

НЕДЕЛЯ НАУКИ ФИЗМЕХ

Сборник аннотаций докладов
Всероссийской научной конференции

30 марта – 3 апреля 2026 года

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

М.В. Шахов, С.П. Рощупкин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

**ОСОБЕННОСТИ РЕЗОНАНСНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ТРЕЗУБЦА
В ПОЛЕ СИЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ**

Теоретически изучены особенности резонансного рождения ультрарелятивистских электрона и электрон-позитронной пары при столкновении ультрарелятивистских электронов с сильной электромагнитной волной. Описание процесса основано на функциях Волкова, являющихся решением уравнения Дирака во внешнем поле. Процесс рассмотрен в случае резонанса Олейника, заключающемся в выходе промежуточного гамма-кванта на массовую поверхность. Получены дифференциальные и полные скорости процесса. Изучена кинематика системы в условиях резонанса. Определены диапазоны начальных параметров, при которых возможно резонансное протекание процесса. Рассмотрена квантовая запутанность состояний конечных частиц в условиях резонанса. Посчитаны полные и дифференциальные вероятности в области оптических и рентгеновских частот внешней волны.

Д.В. Круашвили, Я.А. Бердников
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

**ОСОБЕННОСТИ РОЖДЕНИЯ МЕЗОНОВ СО СКРЫТЫМ ОЧАРОВАНИЕМ
В СТОЛКНОВЕНИЯХ ПРОДОЛЬНО-ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ПРОТОНОВ
ПРИ УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭНЕРГИЯХ**

Изучение рождения мезонов со скрытым очарованием в протон-протонных (pp) столкновениях открывает доступ к функциям распределения глюонов (PDFg) в протоне. Надежная информация о PDFg в свою очередь позволяют оценить вклад глюонов в спин протона. Одним из мезонов со скрытым очарованием является J/ψ . Поскольку в процессе рождения J/ψ мезона принимают участие глюоны, то это обстоятельство служит мотивацией изучения рождения J/ψ мезонов в столкновениях поляризованных и неполяризованных протонов.

В настоящей работе представлены результаты расчетов спектров по поперечному импульсу и двойной продольной спиновой асимметрии J/ψ мезонов. Расчеты выполнены на основе модифицированного нами программного пакета RUTHIA 8. Модификация проведена в части учета поляризованных функций распределения партонов и сечений взаимодействия поляризованных партонов. Проведено сравнение с результатами эксперимента, которое показало удовлетворительное согласие теории и опыта. Сделано предсказание ожидаемых результатов эксперимента SPD коллайдера NICA в части спектра по поперечному импульсу и двойной продольной спиновой асимметрии J/ψ мезона при энергии 27 ГэВ.

Работа выполнена в рамках Государственного задания на проведение фундаментальных исследований (код темы FSEG-2025-0009).

Г.И. Шелых, С.П. Рощупкин, В.В. Дубов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РЕЗОНАНСНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МОДИФИЦИРОВАННОГО СИЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ КОМПТОН-ЭФФЕКТА ДЛЯ УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭНЕРГИЙ ЭЛЕКТРОНА И ГАММА-КВАНТА

В настоящее время интенсивно исследуются резонансные процессы КЭД (квантовой электродинамики) в сильных электромагнитных полях. Резонансный Комптон-эффект представляет собой процесс КЭД второго порядка, в котором промежуточный электрон или позитрон в поле волны выходит на массовую оболочку. Ключевая особенность резонансного процесса заключается в существенном росте сечения рассеяния и распаде процесса на два последовательных процесса первого порядка. В данной работе показано, что кинематика резонансного рассеяния определяется тремя безразмерными параметрами — отношениями энергий начальных частиц к характерным энергиям Комптон-эффекта и процесса Брейта-Уиллера, а также числом поглощенных фотонов волны. Для каналов с промежуточными электроном и позитроном получены аналитические выражения для энергий конечных частиц и показана жесткая связь углов вылета рассеянного гамма-кванта и электрона, отсутствующая в нерезонансном случае. Получены аналитические выражения для резонансного дифференциального и полного сечений рассеяния. Показано, что резонансные сечения могут не несколько порядков величины превышать соответствующие нерезонансные сечения.

Д.А. Вишталюк^{1,2}, Я.А. Бердников¹, Ю.К. Колобов²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
² АО «НТЦ РАТЭК»

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ФОРМИРОВАТЕЛЯ ПОЛЯ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ КОНВЕЙЕРНОГО АНАЛИЗАТОРА НА БАЗЕ ИМПУЛЬСНОГО НЕЙТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА МЕТОДОМ МОДЕЛИРОВАНИЯ В MCNP5

Нейтронно-радиационный анализ (PGNAA) является эффективным методом бесконтактного определения состава промышленного сырья в потоковых анализаторах элементного состава. В настоящее время в данной области наблюдается тенденция к замене традиционных радиоизотопных источников на импульсные нейтронные генераторы (ИНГ). Использование ИНГ с энергией нейтронов 14 МэВ требует проектирования эффективного блока замедления для формирования стабильного поля тепловых нейтронов в зоне измерения при минимизации радиационного фона.

В данной работе с помощью основанного на методе Монте-Карло программного комплекса MCNP5 проведено математическое моделирование узла формирования нейтронного поля с учетом конструктивных параметров импульсного генератора (диаметром 60 мм). В ходе исследования варьировались геометрические параметры и комбинации материалов замедлителей, отражателей и размножителей нейтронов, таких как полиэтилен высокой плотности, графит и свинец. Целью моделирования являлось определение оптимальной конфигурации блока формирователя для получения максимальной плотности потока тепловых нейтронов в целевом объеме конвейерной зоны. В результате работы рассчитаны пространственно-энергетические распределения нейтронов и показана высокая

эффективность применения гетерогенныхборок по сравнению с гомогенными замедлителями. Полученные данные могут быть использованы при проектировании промышленных образцов нейтронных анализаторов состава вещества, обеспечивая повышение их чувствительности и точности.

А.А. Мельник, С.П. Рошупкин, В.В. Дубов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОСОБЕННОСТИ РЕЗОНАНСНОГО РАССЕЯНИЯ УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ДРУГ НА ДРУГЕ В ПОЛЕ СИЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ.

Теоретически изучены особенности резонансного рассеяния ультрарелятивистских электронов друг на друге в поле сильной монохроматической электромагнитной волны. Получено аналитическое выражение для амплитуды процесса в сильном электромагнитном поле. Показано, что в условиях резонанса (резонансы Олейника) исходный процесс второго порядка по постоянной тонкой структуры эффективно распадается на два процесса первого порядка типа нелинейного Комптон-эффекта. В данной задаче имеется релятивистски-инвариантный квантовый параметр, равный отношению энергий электронов к характерной квантовой энергии Комптон-эффекта. Детально изучена резонансная кинематика процесса. Показано, что углы вылета электронов и их энергии существенно зависят от характерных параметров задачи (квантовых параметров Комптон-эффекта, числа поглощенных фотонов и интенсивности волны).

Д.В. Баягантаев, С.П. Рошупкин, В.В. Дубов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РЕЗОНАНСНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОТОННОГО ТРЕЗУБЦА В ПОЛЕ СИЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ

Теоретически изучен резонансный процесс при столкновении гамма-кванта высокой энергии с сильной лазерной волной. При этом рождается гамма-квант и электрон-позитронная пара (фотонный трезубец). В условиях резонанса исходный процесс второго порядка по постоянной тонкой структуры эффективно распадается на два процесса первого порядка (нелинейный Комптон-эффект и нелинейный процесс Брейта-Уилера). Получена амплитуда процесса в поле сильной электромагнитной волны. Показано, что данный резонансный процесс характеризуется двумя характерными квантовыми энергиями – характерной энергией Комптон-эффекта и характерной энергией Брейта-Уилера. Показано, что для канала А энергия позитрона определяется нелинейным процессом Брейта-Уилера (квадратное уравнение для энергии позитрона), а энергия электрона и конечного гамма-кванта определяются нелинейным Комптон-эффектом (кубическое уравнение для энергии электрона). Для канала В позитрон и электрон меняются местами. Детально изучена резонансная кинематика процесса. Показано, что энергии конечных частиц и их углы вылета жестко связаны между собой. При этом, число поглощенных фотонов волны электроном и позитроном определяется резонансной кинематикой и существенно зависит от характерных параметров задачи.

Д.С. Шапаев, Я.А. Бердников, Д.М. Ларионова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)

ИНВАРИАНТНЫЕ СПЕКТРЫ ПРЯМЫХ ФОТОНОВ В HE+AU СТОЛКНОВЕНИЯХ ПРИ ЭНЕРГИИ $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГЭВ

Прямые фотоны являются одним из ключевых инструментов для изучения кварк-глюонной системы, которая образуется в результате столкновения ультрарелятивистских ядер. Это связано с тем, что электромагнитные кванты слабо взаимодействуют с окружающей средой и сохраняют первичную информацию о процессе их рождения.

В данной работе представлены результаты измерения инвариантных спектров прямых фотонов в столкновениях ядер He+Au при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ. Экспериментальные данные получены в эксперименте PHENIX на коллайдере RHIC.

Инвариантные спектры прямых фотонов в столкновениях He+Au измерены методом внешней конверсии.

Проведено сравнение с инвариантным спектром прямых фотонов, рожденных в протон-протонных столкновениях при той же энергии. Показано, что наблюдается превышение выхода прямых фотонов в He+Au над p+p в области $1 < p_T < 5$ ГэВ/c, что может указывать на возможный вклад тепловых фотонов, образующихся в ядерной среде.

Работа выполнена в рамках Государственного задания на проведение фундаментальных исследований (код темы FSEG-2025-0009).

П.С. Гуньков, С.С. Козловский, Я.А. Бердников
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСЧЕТНОГО И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СПЕКТРОВ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТРУБКИ ДЛЯ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА

Рентгенофлуоресцентный анализ позволяет определить количественный состав исследуемого объекта, что необходимо во многих отраслях промышленности, археологии и искусстве. Проведение количественного рентгенофлуоресцентного анализа на сегодняшний день возможно при наличии труднодоступных стандартных образцов или методом фундаментальных параметров, не обеспечивающим высокую точность. Определение количественного элементного состава исследуемого вещества без использования стандартных образцов может быть реализовано с помощью метода Монте-Карло.

Для расчета спектров флуоресценции методом Монте-Карло создается расчетная модель, содержащая источник излучения (модель рентгеновской трубки), образец и детектор. Наиболее критичным элементом в этом расчете является спектр рентгеновской трубки. Точность спектра флуоресценции образца существенно зависит от спектра исходного рентгеновского излучения, поэтому получение спектра рентгеновской трубки расчетным путем является актуальной задачей.

В работе был проведен расчет спектра прострельной рентгеновской трубки с медным анодом с помощью программы МСС. Полученный результат сопоставлен со спектром данной рентгеновской трубки, полученным экспериментальным путем. Отмечается хорошее согласие экспериментальных и расчетных данных.

РАСЧЕТЫ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ВХОДНОГО И ВЫХОДНОГО ТРЕКЕРА ПРОТОНОВ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ПО ИЗУЧЕНИЮ КЛАСТЕРНОЙ СТРУКТУРЫ ЯДЕР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКТИВНЫХ МИШЕНЕЙ НА СЦ-1000 В ПИЯФ (ГАТЧИНА)

Изучение кластерной структуры ядер является одной из фундаментальных задач в ядерной физике, тем не менее не потерявшей свою актуальность на настоящий момент. В ПИЯФ разработана методика экспериментального изучения данного процесса прямым наблюдением развала ядра с использованием активной мишени. Ранее этот процесс изучался только косвенными методами.

Целью предлагаемого эксперимента является изучение выбивания кластеров в неупругом рассеянии протонов на ядрах, используя газовую время-проекционную (ВПК) камеру в качестве активной мишени, где ВПК является одновременно мишенью и детектором частиц отдачи. Также с помощью пропорциональных камер будет измеряться угол рассеянного на мишени протона, это позволит впервые выполнить корреляционные измерения между параметрами частиц отдачи (кластеров) и углами рассеянных протонов.

В докладе будет представлен один из вариантов экспериментальной установки для изучения данного процесса в целом, а также конкретные работы по расчетам и исследованию трека протонного пучка, состоящего из набора пропорциональных камер.

С.Д. Комарова, Е.В. Банников, Д.О. Котов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

АЗИМУТАЛЬНАЯ АНИЗОТРОПИЯ РОЖДЕНИЯ НЕЙТРАЛЬНЫХ ПИОНОВ В СТОЛКНОВЕНИЯХ ${}^3\text{He}+\text{Au}$ ПРИ $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ

Изучение азимутальной анизотропии рождения частиц в столкновениях ультрарелятивистских ядер позволяет исследовать коллективные эффекты, которые являются одним из признаков образования кварк-глюонной плазмы (КГП). Количественное описание азимутальной анизотропии проводится с помощью разложения в ряд Фурье азимутального распределения частиц относительно плоскости реакции. Коэффициенты потока (v_n) в разложении в ряд Фурье называются анизотропными потоками. Анизотропный поток второго порядка — эллиптический поток (v_2) — количественно характеризует анизотропию импульсного пространства рожденных частиц и является доминирующим среди остальных потоков v_n при энергиях RHIC и LHC в области малых быстрот.

Значения v_2 были получены ранее для заряженных адронов, рожденных в столкновениях ${}^3\text{He}+\text{Au}$ при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ. Было обнаружено, что при переходе от центральных столкновений к периферическим, а также с увеличением значений поперечного импульса (p_T), множественность частиц снижается, и вклад непотоковых эффектов в измеряемую анизотропию становится более существенным. Выбор π^0 -мезонов в данной работе обусловлен тем, что их выходы измеримы вплоть до $p_T \approx 16 - 20$ ГэВ/с с относительно малыми неопределенностями. Эта особенность π^0 -мезонов дает возможность расширить диапазон по p_T для исследования влияния непотоковых эффектов на значения $v_2(p_T)$.

В данном докладе представлены результаты измерения значений v_2 для π^0 -мезонов в столкновениях ${}^3\text{He}+\text{Au}$ при энергии $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 200$ ГэВ, полученные в эксперименте PHENIX.

Д.В. Неумин, Д.М. Ларионова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

АНАЛИЗ ИНВАРИАНТНЫХ СПЕКТРОВ ИДЕНТИФИЦИРУЕМЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ АДРОНОВ, ПОЛУЧЕННЫХ В Хе+W СТОЛКНОВЕНИЯХ ПРИ ЭНЕРГИИ 2,5 АГЭВ, В РАМКАХ МОДЕЛИ BLAST-WAVE

Одной из ключевых задач эксперимента MPD (NICA) является исследование свойств ядерной материи в области фазового перехода, соответствующей высоким значениям химического потенциала. Режим фиксированной мишени (Fix Target) рассматривается как первый этап программы MPD, в рамках которого планируется изучение столкновений Хе+W при энергии 2,5 АГэВ. В условиях ожидаемых низких температур в режиме Fix Target особую актуальность приобретает разработка методов оценки параметров образующейся материи, таких как температура, химический потенциал и параметры коллективного потока, на основе анализа экспериментальных данных.

Одним из распространенных подходов к оценке этих параметров является модель релятивистской гидродинамики Blast-Wave. В данной работе выполнен систематический обзор существующих результатов применения модели Blast-Wave для анализа экспериментальных данных в экспериментах с фиксированной мишенью при низких энергиях. Основным результатом работы является применение Blast-Wave модели для описания инвариантных спектров идентифицируемых заряженных адронов, полученных в столкновениях Хе+W при энергии 2,5 АГэВ. Полученные температуры кинетического вымораживания и средней скорости радиального расширения системы частиц сопоставлены с результатами других экспериментов в схожей энергетической области.

С.В. Гаталина¹, С.С. Батури²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Национальный исследовательский университет ИТМО

СПИНОВАЯ ДИНАМИКА ЗАКРУЧЕННОГО ЭЛЕКТРОНА В АКСИАЛЬНО СИММЕТРИЧНОМ НЕОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Экспериментальное обнаружение закрученных электронных пучков с ненулевым собственным орбитальным угловым моментом (ОУМ) подтвердило теоретические предсказания и открыло новые возможности для их применения. В недавних экспериментах были получены пучки электронов с ОУМ до $1000\hbar$, закрученные электроны успешно применяются в микроскопии и могут стать новым инструментом в материаловедении и физике высоких энергий. Несмотря на уже полученные теоретические достижения, все еще остаются открытые вопросы в полноценном описании динамики закрученных частиц, в частности в магнитных полях объективных линз. Такие поля на практике не являются однородными и вносят сложные взаимодействия спина с магнитным полем, которые могут изменять ОУМ и общую волновую функцию частицы. Существует описание эволюции электрона в однородном магнитном поле, однако оно игнорирует переходы на границах, где напряжённость магнитного

поля изменяется. Эта граничная область особенно важна, поскольку приводит к появлению примесных квантовых состояний, которые ухудшают чистоту пучка.

В данной работе мы получили явный вид поправки к волновой функции в первом приближении теории возмущений, правила отбора для возможных переходов и условия применимости выбранного приближения. Как следствие получено, что в магнитных полях с достаточно небольшим градиентом для чистого исходного состояния Ψ_0 существует два допустимых для перехода состояния, описываемых правилами отбора. Величина поправки не постоянна по оси неоднородности магнитного поля и осциллирует вместе с параметром масштабирования. Полученный результат применим не только для полей катушек, используемых в объективных линзах, но и для любого поля, удовлетворяющего полученному условию адиабатичности.

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

СРАВНЕНИЕ УРОВНЕЙ ГЕНЕРАЦИИ ГЕНЕРАТИВНО-СОСЯЗАТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ (ГСС) В ФИЗИКЕ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Генеративно-состязательные сети (ГСС) применяются для ускорения Монте-Карло моделирования в физике высоких энергий. Выбор уровня генерации данных - частица или событие, принципиально влияет на физическую состоятельность модели.

В первом случае генерация осуществляется на уровне отдельных частиц. Модель воспроизводит одночастичные распределения кинематических величин и категориальных признаков. Корреляционная структура при этом формируется опосредованно: распределения задаются через статистические частоты появления состояний, что приводит к явному воспроизведению маргинальных распределений, тогда как законы сохранения и многомерные корреляции обеспечиваются лишь статистически и не контролируются на уровне отдельной генерации.

Во втором случае объектом генерации является событие целиком как множество частиц переменной численности. Это позволяет моделировать структуру события, взаимосвязь событий внутри выборки и интегральные характеристики системы: энергия системы, массовое число и заряд сталкивающихся ядер, а также прицельный параметр столкновения. Такой подход более ресурсоемкий и чувствительный к нестабильностям обучения, но обеспечивает более корректное воспроизведение межсобытийных и структурных характеристик.

Таким образом, генерация отдельных частиц подходит для быстрого воспроизведения маргинальных распределений, тогда как генерация полноценных событий более предпочтительна при необходимости точного моделирования структуры события и физических ограничений системы.

Д.А. Бабакова, В.Д. Серов, С.П. Рошупкин, В.В. Дубов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

РАСSEЯНИЕ ЭЛЕКТРОНА НА МЮОНЕ В СИЛЬНОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

Теоретически изучен резонансный процесс рассеяния электрона на мюоне, модифицированный внешним электромагнитным полем.

Такой процесс второго порядка по постоянной тонкой структуре в условиях резонанса эффективно распадается на два процесса первого порядка: два стимулированных внешним полем последовательных эффектов Комптона. Резонансная кинематика процесса рассмотрена в ультрарелятивистском приближении. Показано, что энергетический спектр конечных частиц существенно зависит от их углов вылета и параметров внешнего поля. Получена оценка для дифференциального сечения процесса, произведено сравнение с аналогичным для случая без внешнего поля.

М.И. Антропов¹, В.А. Бакаев¹, А.А. Заручевский²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Ленинградская областная клиническая больница

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОНОВ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ МЕДИЦИНСКОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ SL75-5

Дистанционная лучевая терапия с использованием фотонов тормозного излучения высокой энергии является одним из основных методов лечения онкологических заболеваний. Качество лечения напрямую зависит от точности дозиметрических характеристик пучка фотонного излучения, что требует их тщательного изучения и контроля на этапе подготовки к облучению.

Цель настоящей работы – определение дозиметрических характеристик пучка фотонов тормозного излучения, генерируемого медицинским линейным ускорителем электронов SL75-5, для обеспечения качественной дистанционной лучевой терапии.

Измерения проводились с использованием цилиндрической ионизационной камеры в водном фантоме. Обработка экспериментальных данных выполнялась с помощью программы OmniPro Ассерт 6.3.

В ходе работы исследовано качество терапевтического пучка тормозного излучения, получены профили дозного распределения для всех размеров исследуемых полей облучения. Установлено, что пучок тормозного излучения обладает высокой степенью симметрии и равномерностью дозы внутри поля облучения, что подтверждает корректную работу систем выравнивания и коллимации ускорителя SL75-5. Полученные данные являются основой для дозиметрического планирования лучевой терапии.

Е.А. Шилов, В.В. Дубов, С.П. Рошупкин

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИССИПАТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕЛИНЕЙНОМ УРАВНЕНИИ ШРЕДИНГЕРА-ЛАНЖЕВЕНА-КОСТИНА

Использование комплексных потенциалов для описания физических явлений позволяет эффективным способом моделировать различные эффекты в диссипативных системах. В представленной работе, при рассмотрении уравнения Шредингера-Ланжевена-Костина, аналитически решена задача о квантовом осцилляторе при наличии диссипативных сил. Общий подход описания диссипативных процессов в ШЛК-модели значительно упрощается при использовании феноменологических оптических потенциалов. Проведенное исследование позволяет выделить группы случаев, при изучении которых подход ШЛК

оказывается наиболее эффективным способом описания диссипативных явлений в квантовых системах.

А.М. Золотухин, В.В. Дубов, С.П. Рощупкин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

КВАНТОВАНИЕ ОСЦИЛЛЯТОРА В ОПТИЧЕСКОМ ПОТЕНЦИАЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КАЛДИРОЛЫ

Мнимый (оптический) потенциал является важным инструментом при квантовомеханическом описании диссипативных процессов. Использование потенциалов данного типа в рамках математического аппарата теоретической физики позволяет охарактеризовать физические причины проявления наблюдаемых эффектов. В данной работе диссипативные системы исследуются на основе модели квантового гармонического осциллятора с мнимым потенциалом. Отметим, что для осуществления вычислений использовался метод Калдиरोлы. Спектр применения предлагаемого подхода достаточно широк, в том числе: описание диссипативных статистических систем, задачи теории лазеров, явление каналирования частиц, процессы при электрон-атомных столкновениях и рассеянии протонов на ядрах.

М.А. Кочерженко, Д.В. Круашвили, Я.А. Бердников
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

АСИММЕТРИЯ ЭТА-МЕЗОНОВ В СТОЛКНОВЕНИЯХ ПРОДОЛЬНО ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ПРОТОНОВ ПРИ ЭНЕРГИИ $\sqrt{s_{NN}}=200$ ГЭВ

Изучение двойной продольной спиновой асимметрии (ДПСА) эта-мезонов в протон-протонных столкновениях является инструментом для исследования спиновой структуры протона. Наблюдаемая ДПСА в экспериментах чувствительна к поляризованным партонным функциям распределения, прежде всего к глюонной поляризации. При энергиях коллайдера RHIC рождение скалярных и векторных мезонов в значительной степени определяется процессами с участием глюонов. Следовательно, измерения асимметрии мезонов позволяют накладывать ограничения на вклад глюонов в полный спин протона.

В данной работе представлен спектр по поперечному импульсу эта-мезонов и зависимость двойной продольной спиновой асимметрии эта-мезонов от поперечного импульса. Для генерации протон-протонных столкновений был использован усовершенствованный в данной работе программный пакет PYTHIA8. Расчет выполнялся при энергии столкновений протонов 200 ГэВ. Проведено сравнение с результатами эксперимента PHENIX коллайдера RHIC, которое показало хорошее согласие теории и опыта.

Сделано предсказание ожидаемых результатов эксперимента SPD коллайдера NICA в части спектра по поперечному импульсу и двойной продольной спиновой асимметрии эта мезона при энергии 27 ГэВ.

Работа выполнена в рамках Государственного задания на проведение фундаментальных исследований (код темы FSEG-2025-0009).

Е.А. Алексеев, А.К. Кавеев
ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

**ЭПИТАКСИАЛЬНЫЙ РОСТ ТВЕРДОГО РАСТВОРА $\text{Ca}_{1-x}\text{Ba}_x\text{F}_2/\text{Si}(001)$: ВЛИЯНИЕ
ТЕМПЕРАТУРЫ НА МОРФОЛОГИЮ И СТРУКТУРУ**

Соединение $\text{Pb}_{1-y}\text{Sn}_y\text{Te}$ (PST) при $y > 0,35$ относится к классу кристаллических топологических изоляторов и представляет интерес для задач спинтроники. Однако рост данного материала методом молекулярно-лучевой эпитаксии сопровождается рядом трудностей, прежде всего связанных с недостаточной гладкостью (планарностью) эпитаксиальных слоёв, что приводит к увеличению рассеяния поверхностных носителей заряда. С целью получения и последующего исследования электрофизических характеристик слоев PST с ориентацией поверхности (001) были выращены гетероструктуры семейства $\text{Pb}_{0.7}\text{Sn}_{0.3}\text{Te}/\text{BaF}_2/\text{Ca}_{1-x}\text{Ba}_x\text{F}_2/\text{CaF}_2/\text{Si}(001)$ с использованием метаморфного буферного слоя на основе твердого раствора $\text{Ca}_{1-x}\text{Ba}_x\text{F}_2$. Для полученных образцов были выполнены морфологические и рентгеноструктурные исследования. Установлено, что повышение температуры роста от 200 до 300 °С приводит к уменьшению высоты рельефа эпитаксиального слоя твердого раствора и, соответственно, снижению среднеквадратичного отклонения (RMS) шероховатости от 6,20 до 3,75 нм. Дальнейшее повышение температуры сопровождается увеличением высоты рельефа и увеличением значения RMS, в частности, до величины 12,99 нм при температуре роста 575 °С. Рентгеноструктурный анализ показал, что предельная температура сохранения однородности твердого раствора без распада на отдельные фазы также составляет около 300 °С. На основании экспериментальных данных была выращена оптимизированная гетероструктура со слоем PST(001), представляющая интерес для дальнейшего нанесения PST улучшенной планарности.

И. Куликовских
ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР В
ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ AlGaAs С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ InGaAs**

В данной работе исследуется распределение температуры в торцевом полупроводниковом лазере на основе гетероструктуры $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ с квантовыми ямами InGaAs . Работа проведена в лаборатории физики полупроводниковых гетероструктур Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе.

Ограничение мощности современных полупроводниковых лазеров связано с разогревом полупроводниковой гетероструктуры. Тепло выделяется как при протекании тока из-за омического сопротивления через слои гетероструктуры, так и из-за безызлучательной рекомбинации в активной области. Разогрев приводит к росту внутренних потерь и снижению дифференциальной эффективности, а в конечном итоге к катастрофическому разрушению прибора. Построение теоретической модели распределения тепла от тока накачки в мощном полупроводниковом лазере, работающем в непрерывном режиме работы, позволит лучше прогнозировать его предельные характеристики. Полученные результаты будут использованы для оптимизации толщин слоёв гетероструктуры новых мощных лазеров.

