержки между бетонированием соседних блоков, температуры окружающей среды на процесс набора прочности бетона (бетонирование в летний и зимний период), наличия/отсутствия швов (промежутков между основными блоками, которые будут бетонироваться через некоторое время) между плитами. При проведении исследования с помощью подпрограмм реализуется концепция приведенного времени. Тепловыделение и переменный модуль упругости бетона в каждом узле конечно-элементной модели изменяются в зависимости от времени, которое в свою очередь является функцией температуры в данном узле. Сделаны выводы об оптимальном варианте последовательного бетонирования плит массивных конструкций с учетом рассмотренных эффектов.

И.А. Рублев¹, И.К. Королёв², А.Б. Фрейдин^{1,2,3}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Институт проблем машиноведения Российской академии наук

³Санкт-Петербургский государственный университет

ОДНОМЕРНАЯ ЗАДАЧА О РАСПРОСТРАНЕНИИ ФРОНТА ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ В УПРУГОМ ТЕЛЕ

Исследуется распространение плоского фронта химической реакции в упругом теле. В результате реакции между упругим материалом B_- и диффундирующим компонентом B_* возникает деформируемый материал B_+ , который предполагается упругим. Реакция сопровождается собственной деформацией превращения – объемным расширением, связанным с различием молярных масс от плотностей твердых компонентов, и изменением модулей упругости. Реакция локализована на фронте реакции Γ и поддерживается диффузией вещества B_* через область W_+ , занятую превращенным материалом B_+ . Диффундирующий компонент поступает в область W_+ через поверхность Ω_+ и полностью поглощается химической реакцией на фронте Γ .

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.

Ранее с помощью развитой теории были решены задачи о распространении фронта реакции в приближении квазистационарной диффузии. В данной работе, на примере двумерной задачи вначале исследован этап первоначального накопления диффундирующего компонента, а затем исследовано распространение фронта реакции.

Для времени начала реакции – момента отщепления фронта реакции от внешней границы тела – получены зависимости от параметров диффузии и зависящей от напряжения

равновесной концентрации диффундирующего компонента. Затем для широкого диапазона значений параметров проведен анализ влияния параметров диффузии, константы скорости реакции и равновесной концентрации на распределение диффундирующего компонента в теле и скорость фронта реакции. Найденное на первом этапе решения распределение диффундирующего компонента в момент начала реакции определяет начальное условие для задачи о распространении фронта реакции.

А.Р. Усманов, В.С. Модестов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАГРУЗОК, ВЫЗВАННЫХ РАЗНОТОЛЩИННОСТЬЮ ВАЛОВ

Одной из тенденций в современном авиадвигателестроении является уменьшение размеров газотурбинных двигателей с сохранением выходной мощности путем увеличения числа оборотов роторов. При этом для аналогичных по массогабаритным характеристикам роторов неуравновешенные центробежные нагрузки будут значительно выше, что приведет к более высоким значениям амплитуд вибраций и, соответственно, к более значительным нагрузкам на опоры, прогибам валов и т.д. . .

Одним из способов снижения центробежных нагрузок является оптимизация конструкции двигателя путем математического моделирования, при этом в качестве исходных данных выступают максимально возможные неточности, возникающие в процессе изготовления и производства ротора двигателя.

Отсутствие возможности проведения экспериментов с заданными неточностями в роторе наводит на необходимость проведения верификации математических моделей на основании статистической обработки вибрационных испытаний различных сборок двигателя, в которых эти неточности некоторым образом распределены в поле допусков.

В данной работе рассмотрена центробежная нагрузка, вызванная разнотолщинностью вала. Предложен метод задания разнотолщинности как случайной величины, равномерно распределенной в поле допусков. Проведен расчет простого ротора с определением функции плотности распределения максимального прогиба. Показано, что в случае наличия разнотолщинности на одном участке ротора результирующая плотность распределения прогиба является равномерно распределенной случайной величиной, а в случае наличия разнотолщинности на двух участках – в общем случае может не быть таковой.

И.Д. Горбенко, О.Б. Шагниева
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССОВ СВЕРЛЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ С УПРАВЛЕНИЕМ

Рассмотрена задача управления роботом, выполняющим операции механообработки. Разработана модель «носитель-инструмент-обрабатываемая поверхность», описывающая динамику процессов сверления. Проведен анализ устойчивости и построена лепестковая диаграмма устойчивости в пространстве параметров сверления. Проведено математическое моделирование колебательных процессов, возникающих в системе.

Автоматизация механообработки с внедрением роботизированных комплексов, несомненно, является мировым трендом, что делает исследования в данной области актуальными. Большая часть таких исследований посвящена разработке математических

моделей, описывающих динамику процессов механообработки, анализу их устойчивости и разработке алгоритмов подавления нежелательных динамических явлений, обусловленных потерей устойчивости в системе. Настоящая работа рассматривает первые две проблемы.

В качестве расчётной модели используется упругая система «робот-инструмент». Обратная связь в системе представлена силомоментным датчиком, устанавливаемым между носителем и шпиндельным блоком. Управление, для упрощения, сводится к обеспечению заданной подачи, и обеспечивается усилиями, развиваемыми сервоприводами носителя. Исследование устойчивости описанной модели заключается в построении лепестковой диаграммы и определении характерных динамических режимов для дальнейшего математического моделирования.

И.Р. Муртазин, А.С. Семенов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ВЛИЯНИЕ АНИЗОТРОПИИ УПРУГИХ СВОЙСТВ КРИСТАЛЛИТОВ НА НЕУПРУГОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО НИКЕЛЯ

Исследуется неупругий отклик представительного объема поликристаллического никеля при различных путях нагружения на основе учета его микроструктуры и прямого математического моделирования упругопластического деформирования кристаллитов с использованием микромеханической модели. Рассматриваемый представительный элемент объема материала имеет форму куба и состоит из множества произвольно ориентированных анизотропных кристаллитов. В ходе исследования был проведен сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния при рассмотрении поликристалла как однородной среды, так и при его представлении в виде совокупности монокристаллов с варьируемыми анизотропными упругими свойствами. Механизм влияния анизотропии упругих свойств кристаллитов на неупругое поведение поликристалла связан с возникновением значительных микронапряжений вследствие взаимного влияния кристаллитов в процессе деформирования. Увеличение значений упругих модулей приводит к росту микронапряжений. Многовариантное моделирование гетерогенных структур осуществлялось в программном комплексе конечно-элементного анализа PANTOCRATOR на основе решения трехмерных краевых задач. Сравнительный анализ проводился как по интегральным кривым деформирования представительного объема поликристалла, так и на основе статистических распределений локальных полей напряжений и деформаций по объему.

Р.И. Петров, М.М. Сперанский, А.С. Семенов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ УПРУГИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ТОЛКАЮЩЕГО ВИНТА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И РАСЧЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящее время наиболее эффективным конструкционным решением для винтов беспилотных летающих аппаратов является использование композиционных материалов. К данным материалам предъявляются жёсткие требования по прочности, виброактивности и весовым характеристикам. Для улучшения изгибных свойств лопаток традиционно используются градиентные волокнистые композиты с внутренними полостями. Повышение эксплуатационных характеристик может быть достигнуто за счет использования nano частиц (фуллерен C90). Целью данного исследования является экспериментальная проверка

эффективных упругих свойств и их воспроизведение в рамках численного моделирования. Краевые задачи решались в трёхмерной постановке с использованием методов конечно-элементной гомогенизации. Получены верхние и нижние оценки эффективных упругих свойств (вилка Хилла). Получены результаты конечно-элементного моделирования трёхточечного изгиба композиционных образцов по стандарту ISO 178. Результаты определения эффективных упругих свойств будут использованы для расчетов прочности, долговечности и виброактивности толкающих винтов беспилотных летательных аппаратов.