Г.А. Немцев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

АНАЛИТИКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ РАССЕЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА НАНОЧАСТИЦАХ СФЕРИЧЕСКОЙ И ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИИ

В работе исследуется рассеяние плоской электромагнитной волны на бесконечно длинном кремниевом цилиндре и однородной кремниевой сфере в рамках классической теории Ми, основанной на решении уравнений Максвелла в соответствующих координатах. Рассматриваются два случая: недиспергирующий материал с постоянной диэлектрической проницаемостью и реалистичный дисперсионный кремний, для которого комплексный показатель преломления $n_\lambda = n_r(\lambda) + i n_i(\lambda)$ задан в соответствии с спектрально-зависимыми данными. Размеры объектов выбраны порядка длины волны, характерный радиус составляет $a = 150 \cdot 10^{-9}$ м, что обеспечивает выраженные ми-резонансы. Для обеих геометрий численно рассчитаны спектральные зависимости эффективности и сечения рассеяния как функции длины волны и проведено сравнение с моделированием в COMSOL Multiphysics, демонстрирующее влияние дисперсии кремния на положение и контраст резонансных пиков.

И.Д. Сысоев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОНООБМЕННЫХ ЛИНЗ В СТЕКЛЕ

Процесс ионного обмена в стекле – это диффузионный процесс, в котором ионы, содержащиеся в стеклянной матрице, заменяются ионами из внешнего источника, что приводит к изменению оптических характеристик стекла, в частности, показателя преломления. Поскольку диффузионная методика может применяться для различных стекол и допирующихся ионов, процесс ионного обмена широко используется для изготовления элементов интегральной оптики и микрооптики. Важным применением метода ионного обмена в стекле является изготовление микролинз и графанов. Микролинзы получают диффузией через маску с круглым отверстием при температуре ниже температуры стеклования. В работе предоставлено численное моделирование формирования микролинз в стекле методом ионного обмена. Выполнены численные расчеты профиля показателя преломления при ионообменной диффузии, а также оптических характеристик формируемых микролинз. Проведен анализ влияния параметров ионного обмена на формируемые структуры. Рассмотрено влияние «боковой» диффузии на характеристики оптических элементов.

Е. С. Федорова^{1,2}, К. В. Пригода¹, В. О. Большаков¹, Д. П. Марков¹, Ю. А. Жарова¹
¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург
² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

СИНТЕЗ И ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ УПОРЯДОЧЕННЫХ МАССИВОВ НАНОЧАСТИЦ Ag, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ВЫТЭСНЕНИЯ

Сегодня большой научный интерес представляют металлические наночастицы, поддерживающие локализованный плазмонный резонанс (ЛПР). На резонансной частоте в их спектрах поглощения и рассеяния наблюдаются выраженные пики, что обуславливает востребованность таких структур в сенсорике, медицине и нелинейной оптике. Кроме того, явление ЛПР позволяет достичь локального усиления электрического поля, что, в свою очередь, ведет к значительному увеличению сигналов гигантского комбинационного рассеяния света.

В связи с этим многие научные группы исследуют неупорядоченные массивы металлических наночастиц, которые показывают значительные результаты. Однако такие структуры трудно поддаются анализу и прогнозированию свойств из-за сложности контроля их геометрии на начальных этапах синтеза. Это затрудняет подбор оптимальных параметров (размера и формы частиц) для решения конкретных задач. В отличие от них, упорядоченные массивы позволяют с помощью методов компьютерного моделирования заранее рассчитать необходимые характеристики структуры.

Учитывая современную тенденцию к миниатюризации приборов, в данной работе предложен процесс создания упорядоченного периодического массива металлических наночастиц. Предложенный подход сочетает метод электронно-лучевой литографии, обеспечивающий точное позиционирование частиц заданного размера, и метод гальванического вытеснения серебра, который не требует сложного оборудования, но дает воспроизводимые результаты. Полученные структуры были исследованы методами спектральной эллипсометрии и рефлектометрии. Проведенный анализ подтвердил наличие плазмонного резонанса и позволил установить корреляцию между геометрическими параметрами полученного массива и его оптическими характеристиками.

А.С. Шигарова^{1,2}, Н.В. Ченцова^{1,2}, С.А. Соков², М.С. Нечаев², А.Г. Колосько²
¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
² ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПОЛЕВОЙ ЭМИССИИ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО КАТОДА

Эффект полевой эмиссии из полупроводников относится к квантовой макрофизике. В настоящее время для обработки эксперимента по полевой эмиссии из любых материалов используют теорию для металлов, ввиду сложности полупроводниковой теории.

Для данного исследования были выбраны кристаллы оксида цинка, которые образуют на поверхности самоорганизующийся стохастический массив из игольчатых наноструктур. Высокие аспектные отношения (высоты к радиусу вершины) и большое число острий (потенциальных эмиссионных центров) позволяют получать стабильные и относительно высокие эмиссионные токи.

В ходе работы проведено экспериментальное исследование эмиссионных свойств плоских образцов ZnO с использованием вакуумной измерительной установки в режиме

быстрого сканирования высоковольтным напряжением (continuous wave mode - режим непрерывной волны). Полученные массивы данных (серии вольт-амперных характеристик (ВАХ)) обрабатывались в программной среде LabVIEW с целью определения средних эффективных параметров эмиссии и последующего сопоставления с теоретическими моделями.

Сравнительный анализ включал три подхода: две модели, разработанные для металлических эмиттеров (классическая формула Мерфи-Гуда в приближении Елинсона-Шредника и НР-приближение повышенной точности), а также модель Стрэттона, учитывающая полупроводниковую природу материала.

В результате обработки экспериментальных ВАХ были получены основные параметры полевых полупроводниковых эмиттеров: суммарная площадь эмиссии и коэффициенты усиления поля. Методами обработки картины свечения было определено число эмиссионных центров. Полученные значения эффективных параметров соответствуют наблюдаемой геометрии образцов по данным сканирующей электронной микроскопии.

А.А. Абушенков, С.П. Рошупкин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РЕЗОНАНСНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА БЕТЕ-ГАЙТЛЕРА В ПОЛЕ СИЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ

Теоретически изучены распределения по энергиям позитрона (электрона), а также полные сечения в резонансном процессе рождения ультррелятивистских электрон-позитронных пар высокоэнергетичным гамма-квантом в поле ядра и сильной электромагнитной волны (модифицированный внешним полем резонансный процесс Бете-Гайтлера). Детально изучена резонансная кинематика. Показано, что основным параметром задачи является квантовый релятивистски-инвариантный параметр Брейта-Уилера, равный отношению энергии начального гамма-кванта к характерной квантовой энергии Брейта-Уилера. Получены аналитические выражения для резонансного дифференциального сечения в зависимости от энергии позитрона (электрона) пары. Также для каналов А и В получены полные резонансные сечения процесса. Показано, что дифференциальные и полные резонансные сечения могут значительно (на несколько порядков величины) превышать соответствующие сечения процесса без внешнего поля.

Е.Н. Аверина¹, М.Е. Каляшова^{1,2}, А.М. Быков^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

АНАЛИЗ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ W43 И WESTERLUND 1 ПО ДАННЫМ ОБСЕРВАТОРИИ CHANDRA

Скопления молодых массивных звезд являются потенциальными источниками космических лучей высоких энергий. Компактные скопления массивных звезд W43 и Westerlund 1 наблюдались в высокоэнергичных гамма-лучах, что указывает на возможность ускорения космических лучей с энергиями порядка ТэВ в этих скоплениях. Синхротронное излучение высокоэнергичных электронов, ускоренных в скоплениях, может вносить вклад в диффузное рентгеновское излучение этих объектов.

В работе был проведен спектральный анализ рентгеновского излучения ядра W43 в области энергий 0.5-8 кэВ по данным обсерватории Chandra. Показано, что однокомпонентная тепловая модель плазмы не описывает наблюдаемое излучение. Анализ диффузного излучения выявил наличие как минимум двух тепловых компонент, а также значительное межзвездное поглощение. Расчёты показали, что одна из тепловых компонент должна иметь температуру больше 5 кэВ. Магнитогидродинамическое моделирование плазмы в ядрах компактных скоплений предсказывает значительно более низкие температуры электронов, что указывает на возможное присутствие жесткой, нетепловой компоненты излучения. Получен поток диффузного излучения в диапазоне 0.5-8 кэВ, на уровне $(5-6) \cdot 10^{-13}$ эрг/см²/с.

Аналогично проанализированы новые, обширные (экспозиция ~ 1 Мсек) наблюдения Westerlund 1 обсерватории Chandra для исследования природы диффузного рентгеновского излучения скопления.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ГАЛАКТИЧЕСКИХ МОЛОДЫХ МАССИВНЫХ
ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ ПО ДАННЫМ ТЕЛЕСКОПА MEERKAT

Молодые массивные звездные скопления, такие как Westerlund 1, Westerlund 2, NGC 3603, Arches, Quintuplet, Westerhout 43, содержат большое число массивных звёзд и характеризуются высоким темпом вспышек сверхновых. Компактность этих систем и высокая плотность звёзд приводят к формированию областей с множеством взаимодействующих ударных волн, которые рассматриваются как эффективные ускорители космических лучей. Такие скопления видны в гамма-, рентгеновских и радио-наблюдениях, что обусловлено в том числе нетепловыми процессами излучения ускоренных частиц.

В данной работе представлено исследование радиоизлучения ряда галактических компактных скоплений. Были использованы данные с южноафриканского радиотелескопа MeerKAT, проект по обзору неба SARA0 MeerKAT 1.3 GHz Galactic Plane Survey, а также наблюдения галактического центра 1.28 GHz MeerKAT Galactic Center Mosaic.

По этим данным проведен спектральный анализ радиоизлучения, выявлены области с отрицательным спектральным индексом, что указывает на предположительное наличие нетепловой компоненты, связанной с синхротронным излучением. Для интерпретации наблюдений разработаны программы моделирования теплового тормозного и синхротронного излучения. В качестве основы для расчета использовались данные гидродинамического моделирования распределения магнитного поля, плотности и температуры в компактном звёздном скоплении, полученные с помощью открытого МГД-кода PLUTO. Сопоставление моделирования и наблюдаемых данных позволяет интерпретировать морфологию и спектры наблюдаемого радиоизлучения звездных скоплений.

М.М. Верязов^{1,2}, А.В. Бобаков², Д.А. Зюзин², А.В. Карпова², А.Ю. Кириченко^{2,3},
С.В. Жариков³

¹ Санкт-Петербургский Политехнический университет им. Петра Великого

² ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

³ Институт астрономии, Национальный автономный университет Мексики

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИРОДЫ ОПТИЧЕСКОГО И РЕНТГЕНОВСКОГО ДВОЙНИКА
ГАММА-ИСТОЧНИКА 4FGL J0935.3+0901

Проведено исследование возможного оптического и рентгеновского двойника гамма-источника 4FLG J0935.3+0901 в оптическом диапазоне. Для его анализа были использованы оригинальные спектроскопические данные с 10-м телескопа Gran Telescopio Canarias. Наблюдения проводились так, чтобы покрыть весь орбитальный период объекта, равный 2.44 часа. На обработанных спектрах в диапазоне 3900-5700Å наблюдаются раздвоенные эмиссионные линии Бальмеровской серии водорода и линии HeI, а также He II и Fe I. Это говорит о наличии аккреционного диска в двойной звёздной системе. По результатам работы показано, что исследуемый объект является либо кандидатом в переходный миллисекундный пульсар в тесной двойной системе с маломассивным звездным компаньоном, либо катаклизмической переменной.

М.В. Глумов¹, А.Н. Шабалин²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
²ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

ДИНАМИКА КОНЦЕНТРАЦИИ КОРОНАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ

Работа посвящена исследованию динамики концентрации корональной плазмы и фактора заполнения корональных петель для двух событий (M7.7 — 19 июля 2012 г., M3.5 — 24 февраля 2011 г.). Анализ основан на совместном использовании данных SDO/AIA и RHESSI в крайнем ультрафиолетовом и мягком рентгеновском диапазонах.

Для восстановления характеристик плазмы применён алгоритм DEM-инверсии по шести каналам в крайнем ультрафиолетовом диапазоне (SDO/AIA); рентгеновские спектры проанализированы методом пространственной визуализации (алгоритм CLEAN) и спектрального фитирования (OSPEX). По полученным распределениям меры эмиссии и оценкам геометрического объёма источников рассчитаны концентрация плазмы и фактор заполнения.

Результаты демонстрируют рост меры эмиссии и электронной концентрации в предвспышечной фазе, при этом рассчитанный фактор заполнения в мягком рентгеновском диапазоне существенно меньше единицы (0.1—0.3), что может указывать на филаментированную структуру нагретой плазмы.

М.Н. Голубев^{1,2}, А.В. Иванчик^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
²ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

ОГРАНИЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛЕГКОГО СТЕРИЛЬНОГО НЕЙТРИНО ПО АНИЗОТРОПИИ РЕЛИКТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Стерильные нейтрино являются гипотетическими слабодействующими частицами и естественными кандидатами на роль темной материи или ее компоненты в расширениях Стандартной модели. В данной работе с помощью кода SAMB проведено моделирование космологических параметров (параметр Хаббла H_0 , параметр плотности материи Ω_m , а также S_8 , $\Omega_b h^2$ и r_{drag}) в зависимости от массы стерильного нейтрино и эффективного числа степеней свободы. Выполнено ограничение этих параметров путем сравнения результатов моделирования с данными наблюдений, что позволяет получить независимые пределы на характеристики стерильного нейтрино.

Е.А. Контаренко¹, А.Н. Шабалин²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
²ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ МАГНИТНОГО ЖГУТА В СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКЕ, ПРОИЗОШЕДШЕЙ 13 ФЕВРАЛЯ 2011 ГОДА В АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ AR 11158

В работе представлен анализ эволюции магнитного жгута в эруптивной солнечной вспышке, произошедшей в активной области AR 11158 (12-15 февраля 2011 года).

Исследование основывается на численных данных нелинейной бессиловой экстраполяции (NLFFF) фотосферного магнитного поля в области короны Солнца, рассчитанной в программной среде GX_Simulator. Целью работы является поиск количественных критериев формирования и эрупции магнитного жгута.

Для оценки энергетики переходных процессов исследовалась динамика распределения магнитных параметров в активной области, разбитой на $X \times Y \times Z$ вокселей. Анализировались графики зависимостей параметра α от модуля магнитного поля B , электрического тока $\nabla \times B$ от B и длины замкнутых магнитных петель L от α .

Анализ численных данных выявил характерные изменения в форме распределений магнитных параметров. На довысшей стадии облако точек на графиках $\alpha(B)$ и $L(\alpha)$ остается разреженным. Однако по мере приближения к пику вспышки наблюдается резкое увеличение плотности точек в области высоких значений α и больших длин петель L , что является количественным индикатором присутствия магнитного жгута. Одновременно на графике токов фиксируется уширение распределения в область сильных полей и высоких токов, что указывает на интенсивное накопление свободной магнитной энергии перед эрупцией.

В пост-высшей фазе плотность точек с критическими значениями α постепенно уменьшается, а область высоких токов сужается. Подобная эволюция распределений численно отражает процесс диссипации токов и конверсию энергии магнитного поля в нагрев плазмы. Однако сохранение длинных закрученных линий свидетельствует о том, что активная область сохраняет эруптивный потенциал для последующих вспышек. Таким образом, статистический анализ параметров NLFFF-экстраполяции позволяет определять стадию эволюции и эруптивный потенциал магнитных структур.

Д.Б. Матросова^{1,2}, Ю.А. Кропотина²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

ТРЕХМЕРНАЯ ГИБРИДНАЯ МОДЕЛЬ ПРИПОЛЯРНОЙ ЛУННОЙ АНОМАЛИИ С РЕАЛИСТИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ.

На данный момент Луна, в отличие от Земли, не обладает глобальным дипольным магнитным полем, но при этом имеет локализованные остаточные намагниченности лунных пород, известные как Лунные магнитные аномалии. Наибольшая концентрация магнитных аномалий на Луне обнаружена в районе южного полюса, где они локализованы над постоянно затененными кратерами Шумейкер и Свердруп. Спектральный анализ данных показывает повышенное содержание водяного льда именно в этих областях, что коррелирует с пространственным распределением магнитных аномалий. Механизм защиты льда может быть связан со способностью локальных магнитных полей отклонять потоки солнечного ветра.

В данной работе с помощью гибридного кинетического кода было смоделировано обтекание солнечным ветром приполярных лунных магнитных аномалий с использованием структуры магнитных полей Луны измеренной спутниками Kaguya и Lunar Prospector.

Е.В. Медведева¹, А.Н. Шабалин², Е.П. Овчинникова²
¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
²ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

ДИНАМИКА ВЫСОТЫ КОРОНАЛЬНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ИСТОЧНИКОВ В СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ

Работа посвящена исследованию динамики корональных источников жесткого рентгеновского излучения, формирующихся в результате захвата ускоренных электронов в вершинах магнитных петель в солнечных вспышках. Основное внимание уделено анализу изменения высоты источников над фотосферой на ранней стадии импульсной фазы. В качестве экспериментальных данных использованы архивы космической обсерватории RHESSI за период 2002–2018 гг.

Для восстановления пространственной структуры и спектральных характеристик источников применен комплекс методов рентгеновской визуализации (алгоритмы CLEAN и Visibilities Forward-Fit) и спектрального анализа. В ходе работы проанализированы мощные лимбовые вспышки X3.9 от 3 ноября 2003 г и M3.5 от 24 февраля 2011 г. Установлено, что в начале фазы энерговыделения наблюдается систематическое понижение высоты коронального источника, сопровождающееся ужесточением энергетического спектра электронов. Полученные результаты интерпретируются в рамках модели коллапсирующей магнитной ловушки как следствие релаксации новообразованных магнитных петель ниже токового слоя. Исследование позволяет наложить наблюдательные ограничения на теоретические модели ускорения и удержания частиц в солнечной короне, а разработанные алгоритмы автоматизированной обработки данных применимы для интерпретации результатов текущих миссий, таких как Solar Orbiter (STIX).

А.Ю. Меркулова¹, В.С. Чепцов^{2,3}, А.К. Павлов¹
¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
³Институт космических исследований Российской академии наук, Москва

СИНТЕЗ И РАЗРУШЕНИЕ ПЕРХЛОРАТОВ В МОДЕЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ РЕГОЛИТА МАРСА

Происхождение перхлоратов на Марсе остается одной из нерешённых проблем современной планетной науки. Предполагается, что важную роль в их образовании и разрушении может играть радиолиз хлорсодержащих соединений под действием космического излучения в условиях разреженной атмосферы. Экспериментальные данные о радиационно-индуцированных процессах в перхлоратсодержащих системах при условиях, приближенных к марсианским, крайне ограничены, особенно для различных типов матриц, моделирующих реголит и лёд.

В работе представлены результаты облучения образцов, содержащих перхлораты и хлориды, в ледяных и силикатных матрицах электронами высоких энергий при низком давлении и температурах до 133 К. Показано, что эффективность и механизмы радиолиза существенно зависят от состава матрицы, что свидетельствует о важной роли среды в радиационной химии перхлоратов. Использование различных матриц позволило оценить процессы разрушения и возможного синтеза перхлоратов в условиях, моделирующих реголит Марса и лёд Европы. В проведенных экспериментах признаки синтеза перхлоратов

обнаружены в количествах, близких к пределу чувствительности использованных физико-химических методов анализа.

А.В. Сенецкий, С.П. Рощупкин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОСОБЕННОСТИ РЕЗОНАНСНОГО СЕЧЕНИЯ СПОНТАННОГО ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТСКОГО ЭЛЕКТРОНА В ПОЛЕ ЯДРА И СИЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ.

Теоретически изучены распределения по частоте тормозного гамма-кванта, а также соответствующие полные сечения в резонансном процессе спонтанного тормозного излучения ультрарелятивистского электрона в поле ядра и сильной электромагнитной волны. Детально изучена резонансная кинематика. Показано, что основным параметром задачи является квантовый релятивистски-инвариантный параметр Комpton-эффекта, равный отношению энергии начального электрона к характерной квантовой энергии Комpton-эффекта. Получены аналитические выражения для резонансного дифференциального сечения в зависимости от частоты тормозного гамма-кванта. Также для каналов А и В получены полные резонансные сечения процесса. Показано, что дифференциальные и полные резонансные сечения могут значительно (на несколько порядков величины) превышать соответствующие сечения процесса без внешнего поля.

З.С. Костина¹, Е.В. Гайлит²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В ТОЧКАХ ЛИБРАЦИИ МЕТОДАМИ ТРЕХМЕРНОЙ ГРАФИКИ

Точки Лагранжа — уникальные области в системе двух массивных тел, где гравитационные и центробежные силы уравновешены, что делает их идеальными для размещения космических обсерваторий. Актуальность работы заключается в необходимости создания наглядной трёхмерной модели для иллюстрации этих процессов. Целью исследования является определение координат точек либрации в системе Солнце–Земля и создание их объёмной 3D-модели, позволяющей наглядно представить гравитационный баланс и траектории движения объектов.

В основе работы лежит гипотеза о том, что методы трёхмерной графики способны эффективно визуализировать абстрактные понятия небесной механики. Исследование базируется на решениях ограниченной задачи трёх тел, а также на анализе устойчивости равновесия в этих точках. В работе использован комплекс методов: теоретический анализ литературных источников, математическое моделирование для расчёта координат точек и компьютерное 3D-моделирование для визуализации гравитационных колодцев и векторных сил. На основе известных формул для радиус-векторов точек Лагранжа произведены расчёты с подстановкой масс Солнца и Земли.

В ходе работы было установлено, что для достоверной визуализации необходимо не только точно разместить объекты согласно расчётам, но и показать природу сил. Создана интерактивная объёмная модель системы Солнце–Земля с точками Лагранжа, интегрированы изображения реальных спутников. Полученная модель наглядно иллюстрирует

гравитационное взаимодействие и расположение точек либрации в трёх плоскостях. Работа доказывает, что 3D-визуализация может быть использована при проектировании перспективных космических миссий.

А.К. Павлов¹, Н.В. Ляшенко¹, А.Ю. Меркулова¹, А.Н. Константинов^{1,2}

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМЕТНЫХ ВСПЫШЕК, ИНДУЦИРОВАННЫХ НАКОПЛЕНИЕМ РАДИКАЛОВ ВО ЛЬДУ

Феномен кометных вспышек остается до настоящего времени одной из нерешенных проблем астрофизики. Согласно существующим гипотезам, одной из возможных причин таких событий может являться накопление свободных радикалов во льду под действием высокоэнергичных космических лучей с последующим выделением энергии при нагреве. Тем не менее, экспериментальные данные по моделированию накопления радикалов и их взрывной активности в ядрах комет в литературе представлены крайне ограниченно.

В настоящей работе приводятся результаты двух экспериментов по облучению различных образцов льда протонами с энергией 15 МэВ, имитирующих воздействие космических лучей на кометное ядро. В первом эксперименте зарегистрировано аномальное тепловыделение при нагреве облученного водяного льда: зафиксированы два импульса быстрого самонагрева при температурах 84 К и 110 К, что свидетельствует о рекомбинации накопленных радикалов. Во втором эксперименте ставилась задача достижения температур образца ниже температуры жидкого азота с целью увеличения выхода радикалов и уровня запасенной энергии. Однако реализация данной задачи была осложнена конструктивными недостатками установки, в частности использованием в обшивке алюминия, обладающего высокой теплопроводностью, что привело к неудовлетворительным условиям термостатирования.

Несмотря на это, результаты первого эксперимента подтверждают принципиальную возможность инициирования кометных вспышек за счет рекомбинации радикалов, накопленных в поверхностных слоях ядер комет под действием космического излучения. В дальнейшем планируется доработка экспериментальной установки с целью достижения температурных режимов ниже температуры жидкого азота.

К.Д. Комлев^{1,2}, А.Л. Лысенко², В.К. Ерёмин²,
Н.Н. Фадеева², Е.М. Вербицкая², И.В. Ерёмин².

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

² ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПТОНОВСКОГО ТЕЛЕСКОПА НА БАЗЕ ОДНОСТОРОННИХ ПЛАНАРНЫХ КРЕМНИЕВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Исследование космического гамма-излучения в диапазоне 0.5-10 МэВ представляет особый интерес, поскольку несёт важную информацию о выделении и переносе энергии в таких объектах, как сверхновые и их остатки, активные ядра галактик и гамма-всплески. К тому же, в этом диапазоне наблюдаются гамма-линии: аннигиляционная линия 511 кэВ и линии снятия ядерного возбуждения, исследование которых может помочь в проверке моделей

нуклеосинтеза, поиске частиц тёмной материи, проверке аккреционных моделей на нейтронные звёзды и пр.

Детектировать излучение данного диапазона можно с помощью телескопов, основанных на комптон-эффекте (например COMPTEL/CGRO). Для измерения параметров комптоновского рассеяния гамма-кванта (геометрии рассеяния и энергии электрона отдачи) современные проекты телескопов используют многослойные трекары на основе двусторонних кремниевых стриповых детекторов (DSSD), обладающих 2D-позиционной чувствительностью. В качестве альтернативы относительно дорогим в производстве DSSD рассматриваются и односторонние стриповые детекторы с сегментированным анодом, в которых определение обеих координат и энергии взаимодействия происходит при помощи двух групп стрипов, нанесённых на одну сторону пластины.

В работе проведено сравнение некоторых характеристик телескопов на основе двусторонних и односторонних пластин при помощи моделирования в среде Geant4 и пакете MEGAlib. Показано, что в области низких энергий эффективность одностороннего детектора проигрывает по отношению к эффективности двустороннего.

С.О. Башкатов¹, В.Ю. Сергеев¹, С.П. Воскобойников¹, В.Г. Капралов¹, Б.В. Кутеев²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

ОДНОМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДАВЛЕНИЯ ЛАВИНЫ УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ С ПОМОЩЬЮ ИНЖЕКЦИИ ВОЛЬФРАМОВЫХ КОЛЛЕКТОРОВ В УСТАНОВКЕ МАСШТАБА ИТЭР

В докладе представляются новые результаты одномерного моделирования подавления тока лавины убегающих электронов при срыве тока в токамаке при помощи инъекции вольфрамовых коллекторов, существенно изменяющие результаты предварительного нульмерного моделирования. В качестве исходного взят сценарий смягчения последствий срыва подхода DMS (Disruption Mitigation System) ИТЭР, в котором предлагается инъекция примесного газа (Ar), формирующая переизлучение тепловой и магнитной энергии плазмы. Однако для снижения тока лавины, вместо существенного увеличения плотности плазмы в сценарии DMS ИТЭР, предлагается инжектировать вольфрамовые коллекторы в плазму сразу после теплового срыва TQ. Требования к параметрам инъекции коллекторов подбирались согласно критериям: 1) Ток электронов лавины менее 0.01% от тока плазмы до срыва; 2) Отклонения коллекторов от прямолинейной траектории за время пролета плазмы менее 1 см; 3) Температура коллекторов ниже $T_{max} \cong 2900$ К, то есть 80% от температуры плавления W.

В работе обсуждаются влияние неопределенностей пространственно-временной эволюции n_e и T_e при TQ на различные сценарии использования коллекторов с приемлемыми размерами и скоростями в комбинации с напуском небольшого количества примесного и рабочего газа для DMS. В докладе приводятся параметры различных сценариев DMS с инъекцией коллекторов и их приемлемость с инженерной точки зрения.