А.А. Семенова, А.И. Грищенко
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОРИЕНТАЦИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ

Монокристаллические суперсплавы на никелевой основе нашли широкое применение в авиационных и стационарных газотурбинных установках, ракетных двигателях, работающих при экстремальных термомеханических воздействиях. Они являются практически безальтернативными материалами для лопаток газотурбинных двигателей 5-го и 6-го поколений. К их отличительным особенностям можно отнести высокие характеристики длительной прочности, жаростойкость, высокое сопротивление коррозии высокотемпературной ползучести за счет отсутствия межзеренных границ. Отдельно можно выделить анизотропию механических свойств. Целью работы является анализ влияния кристаллографической ориентации монокристаллических сплавов на никелевой основе на уровень пластических деформаций при одноосном растяжении. На основе склерономной микромеханической модели неупругого деформирования получены и проанализированы ориентационные зависимости пластической деформации монокристалла. Произведена оценка вклада октаэдрических и кубических систем скольжения.

С.А. Шевченко, Б.Е. Мельников
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОБ УЧЕТЕ НЕСОВЕРШЕНСТВ В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РЕЗОНАТОРА ВТГ

В докладе рассматривается вопрос об учете несовершенств чувствительного элемента (резонатора) волнового твердотельного гироскопа (ВТГ) при проведении вычислений с использованием математической модели резонатора. Базовая математическая модель позволяет провести расчет собственных частот идеального резонатора, а также оценить расщепление частот, при внесении в нее несовершенств. Математическая модель базируется на решении задачи о нахождении собственных частот колебаний тонкой полусферической растяжимой оболочки. Рассматриваются некоторые способы учета разнотолщинности резонатора, как несовершенства, возникающего в результате изготовления изделия. При проведении сравнения способов учета разнотолщинности, в качестве критерия используется значение расщепления рабочей резонансной частоты. Задача дополняется рассмотрением возможности учета температурной зависимости геометрических параметров резонатора для оценки их влияния на значение расщепления.

А.А. Хорев, Л.М. Яковис
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РОБАСТНО-АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СЛУЧАЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ ВЫХОДНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ

Рассматривается задача управления динамическими объектами в условиях неопределенности, когда параметры их математической модели заданы с точностью до диапазона возможных значений. Предложен способ настройки параметров типовых регуляторов, в определенной мере преодолевающий недостатки и объединяющий достоинства основных известных подходов: излишне «осторожного» робастного управления и идентификационной адаптации, требующей «раскачки» управляемого объекта в период формирования его актуальной модели. Метод использует идеи прямой адаптации. Специальная организация процесса поиска субоптимальных настроек регулятора позволяет избежать «проклятия размерности». Основное внимание уделено разработке и исследованию правил останова при поиске настроек регулятора. Предложенные процедуры основаны на том, что, с одной стороны, оптимум настроек находится вблизи границы устойчивости, а, с другой стороны, приближение к границе устойчивости сопровождается появлением и усилением регулярной составляющей колебаний в случайных флуктуациях выходной переменной. Основным инструментом исследования является компьютерное имитационное моделирование в программной среде Matlab-Simulink.

П.Я. Стронгин, Л.М. Яковис
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТЕСТОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ

Рассматривается задача идентификации математической модели объекта управления в режиме его эксплуатации. В основу положен метод настраиваемой модели, позволяющий осуществлять идентификацию без выключения регулятора путем подачи специальных тестовых воздействий. Главная цель выполненных исследований заключалась в разработке и апробации методов расчета параметров тестовых сигналов (интенсивность, длительность и количество ступенчатых импульсов) из условия достижения требуемой точности параметрической идентификации при минимальных отклонениях выходной переменной от режимных значений. Предложена циклическая процедура, чередующая этапы пассивного наблюдения с этапами активной идентификации объекта управления. Предлагаемый универсальный подход конкретизируется применительно к инерционным объектам с запаздыванием. Метод может применяться для настройки параметров ПИ и ПИД-регуляторов применительно к управляемым объектам промышленной автоматики.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЛАКСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ЛИНЕЙНЫХ И НЕЛИНЕЙНЫХ МОДЕЛЯХ ВЯЗКОСТИ

Известно, что окисление и литизация кремния приводят к изменению деформационного поведения: упругий материал превращается в вязко-упругий. В связи с этим в настоящей работе проводится систематический сравнительный анализ различных линейных и нелинейных моделей вязкоупругости на примере решения простейших задач описания релаксации напряжений в условиях одноосного сжатия и чистого изгиба. Исследуется стандартная линейная модель вязко-упругого материала и ее частные случаи – модели Максвелла и Кельвина-Фойгхта, а затем – различные модели нелинейной вязкости с коэффициентом вязкости, зависящим от напряжений.

Н.В. Скутин, С.М. Лобанов, А.С. Семёнов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ВЛИЯНИЕ ТОПОЛОГИИ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ СЕГНЕТОУПРУГОГО МАТЕРИАЛА НА АНИЗОТРОПИЮ ГИСТЕРЕЗИСНОГО ПОВЕДЕНИЯ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ-СЖАТИИ

Сегнетоэластичные материалы находят широкое применение на практике в качестве сенсоров и актуаторов, микромоторов и наноприводов. Ключевым свойством сегнетоактивных материалов является наличие спонтанной поляризации в кристаллитах при температурах ниже температуры Кюри. В тетрагональной фазе, допускающей 6 направлений спонтанной поляризации, соответствующих кристаллографическим осям $\langle 001 \rangle$, наблюдается образование ламинатных доменных структур, удовлетворяющих условиям совместности на доменных границах. Целью данного исследования являлось конечно-элементное моделирование поведения характерных представительных объемов доменных структур (паттерны типа «водяного знака», «елочки», «шашечки») при одноосном циклическом нагружении.

При моделировании эволюции доменной структуры использовалась двухуровневая микроструктурная модель сегнетоэластичного материала, учитывающая диссипативный характер движения доменных стенок. На основе метода конечно-элементной гомогенизации в работе получены гистерезисные кривые для различных топологий доменной структуры. Наблюдается чувствительность результатов к начальному виду доменной структуры и существенная анизотропия гистерезисного поведения.

В.Р. Адиатуллин, С.В. Булович
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ДРЕЙФОВОГО СПЕКТРОМЕТРА

Для решения огромного количества научных и практических задач, связанных, например, с обнаружением взрывчатых, наркотических и отравляющих веществ в газовой среде, часто применяется спектрометрия ионной подвижности. Данный метод обладает такими перспективными качествами, как быстрое действие, высокая чувствительность, отсутствие вакуумных систем и портативность.

Рассмотрена математическая модель работы дрейфового масс-спектрометра. В модели можно выделить два модуля: гидродинамический, который позволяет получить структуру течения в камере дрейфового спектрометра, и электрический, который отслеживает движение ионов как совокупность процессов переноса под воздействием электрического поля и гидродинамической скорости. Поле скорости в дрейфовой камере получено в результате решения системы уравнений Навье-Стокса при помощи программного пакета Ansys Fluent. На основании этого поля значение осевой составляющей скорости вдоль оси камеры получено усреднением в «трубке тока». Электрический модуль включает уравнение Пуассона и необходимое количество уравнений баланса зарядов. Для реализации электрического модуля составлен код программы совместного решения системы уравнений, состоящей из уравнения Пуассона и уравнений, описывающих перенос ионов.

Разработанная вычислительная модель процесса движения ионов в пространстве дрейфа позволяет по исходным параметрам исследуемого образца получать спектры ионной подвижности. Проведено сопоставление результатов численного решения задачи с экспериментальными данными.