К.А. Веселов¹, А.С. Баланёв², В.Ю. Сергеев¹, В.Г.Капралов¹
¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
²ООО "Мелтер", Санкт-Петербург

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЯ В ОДНОШНЕКОВОМ ЭКСТРУДЕРЕ ТВЕРДОГО ВОДОРОДА

За последние годы был разработан ряд конструкций инжекторов водородных макрочастиц. Одна из технологий основана на прямом замораживании газа комнатной температуры в стволе прямого или ротационного типа.

Одношнековый экструдер применяется для непрерывного формирования твердого стержня из водородного льда, который затем разрезается на макрочастицы и инжектируется в горячую плазму для подпитки или исследования параметров плазменного разряда. Для проектирования и разработки системы экструдера необходимо исследование поведения течения вязкопластичного твердого водорода в канале с вращающимся шнеком.

Моделирование выполнено в программном комплексе ANSYS Polyflow с использованием модели бингамовской неизотермической жидкости, описывающей поведение водорода при температурах 10-13 К.

Результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными данными по одношнековому экструдеру из литературы. Показано, что расчетная скорость экструзии хорошо согласуется с экспериментом в диапазоне 5–20 об/мин. Рабочая производительность при 15 об/мин и температуре 10 К составляет около 68 мм³/с, что соответствует скорости экструзии ~22 мм/с. На основе данной модели проведено параметрическое исследование влияния температуры внешней стенки и скорости вращения шнека на интегральную мощность вязкой диссипации. Разработанная методика может быть использована для проектирования новых экструдеров.

С.Р. Жигаленко^{1,2}, Д.В. Куприенко², А.Б. Алтухов², Д.Ю. Батырев²,
Е.З. Гусаков², Л.А. Есипов², Е.О. Киселёв², С.И. Лашкул²
¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
²ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ФОРМИРОВАНИЯ НЕМОНОТОННОГО ПРОФИЛЯ ПЛОТНОСТИ В РЕЖИМАХ С ВЧ НАГРЕВОМ НА ТОКАМАКЕ ФТ-2

Результативность дополнительного нагрева ионной составляющей плазмы при помощи высокочастотного (ВЧ) излучения определяется совокупностью множества факторов, среди которых существенную роль в том числе играет взаимное расположение ВЧ-антенны и системы напуска нейтрального газа. В настоящей работе представлены экспериментальные данные, полученные в режимах, где подача нейтрального газа осуществлялась как в сечении грилла, так и в других сечениях.

Наиболее выраженный характер эффекта немонотонности профиля плотности наблюдается при напуске в сечении грилла, что указывает на существенную роль локальных условий взаимодействия волны и плазмы при инжекции рабочего газа в створе грилла НГ антенны.

Формирование немонотонного радиального профиля плотности плазмы во время ВЧ импульса может свидетельствовать о возникновении внутреннего транспортного барьера (ВТБ). Наличие ВТБ предполагает снижение турбулентного транспорта частиц и энергии, а

следовательно — увеличение времени удержания плазмы. В работе также представлены результаты численного моделирования разряда с ВЧ нагревом и немонотонными профилями плотности, на основе экспериментальных данных.

Е.Д. Купреев, А.Н. Кривошеев, В.Ю. Сергеев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЩЕСТВА ИНЖЕКТИРОВАННОЙ МАКРОЧАСТИЦЫ В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА

Исследования в области управляемого термоядерного синтеза (УТС) требуют эффективных методов доставки топлива в плазму и управления ее параметрами. Одним из основных способов решения этой задачи является инжекция криогенных макрочастиц. Данная технология будет реализована в токамаке ITER для обеспечения топливного цикла.

При попадании в плазму макрочастица испаряется под действием тепловых потоков, образуя вокруг себя облака нейтрального и ионизованного испаренного вещества. Взаимодействие облака вторичной плазмы с неоднородным магнитным полем установки приводит к его дрейфу в сторону слабого магнитного поля (LFS). Скорость испарения вещества с поверхности макрочастицы описывается универсальным законом (скейлингом), рассчитанным в рамках двумерной модели нейтрального экранирования, согласно которой поток испаренного вещества определяется тепловым потоком электронов окружающей (первичной) плазмы, часть которого экранируется слоем нейтрального газа. Учитываемый в работе градиентный (∇B) дрейф приводит к радиальному смещению облака в сторону LFS, таким образом глубина проникновения макрочастицы в плазму зависит от направления инжекции.

Разработан модуль кода ASTRA, позволяющий проводить 1.5D моделирование плазмы в установках с магнитным удержанием. Модуль формирует профиль источника заряженных частиц, использующийся при решении уравнения неразрывности, а также профиль электронной температуры с учетом распределения испаренного вещества по магнитным поверхностям. Таким образом представляется возможным включение инжекции макрочастиц в моделирование сценариев разрядов как существующих токамаков, например, Глобус-М2, ТУМАН, ФТ-2, так и находящихся на стадии разработки, например, ТРТ, ИТЭР и др. Приведены результаты сравнительного анализа расчетов с помощью модуля с доступными экспериментальными и расчетными данными на токамаках.

В.И. Ренни-Лихачевский, Н.В. Штырхунов, Е.Г. Кавеева, В.А. Рожанский, И.Ю. Сениченков
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОКАМАКА JET КОДОМ SOLPS-ITER НА РАСШИРЕННОЙ СЕТКЕ

Моделирование кодом SOLPS-ITER на расширенной сетке позволяет определить параметры разряда вблизи первой стенки токамака. В связи с кардинальными изменениями расчетной сетки по сравнению с предыдущими версиями появляется острая необходимость проверки результатов моделирования и сравнения их с экспериментальными данными, в областях токамака ранее не описываемых кодом.

В данной работе произведено моделирование разряда #85278 токамака JET во всей области вакуумной камеры, благодаря использованию расширенной сетки. Произведенные

расчеты показали хорошее соответствие значений электронной температуры и концентрации на внешнем обводе экваториальной плоскости с экспериментом как в области около сепаратрисы, так и вблизи материальной стенки. В свою очередь величина тока насыщения на внешнем диверторе не совпадает с экспериментом. Данные результаты свидетельствуют о корректности использования новейшей версии кода SOLPS-ITER в дальнем SOL и о необходимости произведения новых расчетов для достижения полного соответствия с экспериментом. Таким образом, использование широкой сетки является перспективным методом моделирования токамаков в будущих исследованиях.

В.Д. Фершуков, С. В. Лунев, С.А. Поняев, В.Ю. Горяинов
²ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА УСКОРЕНИЯ ПЛАЗМЫ В ПАРАБОЛИЧЕСКОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

В работе предложен способ ускорения плазмы путем создания градиента давления за счет сжатия плазмы в магнитном поле параболической формы. Для предложенной конфигурации магнитной системы проведено численное моделирование магнитного поля в пакете численного моделирования магнитных и электрических полей femm и проведена оценка скорости истечения плазмы. В настоящее время проводится создание лабораторной установки с предложенной конфигурацией.

В предложенной установке внешнее магнитное поле создает силу Ампера, действующую в продольном и поперечном направлениях на плазму с током, отделяя ее от стенок и создавая градиент давления по направлению к фокусу магнитного поля. Оценки показывают, что за счет параболической формы внешнего магнитного поля будет происходить фокусировка плазменной струи. При плотности плазмы $\sim 1 \text{ кг/м}^3$ и токе в плазме $\sim 10\text{-}100 \text{ кА}$, скорость истечения плазмы может составлять $\sim 0,1\text{-}1 \text{ км/с}$, что близко к результатам, получаемым на плазменных рельсотронах.

Преимуществом предлагаемого метода по сравнению с рельсотроном является ожидаемое снижение взаимодействия плазмы со стенками и, следовательно, их разрушения и загрязнения плазмы. В дальнейшем при развитии работ данный способ может быть использован в плазменных двигателях и в установках управляемого термоядерного синтеза.

М.А. Царегородцев¹, Т.В. Черноизюмская¹, В.Ю. Сергеев¹, В.В. Конторин¹,
Д.Е. Беляевский², М.К. Буц¹, В.Г. Капралов¹, П.А. Карасев¹, Д.Д. Коробко¹, И.А. Шаров¹
¹Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого
²ООО "ТехноСистемТрейд", Санкт-Петербург

СОЗДАНИЕ КРИОГЕННЫХ МИШЕНЕЙ ДЛЯ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОГО ИСТОЧНИКА ЖЕСТКОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НАНОЛИТОГРАФА.

В работе представлены результаты создания и экспериментального исследования стенда для генерации эшелона криогенных капель, предназначенных в качестве мишеней для лазерноплазменного источника ЭУФ излучения нанолитографа. Альтернативой используемому в промышленности олову выступает ксенон, исключаящий загрязнение оптики, однако требующий эффективной доставки вещества в конденсированном состоянии в зону взаимодействия с лазером. Для отработки технологии ввиду близости реологических

характеристик использовался аргон. Спроектирована и смонтирована установка с криогенным ожижителем, обеспечивающим подачу жидкого аргона через капилляр 104 мкм в камеру с контролируемым давлением. Методом высокоскоростной видеосъемки зафиксирован распад струи на капли вследствие неустойчивости Плато-Рэлея. Получены эшелоны капель аргона диаметром ~0.2 мм с периодом ~0.5 мм. Проведено сравнение экспериментальных данных (скорости, геометрии капель, времени распада струи) с теоретическими моделями и оценен поток атомов мишени.

Н.В. Соловьев, В.М. Тимохин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУИ ПОДВИЖНОГО ГАЗОВОГО КЛАПАНА ДЛЯ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2 МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

В рамках разработки подвижного газового клапана (ПГК), применяемого для смягчения последствий большого срыва в токамаке, были сделаны оценки возможности доработки этого клапана и выбора режимов для задач контролируемого напуска газа, диагностики периферийной плазмы токамака, а также в качестве источника сверхзвуковых молекулярных струй для подпитки плазмы топливом.

Для оценки эффективности газонапуска, профиля разлета газовой струи и распределения основных ее параметров, было проведено моделирование методом Монте-Карло при помощи кода SPARTA. Код SPARTA - это реализация метода прямого стохастического моделирования, в котором рассчитывается взаимодействие между отдельными частицами газа и между частицами и поверхностями.

Основные результаты расчетов представлены в докладе. Моделирование подтвердило возможность использования ПГК в режимах смягчения последствий срыва и контролируемого напуска газа для токамака Глобус-М2. Также было показано, что при использовании сопла Лавалья с диафрагмой можно добиться уменьшения разлета газовой гелиевой струи на угол не более 3 градусов, что важно при использовании клапана в режиме диагностического источника струи. При этом эффективность газонапуска (процент частиц, дошедших до плазмы) будет составлять порядка 30%, при давлении порядка единиц КПа и длительности газонапуска в пределах 100 мс. При моделировании источника сверхзвуковых молекулярных струй была подтверждена возможность конденсации напускаемого газа на срезе специально спроектированного для этой цели сопла: параметры температуры и давления соответствуют тройной точке конденсации водорода.

СЕКЦИЯ «ФИЗИКА ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ»

Петров Д.А., Гуткин М.Ю. Красницкий С.А., Колесникова А.Л., Романов А.Е.
Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Санкт-Петербург

ДИСЛОКАЦИИ НЕСООТВЕТСТВИЯ В ЯНУС-ЧАСТИЦАХ

В докладе рассмотрен механизм релаксации напряжений несоответствия в двухфазных наночастицах с плоской границей раздела, Янус-частицах, предполагающий образование прямолинейной дислокации несоответствия на межфазной границе. Для определения необходимых условий релаксации по такому механизму был использован энергетический критерий. Модель строилась в рамках изотропной линейной теории упругости при предположении о равенстве упругих свойств фаз. Для расчета величины изменения энергии при переходе в частично релаксированное состояние использовались полученные авторами ранее решения краевых задач: 1) о краевой дислокации в упругом шаре, 2) о напряжениях несоответствия в Янус-частице.

В результате получено аналитическое выражение для критического несоответствия в зависимости от параметров системы. Показано, что если объемы фаз сравнимы, то критическое несоответствие практически не зависит от положения границы и определяется прежде всего радиусом частицы. При этом величина критического несоответствия для Янус-частицы значительно выше, чем для соразмерной тонкой пленки на плоской подложке. Полученные результаты позволяют прогнозировать появление дислокаций несоответствия в Янус-частицах.

М.А. Рожков, С.А. Красницкий, А.М. Смирнов
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АНАЛИТИЧЕСКИХ И АТОМИСТИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ К РАСЧЕТУ УПРУГОЙ ЭНЕРГИИ ПЕНТАГОНАЛЬНЫХ НАНОЧАСТИЦ

В последние годы декаэдрические (ДЧ) и икосаэдрические (ИЧ) наночастицы ГЦК металлов привлекают всё большее внимание в катализе, сенсорике и фотонике. Интерес к ним обусловлен уникальной морфологией: острые грани и вершины выступают в роли высокоактивных центров в реакциях окисления и гидрирования, а специфическая огранка обеспечивает значительное усиление поверхностного плазмонного резонанса, что делает такие частицы перспективными для детектирования сверхнизких концентраций молекул, а также для применения в наноантеннах и оптических волноводах. Геометрически такие частицы представляют собой структуру, составленную из отдельных тетраэдров, смежные грани которых образуют двойниковые границы. Эти границы являются источником неоднородного внутреннего напряжённого состояния, характерного для ДЧ и ИЧ. В рамках данной работы полная энергия ДЧ и ИЧ рассчитывалась методом молекулярной динамики в пакете LAMMPS с использованием потенциала EAM. Упругая энергия частиц определялась как разность между полной энергией частицы и суммой вкладов когезионной, поверхностной энергий и энергии двойниковых границ. Для выделения указанных вкладов использовались вспомогательные модели: кубический кристалл с периодическими граничными условиями, модели тетраэдра и тригональной бипирамиды. Сопоставление результатов моделирования с предсказаниями дисклинационных моделей ИЧ и ДЧ позволило установить границы

применимости аналитических подходов и выявить влияние анизотропии материала и кристаллографической огранки на величину упругой энергии пентагональных наночастиц.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 23-72-10014.

Ю.С. Седова^{1,2}

¹Институт проблем машиноведения Российской Академии Наук, Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

АНАЛИЗ ТРЕХ КРИТЕРИЕВ РАЗРУШЕНИЯ В ЗАДАЧЕ О ВОДОРОДНОЙ ХРУПКОСТИ С УЧЕТОМ СКИН-ЭФФЕКТА

Стандартные методы искусственного наводороживания металлов приводят к формированию тонкого приповерхностного скин-слоя с повышенной концентрацией водорода. На изломах таких образцов наблюдается двойственная картина разрушения, которую в настоящее время принято объяснять комбинацией механизмов HELP и HEDE, однако физическая обоснованность подобных гибридных моделей остается дискуссионной.

В настоящей работе предложен подход, развивающий классическую модель HEDE. Его ключевая идея — снижение эффективной поверхностной энергии в присутствии водорода — распространена на три фундаментальных критерия механики разрушения: силовой критерий Ирвина, энергетический J-интеграл и декогезионный критерий с использованием когезионных элементов. Во всех трех постановках определяющим являлся учет исходного неравномерного распределения водорода, соответствующего скин-эффекту. Численное моделирование роста трещины в цилиндрическом образце при одноосном растяжении выполнено с помощью оригинального программного комплекса на языке C++.

Независимо от выбранного критерия получена качественно единая картина кинетики разрушения. На начальном этапе реализуется индуцированный водородом рост трещины с конечным временем инициирования, обусловленным диффузионным накоплением водорода в вершине. По мере развития трещины скорость ее распространения начинает превышать скорость подвода водорода, вследствие чего концентрация в движущейся вершине снижается до фоновых значений. Дальнейшее разрушение протекает уже при исходных механических характеристиках материала, без непосредственного участия водорода.

Таким образом, учет скин-эффекта в рамках классических критериев механики разрушения позволяет естественным образом объяснить наблюдаемую двойственную картину без привлечения дополнительных гипотез о конкурирующих механизмах.

О.Д. Боровская^{2,3}, С.Н. Петров^{1,2}, М. М. Данилова²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

² НИЦ "Курчатовский институт" - ЦНИИ КМ "Прометей", Санкт-Петербург

³Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Санкт-Петербург

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВЫЯВЛЕНИЯ ГРАНИЦ ПЕРВИЧНОГО АУСТЕНИТНОГО ЗЕРНА В СТАЛИ МАРТЕНСИТНО-БЕЙНИТНОГО КЛАССА

Одним из параметров, влияющих на свойства сталей мартенситно-бейнитного класса, является размер бывшего аустенитного зерна (БАЗ). Оптимальными механическими свойствами обычно обладает мелкозернистая сталь, однако, для определенных классов сталей

крупнозернистая сталь будет обладать преимуществом, например, повышенным сопротивлением ползучести.

Несмотря на существование широкого спектра методов выявления БАЗ всё еще продолжается совершенствование известных составов реактивов для химического травления и создание новых способов, основанных на современных методах исследования сталей, таких как дифракция обратно рассеянных электронов (ДОРЭ). В данной работе было проведено сравнение метода химического травления и методов, основанных на данных, полученных с помощью ДОРЭ.

Химическое травление производилось с помощью различных растворов. Традиционно применяемый травитель – ниталь – не позволяет однозначно выявить структуру БАЗ, так как помимо неё происходит вытравливание превращенной структуры. Применение модифицированного реактива Маршалла также выявляет превращенную микроструктуру, но процесс происходит с инкубационным периодом и последующей бурной реакцией, что затрудняет контролируемость травления.

Предложена модификация состава травящего раствора на основе реактива Маршалла. Корректировка рецептуры травителя обеспечивает контролируемое протекание процесса травления без инкубационного периода и позволяет выявить границы БАЗ без значительного фона превращенной микроструктуры. Метод химического травления верифицирован с помощью двух методов реконструкции границ БАЗ на основе данных, полученных с помощью метода ДОРЭ.

А.Н. Матвиенко, М.А. Крупина

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

СИММЕТРИЯ ИЗОМЕРОВ ФУЛЛЕРЕНОВ C36 И C60

В представленном нами докладе рассматривается симметрия изомеров фуллеренов C36 и C60. Данные фуллерены были выбраны не случайно, так как эти изомеры фуллеренов были обнаружены экспериментальным путем. Исследования показали, что существует большое количество изомеров двух рассматриваемых фуллеренов, а именно, они могут различаться своим строением. С одной стороны, каждый из изомеров имеет одинаковое кол-во атомов, а с другой стороны, у них разная структура. В свою очередь, различным структурам соответствует различная симметрия, например, возможны симметрии 4, 5 и 6 порядков. В работе приведены конкретные структуры и их характеристики, такие как симметрия и полученная в результате расчетов энергия. Авторы предполагают, что такие различия в структурах могут обладать разными физическими свойствами.

Д.Р. Бараков, Е.Г. Чечель, В.Ю. Филин, А.В. Ларионов

НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ДИНАМИЧНОСТИ СТАЛЕЙ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ

Нагрузки на суда, морские сооружения и трубопроводы включают удары различной природы, например, навал льда, навал судна на причал, динамические воздействия при прокладке морских трубопроводов, гидроудар в трубах. Интерес авторов обращен к ожидаемому изменению прочностных свойств материалов при быстром нагружении. При

оценке работоспособности материала обычно вводят коэффициент динамичности K_d , определяющий повышение эффективных значений предела текучести и временного сопротивления. Скорость нагружения величиной несколько метров в секунду по справочным данным соответствует скорости деформирования порядка 300 1/с, которую можно считать характерной как для эксплуатационных нагрузок, так и для ударных испытаний образцов при аттестации материалов. Для оценки динамического предела текучести существует несколько математических моделей.

В контексте исследования проведены сравнительные испытания образцов Шарпи, ИПГ (DWTT), NDT и SEP из сталей различных категорий прочности в диапазоне 300-900 МПа и толщин от 15 до 100 мм и последующий анализ с установлением значений коэффициента K_d . Экспериментально показано, что при ударном нагружении образцов со скоростью около 5 м/с повышение прикладываемой нагрузки по сравнению с квазистатическим нагружением практически отсутствует, K_d принимает значения до 1,05.

И.В. Кан, Е.Е. Дамаскинская, В.Л. Гиляров
ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СУБДУКЦИОННОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В работе выполнено компьютерное моделирование субдукционного землетрясения методом дискретных элементов. Для этого была модифицирована открытая платформа MUSEN, позволяющая учитывать сложную геометрию интерфейса плит, неоднородность минерального состава и вариации механических свойств, а также включения с повышенной прочностью (asperity). Разработанная модель позволяет исследовать разрушение гетерогенных материалов с иерархической структурой, аналогичной зонам субдукции.

Модель воспроизводит процесс одноосного сжатия цилиндрических образцов, сформированных из сферических частиц различных фракций (кварц, ортоклаз, олигоклаз), соединенных упругими связями с неоднородными механическими свойствами. Внутри образца находится область, имитирующая зону субдукции. В симуляциях выявлена последовательность разрушения структурных элементов: сначала происходит дестабилизация низкопрочной прослойки, имитирующей границу (зону трения) между плитами, за которой следует постепенное каскадное разрушение высокопрочных включений (asperity). На этом этапе разрушение имеет локализованный характер, связанный с разрушением включений. Затем наблюдается дисперсное разрушение во всем объеме образца. Дальнейшее увеличение напряжения приводит к локализации разрушения и потере целостности образца.

Сопоставление результатов компьютерных и лабораторных экспериментов позволяет говорить о том, что разработанная модель адекватно воспроизводит процессы, протекающие при деформировании гетерогенных материалов. Это открывает возможность исследования параметров, которые невозможно измерить экспериментально, например, распределение локальных деформаций и внутренних напряжений в реальном времени. Анализ данных параметров может способствовать пониманию механизмов субдукционных землетрясений.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МИКРОСТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ НА ЭФФЕКТИВНЫЕ СВОЙСТВА ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТРИАЛОВ

Волокнистые полимерные композиционные материалы (ВПКМ) характеризуются разбросом и анизотропией свойств, связанных с неоднородностью микро- и макроструктуры материала, которая получается в ходе переработки компонентов ВПКМ в изделие в цикле технологического процесса. Для достоверного моделирования свойств таких материалов в изделии необходима разработка комплексной методики, описывающей процессы становления свойств в ходе технологического процесса в каждой материальной точке изделия. Поскольку габариты изделия несравненно велики по сравнению с масштабом структуры материала, для обеспечения возможности проведения расчетов изделия применяют методы многомасштабного моделирования.

Данная работа посвящена моделированию влияния микроструктурных дефектов на эффективные свойства однонаправленных ВПКМ, как частной задаче комплексной методики многомасштабного моделирования свойств материала в изделии с учетом влияния технологического процесса.

Исследование включает анализ микроструктуры материала, разработку регулярной (квадратная упаковка) и стохастической модели репрезентативного объема, а также матрицы экспериментов для получения поправочных коэффициентов к математической модели микромеханики для учета влияния неоднородности структуры, границы раздела фаз и наличия пор.

Я.С. Набизаде^{1,2}, Т.С. Аргунова², М.Ю. Гуткин^{1,3}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

³Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

КОМПЬЮТЕРНАЯ МИКРОТОМОГРАФИЯ – ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССА МИКРО-РАЗРУШЕНИЯ В МОНОКРИСТАЛЛАХ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ОКСИДА ГАЛЛИЯ

В настоящей работе поставлена задача оценки структурного качества и исследования микроразрушения полупроводникового оксида галлия (Ga_2O_3), который является перспективным материалом для электроники нового поколения. Стабильную модификацию $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ выращивают из расплава в виде крупных кристаллов. Производство подложек из таких кристаллов промышленными методами является актуальной проблемой. Однако скорость химической обработки пластин после резки, к сожалению, очень низкая. В то же время скалывание по кристаллической плоскости (100) происходит сравнительно легко. В научной литературе описан способ изготовления подложек методом механического отслоения тонких пластинок. Для оценки качества таких сколов нами был использован метод компьютерной микротомографии, который для монокристаллов Ga_2O_3 ранее не применялся. Обнаружены дефекты структуры в сколах Ga_2O_3 , и обсуждается их природа.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ РАЗОРИЕНТАЦИЙ МЕТОДОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ В ГЦК-РЕШЕТКЕ

Ориентации отдельных зерен в поликристалле являются одной из основных характеристик при анализе текстуры, разориентации между кристаллитами позволяют аттестовать деформированную структуру. При вычислении разориентаций необходимо учитывать эквивалентные ориентировки, обусловленные симметрией кристаллитов. В ГЦК-решетках, обладающих высокой степенью симметрии, количество эквивалентных ориентаций составляет 24, поэтому для определения одной разориентировки необходимо выполнить процедуру перебора 24 вариантов значений углов.

В работе предложен метод расчета углов разориентации без перебора возможных симметричных ориентировок. Математической основой метода являются последовательные преобразования кристаллографических систем координат с учетом поворотных осей симметрии кристаллитов. Разработанный алгоритм был реализован в программной среде MatLab, выполнено тестирование на модельном поликристалле для сравнения с традиционной процедурой перебора вариантов. При полном совпадении результатов расчета метод последовательных преобразований обеспечивает значительное увеличение скорости вычислений.

Д.В. Бутусов¹, Э.А. Ушанова², Н.Ю. Золоторевский¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург

ГРАДИЕНТЫ ОРИЕНТАЦИИ И ПЛОТНОСТЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ НЕОБХОДИМЫХ ДИСЛОКАЦИЙ ВНУТРИ ЭЛЕМЕНТОВ РАЗОРИЕНТИРОВАННОЙ СУБСТРУКТУРЫ ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННОЙ МЕДИ

В процессе пластической деформации поликристалла ориентация исходных кристаллитов (зерен) становится неоднородной: они разбиваются на разориентированные области, то есть формируется деформационная субструктура, и в то же время в масштабе зерна наблюдаются градиенты ориентации. В результате, в материале накапливаются так называемые геометрически необходимые дислокации (ГНД), которые обеспечивают его пластическую аккомодацию в данных условиях. В докладе представлены результаты изучения градиентов ориентации, возникающих в объеме отдельных элементов деформационной структуры (ячеек, фрагментов), и оценки соответствующей плотности ГНД. В качестве модельного материала исследовали технически чистую медь. Ориентационные карты структуры получали в сканирующем электронном микроскопе методом дифракции обратно рассеянных электронов.

Анализ ориентационных карт позволил выявить в исходных зернах формирование полос ячеек. Границы между соседними ячейками внутри полосы размыты. Таким образом, они не соответствуют отдельным «стенкам ячеек», наблюдаемым в просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ), а представляют собой переходные зоны шириной 100...300 нм с повышенной кривизной кристаллической решетки. Границы между полосами ячеек характеризуются относительно большими углами разориентировки, порядка 1° и более, и на некоторых участках локализованы, то есть соответствуют плотным дислокационным

границам, наблюдаемым в ПЭМ. Показано, что градиенты ориентации присутствуют также внутри ячеек, что определяет появление значительной плотности ГНД в их объеме.