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

КАРТИНА ВЯЗКО-НЕВЯЗКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ СИММЕТРИЧНОГО ПРЕПЯТСТВИЯ С РАЗНОЙ ФОРМОЙ ПЕРЕДНЕЙ КРОМКИ

При взаимодействии сверхзвукового потока газа с одиночным препятствием, установленным на обтекаемой поверхности, сложная трехмерная картина течения зависит не только от свойств среды и характеристик набегающего пограничного слоя, но и в значительной степени от геометрии рассматриваемой конфигурации. Настоящая работа посвящена численному исследованию влияния формы затупления передней кромки препятствия на ударно-волновую картину обтекания, вихревую структуру в области перед обтекаемым телом и характеристики локального теплообмена.

Рассматривается модельная задача обтекания сверхзвуковым потоком воздуха ($M = 5$) симметричного затупленного ребра, установленного на пластине; форма передней кромки ребра представляет собой эллипс, соотношение полуосей которого варьировалось. Численные расчеты трехмерных уравнений Навье-Стокса для вязкого совершенного газа выполнены при помощи конечно-объемного «неструктурированного» программного кода

SINF/Flag-S, разрабатываемого в СПбПУ. Проанализированы детальные картины течения и теплообмена для различных форм передней кромки препятствия.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук, МК-3435.2022.1.1.

М.Е. Блюм, С.В. Булович, Е.В. Колесник
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ URANS МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРЕДСКАЗАНИЯ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА ПРИ ТЕЧЕНИИ С НУЛЕВЫМ РАСХОДОМ В ТРУБЕ

Наибольший интерес при изучении осциллирующего течения жидкости с нулевым расходом в трубе представляют режимы, в которых турбулентность возникает только на отдельных фазах периода. Предсказание потери устойчивости ламинарного режима течения и процесс перехода к турбулентному режиму является важной задачей гидродинамики.

Математическое моделирование процесса перехода осложнено большими вычислительными затратами: моделирование в рамках прямого численного моделирования (DNS) требует огромных вычислительных мощностей. Поэтому интерес представляет тестирование URANS-моделей турбулентности, которые не исключают возможность описания переходного процесса, для данного класса течений. В работе рассмотрены модели Спаларта-Аллмараса (SA), низкорейнольдсовая k - ε модель (NKE), модель renormalization group k - ε (RNGKE), Realizable k - ε (RKE), стандартная k - ω (SKW), SST k - ω (SSTKW).

Результаты проведенного исследования сопоставлены с опытными данными. Показано, что для класса осциллирующих течений RANS модели турбулентности со стандартными настройками улавливают ситуацию ламинарно-турбулентного перехода и правильно отражают тенденции изменения характеристик течения. По таким параметрам как момент зарождения, время существования и амплитуда значения турбулентной вязкости лучшее соответствие эксперименту демонстрируют модели турбулентности Spalart-Allmaras и SST k - ω .

Д.В. Борисов^{1,2}, В.В. Калаев², Е.М. Смирнов¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
²Группа СТР – Софт-Импакт

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ СВОБОДНОКОНВЕКТИВНОМ ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТЕЙ С НИЗКИМ ЧИСЛОМ ПРАНДТЛЯ

Задачи теплопереноса в жидкостях, характеризующихся низким числом Прандтля, типичны для многих практических приложений, таких как охлаждение ядерных реакторов, теплообмен в металлургических системах, выращивание монокристаллов кремния из расплава. В связи с повышенными трудностями экспериментального исследования течения и теплообмена в жидкостях с низким числом Прандтля численное моделирование является особо привлекательным методом получения данных о полях скорости и температуры. Цель данной работы заключается в анализе применимости стандартной и обобщенной гипотез градиентной диффузии для RANS-моделирования турбулентного теплопереноса в расплаве кремния с привлечением данных, полученных ранее по вихреразрешающему подходу

(Implicit Large Eddy Simulation, ILES) для турбулентной конвекции расплава при выращивании кристаллов методом Чохральского.

Показано, что стандартная гипотеза завышает абсолютные значения турбулентных потоков и не ухватывает анизотропию теплопереноса, в то время как обобщенная гипотеза как качественно, так и количественно согласуется с данными ILES. Для повышения работоспособности обобщенной гипотезы градиентной диффузии, действующей компоненты тензора рейнольдсовых напряжений, предложена гипотеза (STR), нацеленная на корректное предсказание нормальных и сдвиговых рейнольдсовых напряжений посредством учета различных механизмов анизотропии.

В.Н. Горбачева, Д.О. Панов, Е.М. Смирнов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РАСЧЕТ ТРЕХМЕРНОГО ТЕЧЕНИЯ И ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ КРУТОИЗОГНУТОМ U-ОБРАЗНОМ КАНАЛЕ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ ОРИЕНТАЦИИ КАНАЛА И ГЕОМЕТРИИ ВНУТРЕННЕЙ СТЕНКИ

Канал с крутым поворотом потока на 180° (U-образный канал) – это типичный элемент петлевой схемы внутреннего охлаждения сопловых и рабочих лопаток газовых турбин. Необходимость применения крутоизогнутых каналов предопределяется стремлением наиболее эффективно использовать ограниченное пространство при организации тракта, по которому протекает охлаждающая среда. Известный недостаток крутоизогнутых U-образных каналов – это их высокое гидравлическое сопротивление. Ранее, на примере канала квадратного сечения, было установлено, что посредством оптимизации формы внутренней (разделительной) стенки можно существенно снизить гидравлические потери, при этом общая интенсивность теплосъема изменяется слабо. Когда U-образный канал является элементом тракта внутреннего охлаждения рабочей лопатки, течение в нем подвержено действию силы Кориолиса, значимость которого зависит и от ориентации плоскости изгиба в относительной системе координат.

В докладе представляются результаты численного моделирования турбулентного течения в U-образном канале квадратного сечения при варьировании угла наклона плоскости изгиба относительно оси вращения. В расчетах, выполненных на основе RANS/URANS подхода для числа Рейнольдса 10^5 и двух форм разделительной стенки, варьировалось также значение параметра, определяющего интенсивность глобального вращения. Особое внимание уделяется оценке выигрыша в гидравлических потерях при задании формы внутренней стенки, оптимизированной ранее для случая неподвижного канала.

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

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ КАНАЛЕ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ С ПОВОРОТОМ НА 90°

Представляются результаты численного исследования турбулентного течения во вращающемся канале прямоугольного сечения с поворотом на 90° , проведенного методом WMLES. Исследовано влияние вращения на течение. Проведено исследование точности RANS подхода с использованием различных полуэмпирических моделей турбулентности путем сравнения с результатами численного эксперимента.

Показано, что при наличии вращения вихреразрешающий расчет предсказывает смещение отрывной зоны к стороне пониженного давления и уменьшение потерь давления на повороте. Средняя интенсивность теплоотдачи на повороте уменьшается на 7%, разность температур увеличивается на 15% по сравнению с неподвижным каналом.

Установлено, что при отсутствии вращения независимо от используемой модели турбулентности длина зоны отрыва, предсказанная методом RANS, существенно завышена. Коэффициент теплоотдачи при этом занижается на 11-21% и разность температур на повороте завышается на 4-13% по сравнению с результатами WMLES.

Влияние вращения на результаты RANS диаметрально противоположно влиянию, наблюдаемому в WMLES. Полуэмпирические модели турбулентности предсказывают уменьшение отрывной зоны при наличии вращения. Это приводит к улучшению согласования интегральных характеристик на повороте с результатами вихреразрешающего расчета.

Наименьшую точность при расчете неподвижных и вращающихся течений в прямоугольном канале с поворотом на 90° дает SA RC модель турбулентности. Модели с большим количеством уравнений имеют приблизительно одинаковую предсказательную способность, их точность ограничена скорее самим RANS-подходом, нежели особенностями построения конкретной модели.

А.А. Елисеев, Б.С. Григорьев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПРИМЕНЕНИЕ РАСШИРЕННОГО УРАВНЕНИЯ РЕЙНОЛЬДСА К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ВЯЗКОУПРУГОЙ СМАЗКИ

В некоторых задачах теории смазки, возникающих в практических приложениях, влияние неньютоновских эффектов оказывается значительным. В ряде случаев эти эффекты вызваны полимерной природой смазки, которая приводит к тому, что смазочный слой при нагружении проявляет как вязкие, так и упругие свойства. Одним из способов описать явление вязкоупругости является применение верхней конвективной модели Максвелла. В этой модели деформация жидкости представляется как сумма вязкой и упругой компонент. На этой основе в работе было выведено новое «расширенное» уравнение Рейнольдса для указанной модели, в котором учитывается полная структура верхней конвективной производной в отличие от существующих аналогов. В работе рассматривается также численная схема решения задач вязкоупругой смазки на основе выведенного уравнения. В основе схемы лежит смешанный подход, в котором уравнения реологического закона решаются полулагранжевым методом, а расширенное уравнение Рейнольдса – методом конечных объемов. В работе проведена верификация схемы при помощи численного решения модельной задачи о смазочном клине.

К.К. Забелло, С.Т. Шекелашвили, Н.А. Щур, А.А. Смирновский
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

АПРОБАЦИЯ ОДНОГО АЛГОРИТМА ДЕФОРМАЦИИ НЕСТРУКТУРИРОВАННОЙ РАСЧЁТНОЙ СЕТКИ НА ЗАДАЧЕ ОБ АВТОКОЛЕБАНИЯХ ЦИЛИНДРА В ОДНОРОДНОМ ПОТОКЕ

Представляются результаты численного моделирования поперечных автоколебаний цилиндра, обтекаемого вязкой несжимаемой жидкостью в диапазоне чисел Рейнольдса от 90 до 140. Решение двумерной сопряжённой задачи гидродинамики и динамики твёрдого тела осуществляется с применением «неструктурированного» кода SINF/Flag-S, который был дополнен разработанными программными модулями, реализующими алгоритм деформации расчётной сетки и явный метод для решения уравнений двумерного движения твёрдого тела. Для деформации сетки используется оригинальный алгебраический метод, пригодный для неструктурированных расчётных сеток произвольной топологии, в котором смещение каждого узла сетки вычисляется в зависимости от расстояния от него до границ области деформации. Расчёты автоколебаний цилиндра проводятся как на квази-структурированных, так и полностью неструктурированных расчётных сетках с различной топологией ячеек. Проводится сопоставление полученных в коде SINF/Flag-S результатов с полученными ранее данными численного моделирования в структурированном коде SINF. Анализируется эффект «захвата» частоты колебаний цилиндра, а также явление гистерезиса в некотором диапазоне значений числа Рейнольдса.

В.А. Игнатенко^{1,2}, Д.С. Базаревский², А.А. Смирновский^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Группа СТР – Софт-Импакт

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ РОСТОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ CVD РЕАКТОРЕ К НЕОДНОРОДНОСТЯМ ПОДАЧИ РЕАГЕНТОВ

Монокристаллы нитридных соединений обладают уникальными физическими свойствами, которые делают их незаменимыми в создании высокочастотных электронных устройств. Существует несколько способов получения таких структур, и одним из наиболее популярных является метод осаждения из газовой фазы (chemical vapor deposition, CVD). Этот метод заключается в выращивании кристалла из газофазных компонент в результате поверхностных химических реакций.

В данной работе рассмотрены особенности течения в горизонтальном CVD реакторе. Проводится численное моделирование ростовых процессов на модели действующей в настоящее время в ФТИ имени А.Ф. Иоффе экспериментальной установки «Дракон 125» (где 125 – диаметр установки в миллиметрах). В экспериментальной установке могут возникать значительные неоднородности по скорости подачи реагентов и их температуре, которые оказывают значительное влияние на параметры кристалла. В работе проанализированы данные о ростовых процессах, сделан вывод об их чувствительности к неоднородностям в динамических и температурных граничных условиях.

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ МНОГОФАЗНЫХ ПОТОКОВ С ОБЩИМ ДАВЛЕНИЕМ В БАРОТРОПНОМ ПРИБЛИЖЕНИИ НА ОСНОВЕ СХЕМЫ С ПОВЫШЕННЫМ ПОРЯДКОМ ТОЧНОСТИ

В работе предложен алгоритм численного интегрирования системы уравнений многофазных потоков с общим давлением в баротропном приближении.

Математическая модель описания среды в рамках многожидкостного подхода основана на понятии взаимопроникающих континуумов. Замыкание системы уравнений строится на предположении об общем давлении в жидкостях, а корректность задачи Коши для неё восстанавливается путем использования повторных производных по пространственной координате от разыскиваемых функций. Данная модель допускает ситуацию вырождения отдельных фаз и асимптотический переход к одножидкостной постановке.

Предложенный в работе алгоритм обеспечивает второй порядок точности по времени за счёт использования схемы предиктор-корректор. На шаге предиктора используется неявная схема для определения газодинамических функций, на шаге корректора – явная, что позволяет применить на нём TVD-схему 2-5 порядка точности по пространству.

Алгоритм тестировался на примере течений двух и трёх жидкостей. Решена задача Римана о распаде разрыва в канале переменного сечения при различных значениях давления и объемной доли жидкостей по разные стороны диафрагмы. Также произведен расчет ускорения частиц в волне разрежения.

А.В. Махнов^{1,2}, Д.К. Зайцев¹, А.А. Шмидт²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

ИССЛЕДОВАНИЕ КАВИТАЦИИ В КАНАЛАХ РЕЗКО ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ OPENFOAM

Кавитация в каналах с резко изменяющимся поперечным сечением является предметом многих научных исследований на протяжении последних десятилетий, поскольку тема кавитации актуальна для многих инженерных приложений, таких как, например, топливные форсунки и ракетные топлива. Понимание механизмов, управляющих нестационарным процессом срыва кавитационных облаков в таких течениях, анализ основных энергетических характеристик этого процесса и его влияния на структуру течения жидкостей в каналах (в частности, на турбулентность), являются на данный момент актуальными задачами, не решёнными до достаточной степени в расчётных и экспериментальных работах, представленных в литературе по данной тематике. В данном докладе представлены результаты трёхмерных нестационарных расчётов течений с кавитацией, полученные путём численного моделирования в открытом программном комплексе OpenFOAM. Полученные результаты адекватно согласуются с экспериментальными данными из литературы. Параметрические исследования, проведённые в рассмотренных диапазонах изменения числа кавитации и числа Рейнольдса, позволили получить новую информацию, которая может быть полезной для развития текущих представлений о нестационарных процессах в кавитационных течениях.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО СТРУЙНОГО ТЕЧЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩЕГО ПРИ ДЫХАНИИ ЧЕЛОВЕКА

В работе представлены результаты численных расчетов неизо термических вентиляционных течений, которые формируются вблизи нагретой поверхности теплового манекена, а также при имитации дыхания за счет подачи нагретого воздуха из ноздрей манекена в окружающее пространство. Рассмотрены две модели процесса дыхания – стационарная, с постоянной скоростью выдоха, и нестационарная, при которой моделируется вдох и выдох по синусоидальному закону. Тепловой манекен расположен в вентилируемом помещении в сидячем положении, геометрические параметры соответствуют представленным в экспериментальной работе P.V.Nielsen et al., 2007. Расчеты проведены при двух режимах вентиляционного течения: в условиях перемешивающей вентиляции (манекен обдувается потоком холодного воздуха, скорости которого превосходят значения скорости подъемного течения) и в условиях свободной конвекции. Получено, что две нагретые струи, вытекающие из ноздрей манекена, вблизи его поверхности формируются в одну струю, которая на удалении от поверхности манекена совершает колебания в различных направлениях относительно оси струи. Показано, что дальнобойность струи в случае свободноконвективного режима течения выше, чем в случае перемешивающей вентиляции.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 20-58-18013.