И.А. Ковалев¹, А.Л. Колесникова^{1,2}, М.Ю. Гуткин^{1,2,3}

¹Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

²Университет ИТМО, Санкт-Петербург

³Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

НАПРЯЖЕНИЯ НЕСООТВЕТСТВИЯ И ДИСЛОКАЦИОННЫЙ МЕХАНИЗМ ИХ РЕЛАКСАЦИИ В КВАНТОВЫХ КОЛЬЦАХ У ПЛОСКОЙ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Плоские гетероструктуры с квантовыми кольцами разной формы рассматриваются в настоящее время в качестве перспективных элементов современных электронных и оптоэлектронных устройств. Предполагается, что внедрение новых гетероструктур с квантовыми кольцами позволит модернизировать лазеры, высокочастотные транзисторы и солнечные элементы. Однако сочетание в одной гетероструктуре разных кристаллических материалов приводит к появлению в ней напряжений несоответствия, которые оказывают существенное воздействие на служебные характеристики таких приборов и устройств. В то же время релаксация напряжений несоответствия приводит к появлению в них различных дефектов, которые вызывают деградацию свойств и сокращают продолжительность работы гетероструктур. Поэтому изучение напряжений несоответствия и механизмов их релаксации в таких гетероструктурах чрезвычайно актуально и важно.

В настоящей работе в качестве упругой модели квантового кольца рассматривается включение в виде полого цилиндра, погруженное в упругое полупространство таким образом, что полость цилиндра полностью заполнена материалом матрицы, а его торцевые поверхности параллельны свободной поверхности полупространства. Предполагается также, что материалы полупространства и включения изотропны и имеют одинаковые упругие модули, а включение испытывает собственную дилатацию. В рамках такой модели выполнен расчет и численный анализ полей напряжений. В качестве механизма их релаксации рассмотрено образование прямоугольных призматических дислокационных петель. Найдено изменение полной энергии системы при образовании такой петли и показано, что для ее образования наиболее предпочтительна область, близкая к центру включения.

СЕКЦИЯ “ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА”

Р.А. Красников, С.М. Бакланов, М.В. Титова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

НОВЫЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ ПЕРЕМЕННОГО ШАГА В БЫСТРОМ ГРАДИЕНТНОМ МЕТОДЕ В ПРИЛОЖЕНИИ К ЗАДАЧАМ СБОРКИ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В докладе предложен новый подход к выбору переменного шага в быстром градиентном методе, основанный на сужении в теоретическом обосновании метода класса строго выпуклых функций с липшицевым градиентом до квадратичных форм. В первой части доклада приведены сведения о постановке контактной задачи, а также ее двойственной и относительной постановках, которые представляют интерес в области проекционных методов, к которым, в частности, относится быстрый градиентный метод, благодаря покомпонентной записи ограничений. Во второй части доклада к рассмотрению предлагается формулировка быстрого градиентного метода и выраженное определенным неравенством свойство строго выпуклых функций с липшицевым градиентом. Показано, как за счет сужения класса функций цели до квадратичных форм, можно ослабить требование на шаг. Также предложен эвристический алгоритм контроля шага, представляющий собой компромисс между вычислительной сложностью проверки условия на шаг и точностью выполнения данного условия. В заключительной части проведен сравнительный анализ метода с постоянным шагом и нового подхода к выбору переменного шага на задачах сборки авиационных конструкций. Приведено сравнение по времени расчета тестовых задач при различном числе активных ограничений на решении задачи.

А.О. Васильева, Е.А. Родионова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО СТЕРЖНЯ ПРИ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЯХ

Рассматривается задача минимизации веса консольной балки при условии, что её первая собственная частота поперечных колебаний равна заданному значению. Площадь поперечного сечения может изменяться вдоль длины, но ограничена технологическими пределами. С использованием принципа максимума Понтрягина задача оптимального управления сводится к анализу двух режимов: внутреннего (переменное сечение) и граничного (постоянное сечение). Получено аналитическое соотношение, связывающее оптимальную площадь сечения с прогибом и изгибающим моментом. Исследованы четыре возможные конфигурации стержня: полностью переменного сечения, двухчастные переменная–постоянная, двухчастные постоянная–переменная и трёхчастная постоянная–переменная–постоянная. Для каждой конфигурации определены условия существования и найдены оптимальные положения стыков участков. Проведён численный параметрический анализ влияния материала, формы сечения, целевой частоты и отношения предельных площадей на оптимальные параметры и вес конструкции.

И.Д. Кочетков, А.А. Елисеев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

СОВМЕСТНОЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ФЛЮИДА В ТРУБОПРОВОДАХ

Доклад посвящен исследованию проблемы совместного математического моделирования гидродинамики нефтегазового флюида при движении в трубопроводах и физико-химического моделирования его свойств, разработке методики проведения совместного расчёта указанных явлений, и её реализации. В первой части работы представлена математическая постановка задачи течения флюида в трубопроводах, приведены соответствующие уравнения движения, используемые определяющие соотношения для расчёта необходимых физико-химических свойств флюида, даются необходимые комментарии. Далее рассматриваются вопросы численного решения системы нелинейных уравнений, которая получается после проведения процедуры дискретизации. Затем приводятся результаты численных расчетов, подтверждающие корректность предлагаемого в работе подхода. В заключении приведены результаты исследования затрат времени на решение поставленной задачи альтернативным подходом без непосредственного расчёта свойств флюида, т.е. с применением предварительно сгенерированных PVT-таблиц, и с расчётом свойств флюида, демонстрирующие эффективность разработанного подхода для проведения совместного гидродинамического и физико-химического моделирования течения флюида в трубопроводах.

К.С. Кузнецов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ВОПРОСЫ УПРАВЛЕНИЯ СРЕДНЕВЗВЕШЕННОЙ ЦЕНОЙ НА ТОВАРНЫХ БИРЖАХ С ЗАДАННЫМ ОБЪЕМОМ ПРОДАЖ АКТИВОВ НА НАЧАЛО И КОНЕЦ ТОРГОВОГО ПРОМЕЖУТКА

Очевидно, что и продавцу, и покупателю следует придерживаться тщательно продуманной стратегии купли-продажи товаров на бирже, обеспечивающей участнику торгов как минимум хеджирование прибыли и снижение риска убытков, вызванных колебаниями цен. Для этих целей производитель может приобретать корзинные опционы или, например, спред-опционы, где базовым активом является разница между ценами на два товара. Еще один вариант стратегии хеджирования — специальное управление, основанное на увеличении средневзвешенной цены товаров, реализуемых производителем. Разумеется, такая стратегия включает в себя как неравномерные объемы продаж, так и обратные операции, то есть закупку того же товара в определенных объемах и в определенные моменты времени. Целью настоящего исследования является реализация вышеупомянутой стратегии при условии обеспечения требуемого объема продаж продукции в установленные сроки (или в заданных временных пределах) и демонстрация ее эффективности на примере торговли газом на Европейской энергетической бирже.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОДУКТИВНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ ПО ГЕНЕТИЧЕСКИМ МАРКЕРАМ

Разработана архитектура модели глубокого обучения для прогнозирования количественных фенотипических признаков растений по генетическим маркерам. Рассматривается задача многомерной регрессии для различных сельскохозяйственных культур на основе геномных данных. Трансформерная модель включает блок генетического кодирования, механизм позиционного представления генов, энкодер самовнимания для моделирования межгеновых взаимодействий, а также вспомогательный блок реконструкции генотипических признаков, используемый для регуляризации и стабилизации обучения. Проведён анализ влияния архитектурной сложности, способов агрегации признаков и методов регуляризации на устойчивость обучения. Показано, что простое увеличение ёмкости трансформерных архитектур при ограниченном объёме биологических данных может приводить к деградации качества прогнозирования и сглаживанию предсказаний. Для обучения и тестирования модели использовались геномные и фенотипические данные двух сельскохозяйственных культур. Набор данных по нуту включал 553 образца с 5 783 генетическими маркерами и двумя признаками — массой тысячи семян и высотой растения. Набор данных по рису содержал 469 образцов с 4 045 маркерами и фенотипическими признаками — высотой растения и числом побегов. Экспериментальные результаты показали высокое качество прогнозирования для ряда признаков. Для данных нута на тестовой выборке коэффициент корреляции Пирсона составил 0.88 для массы тысячи семян и 0.77 для высоты растения; для риса — 0.85 для высоты растения и около 0.60 для числа побегов. Полученные результаты демонстрируют перспективность применения трансформерных архитектур для задач геномного прогнозирования и возможность использования разработанной модели для различных сельскохозяйственных культур.

Д.А. Хотинков, Д.В. Авдонушкин, А.Д. Новокшенов, А.И. Боровков
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПЛАНИРОВКИ И РАЗМЕЩЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ АЭС

Работа посвящена численному исследованию задачи оптимального размещения объектов в пространстве с целью минимизации длины трубопроводных соединений. Моделирование выполнено с применением открытого программного обеспечения SCIP (10.0.1) в постановке смешанного целочисленного линейного программирования (MILP). Для моделирования объектов были рассмотрены технологические схемы оборудования, на основании которых была составлена матрица связей объектов, а также были получены размеры оборудования. При решении задачи оптимизации были учтены такие ограничения, как: размер расчетной области, взаимное пересечение объектов друг с другом, конструктивное ограничение на наличие свободного пространства между оборудованием. Также был разработан метод моделирования трубопроводных соединений при решении задачи оптимизации. Решение было получено путем решения задачи целочисленного программирования с применением рекурсивной кластеризации графа связей.

Проанализировано влияние количества объектов в кластерах на значение целевой функции. Показано влияние размеров расчетной области на размещение оборудования, а также влияние моделирования труб на размещение объектов и значение целевой функции.

А.А. Хлимоненко, В.Н. Кризский
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА МИНИМАЛЬНЫХ ПСЕВДООБРАТНЫХ МАТРИЦ С УЛУЧШЕНИЕМ ЧИСЛА ОБУСЛОВЛЕННОСТИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПЛОХО ОБУСЛОВЛЕННЫХ СИСТЕМ ЛИНЕЙНЫХ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ

Различные задачи практики приводят к необходимости решения систем линейных алгебраических уравнений, матрицы которых нередко оказываются вырожденными или плохо обусловленными. В таких случаях прямое применение стандартных численных методов может приводить к значительному усилению погрешностей исходных данных и, как следствие, к получению неустойчивых или физически бессмысленных решений. Поэтому актуальной задачей является разработка методов улучшения обусловленности матриц и повышения устойчивости вычислений. В работе рассматривается алгоритм А. С. Леонова, основанный на модификации спектра матрицы. Подход использует сингулярное разложение матрицы и изменяет её сингулярные числа с помощью специальной нелинейной функции, зависящей от параметра регуляризации. Такой способ позволяет уменьшить влияние малых сингулярных чисел, ответственных за неустойчивость решения. Алгоритм реализован программно в среде MATLAB. Проведены вычислительные эксперименты на тестовых примерах, позволяющие проанализировать изменение числа обусловленности матрицы и точности получаемых решений. Обсуждаются полученные результаты и эффективность предложенного подхода.

Т.Г. Дубровин, А.Д. Новокшенов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕНЕРАТИВНОГО ИИ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ

В работе исследуется возможность применения больших языковых моделей (LLM) для создания полного автоматизированного цикла решения задач линейной вычислительной механики твердого тела. Данный цикл осуществляется за счет ограниченного количества итеративных запросов к LLM, с дополнительной отправкой ошибок исполнения, при наличии таковых. Для реализации и упрощения работы с LLM был разработан Python-скрипт, который был разделен на соответствующие этапы, с применением дополнительных библиотек для: • генерации геометрии (CadQuery/build123d) • генерации сетки (Gmsh) • генерации FEM-расчета, включающего в себя импорт сетки, определение граничных условий, сборку слабой формы и решение (scikit-fem/fenics-dolfinx) • визуализации результатов (pyvista) В процессе проведения экспериментов на простых объемных телах были исследованы и проанализированы различные связки и сочетания библиотек, формулировки, подробность и емкость промптов, а также точность и корректность выдаваемых ответов. Каждый из этапов был подробно разобран, были выявлены типовые ошибки, а также некоторые узвимости.

Полученные результаты подтверждают возможность использования LLM для автоматизации инженерных расчетов при работе с простой геометрией тела.

С.А. Бабахина, А.Н. Баженов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ПИЛООБРАЗНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПО ДАННЫМ SXR-ДИАГНОСТИКИ НА ТОКАМАКЕ «ГЛОБУС-М2»

Пилообразные колебания (sawtooth oscillations) представляют собой одно из наиболее распространенных проявлений магнитогидродинамической (МГД) неустойчивости в токамаках. Такие колебания характеризуются наличием в сигнале квазипериодического процесса: медленного роста температуры и плотности в центре плазмы, за которым следует быстрый срыв. В работе рассматривается задача автоматического детектирования пилообразных колебаний плазмы по данным диагностики мягкого рентгеновского излучения на токамаке «Глобус-М2». Целью исследования является разработка универсального алгоритма, способного надежно выделять срывы пил в широком диапазоне экспериментальных условий, порождающем широкое разнообразие форм пил. В работе предложен гибридный метод, который задействует такие фундаментальные методы, как автокорреляционный анализ, спектральная теория Фурье, непрерывное вейвлет-преобразование, а также основные характеристики робастной математической статистики. В работе предлагается обзор первой версии алгоритма для автоматического детектирования пилообразных колебаний по данным SXR-диагностики токамака «Глобус-М2», основанного на предварительном детектировании пилы и последующем применении к диагностированной пиле вейвлет-преобразования с целью локализации точек срыва. Кроме того, в работе представлен краткий обзор неудачных предварительных подходов к детектированию, а также варианты развития и последующие шаги реализации.

Н.Е. Моторный, Ф.А. Новиков
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ВОПРОСЫ ПОСТ-ОБРАБОТКИ И СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ О ДЕЙСТВИЯХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ В РЕДАКТОРЕ КОДА

Стремительный рост возможностей LLM по выполнению классических лабораторных работ по программированию привел к катастрофическому упрощению несамостоятельного выполнения работ, проверяемых автоматическими системами, без очного интервью с преподавателем. Авторами разрабатывается программный продукт, предлагающий новые методы контроля за выполнением таких работ без беседы с преподавателем. Методы контроля основаны на сборе данных о каждом событии изменения кода в специальном текстовом веб-редакторе, и их последующем анализе. 140 сданных лабораторных работ наполняют датасет 700 тыс. событиями с суммарным изменением 2.7 млн символов. Несмотря на наличие временной метки как единой координаты всех событий, данные не могут быть представлены в виде временных рядов из-за неравномерного распределения интервалов между событиями. Более того, паузы в работе студента приводят к колебаниям значений интервалов между событиями на несколько порядков — от 100 мс при непрерывном наборе текста до 3 дней при его отдыхе в выходные дни. Также сложности возникают при работе с нагрузкой события

изменений — учетом положения курсора в текстовом редакторе по осям строк и столбцов. Как и в любой системе, работающей в сети Интернет, необходимо учитывать возможность сбоя доставки данных, т.е. потерей информации о событии изменения текста при пересылке из веб-редактора на сервер системы проверки. Все описанные особенности показывают необходимость подбора методов пост-обработки данных, базирующихся не на общих практиках, а на конкретных целях работы с датасетом. Некоторые виды обработки эффективнее выполнять в момент записи события, другие же могут быть выполнены только после окончания сбора данных. В статье детально описываются проблемы, с которыми авторы столкнулись при работе с собранным датасетом, и приемы, примененные ими для подготовки датасета и проведения базового статистического анализа. Описываемые подходы уже применены в другой работе, посвященной анализу датасета и ходу построения автоматизированной образовательной среды, сохраняющей качество подготовки инженеро-программистов.

О.К. Лапина, С.В. Лупуляк, М.В. Петухова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОГО ИНТЕРФЕЙСА НА ЯЗЫКЕ PYTHON ДЛЯ ИНЖЕНЕРНОГО ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

Данная работа посвящена проектированию и реализации программного интерфейса на языке Python с использованием Python/C API, обеспечивающего дублирование функциональности графического интерфейса пользователя инженерного программного комплекса. Целью работы является разработка программного интерфейса для автоматизации циклических операций по изменению параметров модели и перезапуску расчётов, выполнение которых вручную через графический интерфейс требует значительных временных затрат. В качестве архитектурного решения выбран подход расширения (extending) на основе Python/C API, обеспечивающего высокую производительность и интеграцию C++ кода с интерпретатором Python. Рассмотрены основные этапы проектирования модулей расширения: объявление функций с корректными сигнатурами, создание таблицы методов и реализация функции инициализации модуля. Разработаны четыре модуля расширения — caseManager, componentManager, solverManager и resultManager, — предоставляющих программный доступ к созданию расчётных случаев, редактированию компонентов, управлению решателем и обработке результатов соответственно. Тестирование модулей в составе рабочих скриптов подтвердило их работоспособность и корректность взаимодействия с программным комплексом. Созданный интерфейс автоматизирует выполнение циклических операций с моделью и расчётами, а также открывает возможность интеграции специализированных библиотек (NumPy, SciPy, Matplotlib).

Е.А. Смаева, Е.Д. Ежова, К.Н. Козлов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

КЛАССИФИКАЦИЯ СИНТЕТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ МЕТОДАМИ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОРАЖЕНИЯ НУТА АСКОХИТОЗОМ

В условиях глобальных климатических изменений ускоренная селекция сельскохозяйственных культур приобретает стратегическое значение. Традиционные полевые

испытания требуют временных и финансовых затрат, поэтому применение методов искусственного интеллекта для анализа геномных данных позволяет существенно сократить сроки выведения новых сортов. Объектом исследования является нут — высокобелковая культура, урожайность которой снижается из-за аскохитоза. Повышение устойчивости к данному заболеванию является важной задачей современной селекции. В работе использованы данные 407 образцов нута, собранных в Эфиопии, Ливане, Марокко, Турции, Индии, Узбекистане и Средиземноморском регионе, фенотипированных на станции ВИР в Кубани в 2016 году. Генетическая информация представлена SNP-маркерами и преобразована в синтетические изображения — визуальные представления геномных данных, в которых пиксели кодируют генетические варианты. Для генерации изображений применены методы MDS, GAF и MTF. Метод MDS сохраняет расстояния между маркерами в двумерном пространстве. GAF кодирует угловые взаимосвязи признаков после нормализации данных в диапазон $[-1, 1]$. MTF формирует матрицу переходных вероятностей: данные квантуются, строится марковская матрица, выполняется нормализация строк, после чего формируется двумерная матрица, масштабируемая как изображение. Разработана модифицированная архитектура CondenseNet с элементами FBNet и вероятностным выбором блоков, обеспечившая точность классификации 81% при снижении вычислительной сложности на 15,6%. Модифицированная ResNet достигла точности 76%. В дальнейшем планируется углублённый анализ нейросетевых архитектур, сравнительная оценка методов преобразования SNP-данных и повышение точности и обобщающей способности моделей.

Л.Н. Липинский, А.Н. Баженов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСЧЕТОВ КОНЦЕНТРАЦИЙ ВЕЩЕСТВ ПО МАСС-СПЕКТРАМ МЕТОДАМИ ИНТЕРВАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Современные методы масс-спектрометрии позволяют получать высокоточные данные о составе химических смесей. Однако экспериментальные измерения неизбежно сопровождаются погрешностями, что приводит к необходимости применения методов обработки данных с учетом неопределенности. Одним из эффективных подходов является использование интервального анализа. Задача определения концентраций веществ по масс-спектрам формализуется в виде переопределённой системы линейных алгебраических уравнений $Ax = b$, где A формируется на основе эталонных спектров веществ из базы данных SDBS, b — экспериментальный спектр смеси, а x — вектор искомым концентраций. Классические методы интервального анализа позволяют получать внешние оценки решений. Однако при построении квадратных подсистем возникает экспоненциальный рост их числа, что существенно увеличивает вычислительные затраты. Дополнительную сложность представляет вычисление твинных оценок — интервальных мод и медиан. В настоящей работе предложены методы оптимизации вычислительных процедур, включающие интеллектуальный отбор информативных уравнений, сокращение числа формируемых квадратных подсистем и применение приближённых алгоритмов вычисления твинных характеристик. Разработан адаптивный критерий остановки, позволяющий автоматически определять достаточное количество подсистем для стабилизации внешней оценки решения. Проведённые вычислительные эксперименты демонстрируют снижение времени вычислений при сохранении корректности получаемых интервалов концентраций. Предложенный подход может применяться при анализе биологических объектов, включая задачи количественного определения нейромедиаторов в тканях мозга.

Д.Д. Пестряков, Ф.А. Новиков
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОСТРОЕНИЯ ОНТОЛОГИЙ УЧЕБНЫХ КУРСОВ ИНЖЕНЕРНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ

Большие языковые модели (LLM) текущего поколения кардинально изменили подходы к поиску информации. Если раньше, чтобы ответить на вопрос, нужно было просмотреть несколько веб-страниц, собрать информацию и самостоятельно ее структурировать, то сейчас достаточно задать вопрос и получить готовый структурированный ответ. Особенно полезной функцией LLM является возможность работы с пользовательскими текстовыми документами. Данная функциональность в совокупности со знаниями, которые загружены в LLM на этапе обучения, позволяет студентам создавать персонализированные экспертные системы по тем или иным курсам. Однако у данного подхода есть ряд недостатков. Во-первых, ограничения по размеру файлов и лимиты по количеству загружаемых файлов. Во-вторых, ограниченное контекстное окно, что приводит к галлюцинациям, особенно если файл большой, а необходимая информация лежит где-то в конце файла. Чтобы обойти эти ограничения, предлагается подход, в рамках которого по загружаемому файлу будет строиться онтология понятий, которые также перечисляются пользователем. Сначала необходимо найти все предложения, в которых упоминаются не менее двух перечисленных понятий. Для формализации используются отношения, определенные в языке UML. Для определения типа отношения используются эмбэддинги: эмбэдинг эталонной фразы для отношения и эмбэдинг найденных в тексте предложений. Далее построенную формализованную онтологию вместе со ссылками на фразы из учебного пособия студенты могут использовать в LLM не опасаясь за переиспользование лимитов бесплатных лимитов и галлюцинации, а преподаватели — для автоматизации процесса итоговой аттестации: можно в автоматическом режиме создавать тесты с краткими свободными ответами.

Е.В. Мурыгин, М.И. Лобачев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ МНОГОСЛОЙНОЙ КВАЗИБЕССИЛОВОЙ СИСТЕМЫ

В докладе рассматривается связь между тепловыделением в проводниках и механическими напряжениями в квазибессилловых магнитных системах, предназначенных для генерации сверхсильных магнитных полей в соленоидах за счёт существенного снижения механических нагрузок. Целью работы является оценка вклада температурных деформаций в напряженно-деформированное состояние однослойного и многослойного квазибессилового магнита при слабовыраженном скин-эффекте, позволяющем использовать квазистатическое приближение для описания электромагнитных процессов.

Для модели однослойного магнита, рассматриваемой как модель представительного объема, выполнена оценка влияния температурного расширения на возникающие в нём механические напряжения. Аналитическое решение, описывающее напряженно-деформированное состояние однослойной системы, дополнено учётом теплового расширения и наличием изоляционных слоёв, на границе с которыми введены условия сопряжения; численный расчёт проведён в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Для многослойной конфигурации, модель которой реализована на языке Python, разработаны

модули нагрева и термоупругости, позволяющие оценить тепловыделение, и создаваемые им дополнительные напряжения в условиях слабовыраженного скин-эффекта.

Полученные результаты позволяют уточнить распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в системе благодаря совместному учёту сил Лоренца и дополнительных напряжений, обусловленных джоулевым нагревом.

Д.В. Ахмадуллин, И.А. Керестень
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

**РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
КОНСТРУКЦИИ РОТАЦИОННОГО ВИСКОЗИМЕТРА
С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ ЖИДКОСТИ МЕЖДУ ШПИНДЕЛЕМ И СТАКАНОМ**

Настоящая работа посвящена разработке моделей для исследования напряженного деформированного состояния ротационного вискозиметра с использованием программной системы конечно-элементного анализа. Применение прямого численного моделирования позволяет провести анализ работоспособности конструкции ротационного вискозиметра. Рассмотрены задача статической прочности под действием внешней нагрузки и задача частотного анализа, в результате решения которой определены частоты и формы колебаний. Также рассмотрена задача вычислительной гидроаэродинамики для вязкой жидкости, расположенной между шпинделем и стаканом ротационного вискозиметра для двух типов шпинделей: дискового (цилиндрического) и лопастного.

Целью исследования является идентификация диапазона динамической вязкости, определяемого параметрами торсионной пружины и геометрической конфигурацией шпинделя. В рамках выполненного исследования определен крутящий момент, возникающий на вращающихся элементах вследствие сопротивления жидкости. Определены значения динамической вязкости для двух режимов работы: при вращении шпинделя в неподвижной жидкости и при вращении стакана вокруг неподвижного шпинделя. Предложена эмпирическая зависимость крутящего момента в зависимости от геометрических параметров шпинделей для рассмотренных режимов работы.

Проведена валидация разработанных моделей для определения частот и форм колебаний стойки ротационного вискозиметра. Расхождение между численными и экспериментальными измеримыми характеристиками не превысило 5%, что обосновывает возможность применения разработанных моделей для проведения исследований и модификации конструкции ротационного вискозиметра.

Р.Р. Галеев¹, М.М. Хасанов¹, Ф.И. Кондратенко²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²ООО "Инженерно-технологический сервис"

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОГНИТИВНОЙ АРХИТЕКТУРЫ АСТ-R В ЗАДАЧАХ
УПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТКОЙ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Современные задачи управления технологическими процессами нефтедобычи характеризуются высокой неопределенностью геологической среды, что ограничивает эффективность классических методов оптимизации и экспертных систем. В работе предлагается подход к созданию адаптивной системы управления темпом ввода скважин на основе когнитивной архитектуры АСТ-R (Adaptive Control of Thought-Rational), моделирующей человеческие механизмы принятия решений.

Разработан гибридный алгоритм, интегрирующий механизмы когнитивной архитектуры (декларативную память, процедуральные правила, забывание и внимание) с методом глубокого обучения с подкреплением. Управляющий агент взаимодействует с гидродинамическим симулятором месторождения, получая обратную связь в виде чистого дисконтированного дохода (NPV). Состояние среды определяется текущими показателями разработки, действие агента — назначение дат ввода добывающих скважин. Механизм внимания позволяет фокусироваться на перспективных стратегиях, а забывание — отсеивать неэффективные, снижая вычислительную нагрузку, и, ускоряя обучение.

Эксперименты на модели месторождения показали, что когнитивный агент обеспечил прирост NPV до 12% по сравнению с базовыми. Результаты подтверждают перспективность интеграции когнитивных архитектур в системы управления сложными технологическими объектами в условиях неопределенности и недостатка данных.

П.В. Гурулева, Д.М. Пашковский

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МОДЕЛИРОВАНИЕ БАЛКИ БЕРНУЛЛИ-ЭЙЛЕРА С ПРОИЗВОЛЬНЫМИ УПРУГИМИ ОДНОСТОРОННИМИ ОПОРАМИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ФУНКЦИЙ ГРИНА

При строительстве протяженных мостов в условиях плотной городской застройки актуальными являются задачи моделирования и расчета основных несущих элементов, которые могут быть представлены в виде балок, опирающихся на упругие односторонние опоры при воздействии различных систем внешних сил. Пролетное строение моста представляется моделью балки Бернулли-Эйлера, опирающейся на систему односторонних упругих промежуточных опор. Поле перемещений балки находится на основе метода функций Грина с применением теории обобщенных функций, записанного для статически неопределенной конструкции. При таком подходе для учета упругих односторонних связей в опорах краевая задача сводится к системе интегральных уравнений Фредгольма. В результате получено аналитическое решение для прогибов и внутренних обобщенных сил балки. Проведен анализ полученных решений для различных систем приложенных внешних сил.