А.Д. Подмаркова¹, М.А. Засимова¹, Н.Г. Иванов¹, Д. Марков²
¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
² Софийский технический университет, г. София, Болгария

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В КЛИМАТИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ

Представляются результаты параметрических расчетов моделирования воздухо распределения в климатической камере для условий эксперимента, выполняемого в научно-исследовательской лаборатории теплового комфорта, энергетики и окружающей среды Технического университета Софии. Климатическая камера имеет форму параллелепипеда с размерами: 1.88×3.01×2.01 м. Воздух подается в камеру через два круглых приточных отверстия, размещенных в нижней части одной из торцевых стенок. Имеется возможность перекрыть область подачи приточных струй решетчатым полом с тем, чтобы обеспечить равномерный воздушный поток в окрестности имитирующего тело человека теплового манекена. Под потолком находится четыре вытяжных отверстия квадратного сечения, через которые воздух покидает камеру. Проведены расчеты воздухо распределения в климатической камере без теплового манекена на основе RANS-подхода. Проведена оценка степени однородности воздушного потока в климатической камере при различных значениях подаваемого расхода: 6, 18 и 30 л/с (т.е. 21.6, 64.8 и 108 м³/ч). Выполнено параметрическое исследование влияния гидравлического сопротивления решетчатого пола на параметры воздухо распределения в камере.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 20-58-18013.

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

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЛАМИНАРНОГО ПЛАМЕНИ ПО ПОВЕРХНОСТИ ГОРЮЧЕГО МАТЕРИАЛА

В работе апробирована методика численного моделирования распространения ламинарного пламени по поверхности горючего материала навстречу газовому потоку. Трёхмерные расчёты пламени данного типа в литературе отсутствуют. Основные выводы по работе заключаются в следующем. Скорость распространения пламени определяется тепловым потоком из пламени в зону прогрева. Пламя является оптически тонким, поэтому основным механизмом теплопередачи является теплопроводность в газе. Точность численного расчёта распространения пламени определяется точностью расчёта теплового потока в зону прогрева, и поэтому требуется разрешение пространственных градиентов температуры в окрестности фронта пламени. В численных расчётах установлено, что режим распространения пламени зависит от интенсивности внешнего нагрева. Увеличение внешнего теплового потока приводит к смене фронтального режима распространения пламени на почти одновременное воспламенение всей нагреваемой поверхности горючего материала.

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

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ПЛОСКОЙ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ВОЗДУШНОЙ СТРУИ В ОГРАНИЧЕННОЕ ПРОСТРАНСТВО

Рассматривается истечение воздушной струи, распространяющейся из плоского сужающегося сопла в ограниченное пространство – полость, форма которого параллелепипед (высота 0.2 м, длина 0.5 м и ширина 0.2 м). В полости находится плоское сужающееся сопло, его ширина совпадает с шириной полости. Высота отверстия, через которое воздух поступает в полость, равна 0.01 м, его ширина совпадает с шириной полости. В расчетах на входе задавался однородный профиль скорости 6 м/с, число Рейнольдса составляет 4000. Геометрические размеры полости и сопла, физические параметры среды и граничные условия соответствуют эксперименту (Mataoui A., et al., 2001). Задача решалась в 2D и 3D постановках.

Моделирование турбулентного течения осуществлялось на основе URANS подхода в сочетании с полуэмпирическими моделями турбулентности. Расчеты проводились в двух постановках: изотермической и неизотермической (температура приточной струи равна 300 К, температура на стенках полости варьировалась в диапазоне 310...360 К). Учет эффектов плавучести осуществлялся с помощью приближения Буссинеска.

Показано, что для выбранного варианта расположения сопла в полости реализуется режим автоколебаний воздушной струи. Учет эффектов плавучести оказывает существенное влияние на амплитуду и частоту колебаний струи. Исследовано влияние автоколебаний струи на теплоотдачу с поверхностями стенок полости.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 22-29-00224.

Т.А. Федорова, А.Ю. Снегирёв
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ДИФфуЗИОННОЕ ГОРЕНИЕ В НЕВЕСОМОСТИ: АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В работе представлены результаты космического эксперимента ВРЕ-Фламенко, выполненного в 2019-2021 гг. на борту МКС с целью изучения устойчивости диффузионного пламени над плоским источником горючего газа. В ходе обработки видеоматериалов и результатов измерений размеров пламени, температуры и тепловых потоков установлено, что данный тип пламени является внутренне неустойчивым. При достижении критического размера пламени происходит его локальное погасание с последующим переходом в режим автоколебаний и полным погасанием. В данной работе выявлены три режима автоколебаний: «симметричный тор», «капюшон» и «спираль». Стационарное диффузионное пламя формируется лишь при достаточно высокой концентрации окислителя и малом расходе горючего газа. Обобщение экспериментальных данных для времени жизни пламени, размеров пламени и доли излученной энергии позволило оценить предельную концентрацию кислорода и обнаружить универсальную зависимость доли излученной энергии от расхода горючего газа. В ходе численного моделирования воспроизведены режимы автоколебаний пламени, наблюдавшиеся в эксперименте. Показано, что причиной погасания является аномально высокий уровень теплопотерь, обусловленных тепловым излучением. Данный режим погасания диффузионного пламени не наблюдается в условиях естественной конвекции при нормальной гравитации.

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

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА ИСКУССТВЕННОЙ ВЯЗКОСТИ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ УДАРНО-ВОЛНОВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ОБТЕКАНИЯ ЦИЛИНДРА НА НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЕТКАХ

Численное моделирование сверхзвуковых и особенно гиперзвуковых течений может осложняться возникновением численной ударно-волновой («карбункул») неустойчивости, которая заключается в появлении нефизических возмущений, приводящих к искажению или изгибу фронта ударной волны. В настоящее время основные исследования в данной области связаны с анализом влияния различных численных аспектов на возникновение неустойчивости, а также с разработкой и тестированием методов подавления данного явления. Известно, что неустойчивость возникает при расчетах на тех сетках, которые содержат поверхности, перпендикулярные фронту ударной волны, при этом во многих исследованиях рассматривается в основном случай структурированных сеток. Одним из эффективных методов подавления «карбункул»-неустойчивости является добавление искусственной вязкости в форме правых частей уравнений Навье-Стокса (особый вклад в развитие этого направления принадлежит Родионову А.В.). Настоящая работа посвящена оценке эффективности метода искусственной вязкости для подавления ударно-волновой неустойчивости при расчетах на неструктурированных сетках с различным типом сеточных элементов. Тестирование проводится на задаче сверхзвукового невязкого обтекания цилиндра ($M = 3$). Численные расчеты выполнены при помощи конечно-объемного «неструктурированного» программного кода SINF/Flag-S, разрабатываемого в СПбПУ.

Ю.В. Шерстобоев^{1,2}, Д.В. Борисов^{1,2}, В.В. Калаев², Е.М. Смирнов¹
¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
²Группа компаний “STR”, Soft-Impact

ILES И RANS МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ ПРИ ОПРЕДЕЛЯЮЩЕЙ РОЛИ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ТОРОИДАЛЬНЫХ ВИХРЕЙ

Рассматривается модельная задача о развитии свободно-конвективного течения в цилиндрической полости при определяющей роли крупномасштабных тороидальных вихрей. Постановка задачи близка к условиям в современных установках, предназначенных для выращивания кристаллов по методу Чохральского. Геометрия задачи определяется отношением высоты цилиндра к диаметру, которое полагалось равным 0,5. Граничные условия ставились таким образом, чтобы на периферии возникали максимальные значения температуры, а около нижней стенки и в центре верхней стенки – минимальные.

Решение было получено с применением вихреразрешающего ILES (implicit Large Eddy Simulation) метода решения уравнений Навье-Стокса и с применением RANS моделирования при использовании нескольких моделей турбулентности, реализованных в пакете CGSim (Flow Module), в том числе модели, разработанной в Soft-Impact. В результате решения были получены распределения скорости и температуры, поля кинетической энергии турбулентных пульсаций, а также корреляции пульсаций компонент скорости и температуры для трех чисел Рэлея $Ra = 10^6, 10^7, 10^8$. Также были получены зависимости интегральных чисел Нуссельта от числа Рэлея. Полученные в рамках ILES и RANS подходов решения были сравнены между собой. По итогам сравнения была проведена калибровка констант модели, разработанной в Soft-Impact.

Л.В. Мальсагова, Д.Э. Сеницына
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ УПРУГИХ МОДЕЛЕЙ КРОВЕНОСНЫХ СОСУДОВ ДЛЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Представляются результаты отработки методики изготовления упругих моделей кровеносных сосудов из силиконовой смеси, а также результаты исследования их механические свойства. Создано несколько вариантов моделей: цилиндрический сосуд без патологий с разной толщиной стенки и бифуркация сосуда. Производство модели происходило посредством отливки силиконовой смеси (Silastic-T4) в форму с установленным в ней внутренним стержнем, которая формирует сосуд с заданной толщиной стенки. При изготовлении бифуркации сосуда использовались два варианта внутреннего стержня: 1. жесткий разборный, 2. из легкоплавкого материала (сплав Вуда или парафин), способного плавиться под действием горячей воды (70-80°C). Второй вариант стержня позволит в будущем изготавливать модели сложной пространственной конфигурации.

Для оценки растяжимости готовых упругих моделей (цилиндрический сосуд, $d_{\text{внут}} = 6$ мм) проводились эксперименты, в которых варьировался состав силиконовой смеси (силиконовая резина, отвердитель, разбавитель) и толщина стенки ($h = 1$ и 2 мм). Приращение диаметра модели определялось под действием статического давления оптическим методом.

Согласно клиническим данным, в физиологическом диапазоне давлений (80 – 120 мм рт. ст.) приращение диаметра сонной артерии ($d_{\text{внут}} = 6$ мм) составляет 0 - 18%. В результате проведенных экспериментов подобран состав силиконовой смеси, который обеспечивает приращение диаметра модели сосуда с толщиной стенки $h = 1$ мм на 5-25% в указанном диапазоне давлений. Таким образом, разработана технология изготовления моделей сосудов с растяжимостью близкой к таковой для реальных артерий.

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

А.А. Мизинцева, Д.Э. Сеницына
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ ЗА ОДНОСТОРОННИМ СТЕНОЗОМ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ДОПЛЕРОВСКИМ МЕТОДОМ

Представляются результаты экспериментального исследования структуры стационарного течения в моделях сосуда с односторонним стенозом (степень сужения, STI, по площади составляет 50% и 70%) ультразвуковым доплеровским методом. Анализируются данные по распределению максимальной осевой скорости вдоль сосуда, профилям осевой скорости за стенозом и длине зоны рециркуляции в диапазоне чисел Рейнольдса $200 \div 1800$.

Показывается, что для обеих моделей, с разной степенью сужения, можно выделить два участка в зависимости длины зоны рециркуляции от числа Рейнольдса: начальный, при малых числах Рейнольдса, характеризуемый линейным ростом длины зоны рециркуляции, и основной, с практически постоянным значением. Определены значения критических чисел Рейнольдса, до которых длина зоны рециркуляции изменяется линейно: для $STI = 50\%$ $Re_{\text{крит}} = 600$, при $STI = 70\%$ $Re_{\text{крит}} = 200$. Линейный рост длины зоны рециркуляции на начальном

участке характеризует ламинарный режим течения, постоянство длины зоны рециркуляции при дальнейшем увеличении числа Рейнольдса косвенно указывает на турбулизацию потока за стенозом. Полученный результат о ламинарном характере течения на начальном участке также подтверждается измерением профилей скорости: при малых числах Рейнольдса ($Re < 400$) для обеих моделей форма профиля скорости в сечении за стенозом, расположенном на расстоянии $10D$ (где D – диаметр сосуда) близка к профилю Пуазейля для установившегося по длине течения.

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

Д.Э. Сеницына

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КРИВИЗНЫ СОСУДИСТОГО РУСЛА НА ВИХРЕВУЮ СТРУКТУРУ В БИФУРКАЦИИ БРЮШНОЙ АОРТЫ

Представляются результаты численного исследования пространственно-временной структуры течения в четырех геометрически различных моделях, включающих область бифуркации брюшной аорты и подвздошных артерий, среднестатистической конфигурации и с максимальными отклонениями характерных углов ветвления. Разработанные модели построены по осредненным клиническим данным около 800 пациентов, учтены характерные пространственные углы рассматриваемого участка сосудистого русла из трех бифуркаций и диапазон их изменений. Изучено влияние параметров кривизны на временную и пространственную эволюцию структуры потока. Показано, что в наружных подвздошных артериях явно выраженное одновихревое течение формируется только во время фазы уменьшения расхода. Согласно клиническим данным, области, для которых характерны малые значения осредненных по циклу сдвиговых напряжений и высокие значения индекса колебаний сдвиговых напряжений, подвержены развитию стеноокклюзирующих поражений. Полученные расчетные оценки указанных характеристик показали, что наиболее вероятными местами для развития патологий являются внешние стенки общих подвздошных артерий. Установлено, что на осредненные по циклу сдвиговые напряжения на стенке кривизна сосудистого русла оказывает слабое влияние.

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

Л.Г. Тихомолова, А.Д. Юхнев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ТЕЧЕНИЯ В МОДЕЛИ ОТВЕТВЛЕНИЯ ПРОТЕЗА ОТ БЕДРЕННОЙ АРТЕРИИ МЕТОДОМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВЕКТОРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Одной из операций по восстановлению кровотока в нижних конечностях является шунтирование. Через несколько лет в большинстве случаев происходит зарастание сосудистого протеза из-за гиперплазии интимы - чрезмерного роста клеток на внутренней поверхности сосуда. Исследования указывают на нарушение естественной структуры кровотока как на фактор, стимулирующий данный процесс.

Целью работы является получение экспериментальных данных о структуре течения в модели ответвления протеза от бедренной артерии при разных соотношениях выходных расходов.

Напечатанная на 3D принтере модель имела входной диаметр общей бедренной артерии 6 мм, а выходные диаметры протеза – 8 мм и глубокой бедренной артерии – 4 мм, с углами ответвления 50° и 40°, соответственно. Максимальное входное число Рейнольдса - 1000. Расход по протезу составлял от 30% до 70% входного. Для проведения векторной визуализации и измерений в режиме Vector flow использовался ультразвуковой аппарат Mindray Resona 7.

Изучена эволюция векторного поля скорости в модели по длине цикла. Образование интенсивного вихревого течения обнаружено на внешней стенке протеза ниже по потоку от места ответвления протеза. Максимальный размер застойной зоны наблюдался при наименьшей доле расхода в протезе. Полученные экспериментальные данные о течении в модели ответвления протеза от бедренной артерии дают возможность определить места, в которых предположительно повышен риск развития гиперплазии интимы.

Работа выполнена при поддержке РФФ, грант №20-65-47018.

Я.Ф. Иванова¹, А.Д. Юхнев¹, Л.Г. Тихомолова¹,
Е.М. Смирнов¹, А.А. Врабий²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И.П. Павлова

ПАЦИЕНТ-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ РАСЧЕТЫ КРОВОТОКА ПРИ БЕДРЕННО-ПОДКОЛЕННОМ ШУНТИРОВАНИИ

Наиболее часто встречающееся заболевание сосудов нижних конечностей – это атеросклероз – холестериновые отложения в сосуде, которые могут перекрыть кровоток. В таком случае сосудистыми хирургами выполняется бедренно-подколенное шунтирование с целью восстановления кровотока в бедренной артерии в обход закупоренного участка сосуда. Однако существует риск окклюзии протеза в течение первого года после операции. Оценка риска зарастания протеза после имплантации должна выполняться при индивидуальном подходе и анализе гемодинамики конкретного пациента.