К.Д. Журавлева

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА СОЧЛЕНЕННОГО ТЕЛА ДЛЯ ПЛОСКОЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Алгоритм сочлененного тела (articulated body algorithm – АВА) предложен Р. Физерстоуном в 1983г. для решения прямой задачи динамики системы твердых тел с вращательными и поступательными сочленениями, образующими незамкнутую кинематическую цепь. АВА имеет рекордно малый порядок вычислительной трудоемкости решения прямой задачи динамики – $O(n)$ (n - число тел цепи) и его легко можно адаптировать для систем тел, имеющих древовидную кинематическую структуру (антропоморфные механизмы), а также для систем со свободной («плавающей») базой.

В работе АВА использован для динамической симуляции плоского механизма, звенья которого связаны идеальными цилиндрическими шарнирами и образуют линейную

кинематическую цепь с неподвижной базой. Алгоритм реализован в виде программы в среде MATCAD. Приводятся результаты расчета движения пятизвенной цепи с шарнирно закрепленным концом под действием собственного веса.

К.Д. Журавлева
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЭМПИРИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РАСКРЫТИЮ СТАТИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ, ОБУСЛОВЛЕННОЙ ТРЕНИЕМ

Рассматривается твердое тело T , которое находится в равновесии под действием собственного веса G , опираясь на две шероховатые плоскости в точках A и B . Центр тяжести и обе опорные точки расположены в одной вертикальной плоскости. Задача расчета опорных реакций R_A и R_B является статически неопределимой, поскольку содержит 4 неизвестных компонента: по 2 нормальных и 2 касательных (обусловленных трением). В работе предлагается эмпирический подход к раскрытию неопределенности – измерение нормальной составляющей одной из опорных реакций. Выявлено однопараметрическое семейство статически допустимых решений задачи расчета реакций и получены рекомендации по выбору значения параметра.

Т.Б. Зайченкова, А.И. Грищенко
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИССЛЕДОВАНИЕ И ВЕРИФИКАЦИЯ КРИТЕРИЕВ ПЛАСТИЧНОСТИ ЖАРОПРОЧНЫХ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

Ярко выраженная анизотропия механических характеристик жаропрочных монокристаллических никелевых сплавов требует применения критериев пластичности, адекватных реальным механизмам деформирования, что необходимо учитывать при прочностных расчетах лопаток. Проведен сравнительный анализ микромеханического критерия Шмидта (с учетом наличия как октаэдрических, так и кубических систем скольжения) и феноменологических критериев — квадратичного критерия Хилла и критерия четвертой степени. Верификация осуществлялась путем сопоставления расчетных и экспериментальных значений предела текучести сплава PWA 1480 в широком диапазоне кристаллографических ориентаций. Установлено, что наилучшее соответствие эксперименту обеспечивает критерий Шмидта. Квадратичный критерий Хилла не отражает немонотонный характер изменения предела текучести, в то время как использование критерия четвертой степени позволяет существенно повысить точность аппроксимации. Полученные результаты могут быть применены для повышения достоверности расчетов прочности и ресурса монокристаллических лопаток газотурбинных двигателей и установок.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛОСКОГО ФРОНТА ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ С ВЯЗКОУПРУГИМ ПРОДУКТОМ РЕАКЦИИ: 2D ПОСТАНОВКА

Рассмотрено распространение плоского фронта локализованной химической реакции в условиях плоской деформации. Процесс сопровождается собственной деформацией превращения, порождающей напряжения, которые влияют на скорость реакции, и поддерживается диффузией реагента через превращенный материал. В результате реакции исходный упругий материал превращается в вязкоупругий. К реакциям такого типа относятся, например, реакции окисления или литизации кремния. Моделирование основано на концепции тензора химического сродства, в рамках которой термодинамическая сила, управляющая движением фронта реакции, определяется нормальной компонентой тензора сродства.

Проведен анализ влияния внешней деформации на кинетику распространения и блокирование фронта. Исследована релаксация напряжений в вязкоупругом продукте и ее влияние на движение фронта. Проведено сравнение двух режимов распространения фронта реакции: кинетического, в котором скорость реакции определяется химическим сродством, и квазиравновесного, реализующегося при нулевом химическом сродстве. Показано, что выбор режима определяется безразмерным параметром, определяемым коэффициентом диффузии, константой химической реакции и коэффициентом массопереноса диффундирующего компонента через внешнюю границу тела. Также рассмотрено распространение фронта реакции в условиях циклического деформирования вблизи порога блокирования.

М.А. Кириченко, А.В. Лукин, И.А. Попов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МОДЕЛИ ПОНИЖЕННОГО ПОРЯДКА НА ОСНОВЕ МЕТОДА СОБСТВЕННЫХ ОРТОГОНАЛЬНЫХ РАЗЛОЖЕНИЙ С ПРОЕКЦИЕЙ ГАЛЁРКИНА В ПРИЛОЖЕНИИ К ЗАДАЧАМ ЭЛЕКТРОКВАЗИСТАТИКИ

Рассматривается построение моделей пониженного порядка для задач электроквazистатики с целью ускорения многократных расчётов при сохранении приемлемой точности. Подход основан на идее, что динамика распределения потенциала в области часто лежит в подпространстве малой размерности и может быть описана набором характерных пространственных мод. На этапе подготовки выполняются эталонные расчёты для набора режимов и формируется базис по снимкам решений (snapshot-based). Далее методом собственных ортогональных разложений извлекаются доминирующие моды, отражающие основную энергию/вариативность поля. На этапе применения исходная модель проектируется на найденное подпространство, что приводит к существенно меньшей вычислительной сложности и ускоряет расчёты во времени. Обсуждаются критерии выбора размерности базиса, устойчивость и корректность аппроксимации, а также способы контроля погрешности и оценка выигрыша по времени. Отдельно отмечается применимость подхода к задачам с вариациями режимов возбуждения и параметров.

Д.А. Кормановский¹, Е.К. Смирнова¹, К.П. Фролова^{1,2}, Н.М. Бессонов²
¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
² Институт проблем машиноведения Российской академии наук

УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛА В ОКРЕСТНОСТИ РАСТУЩЕЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОРЫ

Поры в конструкционных материалах могут выступать концентраторами напряжений. При достижении критического уровня нагрузки в их окрестности возможно возникновение пластических деформаций. При этом поведение материала в окрестности поры определяется не только величиной нагрузки, но и его локальными свойствами, которые вблизи дефекта могут существенно отличаться от свойств основного объема.

В работе исследуется эволюция зоны пластических деформаций вокруг сферической поры в условиях квазистатического роста давления. В общем случае рассматривается неоднородный материал с упругими модулями, зависящими от расстояния до центра поры. Пора считается изолированной и достаточно удаленной от других дефектов, что позволяет использовать модель сферического слоя с внешним радиусом, много большим радиуса поры. Задача решается численно с использованием метода Уилкинса. Для однородного материала в случаях постоянных модулей упругости, идеальной пластичности, а также пластичности с линейным упрочнением получены аналитические решения. Проведено сравнение численных и аналитических результатов.

В работе получены распределения напряжений вдоль радиуса сферического слоя и положение упругопластической границы. Определены критические значения внутреннего давления, при которых в окрестности поры возникает область пластических деформаций. Показано, что неоднородность упругих свойств влияет на размеры пластической зоны и критические значения нагрузок, что важно учитывать в инженерных расчетах.

Д.А. Лавыгин, А.В. Лукин, И.А. Попов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИЗГИБНО-КРУТИЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И УСТОЙЧИВОСТЬ КРЫЛА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В ПОТОКЕ ГАЗА

Целью работы является верификация отечественных программных комплексов, направленных на решение задач аэроупругости, в частности задачи определения критических параметров флаттера элементов летательного аппарата. В качестве эталонной тестовой постановки рассматриваются дифференциальные уравнения изгибно-крутильных колебаний простейшей упругой конструкции в скоростном потоке: стержень постоянного сечения с двумя степенями свободы с учетом смещения положения центра масс от упругой оси объекта. Критерием наступления флаттера является потеря устойчивости объекта, соответствующая переходу через мнимую ось собственного значения рассматриваемой системы при росте скорости набегающего потока. Одни и те же исходные уравнения решаются несколькими независимыми методами: метод Галеркина, численное решение краевой задачи методом конечных разностей, точное аналитическое решение с построением трансцендентного частотного уравнения. Выполняется сравнение критических скоростей и частот. Полученные результаты формируют основу для последующей верификации расчетных модулей различных конечно-элементных программ.

Н.А. Левин, А.В. Лукин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА БАЛАНСИРОВКИ МАССЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ ТВГ

Доклад посвящен исследованию методов балансировки массы твердотельных цилиндрических резонаторов, конкретно методу локального лазерного испарения металлического слоя. При создании цилиндра могут возникнуть неоднородности массы и покрытия в некоторых областях цилиндра, что приводит к ухудшению важных характеристик гироскопа, а именно расщепление собственных частот, смещение осей жесткости, ухудшение добротности, что снижает точность прибора. Лазерная балансировка является высокоточным способом удаления массы, не требует механического контакта и присутствует возможность автоматизации процесса.

В ходе работы была предложена математическая модель, позволяющая моделировать процесс лазерного удаления материала. Она включает в себя поглощение излучения, нагрев, фазовый переход и унос массы. Для оценки влияния испарения на характеристики резонатора была использована модель малых возмущений, связывающая величину снятой массы и её азимутальное положение с изменением модальных параметров. Аналитические оценки порогов испарения и глубины проникновения выполнены на основе одномерной задачи теплопроводности, ключевые параметры – отношение длительности импульса к времени тепловой релаксации μ , отношение размера пятна к характерной длине переноса ζ . Численные расчёты температурных полей, остаточных напряжений и локальных деформаций выполнены в программном комплексе ANSYS.

Результаты исследований показывают высокую эффективность лазерной балансировки как одного из этапов коррекции масс в цилиндре и возможность использования при разработке автоматизированных установок для повышения точности и стабильности работы гироскопов.

М.Л. Линчевский, Р.Д. Танцуев, О.В. Антонова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РАЗРАБОТКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ БИОНИЧЕСКОГО ПРОТЕЗА КИСТИ РУКИ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Исследование направлено на разработку параметрической модели бионического протеза кисти руки, необходимой для создания динамической модели. Актуальность исследования обусловлена высокой востребованностью в области разработки бионических протезов руки, которым требуются точные алгоритмы управления. В качестве исходных данных выступают кинематические параметры и биомеханические характеристики движений, регистрируемые в процессе изучения различных жестов и типов захвата. Анализируются способы обработки и интерпретации этих данных с целью построения динамической модели кисти, отражающей её геометрические и функциональные параметры. Полученная параметризованная модель будет использована при проектировании систем управления для бионических протезов руки.

НЕСТАЦИОНАРНОЕ ДЖОУЛЕВО ТЕПЛОЫДЕЛЕНИЕ В ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ МНОГОСЛОЙНОЙ МОДЕЛИ КВАЗИБЕССИЛОВОГО МАГНИТА

Квазибессилловые магнитные системы рассматриваются как перспективная схема генерации сверхсильных магнитных полей без экспоненциального роста габаритов и энергопотребления. Одним из ограничивающих факторов их работы является импульсное джоулево тепловыделение в проводящих элементах.

В работе решена одномерная осесимметричная задача нестационарной диффузии двухкомпонентного магнитного поля в системе из n соосных проводящих полых цилиндров. На каждой границе задаётся полный набор граничных условий для аксиальной и азимутальной компонент магнитной индукции. Возбуждение осуществляется униполярным импульсом тока в виде полуволны синуса; анализируется как процесс нарастания поля, так и стадия после окончания импульса.

Решение получено методом разложения по собственным функциям. На его основе вычислены распределения токов и объёмного джоулева тепловыделения в слоях. Введена безразмерная частота подачи тока и для осесимметричной n -слойной модели уточнены условия минимума тепловыделения, ранее полученные для плоского слоя.

Дальнейший этап исследования связан с решением нестационарной задачи теплопроводности, где источником служит рассчитанное распределение джоулева нагрева, что позволяет оценить температурные поля и ограничения многослойной конструкции.

Все расчёты реализованы в авторском программном комплексе на языке Python, ориентированном на параметрический анализ квазибессилловых магнитных систем.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ ПОДХОДОВ К ОПИСАНИЮ ДИНАМИКИ ЖИДКОЙ СРЕДЫ В ЗАДАЧЕ ВХОДА СФЕРИЧЕСКОГО ТЕЛА В ВОДУ

Одной из актуальных задач вычислительной механики является моделирование ударного взаимодействия твердых тел с жидкой средой при входе в воду. В настоящей работе представлен сравнительный анализ различных подходов к описанию жидкой среды на примере задачи о входе в воду сферического тела. Численное моделирование выполнено с применением метода конечных элементов в программной среде LS-DYNA. Рассматриваются различные формулировки пространственного описания жидкости, включая Эйлерову, комбинированный метод Лагранжа–Эйлера (ALE) и SPH. Особое внимание уделено оценке ударных нагрузок, действующих на сферическое тело. Результаты численного моделирования сравниваются с экспериментальными данными, представленными в литературе. Полученные результаты позволяют выбрать оптимальный численный подход и могут быть использованы при решении прикладных задач, связанных с проектированием конструкций, взаимодействующих с водной средой.

О ТЕНЗОРЕ ХИМИЧЕСКОГО СРОДСТВА ДЛЯ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ В ДЕФОРМИРУЕМЫХ ТЕЛАХ

Работа посвящена развитию концепции тензора химического сродства при описании химической реакции в деформируемом твердом теле, которая протекает при поддержке диффундирующего компонента B_* . В процессе реакции исходный деформируемый твердый компонент B_- претерпевает превращение в деформируемый твердый компонент B_+ , причем реакция сопровождается собственной деформацией превращения, порождающей внутренние напряжения, которые, в свою очередь, влияют на скорость химической реакции. В работе рассмотрен вывод тензора химического сродства с учетом того, что диффузия компонента B_* может происходить как в превращенном, так и в непревращенном материале. При рассмотрении диффузии компонента B_* вводится коэффициент β его извлекаемости из исходного материала, определяющего вклады в химическую реакцию диффундирующих частиц по обе стороны фронта реакции. Приводятся результаты моделирования химической реакции с применением тензора сродства и анализируется ход реакции в зависимости от параметра β .

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 25-11-00274.

Д.М. Пашковский
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЛОКАЛИЗАЦИЯ УПРУГИХ ВОЛН В ЛИНЕЙНОЙ МИКРОПОЛЯРНОЙ УПРУГОЙ СРЕДЕ

При распространении волн в слабонеоднородных средах возникает эффект пространственной локализации с последующим подавлением их распространения вследствие многократного рассеяния на неоднородностях среды, называемый также эффектом локализации Андерсона. В работе данный эффект исследован в случае распространения нестационарных упругих волн в микрополярной сплошной среде (среде Коссера). С помощью численного моделирования разрывным методом Галеркина анализируется влияние микрополярных параметров материала на условия возникновения и характеристики локализованных мод. Для описания эффекта локализации создана модель слабо неоднородной среды путем введения случайных флуктуаций упругих микрополярных модулей. Построены зависимости коэффициента прохождения волны через образец, а также распределение амплитуд смещений и микроповоротов в зависимости от частоты и степени беспорядка. Особое внимание уделяется сравнению результатов, полученных в рамках классической теории упругости и теории Коссера. Полученные результаты исследования актуальны для разработки новых типов акустических метаматериалов, виброизоляторов и элементов микроэлектромеханических систем, где эффекты локализации играют важную роль при их проектировании.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КВАЗИБЕССИЛОВОЙ СИСТЕМЫ

Доклад посвящен исследованию динамических характеристик квазибессиловой системы, рассматриваемой в качестве перспективной конструкции для формирования экстремальных магнитных полей при снижении силовых нагрузок, воздействующих на проводник. В качестве рассматриваемой модели принят многослойный толстостенный цилиндр, формируемый из чередующихся проводящих и изоляционных слоев.

Рассмотрено определение первых собственных частот многослойной системы методом Брента на языке программирования в Python (через частотное уравнение на основе функций Бесселя и условия сопряжения), сопоставление рассматриваемого метода с точным решением (для изотропного случая) и численное сравнение аналитических результатов с результатами модального анализа в программном комплексе ANSYS APDL. Проведена проверка отклика рассматриваемой системы на импульсное воздействие, соответствующее полуволне синуса.

В качестве дополнения выполнен переход от толстостенной цилиндрической системы к приближению реальной катушки: цилиндрические слои заменены на набор витков круглого сечения. Сравнение собственных частот толстостенной цилиндрической и витковой моделей позволило оценить влияние дискретизации по виткам на собственные частоты системы и обосновать применимость осесимметричного приближения для оценки динамических характеристик квазибессиловой системы.

Результаты исследований демонстрируют схожесть рассматриваемого осесимметричного подхода с определением собственных частот трехмерной геометрии, что подтверждает возможность применения данного подхода к решению задач о нахождении собственных частот многослойной системы.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ШАРНИРНО-СОЧЛЕНЕННОЙ РАМЫ КОЛЕСНОГО БУЛЬДОЗЕРА ПРИ СРЕЗАНИИ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ГРУНТА

В докладе описывается методика оценки прочности шарнирно-сочлененной рамы колесного бульдозера при срезании верхнего слоя грунта третьей категории. Данная методика позволяет охарактеризовать стандартные рабочие нагрузки, испытываемые трактором во время работы бульдозерным оборудованием, что позволяет найти способы увеличения надежности рамы, упростить ее разработку и уменьшить количество доводочных испытаний. Представлена аналитическая модель определения усилий, действующих на отвал со стороны грунта, с учетом эксплуатационной массы машины, характеристик трансмиссии, геометрии рамы и механических свойств грунта. Полученные усилия применены к конечно-элементной модели рамы, выполненной в программном комплексе Abaqus, после чего произведен анализ ее напряженно-деформированного состояния. По результатам расчета установлены наиболее нагруженные зоны рамы трактора и области возникновения пластических деформаций.

Е.К. Смирнова¹, К.П. Фролова^{1,2}, Н.М. Бессонов²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

² Институт проблем машиноведения Российской академии наук

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОГО СТЕРЖНЯ ПРИ КОНТАКТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С УЧЕТОМ РАЗГРУЖЕННОЙ КОНФИГУРАЦИИ ДЕФОРМИРУЕМОГО ТЕЛА

При пластическом течении в материале происходят необратимые изменения, сопровождающиеся эволюцией разгруженной конфигурации. Корректный учет этих изменений имеет большое значение для прогнозирования напряжённо-деформированного состояния конструкций, особенно при сложной истории нагружения/разгрузки.

В классическом подходе к моделированию пластичности условие текучести Мизеса формулируется в виде ограничения на интенсивность напряжений, что приводит к записи критерия через эквивалентное напряжение. В предлагаемой модели используется альтернативная интерпретация, согласно которой пластическая деформация возникает, когда различие между текущей и разгруженной конфигурациями тела превышает заданный порог. Тем самым условие текучести связывается не с уровнем напряжений, а с мерой несовпадения конфигураций, что, как кажется авторам, более физично и естественным образом учитывает накопление необратимых деформаций и изменение внутренней структуры материала.

В качестве примера рассмотрена задача о формоизменении упруго-пластического тела – продольный изгиб стержня при динамическом нагружении. Предложен подход к моделированию динамического деформирования с использованием контактного алгоритма (soft contact algorithm). Численная реализация выполнена на основе метода конечных разностей. В результате расчётов воспроизведён эффект отпружинивания (springback), характерный для процессов пластического формоизменения.

С.И. Соколова, Д.А. Третьяков

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ ЭКСТРУДЕРА FDM 3D-ПРИНТЕРА И ИХ ПОДАВЛЕНИЕ

В работе исследуются нелинейные колебания экструдера FDM 3D-принтера, приводящие к ухудшению качества печати и возникновению характерных дефектов, в частности «ringing», обусловленного вибрациями механической системы. Рассматриваются существующие методы подавления вибраций и повышения точности позиционирования исполнительных механизмов. Целью работы является построение математической модели динамики экструдера на основе нелинейного осциллятора Дуффинга, соответствующей конкретной экспериментально исследуемой колебательной системе, поскольку различные механические системы характеризуются индивидуальными динамическими параметрами и требуют отдельного математического описания.

Экспериментально измеряются ускорения и внешняя сила, действующая на исследуемый образец вдоль оси перемещения. Полученные данные обрабатываются с использованием фильтра нижних частот Баттерворта для подавления шумовой составляющей. На основе интерполяции формируется непрерывная функция внешнего воздействия, используемая при численном решении дифференциального уравнения движения.

Коэффициенты модели определяются путем численного решения уравнения и сопоставления расчетных и экспериментальных значений ускорений.

Дополнительно исследуется диапазон применимости модели при изменении скорости печати в пределах $\pm 15\text{--}20\%$. Полученная модель может быть использована для анализа вибрационных эффектов и разработки методов их подавления с целью повышения качества FDM-печати.

С.С. Степанов, О.В. Антонова

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ОТКЛИКА ОБРАЗЦОВ ИЗ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО ПОЛИУРЕТАНА TPU 95A

Современные полимерные материалы, такие как термопластичный полиуретан (TPU), применяются в различных областях: от робототехники до биомедицинских конструкций, что делает актуальным изучение их механического поведения. В данной работе рассматривается численное моделирование поведения образцов из материала TPU 95A с использованием метода конечных элементов, учитывающего нелинейную гиперупругость материала. Особое внимание уделяется оценке изгибной деформации образцов. Предварительная калибровка проводится на экспериментальных данных, а валидация формы изгиба проводится с применением трёхмерного сканирования деформированных образцов, что позволяет повысить достоверность моделирования. Предлагаемый подход открывает возможности для дальнейшего анализа влияния геометрии и технологических особенностей 3D-печати на механические свойства TPU и служит основой для последующих исследований.

М.А. Субботин, А.В. Лукин

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАССОВЫХ НЕСОВЕРШЕНСТВ РЕЗОНАТОРА ТВГ

В работе рассматривается задача идентификации массовых несовершенств резонатора твердотельного волнового гироскопа (ТВГ), в частности кольцевого резонатора. Наличие технологических отклонений распределения массы приводит к расщеплению собственных частот вырожденной пары форм колебаний, ухудшению добротности и как следствие, ухудшению точности прибора. В докладе представлена математическая модель резонатора с учетом малых массовых несовершенств. В процессе работы применялся метод Галеркина, а также использовалось символьное программирование в программном пакете MATLAB. Получена система связанных дифференциальных уравнений, описывающая динамику кольцевого резонатора с учетом асимметрии массы. Показано, каким образом модальные параметры модели связаны с распределением массовых несовершенств по телу резонатора. На основе анализа полученной математической модели сформулирован подход к нахождению углового положения массовых дефектов по измеряемым динамическим характеристикам.

ДИНАМИКА КОНСТРУКТИВНО НЕСИММЕТРИЧНОГО ВОЛНОВОГО ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ГИРОСКОПА

Для навигации в авиационной и космической технике широко применяются волновые твердотельные гироскопы (ВТГ), основанные на эффекте Брайана – прецессии стоячей волны в упругой осесимметрической оболочке (резонаторе). Резонаторы ВТГ требуют высокой точности изготовления и трудоёмкой настройки. Настоящим исследованием предлагается способ настройки резонатора воздействием электрического поля.

В рамках работы произведено исследование компьютерной модели резонатора ВТГ. В конструкцию резонатора внесена конструктивная несимметрия, следствием которой становится расхождение 3 и 4 собственных частот резонатора. Цель работы состоит в том, чтобы сблизить 3 и 4 частоты резонатора воздействием электрического поля. Задача работы состоит в построении и исследовании математических и компьютерных моделей резонатора и электродов.

Е.В. Ходырева¹, К.П. Фролова^{1,2}, Н.М. Бессонов²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

² Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Санкт-Петербург

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСЫХАНИЯ УПРУГОГО ТЕЛА С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ РАЗГРУЖЕННОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Задачи массопругости связаны с описанием механического поведения среды в условиях концентрационного воздействия, при котором изменение содержания вещества приводит к возникновению и перераспределению внутренних напряжений. Характерными примерами таких процессов являются насыщение твёрдых тел газами, поглощение и испарение влаги (растворителя), а также расширение специальных смесей при взаимодействии с водой, используемых, например, для дробления горных пород.

В классической постановке задач массопругости влияние концентрации на напряжённое состояние учитывается введением дополнительного слагаемого в определяющее соотношение, которое, как правило, носит феноменологический характер, либо строится на основании исходных упрощающих предположений. В предлагаемой модели даётся более физически обоснованная интерпретация эффектов массопругости на основе введения понятия разгруженной конфигурации тела. Предполагается явная зависимость объёма разгруженной конфигурации от текущей концентрации вещества, что естественным образом приводит к возникновению внутренних напряжений.

В качестве примера рассмотрена задача о высыхании упругой пластины. В модель введён критерий разрушения, позволяющий воспроизвести процесс зарождения и развития трещины.

Разработан численный алгоритм на основе метода конечных разностей, обеспечивающий реализацию предложенной модели.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ В ДВУХРЯДНОМ ПУЧКЕ ТРУБ ПРИ РАЗМЕЩЕНИИ НА ПОВЕРХНОСТИ РЕБЕР ВИХРЕГЕНЕРАТОРОВ

В работе проводится численное исследование свободно-конвективного течения и теплообмена в теплообменном аппарате – коридорном пучке, состоящем из двух рядов труб с пластинчатым оребрением при значении числа Рэлея $3.2 \cdot 10^7$. Рассмотрена конфигурация пучка с гладкими ребрами и с ребрами, на которых вблизи несущих труб установлены парные вихрегенераторы для интенсификации теплообмена. Вихрегенераторы имеют форму параллелепипеда, они направлены под углом 20 градусов к набегающему потоку. Расчеты проведены с помощью программного пакета ANSYS Fluent. Моделирование течения выполнено на основе решения полных нестационарных уравнений Навье-Стокса. Исследовано влияние сеточной зависимости решения, показано, что высота первой пристеночной ячейки должна составлять не более 1% от межреберного шага.

Выполнено сопоставление характеристик течения и параметров теплообмена в пучках труб с установленными вихрегенераторами и без них. Получено, что для рассмотренного режима над несущими трубами формируется нестационарное течение. Для варианта с вихрегенераторами нестационарность также проявляется над поверхностью вихрегенераторов. Результаты демонстрируют, что использование последних способствует увеличению интегральных значений числа Нуссельта до 15%. Дальнейшие исследования будут направлены на оценку влияния формы и положения вихрегенератора на течение и параметры теплообмена.