Для решения данной задачи разработана методика пациент-ориентированных расчетов, в которых учитывается персонифицированная геометрия проведенной сосудистой операции, полученная из данных компьютерной томографии, а также входной расход и соотношение выходных расходов, полученные путем ультразвуковых измерений. У четырех из десяти пациентов была обнаружена неоинтима в области входного шва, которая может в дальнейшем перекрыть просвет протеза. Ее максимальная толщина составила от 1 до 4 мм для исследованных пациентов. Методом численного моделирования проанализирована структура течения, наличие застойных зон, распределения осредненных по времени сдвиговых напряжений (TAWSS) и индекса их колебаний (OSI). Увеличение скорости в месте сужения проходного сечения из-за наросшей неоинтимы в области шва влечет за собой увеличение TAWSS и уменьшение OSI в этой области. Осредненные по участку стенки с неоинтимой значения TAWSS для исследованных пациентов составили от 1 до 12 Па, значения OSI – от 0,1 до 0,3.

Работа выполнена при поддержке РФФ, грант №20-65-47018.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЦИРКУЛЯЦИОННОЙ ЗОНЫ В МОДЕЛИ АНАСТОМОЗА БЕДРЕННОЙ АРТЕРИИ

Математическое моделирование позволяет исследовать трехмерный поток крови в модели анастомоза бедренной артерии и оценить необходимые гемодинамические параметры. Анастомоз представляет собой ответвление протеза от артерии для формирования пути обходного кровотока. Целью работы является исследование зависимости длины рециркуляционной зоны от соотношения выходных расходов в модели анастомоза бедренной артерии.

В данной работе проведено численное моделирование кровотока в месте соединения бедренной артерии и сосудистого протеза. С помощью средств пакета ANSYS CFX по методу конечных объемов проведен расчет стационарного ламинарного течения. Кровь моделировалась как несжимаемая вязкая жидкость. Рассмотрены случаи постоянного расхода на входе и различных соотношений выходных расходов (доля выходного расхода в протезе от входного – 30%, 50%, 70%).

Получена картина вихревого течения с помощью линий тока, которая показала наличие зоны рециркуляции в протезе вниз по потоку от места ответвления протеза. Построены поля сдвиговых напряжений на стенке модели. Начало и конец рециркуляционной зоны определялись как точки с нулевой скоростью вблизи стенки. В них происходит смена знака сдвигового напряжения. При увеличении доли расхода по протезу отмечено уменьшение длины зоны рециркуляции.

Е.Д. Никитин¹, Я.А. Гатаулин^{1,2}, А.Д. Юхнев^{1,2}, Д.А. Росуховский^{1,2}
¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
²Институт экспериментальной медицины

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В ВЕНОЗНОМ КЛАПАНЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНОГО ОБРАТНОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ

Функция вен состоит в беспрепятственном проведении крови по направлению к сердцу и недопущении обратного ее тока. Данная функция обеспечивается двустворчатыми клапанами в просвете вены и нарушается, если створки клапана смыкаются не полностью или слишком медленно. Отсутствие возможности визуализировать движение неизменных створок клапана и отсутствие информации о значении других характеристик кровотока, создают предпосылки для численного моделирования.

Впервые проводится численное моделирование течения в венозном клапане под действием импульсного обратного перепада давления (пробе Вальсальвы).

На основе клинических данных построена двумерная симметричная модель венозного клапана подколенной вены. На выходной границе задавалось импульсное изменение давления во времени амплитудой 40 Па и длительностью 3 с. Для жидкости выбрана ньютоновская модель. Течение является ламинарным. Использовано приближение жестких стенок ввиду малости их перемещений для подколенной вены. Модуль Юнга Е створок клапана варьировался от 0,2 до 2 МПа.

Расчеты течения жидкости и движения створок проведены в программах Ansys Fluent и Ansys Mechanical с помощью технологии fluid-structure interaction (FSI).

Разработанная модель течения в венозном клапане протестирована по длительности обратных токов с помощью результатов ультразвуковых доплеровских измерений для здорового и несостоятельного клапана. Для модели здорового клапана ($E = 0,2$ МПа) длительность обратного тока была меньше 0,5 с, а для несостоятельного клапана ($E = 2$ МПа) – больше 1 с.

А.О. Стош¹, Ю.С. Чумаков¹, В.В. Суворов²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет

ОСОБЕННОСТИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ КРОВИ В АОРТЕ С СУЖЕНИЕМ АРТЕРИАЛЬНОГО ПРОТОКА. КОАРКТАЦИЯ АОРТЫ У МЛАДЕНЦЕВ

На сегодняшний день врожденные пороки сердца (ВПС) – одни из наиболее распространенных патологий развития новорожденных во всем мире. Лидирующие позиции по ранней сердечно-сосудистой смертности и заболеваемости, связанной с сердечной недостаточностью, занимает коарктация аорты (КоА), процент ее обнаружения среди всех ВПС составляет 6-15%. Отличительная особенность сердечной аномалии выражается в сужении артериального протока на 50% и более, что затрудняет свободное и беспрепятственное протекание крови. Артериальная гипертензия является основным показателем к выявлению соответствующей патологии у младенцев. Оценка гемодинамики – ключевой фактором при планировании лечения.

Цель работы: Работа состоит из двух частей: первая – обобщение существующих методов коррекции коарктации аорты, а вторая – характеристика гемодинамических изменений в потоке, связанных с коррекцией (у пациентов с патологией) в зависимости от величины сужения артериального протока с учетом влияния реальных свойств крови.

Материалы и методы: Анализ результатов коррекции коарктации аорты у младенцев производился по предоставленным клиникой снимкам компьютерной томографии. Обработка снимков производилась в программном пакете Materialise Mimics Medical 21.0. Результаты анализа используются для разработки модели для дальнейшего численного расчета.

Полученные результаты: (1) построена зависимость величины остаточного сужения артериального протока от степени раздутия баллона при коррекции коарктации аорты; (2) разработаны предварительные численные модели для дальнейшего исследования гемодинамических изменений в потоке.

СЕКЦИЯ «МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА И КОНВЕРСИИ ЭНЕРГИИ»

С.Д. Ляжков, В.А. Кузькин

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ДВУХТЕМПЕРАТУРНЫЙ ПЕРЕНОС ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В β – ФПУТ ЦЕПОЧКЕ С ПРИКРЕПЛЕННЫМИ МАССАМИ

Рассматривается нестационарный перенос тепловой энергии в бесконечной цепочке «масс-ин-масс» при заданном профиле теплового возмущения. Цепочка состоит из двух подрешеток: моноатомной цепочки β – Ферми-Паста-Улама-Цингу и гармонических осцилляторов, прикрепленных к каждой частице β – ФПУТ цепочки. Начальный профиль температуры задан так, что начальные температуры частиц β – ФПУТ цепочки и прикрепленных осцилляторов равны. Результаты, полученные в гармоническом приближении, показывают, что температуры подрешеток значительно отличаются в процессе баллистического теплопереноса. Однако эти температуры могут оставаться различными даже в случае нелинейных межатомных взаимодействий. Показано, что значение нелинейного коэффициента, необходимого для выравнивания температур, существенно зависит от соотношения масс β – ФПУТ и прикрепленных частиц. Чем меньше масса прикрепленных осцилляторов в сравнении с массой β – ФПУТ частиц, тем большая нелинейность необходима для выравнивания.

Б.С. Борисенков, А.М. Кривцов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗМУЩЕНИЯ ЧЕРЕЗ ГРАНИЦУ ДВУХ СРЕД

В данной работе исследуется прохождение некоторого возмущения через границу двух различных сред. Цель работы: понять, что происходит с распространением тепла в неоднородном материале на наноуровне с помощью численного решения уравнения для механической модели кристаллической решетки.

В первой части доклада рассматривается одномерная модель кристалла и задается ограниченное возмущение в виде бегущей волны, которая претерпевает распад на две в результате столкновения с границей двух сред. Различие этих сред моделируется с помощью изменения параметров системы, таких как масса частиц и жесткость пружин.

Во второй части рассматривается ограниченное двумерное возмущение в виде поперечной волны, которая также претерпевает столкновение с границей сред.

В обоих моделированиях основной интерес представляет перераспределение энергии после столкновения и перераспределение аналога "импульса" для возмущения, которое в данном случае мы будем называть квазичастицей.

Ф.И. Кондратенко, А.М. Кривцов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ В ОДНОМЕРНОМ КРИСТАЛЛЕ С ЧЕРЕДОВАНИЕМ МАСС

В данной работе рассматривается процесс переноса энергии в кристалле с чередованием масс. Разработан математический аппарат, основанный на понятии взаимной энергии и разностных операторах, показана эффективность применения разработанного аппарата для получения интегралов распространения энергии. Выдвинута и предварительно доказана гипотеза о сохранении потока энергии в одномерном кристалле с чередованием масс, основанная на аппарате взаимных энергий и понятии симметричной энергетической ячейки. Проведен численный эксперимент, подтверждающий гипотезу. Рассмотрены равновесные температуры в кристалле с включениями при периодических граничных условиях. Произведено численное моделирование, доказывающее малозначительное влияние включений при росте числа частиц в ячейке периодичности. Получено аналитическое приближение решения задачи о поиске равновесных температур в кристалле с включениями при периодических граничных условиях.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ В ОДНОМЕРНОМ КРИСТАЛЛЕ С ЧЕРЕДОВАНИЕМ МАСС

В данной работе проводится сравнительный анализ движения энергетического центра в гармоническом кристалле Гука и в кристалле с чередованием масс с помощью метода энергетических моментов. В каждом случае получено уравнение движения энергетического центра для произвольного возмущения, обладающего конечной энергией.

Показано, что в обычной цепочке энергетический центр всегда движется равномерно, тогда как в цепочке с чередованием масс такое точно выполняется только при симметрии возмущения. При произвольном возмущении поток энергии сохраняется с точностью до малой величины. Показана аналогия между обычной динамикой массы и энергетической динамикой, откуда можно получить аналог обобщенной силы, которая определяет положение энергетического центра в двухатомной цепочке Гука.

**ЧТО ТАКОЕ ФРАКТАЛЫ И КАК ОНИ СВЯЗАНЫ
С АРХИТЕКТУРОЙ И ПРОЕКТИРОВАНИЕМ**

Понятие фрактала ввел в рассмотрение Бенуа Мандельброт (1924-2010) в 1977 году. В переводе с латинского слово «fractus» означает «раздробленный, разбитый». Под фракталами понимаются объекты, характеризующиеся самоподобием форм при стремлении масштабной единицы к нулю. Инженерное представление фрактала сводится к квазифракталу с ограниченным числом самоповторений, организованных по рекурсивному принципу.

В математической теории фракталов важную роль играет понятие множеств дробной размерности.

Примерами фрактальных структур в природе служат капуста Романеско, снежинки, молнии, папоротники, кроны деревьев, береговые линии, горы. В древней интуитивной архитектуре фракталы присутствуют как образы, непосредственно заимствованные у природы. Использование же фрактальных алгоритмов в современном архитектурном морфогенезе становится научно обоснованным, а фрактальная геометрия начинает успешно применяться для анализа архитектурных форм и моделирования их структур.

ЭНТРОПИЯ В МАТЕМАТИКЕ, ФИЗИКЕ И ИНФОРМАТИКЕ

Целью работы является исследование корректного представления о том, что такое энтропия, как выглядят ее воплощения в физике и теории информации, сравнение разных формулировок с выделением общего и демонстрация приложения энтропии в Computer Science.

Дано определение энтропии, наглядно изложен математический смысл понятия как абстракции, рассмотрены взгляды на энтропию в физике и теории информации. Физический смысл величины представлен в виде принципа Больцмана, энтропия рассмотрена как статистическая характеристика термодинамической системы. Значение энтропии в теории информации отражено изложением формулы Шеннона, формулы Хартли, отмечен принцип Ландауэра.

Польза энтропии как количественной меры информационной ценности в Computer Science показана при построении дерева решений с реализацией соответствующего алгоритма.

В.Д. Емельянов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ И АНАЛИЗА ФУНКЦИЙ ХЭШИРОВАНИЯ

Задача исследования – проанализировать, какие требования выдвигаются для хэш-функций с учетом реализуемых на практике атак против систем с их применением, какими способами выполняется проектирование хэш-функций с удовлетворением этих требований, а также изучить конкретные хэш-функции, чтобы выяснить, почему некоторые из них оказываются ненадежными (функции семейства MD) или не применяются на практике (функция VSH и другие доказуемо безопасные).

В ходе работы были проанализированы различные источники в области криптографии, на основании которых была выстроена основная теоретическая часть доклада. Эта теоретическая часть стала основой для практических исследований некоторых хэш-функций (SHA256, MD5, VSH), которые позволили понять, каким образом на практике можно проанализировать надежность хэш-функции и продемонстрировать некоторые из их свойств. Практическая часть исследования была направлена в первую очередь на анализ псевдослучайности выходной последовательности и лавинного эффекта (то есть значительного изменения выходного значения при малом изменении входного аргумента).

С.О. Дроздов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ФУНКЦИИ (К ОДНОЙ ПРОБЛЕМЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА ФИЗИКИ И МЕХАНИКИ)

Исторически, при создании математического анализа были использованы представления об актуально бесконечно малых величинах. Но исторически появившиеся первыми представления о бесконечно малых числах не соответствуют современному анализу, в рамках которого используется потенциальная, а не актуальная бесконечность.

В силу этих исторических особенностей, даже после формализации интегрально-дифференциального исчисления при помощи понятия предела, в курсах физики и механики используется представление о бесконечно малых, как об актуальных величинах (числах).

Несмотря на то, что многие утверждения, используемые в курсах физики и механики, можно формализовать, используя концепцию потенциальной бесконечности (в частности, привлекая понятие дифференциала), остаются проблемы со строгим построением “бесконечно малой” части пространственно-распределенной величины.

Эту проблему можно решить (и это представляется в докладе) введением понятия пространственной функции (как однозначного отображения множества объемов евклидова пространства на множество вещественных неотрицательных чисел) и ее обобщенного дифференциала как аналога дифференциала функции вещественной переменной.

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ «ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ В ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И МЕДИЦИНСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ»	3
СЕКЦИЯ «ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД И НАНОСТРУКТУР»	14
СЕКЦИЯ «ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И КОСМОСА»	19
СЕКЦИЯ «ФИЗИКА ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ»	29
СЕКЦИЯ «ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА»	32
СЕКЦИЯ «МЕХАНИКА И ПРОЦЕССЫ УПРАВЛЕНИЯ»	36
СЕКЦИЯ «ГИДРОАЭРОДИНАМИКА, ГОРЕНИЕ И ТЕПЛООБМЕН»	51
СЕКЦИЯ «БИОМЕХАНИКА»	61
СЕКЦИЯ «МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА И КОНВЕРСИИ ЭНЕРГИИ»	66
СЕКЦИЯ «МАТЕМАТИКА»	68

НЕДЕЛЯ НАУКИ ФИЗМЕХ

Сборник аннотаций докладов
Всероссийской научной конференции

4–9 апреля 2022 года

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

Подписано в печать 05.05.2022. Формат 60×84/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 4,5. Тираж 32. Заказ 1690.

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.