В.Р. Адиатуллин, С.А. Галаев, Н.Г. Иванов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ВСТРЕЧНЫХ ПРИСТЕННЫХ СТРУЙ В ВЕНТИЛИРУЕМОМ МОДЕЛЬНОМ ПОМЕЩЕНИИ

Представляются результаты численного моделирования трехмерного течения воздуха в модельном помещении, для которого имеются данные физического эксперимента, проведенного в изотермических условиях (Кернер с соавторами, 2013). Подача воздуха в помещение, имеющее форму прямоугольного параллелепипеда высотой H , длиной $L = 1.33H$ и шириной $W = 1.67H$, осуществляется из двух припотолочных щелей высотой $h_{in} = 0.0067H$, размещенных напротив друг друга на противоположных торцевых стенках. Вытяжные отверстия – две щели высотой $h_{out} = 0.05H$ – размещены на тех же стенках в окрестности пола. Течение рассматривается как в пустом помещении, так и в помещении с загромождением. Расчеты на основе прямого решения уравнений Навье-Стокса без привлечения модели турбулентности выполнены для двух значений расхода приточного воздуха. Число Рейнольдса, построенное по среднерасходной скорости и высоте помещения, при этом принимает значения $2.4 \cdot 10^4$ и $4 \cdot 10^4$, при задании в качестве линейного масштаба высоты приточной щели значения числа Рейнольдса составляют 160 и 270. Обсуждается степень чувствительности решения к размерности расчетной сетки и величине шага по времени.

Приводятся результаты всестороннего анализа течения, включающего статистический анализ, в сопоставлении с литературными экспериментальными данными.

Расчёты проводились с использованием ресурсов СКЦ «Политехнический». Исследование выполнено при поддержке гранта РФФ 24-19-00437.

К.А. Акимова, А.А. Пожилов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПУЧКОВ ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛООБМЕНА

Численно исследовано влияние кольцевого межреберного загрязнения на характеристики теплообмена пучка оребренных труб. Постановка задачи приближена к доступным в литературе экспериментам (Маршалова, 2025). Рассмотрен однорядный горизонтальный пучок из шести оребренных нагретых труб с вытяжной шахтой, которая накрыта крышкой с отверстием по центру. Модельное загрязнение межреберного пространства представляет собой плотно намотанный на трубу (между ребер) льняной шнур. Трехмерное численное моделирование выполнено на основе решения уравнений Навье-Стокса. Расчёты проведены в предположении периодичности течения с шагом оребрения. В ходе серии расчётов варьировалась температура нагрева труб, высота шахты и площадь отверстия в крышке. Полученные данные о характеристиках теплообмена (зависимости числа Нуссельта от числа Рэлея) сопоставлены с описанными в литературе данными экспериментов.

М.В. Акунец, А.В. Гарбарук

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПРИМЕНЕНИЕ ГИБРИДНОГО МЕТОДА ОТБОРА ПРИЗНАКОВ В РАМКАХ УЛУЧШЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Для моделирования турбулентных течений в инженерной практике наиболее часто применяются уравнения Рейнольдса, замкнутые при помощи полуэмпирических моделей турбулентности. Несмотря на многолетнюю историю их развития, даже наиболее успешные из них не универсальны и обеспечивают приемлемую точность лишь для ограниченного класса течений. Повышение точности расчета отдельного класса течений может быть достигнуто за счет соответствующих поправок. В последние десятилетия при построении поправочных функций широкое распространение получили методы машинного обучения (МО), которые позволяют обеспечить лучшее согласование с «эталонными» данными. Важнейшим вопросом при решении данной задачи является выбор аргументов поправочной функции, который в значительной степени определяет ее эффективность и, как правило, опирается на интуицию и опыт исследователя.

Настоящая работа посвящена оценке эффективности более систематических подходов выбора аргументов поправочной функции для модели турбулентности, опирающихся на методы отбора признаков (feature selection). Проведен сравнительный анализ 3 фильтрационных методов отбора (RRreliefF, MIMIC и mRMR) в сочетании с методом-обёрткой (SFS) для определения аргументов поправочной функции к модели турбулентности Спаларта-Аллмараса (SA), повышающей точность расчета обтекания выпуклости на поверхности.

Показано, что представленный гибридный метод с использованием любого из рассмотренных методов фильтрации успешно формирует эффективный набор аргументов поправочной функции. Гибридный метод с МІМІС в рамках данной работы обеспечил наилучшие результаты.

Е.В. Бабич, Е.В. Колесник

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНОГО ПОДВОДА ТЕПЛА НА КАРТИНУ ВЯЗКО-НЕВЯЗКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВБЛИЗИ ПЕРЕДНЕЙ КРОМКИ ЗАТУПЛЕННОГО РЕБРА

Одним из перспективных методов управления ударно-волновыми и отрывными структурами при сверхзвуковом обтекании тел является энергетический способ, основанный на создании локализованных источников тепловыделения в набегающем сверхзвуковом потоке. Подвод тепла может влиять на ламинарно-турбулентный переход или на конфигурацию ударно-волновых структур и локальных сверхзвуковых зон на обтекаемом теле, что позволяет существенным образом изменять картину обтекания тела и снижать его волновое сопротивление.

Настоящая работа посвящена численному исследованию влияния локального теплового источника на вихревую структуру и теплообмен при сверхзвуковом обтекании затупленного ребра, установленного на пластине. Расчеты трехмерных уравнений Навье-Стокса для вязкого совершенного газа выполнены при помощи конечно-объемного «неструктурированного» программного кода SINF/Flag-S, разрабатываемого в СПбПУ. В ходе параметрического анализа выявлены зависимости, связывающие характеристики теплового источника с ударно-волновой картиной течения, размерами отрывных областей и конфигурацией вихревой структуры.

В.А. Баранов, А.Г. Абрамов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РАЗРАБОТКА ГИБРИДНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МЕТОДИК НА ОСНОВЕ ГРАФОВЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Представляются результаты разработки и апробации гибридных вычислительных методик, базирующихся на графовых нейронных сетях (Graph Neural Network, GNN), которые предсказывают поля и/или градиенты гидродинамических величин в процессе проведения расчетов в CFD-пакете Ansys Fluent, обучаются на накапливаемых данных и не требуют предобучения. Модель GNN основана на графовой свертке LINKX, разделяющей информацию в узлах графа и учитывающей топологию. Обучение модели производилось на основе данных численного моделирования пульсирующего течения вязкой несжимаемой жидкости в плоском канале длиной 1 м и шириной 0.1 м. Задача решалась при числе Рейнольдса 560 на равномерной сетке размерностью 4000 ячеек, шаг по времени составлял 0.025 с.

Сопоставлялись четыре вычислительные методики: (1) CFD-расчет; (2) предсказание GNN полей величин (замена CFD); (3) предсказание GNN градиентов величин, реконструкция по ним полей и передача в CFD-пакет; (4) предсказание GNN градиентов и их передача в CFD-

пакет для дальнейших вычислений (использовалась библиотека PyFluent). Во всех гибридных подходах GNN применялась на очередном временном шаге при падении значения функции ошибки ниже заданного порога с последующим возвратом к CFD-расчету. Установлено, что методика (2) обеспечивает заметное сокращение времени расчетов по сравнению с «чистым» CFD (1), при этом получаемое решение с высокой точностью соответствует базовому. Методики (3), (4) не позволили уменьшить время в силу высоких затрат на вычисление градиентов и накладных расходов на коммуникации с CFD-пакетом.

К.И. Гасанова, Е.В. Колесник
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЛНООБРАЗОВАНИЯ В СТЕКАЮЩИХ ПЛЕНКАХ ЖИДКОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА VOF

Работа посвящена численному исследованию волнового режима течения стекающей жидкой пленки по вертикальной стенке. Моделирование выполнено с применением коммерческого пакета ANSYS Fluent (2022R1) в двумерной нестационарной постановке с использованием метода Volume of Fluid и модели непрерывной поверхностной силы для учета поверхностного натяжения.

Для моделирования волнового процесса на входной границе задается параболический профиль скорости в пленке с наложенным синусоидальным возмущением. Проведены расчёты для режимов волн малой и большой амплитуды при различных числах Рейнольдса и частотах вносимых малых возмущений. Для волн малой амплитуды показано формирование стартовой волны с последующим переходом к регулярному волновому режиму. Для волн большой амплитуды выявлены выраженные нелинейные деформации свободной поверхности и усложнение структуры течения.

Проанализировано влияние амплитуды и частоты входного возмущения на форму и скорость возникающих волн. Установлено, что увеличение частоты приводит к уменьшению длины и амплитуды волн, а также к увеличению протяжённости начального гладкого участка. Показано, что рассчитанные скорости распространения волн находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными и эмпирическими зависимостями.

И.О. Демо, А.А. Смирновский
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ТЕСТИРОВАНИЕ НЕСКОЛЬКИХ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОРМЫ МЕЖФАЗНОЙ ГРАНИЦЫ В ЗАДАЧАХ РОСТА КРИСТАЛЛА КРЕМНИЯ ИЗ РАСПЛАВА

В работе представляются результаты тестирования двух методик расчета формы фронта кристаллизации в задачах роста кристалла кремния из расплава. Необходимость корректного определения формы межфазной границы обусловлена её существенным влиянием на качество выращиваемого кристалла, в том числе на образование дефектов кристаллической структуры. В данном исследовании рассматриваются следующие подходы: метод маркер-функции и метод коррекции фронта кристаллизации с помощью деформации сетки. Тестирование проводится на модельной задаче Стефана плавления кристалла кремния, имеющего форму цилиндра с заданным перепадом температур между верхней и нижней стенкой (рассматривается как однородное, так и неоднородное распределение температуры на

торцевых стенках). Результаты численного моделирования сравниваются с имеющимся аналитическим решением и друг с другом. Показаны преимущества и недостатки обоих подходов, в частности продемонстрирована более сильная сеточная чувствительность метода маркер-функции по сравнению с методом деформации сетки.

С.Н. Дурнев², А.В. Гарбарук¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

²Лицей «Физико-техническая школа» имени Ж.И. Алфёрова

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ВСПЛЫТИЯ ВОЗДУШНЫХ ПУЗЫРЬКОВ В ВОДЕ

Моделирование всплытия пузырьков газа в жидкости необходимо для численной оптимизации различных промышленных процессов, от химических производств до очистных сооружений. Описание всех процессов, влияющих на всплытие пузырей, требует использования больших вычислительных мощностей, поэтому на практике обычно применяются упрощенные модели, основанные на экспериментальных данных. Целью настоящей работы является получение таких данных.

Проведено экспериментальное исследование всплытия одиночных воздушных пузырей различного объема. В ходе работы была создана экспериментальная установка, состоящая из генератора пузырей и вертикальной трубы с прозрачными стенками, которая была оснащена измерительной системой на основе видеосъемки двумя камерами. Была создана программа для обработки результатов съемки и получения пространственной траектории пузырей из видео. В результате были получены траектории пузырей, качественные зависимости формы пузыря от времени и количественные зависимости скорости движения и траектории пузырьков от числа Бонда. Показано, что полученные результаты согласуются с известными из литературы экспериментальными и расчетными зависимостями.

К.К. Ермакова, М.А. Засимова

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР, СФОРМИРОВАННЫХ ИМПУЛЬСНОЙ СТРУЕЙ: ВЛИЯНИЕ ОБЪЕМА ПОДАВАЕМОЙ СРЕДЫ

В работе выполнено численное моделирование течения, формируемого при импульсной подаче турбулентной струи. Рассматриваемое течение характеризуется числом Рейнольдса ($Re = 1,3 \cdot 10^5$) и параметром P , связанным с объемом импульсно подаваемой среды, значение которого варьировалось от 1,7 до 6,3. Задача решалась на основе двух подходов к моделированию турбулентного движения URANS подхода с использованием стандартной $k-\epsilon$ модели турбулентности и вихреразрешающего LES подхода.

При заданном значении параметра $P = 2,9$ характеристики вихревых структур, полученные с использованием URANS подхода, сопоставлены с данными LES расчетов. На этапе подачи струи URANS данные отличаются от LES данных по форме полей скорости и области проникновения вихревых структур, получено, что к моменту окончания подачи струи положение фронта вихревой структуры относительно источника распространения составило 11 и 12 калибров по данным URANS и LES соответственно. Показано, что на дальнейших этапах движения вихревые структуры, полученные методами URANS и LES, близки.

На основе URANS данных проведен анализ изменения характеристик вихревых структур в зависимости от параметра P . Получено, что вдали от источника распространения струи изменение во времени скорости структур и их пространственного положения подчиняется степенной зависимости с показателями $t^{-0.75}$ и $t^{0.25}$ соответственно. Так при $P = 6,3$ вихревая структура распространяется на 85 калибров, а при $P = 1,7$ на 25. Проведена оценка влияния параметра P на эжектируемый вихревой структурой объем среды.

А.С. Еропов, Е.М. Смирнов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ТЕПЛООТДАЧА В КВАЗИ-ЛАМИНАРНОМ СВОБОДНОКОНВЕКТИВНОМ ТЕЧЕНИИ У ВНЕЗАПНО НАГРЕТОЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ УСТАНОВКЕ НА НЕЙ ИНТЕНСИФИКАТОРОВ В ВИДЕ НАКЛОННЫХ РЕБЕР

Представляются результаты численного моделирования ламинарного и квази-ламинарного свободноконвективного течения, развивающегося у внезапно нагретой безграничной пластины, на поверхности которой находится периодическая система наклонных ребер с V-образным расположением. Расчетные данные получены посредством решения полной системы нестационарных уравнений Навье-Стокса и энергии, записанных в приближении Буссинеска. Для случая гладкой пластины (без интенсификаторов) проводится сравнение данных, полученных численным методом, с известным теоретическим автомодельным решением. Анализируется структура течения, рассчитанного при наличии на поверхности пластины интенсификаторов теплообмена указанного вида, при обтекании которых формируется система подвижных вихревых структур. Приводятся данные, показывающие, что установка макрошероховатостей в виде тонких наклонных ребер с V-образным расположением может обеспечить значительную интенсификацию теплоотдачи в интервале значений локального числа Грасгофа, лежащем ниже критического – соответствующем переходу к турбулентному режиму течения на гладкой пластине при малом уровне внешних возмущений.

К.К. Забелло, А.В. Гарбарук

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОПТИМИЗАЦИЯ ОКТРИ-СЕТОК ДЛЯ РЕШЕТОЧНЫХ УРАВНЕНИЙ БОЛЬЦМАНА НА ПРИМЕРЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ О ЛАМИНАРНОМ ОБТЕКАНИИ ЦИЛИНДРА

Работа выполнена в рамках проекта по созданию расчетной методики решения задач аэроакустики методом решеточных уравнений Больцмана. Этот метод, как правило, использует декартовы сетки, что осложняет расчет обтекания геометрически сложных объектов. Одним из способов решения этой проблемы является использование так называемых октри-сеток, позволяющих повысить точность за счет измельчения сетки к поверхности тел. Целью настоящей работы является разработка рекомендаций по параметрам оптимальных октри-сеток, обеспечивающих приемлемую точность решения при минимальных вычислительных затратах.

Рассмотрена задача численного моделирования ламинарного обтекания круглого цилиндра при числе Рейнольдса $Re = 100$ методом решеточных уравнений Больцмана. Расчёты выполняются с использованием изотермической модели D2Q9 с BGK оператором

столкновений и рекурсивной регуляризацией функции распределения. В качестве эталонного решения используются сошедшие по сетке результаты численного моделирования, полученные в программном комплексе ANSYS Fluent. Сравнение проводится по значениям коэффициентов сопротивления и подъемной силы, их среднеквадратичным отклонениям, а также по числу Струхала, характеризующему периодичность схода вихрей.

В.Д. Заусаев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАСШИРЕНИЯ СТВОЛА СКВАЖИНЫ И ПЕРФОРАЦИИ НА ЗАБОЕ НА РАСПРОСТРАНЕНИИ ВОЛНЫ ГИДРОУДАРА В СКВАЖИНЕ

Волны давления при гидроударе широко используются для диагностики скважин. Базовая интерпретация опирается на модель четвертьволнового резонатора ($\lambda/4$) для однородной трубы с закрытым устьем и открытым забоем. Реальные скважины имеют сложную конструкцию — изменение диаметра ствола и трение в перфорациях на забое, что искажает волновую картину. Цель работы — количественная оценка этих эффектов.

Выполнено численное моделирование методом конечных объемов с решателем Римана. Для анализа применены Фурье- и кепстральный анализ. Расширение ствола смещает собственные частоты: для основной моды безразмерное волновое число $k_0L/(2\pi)$ увеличилось с 0.25 ($\lambda/4$) до 0.2795. При этом аналитические оценки времён двойного пробега остаются справедливыми — соответствующие пики видны на кепстре, локализуя расширение. Перфорация уширяет резонансные пики, по ширине оценён коэффициент затухания γ .

Совместное применение методов разделяет эффекты: кепстр указывает положение неоднородностей, спектр — изменение резонансных свойств и затухание. Результаты подтверждают необходимость учёта реальной конструкции скважины при интерпретации данных гидроудара.

Зо Хтет Аунг

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПОЛЯ СКОРОСТИ ВБЛИЗИ ТЕЛА ВРАЩЕНИЯ

Объектом исследования является поле скорости при продольном обтекании осесимметричного тела. Цель работы — разработка эффективного полуэмпирического метода расчета распределения скорости вблизи поверхности тела вращения с учетом влияния числа Рейнольдса и характеристик пограничного слоя.

Метод основан на сочетании расчета внешнего потенциального течения методом граничных интегральных уравнений (ВЕМ) и интегрального метода расчета турбулентного пограничного слоя. Распределение скорости в пограничном слое определяется по формуле Прандтля с использованием эмпирической зависимости длины пути смещения. Согласование внутреннего (вязкого) и внешнего (потенциального) решений выполняется методом сращиваемых асимптотических разложений. Для верификации проведены сопоставления с экспериментальными данными по дирижаблю ZS2G-1 и результатами CFD-расчетов (RANS, k- ϵ модель, OpenFOAM).

Показано хорошее согласование расчетных и CFD-данных в безотрывной области течения. Установлено существенное влияние числа Рейнольдса и параметров ламинарно-турбулентного перехода на профиль скорости и толщину пограничного слоя.

Разработанный метод позволяет оперативно прогнозировать поле скорости и может применяться для учета масштабного эффекта при проектировании гондол винто-рулевых колонок и других осесимметричных тел.

Киив Зин Хтун

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

ОСОБЕННОСТИ ЭВОЛЮЦИИ ВИХРЕВЫХ ПЕЛЕН ПРИ ДВИЖЕНИИ КРЫЛА НАД И ПОД ГРАНИЦЕЙ РАЗДЕЛА СРЕД

Объект исследования – форма вихревых пелен за крылом, движущимся в воздушной или водной среде в зависимости от его расположения вблизи границы раздела сред. Целью работы является выявление основных закономерностей изменения формы вихревых пелен в зависимости от расположения крыла относительно границы раздела сред.

Для моделирования перемещения вихревых пелен применяется разработанный ранее метод расчета формы поперечных сечений вихревых пелен в различные моменты времени в безграничном пространстве. В данной работе метод был модифицирован на основе функции Грина для полупространства для учета границы раздела сред

Обнаружено существенное различие в поведении вихревых пелен при движении крыла над или под границей раздела сред. При движении крыла над границей раздела вихревые жгуты движутся в разные стороны вдоль этой границы, а при движении под границей раздела вихревые жгуты сначала движутся навстречу друг другу, а потом начинают быстро опускаться вниз. Получены оценки скорости перемещения вихрей в зависимости от расстояния до границы раздела сред.

Выявленные закономерности поведения вихревых пелен могут применяться при проектировании систем крыльев экранопланов и судов на подводных крыльях.

В.В. Клепалов^{1,2}, Д.С. Пашкевич¹, А.Е. Мухачев², Е.Ф. Кади-Оглы²
¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
²ООО «ААЭМ», Санкт-Петербург

РАСЧЁТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В КОЖУХЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ТОКООТВОДОВ ТУРБОГЕНЕРАТОРА БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Исследование представляет собой расчётный анализ совместных тепловых и электромагнитных процессов в области вспомогательной системы турбогенератора большой мощности тихоходной паровой турбины. Целью исследования является определение расхода воздуха, при котором будет обеспечена термостабилизация токоведущих и экранирующих элементов турбогенератора. Решается сопряжённая задача охлаждения потоком воздуха металлической конструкции, в элементах которой протекают электрические токи различной силы.

В нижней части трёхфазного турбогенератора находятся шесть токоотводов с силой тока до 37,5 кА. Токоотводы размещены в секционированном стальном кожухе с открытыми

верхними и нижними гранями. Температура токоотводов не должна превышать 110 °С, а кожуха – 70 °С.

Инструментальное определение температуры поверхности тепловыделяющих элементов конструкции затруднено в связи со значительными электрическими токами, которые в них протекают.

Исследование предполагает оценку распределений температур на токоведущих и экранирующих элементах методом численного моделирования с помощью программного комплекса «Логос». Значения коэффициентов теплоотдачи на поверхности тепловыделяющих элементов конструкции при заданном расходе воздуха рассчитывались методом последовательных приближений. На их основе определялись значения температуры поверхности этих элементов с учётом тепловыделения, обусловленного протеканием электрического тока. При необходимости расход воздуха корректировался в сторону увеличения или уменьшения, после чего расчёт повторялся.

В.Ю. Коёкин^{1,2}, С.В. Булович^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ТРУБЕ ПРИ ПУЛЬСИРУЮЩЕМ РАСХОДЕ ГАЗА НА ВХОДЕ

Течение в трубах теплообменных аппаратов энергетических установок часто является нестационарным. В данной работе проводится исследование влияния пульсирующего потока газа на характер теплообменных процессов в прямой трубе постоянного круглого сечения. Численное моделирование турбулентного течения идеального газа проводилось в пакете ANSYS Fluent в осесимметричной постановке. В качестве граничного условия на входной границе трубы задавался переменный массовый расход, изменение которого имело вид прямоугольных импульсов со скважностью равной 2, температура поступающего газа была постоянной. На выходе задавалось постоянное противодавление, на стенке трубы ставилось изотермическое граничное условие. В ходе исследования варьировалась частота пульсаций, при этом величина среднего расхода газа и амплитуда пульсаций сохранялись неизменными. Было выполнено сравнение полученных результатов со стационарным течением, когда расход газа на входе в трубу соответствовал среднему значению расхода в пульсирующих режимах; построена зависимость числа Нуссельта от частоты пульсаций. Показано, что при определенной частоте пульсаций расхода в системе возбуждаются собственные колебания газа, что приводит к интенсификации теплообмена.

Л. Д. Кондратьев¹, С.В. Булович^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ДВИГАТЕЛЕ СТИРЛИНГА НА СТОЯЧЕЙ ВОЛНЕ В ДВУМЕРНОЙ ПОСТАНОВКЕ

В рамках двухмерной осесимметричной постановки проведено численное моделирование нестационарного течения газа в акустическом двигателе Стирлинга на основе решения полной системы уравнений Навье-Стокса. Рассмотрена конструкция двигателя,

включающая акустический резонатор и теплообменный блок, состоящий из регенераторов и теплообменников (нагревательных и охлаждающих элементов), которые суммарно представляют собой двадцать витков спиралевидной полосы. В исследовании спираль заменена кольцами различного радиуса. Для определения температурного поля в материале регенераторов решается нестационарное уравнение теплопроводности. Рассматриваемая постановка задачи позволяет учитывать взаимодействие не только с теплообменным блоком, но и с корпусом устройства.

Исследование выполнено для набора параметров, при которых в резонаторе возбуждается стоячая волна. В ходе анализа состояния акустического поля детально рассмотрены поля давления, скорости и температуры газа в области теплообменного блока. Процесс нестационарного сопряженного теплообмена между газом и элементами регенератора проведен с учетом теплофизических свойств материала. На основе решения нестационарной задачи теплопроводности определено распределение температуры как в каждом кольцевом сегменте регенератора, так и изменение температуры в направлении оси резонатора.

Д.Ю. Конин, К.А. Стариков, В.С. Модестов, А.А. Попович
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТЕЧЕНИИ В ТРУБЕ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ТРИЖДЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ МИНИМАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТИПА ДАЙМОНД

Повышение тепловой эффективности теплообменного оборудования позволяет снизить его габариты, металлоемкость и стоимость. Для однофазной конвекции широко применяют турбулизаторы простой геометрии, например штырьки. Развитие аддитивных технологий позволило создавать более сложные поверхности теплообмена, в частности решетчатые структуры с трижды периодическими минимальными поверхностями (ТПМП). По данным литературы, применение ТПМП-структур приводит к увеличению среднего числа Нуссельта примерно в 2 раза и общей теплогидравлической эффективности в 1.5 раза по сравнению со штырьковыми турбулизаторами. Однако при этом наблюдается рост гидравлических потерь до 3 раз. Ранее для структуры типа гироид было показано, что увеличение шага решетки снижает гидравлические потери. В данной работе исследовано влияние шага решетки ТПМП типа даймонд на характеристики теплообмена.

Рассмотрен теплообмен при течении воздуха в круглой трубе с решетчатой структурой типа даймонд. На внешней поверхности трубы задан тепловой поток постоянной плотности (граничные условия второго рода). Число Рейнольдса варьировали в диапазоне ламинарного режима. Численное моделирование выполнено в ANSYS Fluent на основе RANS-подхода с использованием SST $k-\omega$ модели турбулентности. Расчеты проведены с использованием метода конечных объемов с учетом сопряженного теплообмена. Получены распределения местных чисел Нуссельта и потерь статического давления. Показано, что увеличение шага решетки приводит к росту теплоотдачи в 1–1.5 раза и гидравлических потерь в 2–2.5 раза относительно канала со штырьками. Для валидации результатов разработан экспериментальный стенд с измерением давления и температуры и позволяющий определить среднее число Нуссельта, потери давления и теплогидравлическую эффективность.

Д.Ю. Кучиев, А.А. Смирновский
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ К РАСЧЁТУ ТУРБУЛЕНТНОЙ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ В СЛОЕ С ОБЪЁМНЫМ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЕМ

В работе рассматриваются подходы для предсказания турбулентных характеристик потока в задаче о свободной конвекции в слое с объёмным тепловыделением и охлаждаемыми горизонтальными стенками на основе методов машинного обучения. Для получения первичных данных о полях скорости, температуры и турбулентных характеристиках потока в рассматриваемой задаче проводится прямое численное моделирование. Цель исследования – оценить возможность и эффективность применения методов машинного обучения для ускорения расчетов без потери качества в классе задач, связанных со свободноконвективными течениями жидкости. Все численные эксперименты и генерация обучающих выборок выполнены при помощи открытого программного обеспечения OpenFOAM v13. Для подтверждения валидности полученных результатов проводится их сопоставление с эталонными литературными данными прямого численного моделирования.

Д.А. Максимов, Е.В. Колесник
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ НЕРАВНОВЕСНЫХ МОДЕЛЕЙ КОНДЕНСАЦИИ ДЛЯ РАСЧЕТА ВНУТРЕННИХ ТРАНСЗВУКОВЫХ ТЕЧЕНИЙ ВОДЯНОГО ПАРА

Работа посвящена применению и тестированию неравновесных моделей конденсации для расчета течения водяного пара в расширяющемся сопле. В практических приложениях расширение газа в сверхзвуковой части потока может происходить в течение очень малых промежутков времени. Если температура пара пересекает линию насыщения и при этом пар не содержит примесей, то его конденсация начинается не сразу, а только при достижении необходимой степени переохлаждения. В таком случае фазовый переход является неравновесным, и кинетика процесса описывается теорией нуклеации. Расчет такого типа течений представляет существенную сложность, так как требуется обоснованно определить свойства образующихся капель жидкости, скорость их роста, распределение по размерам, особенности обмена импульсом и энергией с паром. Типичными упрощениями являются приписывание макроскопических свойств кластерам из небольшого числа молекул, применение эмпирических постоянных в законах роста, использование монодисперсного приближения, предположение об относительной малости размеров частиц новой фазы. Вопрос о применимости и работоспособности неравновесных моделей конденсации, основанных на различных допущениях, остается не до конца решенным и актуальным на сегодняшний день.

В настоящей работе приведены результаты расчетов течения водяного пара в сопле Лавала для условий экспериментальной работы Moses&Stein (1978). Выполнено сравнение численных результатов, найденных с помощью реализованных в коммерческих кодах ANSYS Fluent и ANSYS CFX неравновесных моделей влажного пара. Получено качественное согласие численных решений с экспериментом; отмечены количественные различия и их возможные причины.

В.Д. Мануилова, Д.К. Зайцев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ПАКЕТА OPENFOAM ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ О ПОКОЯЩЕМСЯ ИЛИ ПРЯМОЛИНЕЙНО ВСПЛЫВАЮЩЕМ ОДИНОЧНОМ ПУЗЫРЕ

Метод VoF (Volume of Fluid) широко применяется при численном моделировании газожидкостных потоков с заранее неизвестной межфазной границей. Целью данной работы является сравнение двух вариантов метода VoF, реализованных в известном пакете OpenFOAM v2312, на примере задачи о покоящемся пузырьке (в отсутствие гравитации) и о всплытии изолированного воздушного пузыря в поле силы тяжести. Расчёты выполнены на нескольких расчетных сетках для двух жидкостей (воды и минерального масла), существенно различающихся по физическим свойствам, что позволило охватить широкий диапазон определяющих безразмерных параметров. При моделировании покоящегося пузырька оценивалась точность воспроизведения перепада давления на интерфейсе по закону Лапласа, а также уровень паразитных токов, обусловленных численной ошибкой определения кривизны интерфейса. Результаты численного моделирования всплытия пузырька сопоставлены с экспериментальными данными по скорости всплытия, а также с теоретической зависимостью коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса. Отдельное внимание уделено анализу влияния паразитных токов на скорость всплытия.

К.М. Медведев, А.В. Семенюта, А.С. Стабников
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

СРАВНЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОГРАММНЫХ ПАКЕТОВ ANSYS FLUENT И STAR-CCM+ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КИПЕНИЯ НЕДОГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ

Кипение недогретой жидкости является одним из ключевых явлений, оказывающих влияние на охлаждение тепловыделяющих элементов атомных реакторов. В последнее время для описания этого явления всё чаще используются CFD расчеты, в которых для моделирования физических процессов межфазного взаимодействия при кипении используется модель взаимопроникающих континуумов, дополненная моделью RPI (Rensselaer Polytechnical Institute) для описания теплового потока на стенке.

Точность расчетов, выполненных с использованием этого подхода, определяется выбором эмпирических замыкающих соотношений для отдельных слагаемых. Кроме того, при использовании этого подхода часто возникают вычислительные проблемы, препятствующие получению решения. Этот факт, в совокупности с тем, что в разных CFD-кодах реализованы различные замыкающие соотношения, приводит к необходимости тестирования математической модели в совокупности с вычислительным кодом. Таким образом, целью работы является оценка применимости программных комплексов ANSYS Fluent и Star-CCM+ для расчета кипения недогретой жидкости.

Тестирование проводится на задаче течения воды в круглой вертикальной обогреваемой трубе, на внутренней поверхности которой происходит закипание. Постановка задачи соответствует эксперименту Бартоломея 1967 года. В Star-CCM+ сходимость итераций обеспечивается только при использовании сопряженной постановки с учетом теплообмена в стенке трубы, в то время как в ANSYS Fluent этого не требуется. Продемонстрировано влияние расчетной сетки и выбора моделей, описывающих многофазное течение, в кодах ANSYS

Fluent и Star-CCM+, а также приведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными.

М.А. Мовсисян, Е.В. Колесник
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ТЕСТИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ НЕЯВНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕЧЕНИЙ СЖИМАЕМОГО ГАЗА НА НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЕТКАХ

Работа посвящена реализации и тестированию нескольких эффективных неявных методов для расчета течений вязкого сжимаемого газа на неструктурированных сетках в рамках density-based подхода.

В рамках работы была реализована программа для расчета течений сжимаемого газа на неструктурированных сетках произвольной топологии со вторым порядком аппроксимации потоков на гранях.

В работе приведены описания и результаты тестирования следующих неявных схем: «классическая» неявная схема с использованием якобиана, вычисленного по аналитическим формулам; схема «Jacobian-Free», заменяющая матрично-векторное произведение с помощью конечных разностей; схема с использованием алгоритмического дифференцирования, позволяющая получать якобианы с машинной точностью; схема BLUSGS (Block Lower Upper Symmetric Gauss Seidel), использующая упрощенное расщепление якобианов, что делает ее дешевой в вычислительном плане.

Работоспособность и эффективность реализованных методов оценивалась при расчете невязких сверхзвуковых и трансзвуковых течений, а также при расчете сверхзвуковых течений, характеризующихся вязко-невязким взаимодействием

Н.А. Монахов, А.В. Масюкевич, П.А. Попов
ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ SA-WSM ДЛЯ РАСЧЕТА СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА ЗА ПАДАЮЩЕЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

Определение параметров сверхзвукового потока газа в рабочей камере установки является одним из важнейших этапов экспериментального исследования, определяющим достоверность полученных результатов. При использовании импульсных высокоэнтальпийных установок данная задача существенно усложняется в силу изначально нестационарного характера газодинамических процессов, а также сложности и многообразия высокотемпературных явлений. Как правило, в серийном эксперименте на ударных трубах с отражающим соплом проводится измерение скорости и давления за падающей и отраженной ударными волнами и пространственное распределение полного давления в сверхзвуковой струе. Данный набор позволяет далее определить остальные параметры потока газа. При этом, измерение турбулентных характеристик потока в случае больших чисел Рейнольдса сопряжено со значительными трудностями.

Возможным подходом является параметрическое численное моделирование пограничного слоя на пластине с использованием моделей турбулентности, учитывающих

ламинарно-турбулентный переход, и сравнение полученных данных с результатами эксперимента.

В данной работе проведено измерение теплового потока за падающей ударной волной в камере низкого давления ударной трубы прямоугольного сечения. Для условий эксперимента выполнено моделирование течения в двумерной постановке в пакете Eilmer с использованием модели турбулентности Spalart-Allmaras ВСМ с варьлируемой интенсивностью турбулентных пульсаций сверхзвукового потока на входной границе. Искомое значение этой интенсивности определялось по совпадению момента времени ламинарно-турбулентного перехода в эксперименте и численном моделировании. Установлено, что данная модель завышает интенсивность турбулентных пульсаций, при этом плотности рассчитанного теплового потока в ламинарной и турбулентной фазе совпадают с экспериментальными значениями.

С.А. Назарова, М.А. Засимова

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ПОДАЧИ ПРИТОЧНОГО ВОЗДУХА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОХЛАЖДЕНИЯ ВЕНТИЛИРУЕМОГО ПОМЕЩЕНИЯ

Представляются результаты численного моделирования течения и теплопереноса в вентилируемом помещении. Воздух поступает в помещение через квадратное отверстие $h \times h$, расположенное на потолке, размер помещения $9.14 \times 2.28 \times 3.05 h^3$, посередине помещения размещена перегородка, разделяющая помещение на две области с высокими и низкими значениями скорости. Решается задача установления поля температуры в помещении: в начальный момент температура воздуха в помещении задавалась равной 20°C , температура охлаждающей струи – 10°C . Проводится оценка эффективности охлаждения помещения при различных способах подачи приточного воздуха. Рассмотрен стационарный режим подачи струи и нестационарный, когда скорость струи изменяется по ступенчатому закону (с разным периодом подачи струи). Расчеты выполнены на основе решения нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (URANS подход) с использованием стандартной k - ε модели.

Для стационарного режима подачи приточного воздуха, при значении числа Рейнольдса 1600, на участке установившегося режима течения показано удовлетворительное согласие полей скорости, полученных в расчете, с доступными в литературе экспериментальными данными. Для вариантов с различными способами подачи приточной струи проанализировано изменение среднеобъемной температуры в помещении во времени. Установлено, что изменение температуры во времени осуществляется по степенной зависимости, при этом в случае стационарной подачи показатель степени равен -0.02 , а для нестационарных, в зависимости от периода подачи струи, это значение составило $-0.022 \dots -0.024$. Показано, что нестационарная подача воздуха повышает скорость охлаждения помещения по сравнению со стационарным режимом.

Расчеты выполнены с использованием ресурсов СКЦ «Политехнический». Исследование выполнено при поддержке РФФ (грант № 24-19-00437).

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОБОДНОКОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА ВБЛИЗИ ОДИНОЧНОЙ ОРЕБРЕННОЙ ТРУБЫ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ НАКЛОНА ЕЕ ОСИ

В работе представлены результаты численного исследования свободноконвективного течения и теплообмена вблизи одиночной оребренной трубы при значениях чисел Грасгофа достигающих 6×10^5 . Исследовалось влияние на течение и теплообмен угла наклона трубы относительно гравитационной силы ($0 \dots 90^\circ$). Моделирование течения и теплообмена выполнялось на основе решения системы стационарных уравнений Навье-Стокса и энергии. Использовалась модель излучения Surface to Surface. Для проведения расчетов применялся пакет ANSYS Fluent.

Показано, что при увеличении угла наклона трубы от горизонтального положения к вертикальному, локальные максимумы скорости смещаются в направлении верхнего торца трубы, соответственно интенсивность локальной теплоотдачи в этом же направлении уменьшается. Установлено, что в исследуемом диапазоне чисел Грасгофа доля лучистой составляющей от общего теплового потока для горизонтальной трубы составляет от 40 до 50%, а для вертикальной – от 60 до 70%. Исследовалось влияние на течение и теплообмен величины межреберного шага (отнесенное к диаметру трубы значение составило $0.09 \dots 0.74$). Выявлено, что увеличение межреберного зазора способствует более интенсивному проникновению потока в межреберное пространство, что приводит к росту теплоотдачи. Результаты проведенных расчетов согласуются с доступными в литературе экспериментальными данными и данными численного моделирования, проведенного в схожих условиях.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, грант № 24-49-10003.

Ф.А. Орлов¹, Н.А. Монахов¹, М.З. Шварц¹, П.А. Попов¹, М.А. Котов²
¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург
²Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ ПЛЕНКИ ИЗ ТЕЛЛУРИДА ГЕРМАНИЯ

Разработка и изучение характеристик новых типов диагностических средств является неотъемлемым этапом экспериментальных исследований. Одним из перспективных направлений, является создание датчиков теплового потока и излучения на основе косослойных анизотропных пленок. Выбор материала и структуры пленки определяется необходимыми параметрами получаемых датчиков.

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования конвективного и лучистого теплового воздействия на тонкопленочный датчик из теллурида германия. В качестве способа конвективного воздействия рабочей поверхности датчика был выбран нагрев газом за отраженной ударной волной. Исследование реакции датчика на излучение, является значительно более сложной задачей, поскольку его рабочий диапазон лежит в видимой и инфракрасной области спектра. В первом случае использовался имитатор солнечного излучения на основе ксеноновой лампы. Получено интегральное значение и

спектральная зависимость вольт-ваттного коэффициента. Обнаружена нелинейная зависимость между электрическим сигналом и интенсивностью монохроматического излучения. Исследование реакции датчика на инфракрасное излучение проводилось с помощью нагретого за отраженной ударной волной углекислого газа при температурах до начала диссоциации. Показано, что чувствительность датчика на основе пленки из теллурида германия к лучистому тепловому потоку значительно превышает данную величину при конвективном нагреве.

Ф.А. Орлов, Н.А. Монахов, К.И. Белов, П.А. Попов
ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ ДАТЧИКА ТЕПЛООВОГО ПОТОКА НА АНИЗОТРОПНЫХ ТЕРМОЭЛЕМЕНТАХ ИЗ ВИСМУТА В УСЛОВИЯХ ДИССОЦИАЦИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА ЗА ОТРАЖЕННОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

Исследование процессов за отраженной ударной волной является стандартным экспериментальным подходом в химической кинетике. Он позволяет «мгновенно» нагреть исследуемый газ в хорошо контролируемых условиях. Также, данный метод широко используется для калибровки и исследования характеристик датчиков давления и теплового потока.

В данной работе проведен анализ применимости датчиков теплового потока на анизотропных термоэлементах из висмута для исследования теплообмена за отраженной ударной волной в углекислом газе. Начальные условия экспериментов выбирались таким образом, чтобы температура за отраженной ударной волной была достаточной для начала диссоциации рабочего газа, а релаксационные времена были сопоставимы с длительностью рабочего времени установки. Проведено сравнение измеренной плотности теплового потока с результатами и теоретическими оценками. Исследовано быстроедействие датчиков, изменение вольт-ваттного коэффициента из-за воздействия высокотемпературных продуктов химических реакций на его рабочую поверхность.

А.Б. Пагаев, С.А. Галаев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОГО ГАЗА ЧЕРЕЗ ВЕНЕЦ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА С ПРОФИЛИРОВАННОЙ ТОРЦЕВОЙ СТЕНКОЙ

В современных газотурбинных установках повышение эффективности может быть достигнуто за счет снижения потерь кинетической энергии потока на вторичные течения. Профилирование торцевой стенки является одним из методов воздействия на структуру потока в лопаточных аппаратах с малым отношением высоты к длине лопаток.

Настоящая работа посвящена численному моделированию течения через венец осевого компрессора NASA Rotor 37 с изучением влияния неосесимметричного профилирования торцевых поверхностей на интегральные параметры и локальную структуру потока. Расчёт проведён в программном комплексе ANSYS CFX. Валидация, выполненная на примере течения через венец с цилиндрической торцевой стенкой, показала удовлетворительное соответствие результатов расчета экспериментальным данным. Рассмотрены два варианта профилирования торцевой поверхности: впадина на ступице вблизи выхода из

межлопаточного канала и локальный подъём в области скачка уплотнения. Оба варианта показали положительное влияние на локальные характеристики течения, уменьшение зон отрыва в прикорневой области и незначительные изменения в интегральных параметрах.

Продемонстрирована возможность управления вторичными течениями путем изменения геометрии торцевых поверхностей. Выявлено влияние модели турбулентности и размерности расчётной сетки на характеристики течения.

А.А. Петров, Е.Э. Китанина

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ЛАМИНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА В ВИТЫХ ТРУБАХ КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ

В работе представлены результаты численного моделирования нестационарных режимов течения и теплообмена в витой трубе квадратного поперечного сечения. Численно решалась система уравнений Навье-Стокса и энергии для ламинарного течения. На границах расчетной области задавались условия периодичности. Температура стенок трубы полагалась постоянной. Расчеты проводились в программном комплексе ANSYS Fluent. В ходе методических расчетов исследована чувствительность результатов к размерности сетки и безразмерному шагу по времени. Проведено параметрическое исследование влияния числа Рейнольдса на мгновенные и осредненные характеристики течения и теплообмена. Показано, что с ростом числа Рейнольдса существенно меняется картина продольного течения и интенсивность вторичных токов, возрастает амплитуда пульсаций скорости в точках мониторинга, меняются их частотные характеристики. При увеличении числа Re происходит интенсификация теплообмена в витой трубе.

А.Н. Попов, А.А. Богданов, Н.А. Монахов, Р.О. Куракин, П.А. Попов
ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ ЗАТУПЛЕННОГО ТЕЛА ИОНИЗОВАННЫМ АРГОНОМ НА УДАРНОЙ ТРУБЕ С ОТРАЖАЮЩИМ СОПЛОМ

Экспериментальное исследование взаимодействия сверхзвукового потока с моделями при высокой энтальпии газа возможно только на импульсных установках различного типа. Наибольшее распространение получили ударные трубы с отражающим соплом в силу относительной простоты конструкции и низких затрат на проведение экспериментов. Такие установки обладают существенной особенностью, связанной с ударным методом сжатия и нагрева рабочего газа в области перед соплом. При высоких числах Маха падающей ударной волны химический состав газа за отраженной ударной волной изменяется в силу процессов диссоциации и ионизации, что приводит к невозможности в полной мере воспроизвести сверхзвуковое обтекание тела газом исходного состава.

В данной работе представлены результаты исследования сверхзвукового обтекания полусферы потоком аргона. Эксперименты проведены на Большой ударной трубе ФТИ им. А.Ф. Иоффе с отражающим соплом. Регистрировалось давление торможения и ток через двойной зонд в критической точке, теневая картина течения и собственное свечение ударного слоя. Проведены оценки времени ионизационной релаксации и рассчитаны равновесные параметры газа за отраженной ударной волной и в критическом сечении сопла. Течение в

диффузорной части сопла рассчитано по одномерной модели с учетом рекомбинации. Расчет обтекания полусферы в осесимметричной постановке выполнен в Eilmer с учетом химических реакций при высоких температурах.

Г.Е. Родин, Д.К. Зайцев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАМИНАРНЫХ РЕЖИМОВ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ

Вихревые трубы, в которых реализуется эффект энергоразделения во вращающемся потоке газа (т.наз. эффект Ранка), находят широкое применение в технике, однако в вопросе о ведущем механизме данного эффекта до сих пор нет единого мнения. В рамках расчетно-экспериментального исследования, проведенного в СПбПУ в конце 90-х годов, было впервые установлено, что, вопреки распространенному мнению, энергоразделение в вихревой трубе может иметь место не только при турбулентном, но и при ламинарном течении газа. В ходе недавних расчетов ламинарного течения газа в 3D модели вихревой трубы были обнаружены не наблюдавшиеся ранее режимы течения, отличающиеся наличием когерентных структур, визуально близких к осесимметричным, что позволяет предположить возможность их возникновения в осесимметричной постановке. Настоящая работа направлена на обнаружение и параметрическое исследование подобных возмущенных режимов течения в вихревой трубе в рамках осесимметричной постановки. Численное моделирование проводится в вычислительном пакете ANSYS Fluent.

А.С. Романов, С.А. Галаев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ВЫХОДНОМ ДИФFUЗОРЕ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ С ПРЕДВКЛЮЧЕННОЙ ТУРБИННОЙ СТУПЕНЬЮ

Выходной диффузор представляет собой один из ключевых элементов энергетической газотурбинной установки. Его основное функциональное назначение заключается в обеспечении разрежения за последней ступенью турбины с последующим плавным восстановлением давления потока до атмосферного значения. Реализация данного технического решения позволяет увеличить располагаемый теплоперепад, срабатываемый на турбине, что напрямую способствует росту вырабатываемой мощности и повышению эффективности всей энергоустановки.

Существующие инженерные методики проектирования диффузоров являются консервативными, поскольку базируются на обобщении экспериментальных данных, полученных в условиях, далеких от натуральных. Их главным недостатком является допущение об однородности входного потока. В действительности же последняя ступень турбины выступает мощным генератором турбулентности и источником выраженной аэродинамической неоднородности потока, что оказывает существенное влияние на производительность и эффективность работы сопряженного блока «последняя ступень — выходной диффузор».

Развитие нестационарных численных методов моделирования процессов гидрогазодинамики в решетках турбомашин открывает новые возможности для достоверного учета факторов неоднородности и турбулентности потока на входе в диффузор. В связи с этим в рамках настоящей работы выполнено нестационарное численное моделирование течения в экспериментальном модельном отсеке газовой турбины с выходным диффузором, с использованием двух подходов к моделированию турбулентности: URANS SST и IDDES. Учет относительного движения ротора и статора реализован посредством метода скользящих сеток (Sliding Mesh). На основе полученного решения проведен детальный анализ особенностей турбулентного неоднородного течения, оказывающих существенное влияние на производительность блока «последняя ступень — диффузор».

Е.В. Садикова^{1,2}, Т.А. Федорова^{1,2}, Д.С. Пашкевич^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²ООО «Аврора Кемикалс», г. Северск

РАСЧЁТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ РЕАКТОРА ПО СИНТЕЗУ ГЕКСАФТОРЭТАНА ФТОРИРОВАНИЕМ ЭТИЛЕНА ТРИФТОРИДОМ КОБАЛЬТА ПРИ ОТСУТСТВИИ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА

Выполнено расчётное исследование теплового состояния реактора синтеза гексафторэтана (C_2F_6) фторированием этилена трифторидом кобальта (CoF_3) в условиях неподвижного слоя порошка и неподвижного газа, где перенос тепла осуществляется только теплопроводностью. Расчёты проводили с использованием приближённой теории теплового взрыва Д.А. Франк-Каменецкого и методом численного решения нестационарного уравнения теплопроводности с источником тепла, связанным с протеканием экзотермической реакции. Источник тепла моделировали с помощью формальных кинетических уравнений, построенных авторами ранее на основе литературных экспериментальных данных по скорости фторирования этилена и фторэтанов. В расчётах варьировали теплопроводность реагирующей системы, порядок реакции, давление газа и другие параметры.

Показано, что для порошков фторидов кобальта с низкой теплопроводностью (~ 0.08 Вт/(м·К)) критический диаметр реактора составляет величину порядка 1–10 мм для различных значений давления. Результаты численного моделирования и теоретические расчёты показали, что при низкой теплопроводности в цилиндрическом реакторе опытно-промышленного масштаба (диаметр 100 мм) развивается тепловой взрыв с максимальной температурой на оси цилиндра порядка 1000–1900 К, что при промышленной эксплуатации должно привести к деструктивному фторированию углеродной связи фторэтанов.

Для обеспечения стабильной работы реактора диаметром 100 мм при температуре стенки 200 °С необходима теплопроводность среды не менее 10 Вт/(м·К), что может быть достигнуто созданием высокотеплопроводной структуры в слое порошка.

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 24-91-18003.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕКСАФТОРИДА УРАНА С ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИМИ ВЕЩЕСТВАМИ И КИСЛОРОДОМ В РЕЖИМЕ ГОРЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КИНЕТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОСНОВНЫХ РЕАКЦИЙ

Взаимодействие гексафторида урана, обедненного по изотопу U-235, с водородсодержащими веществами, например, метаном или водородом, и кислородом в режиме горения является одним из способов его переработки.

Важным направлением работ в этой области является создание и верификация математической модели турбулентного горения, реализованной в программном комплексе ANSYS Fluent. Ранее авторами было проведено численное исследование указанных процессов с использованием диффузионной кинетической модели, для которой не требуется инициирование фронта пламени.

В настоящей работе приведены результаты численного моделирования указанного процесса при использовании модели, в которой для описания скорости химических реакций диффузионную модель заменили на кинетические модели окисления метана или водорода кислородом и гидролиза гексафторида урана, а инициирование фронта пламени моделировали на основе литературных данных по кинетике фторирования аммиака фтором.

На основе разработанной модели были получены поля параметров процесса для пилотного реактора типа туннельной горелки.

К.Ю. Федчишина, А.А. Смирновский

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ РАВНОВЕСИЯ ЖИДКОСТИ В ПОЛЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ С НЕОДНОРОДНЫМ ОБЪЁМНЫМ ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЕМ

В работе рассматривается задача линейной теории устойчивости равновесия жидкости в поле силы тяжести в бесконечном горизонтальном слое, ограниченном сверху и снизу двумя твёрдыми изотермическими пластинами. В отличие от классической задачи Рэлея-Бенара с подогревом снизу и охлаждением сверху, в данной работе рассматривается устойчивость равновесия при наличии внутренних источников тепла, как с однородным, так и с неоднородным распределением удельной мощности тепловыделения по высоте слоя. Основная цель работы заключается в определении критического числа Грасгофа (Gr), при котором равновесие теряет устойчивость, на основе линейного анализа. Рассмотрены три случая распределения удельной мощности тепловыделения по высоте: постоянное, линейное и экспоненциальное. На основе линеаризованных уравнений Буссинеска и метода нормальных мод задача сводится к обобщённой проблеме собственных значений. Для её решения разработан программный код на языке Python, использующий метод конечных разностей для дискретизации полученного уравнения и решения задачи нахождения собственных значений. В ходе расчётов определены критические значения Gr и соответствующие им волновые числа, визуализированы структуры возмущений. Результаты расчётов сравниваются с литературными данными.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСТУПАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ НА ПОВЕРХНОСТНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

Известно, что наличие локальных геометрических неоднородностей на поверхностях различных судов и сооружений может существенно влиять на их аэродинамические характеристики. Один из наиболее достоверных способов определения такого влияния – исследование воздействия ветрового потока на модели объектов в аэродинамических трубах. Целью данной работы являлись экспериментальные исследования по определению влияния выступающих элементов конструкции на распределение давления по поверхности модели.

В настоящей работе в качестве основной модели был рассмотрен параллелепипед, помещаемый в однородный поток с постоянной скоростью. При проведении экспериментальных исследований для модификации объекта использовались присоединяемые к основной модели выступающие элементы, подобные конструктивным деталям на поверхностях судов или балконам на фасадах зданий. В ходе работы было проведено сравнение распределения давления по поверхности модели с выступающими элементами и без них, а также рассмотрено влияние их габаритов на получаемые аэродинамические характеристики. Экспериментальные исследования проводились в Малой аэродинамической трубе Крыловского научного центра при нескольких углах направления набегающего потока.

В.Ю. Щукина, В.А. Талалов, П.С. Камбур
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТОВ МЕЖФАЗНОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ПРОДУВЕ ГАЗА СКВОЗЬ ПОЛИДИСПЕРСНЫЙ СЛОЙ ПОРОШКА ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ ДЛЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СЛОЯ

Для оптимизации процессов высокоэкзотермического синтеза термолабильных соединений в фазовой системе газ-твёрдое при отсутствии перемешивания порошка (например, фторирование этилена трифторидом кобальта с получением гексафторэтана) всё большее значение приобретает численное моделирование, которое невозможно без информации о теплофизических свойствах материалов и интенсивности межфазного теплообмена.

Прямое измерение коэффициентов теплоотдачи от газовой фазы к твердой в пористой структуре невозможно, поэтому целесообразно определять их на основе метода подобия процессов переноса импульса и тепла.

В настоящей работе экспериментальное определение гидравлического сопротивления слоя порошка проводили с использованием полидисперсных порошков оксидов кремния и алюминия с известным гранулометрическим составом в вертикальной цилиндрической прозрачной трубке, меняя расход воздуха и не допуская псевдооживления слоя.

На основе полученных результатов сделаны выводы о возможности применения законов Дарси и Форхгеймера и выполнена оценка коэффициентов межфазного теплообмена.

Эксперименты показали, что плотность порошка (свободная засыпка, уплотнение встряхиванием) в значительной степени влияет на гидравлическое сопротивление.

Уплотнение порошка на 5 % встряхиванием приводит к росту гидравлического сопротивления до 2 раз.

Определены условия псевдооживления стационарного полидисперсного слоя порошка, результаты эксперимента по минимальной скорости псевдооживления сопоставлены с расчётами по имеющимся в литературе зависимостям.

Н. Юрченко, А.В. Гарбарук

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ НА ГРУБЫХ СЕТКАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

При решении задач проектирования часто возникает необходимость проведения серийных оптимизационных расчетов однотипных течений. При этом зачастую для обеспечения требуемой точности необходимы очень подробные расчетные сетки, что приводит к существенным вычислительным затратам при проведении подобных расчетов. Для снижения этих затрат необходимо использовать менее подробные сетки, но в этом случае не удается получить решение достаточной точности. Целью данной работы является повышение точности результатов, получаемых на таких сетках.

В работе использован метод, основанный на коррекции полученного решения в ходе постпроцессинга. Поправка к решению строится с использованием нейронной сети архитектуры многослойный перцептрон (MLP), обучение которой проводится на ограниченном наборе задач рассматриваемого класса. Обучающая выборка получается путем сравнения решения на грубой сетке с «эталонным» решением, полученным на подробной сетке.

Приведены результаты применения использованного метода для решения задачи об обтекании крыловых профилей при углах атаки, близких к критическому.

А.А. Абрамов¹, А.Ю. Тамм²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики, Санкт-Петербург

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛИ ОГДЕНА ДЛЯ ОПИСАНИЯ РЕАКЦИИ ПОДКОЖНО-ЖИРОВОЙ КЛЕТЧАТКИ НА МЕХАНИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

Введение. Подкожно-жировая клетчатка (ПЖК) является ключевым слоем кожного покрова, выполняющим амортизирующую и защитную функции. Знание её механических свойств необходимо для решения широкого круга прикладных задач биомеханики: от прогнозирования последствий травматических воздействий до планирования хирургических вмешательств и разработки медицинского инструментария. Для описания реакции ПЖК на механические воздействия применяются гиперупругие модели материала, одной из таких моделей является модель Огдена, позволяющая воспроизводить нелинейный характер деформирования материала. Данная модель имеет параметры, определяемые эмпирическим путём и применяемые при проведении расчетных проверок. Зачастую эти параметры идентифицируются с использованием результатов натуральных экспериментов по сжатию жировой ткани.

Содержание. В данной работе описана система нелинейных алгебраических уравнений модели Огдена и исследована возможность получения решения данной системы уравнений в аналитическом виде для области пространства простой формы. Также для ПЖК сложной формы в условиях контактного взаимодействия показана оценка влияния на достоверность результатов моделирования с использованием метода конечных элементов следующих параметров дискретизации: характерный размер конечного элемента, шаг интегрирования по времени и выбраны их рациональные значения. По результатам сравнения с натурным экспериментом проведена идентификация физических параметров модели Огдена. В заключении сделаны выводы о дальнейших направлениях исследования.

И.Д. Гесин, Н.А. Кабин, О.В. Антонова

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ПЕРСониФИЦИРОВАННЫХ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ КОРОНАРНЫХ СОСУДОВ НА ОСНОВАНИИ ДАННЫХ ВНУТРИСОСУДИСТОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Исследование направлено на выбор и обоснование наиболее эффективного подхода к созданию биомеханической модели коронарных сосудов, пораженных атеросклерозом. В качестве исходных данных выступают данные ангиографии и внутрисосудистого ультразвукового исследования. Анализируются особенности обработки исходных изображений с целью создания конечно-элементных моделей сосудов, учитывающих различные свойства стенок сосудов и зон, поражённых атеросклерозом. Полученные биомеханические модели будут использованы при моделировании процессов стентирования и ангиопластики.

А.В. Папсуева, Д.М. Пашковский
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

БИОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА АКСОНА С УЧЕТОМ ВЯЗКОУПРУГИХ СВОЙСТВ

Травмы спинного мозга сопровождаются нарушением проводимости нервных волокон и ограничением способности к их регенерации. Одним из ключевых факторов восстановления является механика роста аксона, определяемая внутренней структурной организацией аксонального стержня и свойствами внешней среды. В работе построена механическая модель роста аксонального стержня на основе вязкоупругой линейной сплошной среды. Численное моделирование напряженно-деформируемого состояния и роста реализовано в пакете COMSOL Multiphysics. Аксон моделируется как трехслойная двухкомпонентная структура, включающая аксоплазму и кортикальную мембрану. Вязкоупругие свойства внутренней среды описаны с использованием обобщенной модели Максвелла, что позволяет учитывать релаксационные процессы. В модели реализован механизм роста, основанный на изменении массы ввиду полимеризации и деполимеризации микротрубочек и F-актина, с учётом внутренних вязкоупругих свойств. Получены результаты численного моделирования напряженно-деформируемого состояния, демонстрирующие рост аксонального стержня и формирование характерного вязкоупругого отклика.

А.П. Корчагин, О.В. Антонова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ВЛИЯНИЕ ВЫБОРА ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ НА ГЕМОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ КРОВОТОКА В ЗОНЕ БИФУРКАЦИИ ЛЕВОЙ КОРОНАРНОЙ АРТЕРИИ

В работе рассматривается трехмерная задача нестационарного течения крови в зоне бифуркации левой коронарной артерии, при разных уровнях поражения стенозом. Геометрическая модель здоровой артерии получена на основании данных компьютерной томографии. Рассматриваются также и пораженные артерии, при этом варьируется степень сужения и локализация стеноза.

В качестве изменяемых параметров выступают граничные условия на входной и выходных границах, выбор математической модели крови и учет движения стенки сосуда. По результатам расчетов получены поля распределения гидродинамических и гемодинамических характеристик.

Т. Цай, И. Сулова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПРИМЕНЕНИЕ ДВОЙНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕРДЕЧНОГО РИТМА С ЭКСТРАСИСТОЛАМИ

Данная работа направлена на исследование сердечного ритма, содержащего экстрасистолы, путем расчета количественных параметров variability сердечного ритма.

Для расчетов использованы записи пациентов с экстрасистолией из баз MIT-BIH-Arrhythmia-Database.

Для моделей фрагментов записи ритма с экстрасистолией и без экстрасистолы получены аналитические выражения для первого непрерывного вейвлет-преобразования $V(v, t)$. По максимальным значениям $|V(v, t)|^2$, определена функция мгновенной частоты $v_{max}(t)$ и приведены ее графики для указанных видов сердечного ритма.

С целью выявления характерных особенностей перестройки ритма в настоящей работе используется повторное (двойное) вейвлет преобразование от $v_{max}(t)$. На основании аналога равенства Парсевала по вейвлет-спектрам $v_{max}(t)$ определена локальная плотность энергии $\varepsilon(v, t)$ и вычислены спектральные интегралы в различных частотных диапазонах.

В работе построены графики изменения спектральных интегралов во времени, которые явно указывают на наличие экстрасистолы и компенсаторной паузы, характерной для желудочковой экстрасистолы. Показано, что количественные оценки спектральных интегралов в диапазоне HF (высоких частот) в случае экстрасистолы значительно превышают соответствующие величины для фрагментов сигналов с регулярным ритмом. Для сигналов с экстрасистолами зафиксировано превышение над средним уровнем значений для спектральных интегралов в LF и VLF диапазонах в определенные моменты времени, что может указывать на длительную компенсаторную паузу, которая характерна для желудочковых экстрасистол.

В работе произведен количественный анализ изменений динамики ритма сердца, который особенно важен при наличии экстрасистол, связанных с турбулентностью ритма. Отметим, что абсолютно регулярного сердечного ритма не существует и, именно количественные оценки могут позволить выявлять критические ситуации при диагностике. Такой подход может быть использован для выявления и анализа экстрасистол и их классификации.

О.А. Хапцова, И.Е. Груздев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕНИСКОВ КОЛЕННОГО СУСТАВА

Данная работа посвящена созданию конечно-элементной модели коленного сустава для анализа напряженно-деформированного состояния менисков. Мениски – серповидные прослойки между бедренной и большеберцовой костями, они обеспечивают конгруэнтность суставных поверхностей, распределение нагрузок, амортизацию и стабилизацию сустава. Разрывы мениска относятся к числу наиболее распространенных повреждений коленного сустава, в связи с этим исследование биомеханических механизмов возникновения разрывов имеет важное значение для профилактики и совершенствования методов лечения.

В ходе работы на основе МРТ снимков в программе 3D Slicer построена объемная геометрия сустава. Основной этап исследования был выполнен в программном пакете Ansys. Для описания механического поведения ткани мениска реализованы различные подходы к моделированию материала: линейная упругая изотропная модель, анизотропная модель, учитывающая вклад коллагеновых волокон. Были рассмотрены различные сценарии нагружения, отвечающие таким движениям как резкое разгибание коленного сустава, осевая ротация бедренной кости. На их основе выявлены кинематические параметры движений, при которых напряжения в мениске достигают критических значений, а также проведена оценка влияния выбора модели материала на точность локализации зон потенциального разрыва.

С.Д. Иванов, О.В. Антонова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСКРЫТИЯ БАЛЛОНА ПРИ АНГИОПЛАСТИКЕ

Исследование посвящено разработке математической модели процесса раскрытия баллона в артерии, пораженной атеросклеротической бляшкой. В качестве исходных данных используются геометрические параметры сосуда, полученные по результатам обработки данных ангиографии и внутрисосудистого ультразвукового исследования. Рассматриваются особенности описания нелинейных свойств материалов баллона, а также контактного взаимодействия между телом баллона и стенкой сосуда. Реализация модели в среде конечно-элементного анализа Simulia Abaqus позволит оценить распределение напряжений и деформаций в системе «баллон-сосуд» в зависимости от величины прикладываемого давления и геометрии самого баллона, что необходимо для прогнозирования рисков повреждения сосудистой стенки и оптимизации протоколов малоинвазивного вмешательства.

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПЛОМБИРОВАННОГО ЗУБА ПРИ СТАТИЧЕСКОЙ ЖЕВАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКЕ

Отличия механических свойств реставрационных стоматологических материалов от естественных тканей ведут к перераспределению напряжений и повышенному риску возникновения сколов, трещин и вторичного кариеса. В связи с постоянным появлением новых реставрационных материалов возникает объективная необходимость их комплексного исследования по механическим критериям. Цель исследования — количественно оценить напряженно-деформированное состояние пломбированного зуба при статической жевательной нагрузке и сопоставить поведение трех материалов методом конечных элементов. На основе данных компьютерной томографии и 3D-сканирования была построена геометрическая модель зуба. В структуре модели была выделена полость реставрации, для которой спроектирована соответствующая геометрия пломбы. Каждому компоненту системы — материалу реставрации и окружающим тканям (эмали, дентину, кортикальной и губчатой кости) — были сопоставлены соответствующие физико-механические параметры. Сравнение полей напряжений для здорового и пломбированного зуба дает возможность количественно оценить эффективность материалов, что снижает необходимость дорогостоящих натуральных испытаний.

М.Р. Калугин, С.Д. Ляжков
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

УПРАВЛЯЕМОЕ ЛОКАЛЬНОЕ РАЗРУШЕНИЕ АКТИНОВОГО ФИЛАМЕНТА ПОСРЕДСТВОМ ФОКУСИРОВКИ ЭНЕРГИИ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ

В работе исследуется возможность управляемого локального разрушения актинового филамента посредством фокусировки энергии двух волновых пакетов, возбуждаемых

короткими лазерными импульсами. Динамика филамента моделируется в рамках нелинейного уравнения струны с нелинейным упругим основанием, вязким затуханием и локальным дефектным потенциалом, имитирующим патологический агрегат. Внешняя сила задаётся в виде двух движущихся локализованных импульсов с конечной пространственной шириной и сверхкороткой временной длительностью.

Рассматриваются два способа оценки локальной плотности энергии в точке столкновения в линейном приближении задачи: через точное решение задачи через функцию Грина и через метод энергетической динамики по Кривцову с использованием импульсной аппроксимации. Получено выражение для максимальной локальной энергии в момент столкновения волновых пакетов и выявлена её зависимость от амплитуды импульса, длительности воздействия и пространственной ширины возмущения.

Проведена численная верификация модели методом конечных разностей с учётом нелинейности. Проведён параметрический анализ, позволяющий определить условия фокусировки энергии, при которых достигается максимум локальной плотности энергии, необходимой для разрушения участка филамента, при сохранении малых глобальных деформаций филамента. Ожидается, что результаты работы послужат шагом к развитию механотерапии, методов удаления опухолей с минимальным повреждением здоровых тканей.

Е.И. Кокшарова, Я.А. Гатаулин, Е.М. Смирнов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОСА ВХОДНОГО ПРОФИЛЯ СКОРОСТИ НА СТРУКТУРУ ТЕЧЕНИЯ ЗА МОДЕЛЬЮ АСИММЕТРИЧНОГО СТЕНОЗА

Исследование структуры течения в каналах с локальными сужениями имеет широкую область применения в гемодинамике, в частности при анализе стенозов артерий. В медицинской практике наблюдаются различные типы артериальных сужений, среди которых наиболее распространены асимметричные стенозы. Известно также, что многие кровеносные сосуды имеют изогнутую форму.

Настоящая работа посвящена численному исследованию влияния скоса входного профиля скорости, за поворотом канала, на структуру течения за стенозом. Рассмотрена модель асимметричного стеноза со степенью сужения 70% по площади поперечного сечения. Расчетный скошенный профиль скорости на входе получен в сечении, расположенном непосредственно после поворота цилиндрического канала диаметром $D = 17$ мм на 90° с радиусом кривизны $R = 850$ мм; $Re = D \cdot V_b / \nu = 1800$ и $Dn = Re \sqrt{D/2R} = 180$. Отметим, что максимум входного профиля продольной скорости смещен в сторону проходного сечения стеноза, а относительная интенсивность вторичного течения на входе $(V_\tau/V_b)_{max} = 0.064$, где V_τ — тангенциальная скорость, V_b — среднерасходная скорость. Трёхмерное численное моделирование течения в области сужения канала выполнено методом моделирования крупных вихрей (LES).

Полученные результаты для скошенного входного профиля сопоставлены по распределению скоростей, рейнольдсовых напряжений и турбулентной кинетической энергии с данными для случая параболического профиля Пуазейля.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ В МОДЕЛИ СОСУДА С МЕСТНЫМ СУЖЕНИЕМ

Тромбоз вен сопровождается формированием локального сужения сосуда, что существенно изменяет картину течения крови и может приводить к потере устойчивости потока с возникновением переходных и турбулентных режимов. Гидродинамический фактор играет ключевую роль в прогрессировании тромбоза, однако механизмы развития неустойчивостей в венозном русле, характеризующемся низкими числами Рейнольдса, остаются недостаточно изученными. При проведении численных исследований критических параметров перехода возникает задача выбора эффективного подхода к введению контролируемых возмущений и оценки влияния размерности модели на достоверность результатов.

В работе выполнено численное моделирование течения в двумерной модели сосуда с локальным сужением, имитирующим тромб. Исследовано влияние входных возмущений расхода на длину зоны рециркуляции за препятствием. Показано, что данный параметр демонстрирует сильную чувствительность к амплитуде и частоте возмущений. Установлено, что результаты двумерных расчетов позволяют с высокой эффективностью получать «пристрелочные» данные для определения наиболее опасных частот возмущений, что существенно сокращает время подготовки к трехмерному моделированию. Сделан вывод о целесообразности применения двумерной постановки для анализа физических механизмов неустойчивости и предварительной оценки критических режимов течения в сосудах с местным сужением.

СЕКЦИЯ «МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА И КОНВЕРСИИ ЭНЕРГИИ»

В.В. Зюзин¹, Е.Ф. Грекова^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Институт проблем машиноведения РАН

ЧАСТОТНЫЕ СВОЙСТВА ТЕРМОУПРУГИХ СВЯЗАННЫХ СВОБОДНЫХ ВОЛН В БЕЗГРАНИЧНОЙ СРЕДЕ

Анализируется частотная зависимость основных характеристик связанных свободных волн в безграничной среде в рамках классической модели термоупругости. Описана зависимость отношения амплитуд и разности фаз колебаний, приведены асимптотические приближения данных зависимостей для различных областей частот. Полученные зависимости волнового числа и коэффициента затухания совпадают с приведёнными в литературе. Введено в рассмотрение балансовое соотношение, описывающее перенос и диссипацию энергии в среде. Приведён анализ зависимости параметров вектора потока энергии и величины диссипации от частоты. Установлено качественное влияние параметра связанности упругой и тепловой подсистем на характеристики колебаний. Рассмотрено несколько частных случаев зависимостей указанных выше величин при определённых значениях параметра связанности. Высказаны предложения о применимости полученных результатов для описания термоупругих процессов в метаматериалах.

П.С. Алферова¹, Е.Ф. Грекова²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

УРАВНЕНИЕ ДЛЯ МАКРОСТРУКТУРЫ В ВЯЗКОУПРУГОЙ РЕДУЦИРОВАННОЙ СРЕДЕ КОССЕРА С РОТАЦИОННОЙ ДИССИПАЦИЕЙ

В геосредах логарифмический декремент затухания как функция частоты колебаний имеет максимум. В модели трения Максвелла логарифмический декремент затухания убывает с частотой, а в модели Кельвина-Фойгта – возрастает. Однако максимум поглощения на некоторой частоте наблюдается при введении вязкого трения как реакции на поворот частицы среды в редуцированной среде Коссера. Такая среда характеризуется наличием вращательных степеней свободы, причем ее упругая энергия не зависит от градиента поворота. Она может служить приближенной моделью геосреды.

В данной работе получено уравнение, описывающее вязкоупругое поведение на макроуровне как эффективный вклад от микроструктурной диссипации. В нем используется только вектор перемещений, а вектор поворота исключен. Введен эффективный тензор напряжений, который мог бы быть тензором напряжений для классической среды с памятью, имеющей те же динамические уравнения. Он содержит слагаемое, отвечающее за трение типа Кельвина-Фойгта и слагаемое, которое при достаточно большой поворотной диссипации совпадает с вязкоупругим напряжением, моделируемым по Максвеллу.

ЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕРМОУПРУГИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХФАЗНОГО КОМПОЗИТА С ЭЛЛИПСОИДАЛЬНЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ

В работе исследуются эффективные термоупругие характеристики двухфазного композита, состоящего из изотропной матрицы и ориентированных эллипсоидальных неоднородностей. Для определения эффективных модулей упругости и тензора теплового расширения применяется метод гомогенизации Мори–Танаки, который позволяет учесть взаимодействие включений через среднее поле в матрице, а также обладает предельным переходом при большой объемной доле неоднородностей. Распределение ориентации описывается функцией плотности вероятности с параметром порядка, зависящим от внешних условий, таких как температура. Получены замкнутые аналитические выражения для тензора эффективной жесткости и коэффициентов теплового расширения как функций от микроструктурных параметров. Проведён анализ влияния степени анизотропии распределения на эффективные свойства, выполнено сравнение со схемой без учета взаимодействия. Показано, что учёт ориентации неоднородностей существенно изменяет анизотропию эффективных термоупругих характеристик. Разработанный подход может быть использован при моделировании интеллектуальных материалов, в частности жидкокристаллических эластомеров, чувствительных к изменению температуры.

И.Н. Трунова^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Институт проблем машиноведения РАН

ВОЗМУЩЕНИЯ С УГЛОВЫМ МОМЕНТОМ ЭНЕРГИИ В СПЛОШНЫХ И ДИСКРЕТНЫХ СРЕДАХ

В работе развивается формализм энергетической динамики для описания вращательных характеристик локализованных волновых возмущений. Вводится понятие углового момента энергии — интегральной характеристики, аналогичной моменту импульса в механике, но построенной на распределении энергии, а не массы. Показано, что в изотропных средах эта величина сохраняется. На основе аналогии с механикой твердого тела для произвольного возмущения определяется тензор инерции энергии и связанная с ним эффективная угловая скорость, характеризующая вращение энергетического распределения как целого. Подход позволяет единообразно описывать как поступательное движение центра энергии, изученное ранее, так и вращательные степени свободы возмущения. В качестве конкретных примеров рассмотрены квази-бесселев пучок с фазовым вихрем, для которого получена связь углового момента с энергией и топологическим зарядом, и тангенциальная кольцевая волна.

Г.Д. Федотова, С.Д. Ляжков
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

БЫСТРЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В КВАДРАТНОЙ РЕШЁТКЕ С УГЛОВЫМИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯМИ

В данной работе обсуждаются быстрые тепловые процессы в двумерной квадратной кристаллической решётке, совершающей продольные колебания, с учетом угловых взаимодействий частиц. На основе уравнений Лагранжа получена система уравнений движения. Показано, что в линейном приближении равновесные значения и характер затухания кинетических температур существенно зависят от соотношения жесткостей угловой и линейной пружин. Получена зависимость равновесной кинетической температуры от соотношения жесткостей. Исследовано влияние геометрической нелинейности на распределение кинетических температур по различным пространственным направлениям для двумерной кристаллической решетки. Результаты работы могут быть применены для описания неравновесного состояния в двумерных наноматериалах и метаматериалах с угловыми связями, при котором могут наблюдаться одновременно несколько различных температур в системе.

П.С. Елисеева, В.А. Кузькин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ОДНОМЕРНОЙ ЦЕПОЧКИ ЛЕННАРДА-ДЖОНСА

Работа посвящена уравнению состояния одномерной цепочки частиц, взаимодействующих посредством потенциала Леннарда-Джонса при периодических граничных условиях. С использованием преобразования Лапласа в термодинамическом пределе получено уравнение, связывающее тепловое давление, температуру и среднее межчастичное расстояние. Результаты численного моделирования подтверждают хорошее согласие с теоретической кривой давления. Для случая сильно разреженной цепочки, когда среднее расстояние между частицами значительно превышает равновесное, проведено сопоставление трёх зависимостей давления от температуры: полученной в численном эксперименте, рассчитанной по выведенному уравнению состояния и зависимости для идеального газа. Показано, что при низкой плотности потенциал взаимодействия становится пренебрежимо малым, и уравнение состояния одномерной цепочки Леннарда-Джонса переходит в уравнение состояния идеального газа для одномерного случая. Дополнительно исследуется вопрос о возможности фазовых переходов в одномерной системе; анализируются индикаторы плавления, введенные для трёхмерного случая.

А.А. Кедров
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

КИНЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПИСАНИЮ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА В ЛИНЕЙНОЙ ЦЕПОЧКЕ С ДЕФЕКТАМИ МАССЫ

В работе исследуется перенос энергии в линейной цепочке частиц, содержащей точечные дефекты массы. Анализ проводится с использованием двух подходов: прямого

решения уравнений динамики и кинетической теории переноса тепла. В работе получено точное решение уравнений динамики о рассеивании гармонических волн на дефекте, получены аналитические выражения для коэффициентов прохождения и отражения. В приближении волн с медленно меняющимися огибающими выведено уравнение Больцмана, которое затем обобщено на случай систем со случайным распределением дефектов. С помощью численного моделирования определены границы применимости кинетического описания.

Предложенное уравнение Больцмана расширяет возможности анализа линейных цепочек с дефектами, в частности, оно может быть решено в общем виде аналитически. Предложенный подход может быть распространен на другие типы линейных дефектов путем решения соответствующей задачи рассеяния.

М.Н. Панасенко, С.Д. Ляжков
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПЕРЕХОД К ТЕПЛОВОМУ РАВНОВЕСИЮ В ЦЕПОЧКЕ КИРКВУДА КАК МОДЕЛИ МОЛЕКУЛЯРНОЙ СИСТЕМЫ С УГЛЕВОДОРОДНЫМИ СВЯЗЯМИ

Рассматривается одномерная цепочка Кирквуда — зигзагообразная структура, позволяющая с микроскопических позиций описать динамику реальных молекулярных цепей, в частности полиэтилена, где частицы имитируют молекулы метилена CH_2 , а пружины — углеводородные связи.

Исследуется переход к тепловому равновесию, имеющий место в данной цепочке, из неравновесного состояния с нулевыми смещениями и случайными начальными скоростями, соответствующими различным кинетическим температурам.

В линейном (гармоническом) приближении динамика сводится к суперпозиции нормальных мод. Аналитическое решение, полученное с использованием аппарата динамической матрицы и дискретного преобразования Фурье, демонстрирует, что равномерное распределение энергии по степеням свободы не наступает.

Рассмотрено влияние нелинейности на переходный процесс, при котором наблюдается постепенное выравнивание кинетических температур (соответствующих различным степеням свободы), возникающий вследствие обмена энергией между нормальными модами. Исследуется вопрос, как именно происходит процесс выравнивания в зависимости от начального угла между связями, а также соотношений между жесткостями пружин.

Результаты работы служат шагом к пониманию механизмов установления теплового равновесия в низкоразмерных системах необходимо для понимания процессов теплопереноса и диссипации энергии в полимерах. Разработка адекватных модельных представлений позволяет прогнозировать поведение реальных материалов при экстремальных тепловых нагрузках.

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ОДНОМЕРНОЙ ЗАДАЧИ ГАЗОДИНАМИКИ НОСИТЕЛЯ ШРЕДИНГЕРА-ЗАХАРОВА

Рассматриваются численные методы решения системы уравнений газодинамики носителя произвольной природы, состояние которого описывается одномерным кубическим нелинейным уравнением Шредингера (НУШ). Модель аналога газа, уравнения баланса для которого рассматриваются в данном докладе, предлагается именовать «газом Шредингера-Захарова». Система уравнений решена явным и неявным методами конечных разностей (МКР), методом сглаженных частиц (SPH). При реализации метода SPH применяется интегрирование дискретизированных уравнений баланса симплектическими методами. Для каждого численного метода реализован апостериорный метод оценки погрешности через исследование сохранения гамильтониана НУШ и производится проверка на устойчивость. Описываются преимущества и недостатки применения вышеперечисленных численных методов при различных начальных условиях.

А.П. Рюмин, А.А. Сазонов, А.А. Бондаренков, Н.С. Градов, С.В. Хлопин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ МАЛЫХ КОЛЕБАНИЙ СУДНА ДЛЯ ЗАДАЧИ ИНЕРЦИАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ

Рассматривается система дифференциальных уравнений, описывающих малые колебания тела (судна) относительно его метацентра с учетом присутствия дополнительной массы в виде грузов и при её отсутствии. Полученная система уравнений составлена для случая отсутствия данных о водоизмещении и геометрии корпуса судна, в предположении, что метацентр находится на оси симметрии подводного профиля корпуса и масса грузов мала по сравнению с массой судна. Проанализирована применимость известных уравнений для связи метацентрической высоты и водоизмещения в рамках описанных допущений. Выражены моменты инерции дополнительных грузов в системе центра масс. С учетом углов крена/дифферента, угловой скорости и углового ускорения делается вывод о разрешимости системы. Приведено решение системы дифференциальных уравнений, описывающих процесс колебаний и позволяющих определить координаты центра масс судна. Высказаны предложения о применимости полученных результатов при проектировании инерциальной системы определения центра тяжести судов.

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ «ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ В ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И МЕДИЦИНСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ»	2
..	
СЕКЦИЯ «ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД И НАНОСТРУКТУР»	11
..	
СЕКЦИЯ «ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И КОСМОСА»	15
..	
СЕКЦИЯ «ФИЗИКА ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ»	27
СЕКЦИЯ «ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА»	34
СЕКЦИЯ «МЕХАНИКА И ПРОЦЕССЫ УПРАВЛЕНИЯ»	43
..	
СЕКЦИЯ «ГИДРОАЭРОДИНАМИКА, ГОРЕНИЕ И ТЕПЛООБМЕН»	55
СЕКЦИЯ «БИОМЕХАНИКА»	77
СЕКЦИЯ «МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА И КОНВЕРСИИ ЭНЕРГИИ»	83
.	