

НЕДЕЛЯ НАУКИ ФИЗМЕХ

Сборник аннотаций докладов
Всероссийской научной конференции

31 марта – 4 апреля 2025 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

КВАНТОВАЯ ЗАПУТАННОСТЬ СОСТОЯНИЙ КОНЕЧНЫХ ЧАСТИЦ В ПРОЦЕССЕ РОЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННОЙ ПАРЫ И ЭЛЕКТРОНА ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ С СИЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНОЙ

Данная работа содержит теоретическое исследование процесса резонансного рождения электрон-позитронной пары и электрона при столкновении ультрарелятивистских электронов с сильной электромагнитной волной. Процесс рассмотрен в случае резонансов Олейника, заключающихся в выходе промежуточного гамма-кванта на массовую поверхность. В условиях резонанса исходный процесс второго порядка по постоянной тонкой структуры эффективно распадается на два процесса первого порядка: стимулированные внешним полем Комптон эффект и процесс Брейта-Уиллера. Детально изучена резонансная кинематика процесса. Получена резонансная дифференциальная вероятность процесса. Показано, что в случае резонанса наблюдается квантовая запутанность состояний, когда измерение угла вылета электрона (электронной пары) однозначно определяет энергии конечных частиц и угол вылета электронной пары (электрона). Найдены диапазоны частот и интенсивностей сильной электромагнитной волны, при которых резонансная вероятность процесса может существенно (на несколько порядков величины) превышать соответствующую полную вероятность стимулированного внешним полем Комптон-эффекта.

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

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛИРОВАНИЯ СПЕКТРОВ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТРУБКИ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО В РАЗЛИЧНЫХ ПРОГРАММАХ

Рентгенофлуоресцентный анализ позволяет определить количественный состав вещества, что необходимо в металлургии, ювелирном деле, химической, нефтяной и пищевой промышленности, сельском хозяйстве, археологии и др. В настоящее время для проведения количественного рентгенофлуоресцентного анализа используют дорогостоящие стандартные образцы или метод фундаментальных параметров, имеющий невысокую точность. Определение количественного элементного состава образца с помощью программы для расчета прохождения излучения через вещество методом Монте-Карло может обеспечить высокую точность получаемых результатов без применения стандартных образцов.

Для получения спектров флуоресценции методом Монте-Карло необходимо предварительно облучать исследуемый образец рентгеновским излучением с уже известным спектром. От точности спектра рентгеновского излучения зависит конечный результат при расчете спектра флуоресценции, таким образом получение расчетным путем спектра рентгеновской трубки, близкого к реальному представляет актуальную задачу. Наиболее точное моделирование спектра рентгеновской трубки проводится методом Монте-Карло.

При этом могут использоваться различные программы. В нашей работе был проведен расчет спектра прострельной рентгеновской трубки с медным анодом с помощью программ Geant4, MCNP5 и MCC. Полученные результаты сравнительного анализа представлены в данной работе.

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

ФАКТОРЫ ЯДЕРНОЙ МОДИФИКАЦИИ АДРОНОВ В D+D СТОЛКНОВЕНИЯХ ПРИ ЭНЕРГИЯХ $\sqrt{s_{NN}} = 13,5$ И $\sqrt{s_{NN}} = 27$ ГЭВ

В настоящей работе получены факторы ядерной модификации для адронов π^0 , J/ψ , D^\pm в столкновениях ядер дейтерия при энергиях, характерных для планирующегося эксперимента SPD на коллайдере NICA: $\sqrt{s_{NN}} = 13,5$ и $\sqrt{s_{NN}} = 27$ ГэВ. Расчеты проводились как для ядерно модифицированных функций партонного распределения в нуклоне, так и для функций распределения партонов, рассчитанных для свободных нуклонов. Полученные результаты демонстрируют, что факторы ядерной модификации для выбранных адронов, как при использовании ядерно модифицированных функций партонного распределения, так и для функций распределения партонов, рассчитанных для свободных нуклонов, в пределах неопределенности равняются единице. Это указывает на отсутствие эффектов или их незначительное влияние на образование данных адронов в дейтрон-дейтронных столкновениях по сравнению с протон-протонными столкновениями.

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

А.А. Лобанов^{1,2}, Д.М. Ларионова¹, Я.А. Бердников¹, В.И. Никитченко²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I

ПРЕДСКАЗАНИЕ АСИММЕТРИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ПИОНОВ В СТОЛКНОВЕНИЯХ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ПРОТОНОВ С ПОМОЩЬЮ ГЕНЕРАТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Исследование структуры протона остается одной из ключевых задач физики элементарных частиц. Основная сложность заключается в определении вкладов партонов (кварков и глюонов) в полный спин протона. Для количественной оценки спиновых вкладов кварков и глюонов требуется анализ двойных продольных спиновых асимметрий (DLSA), возникающих при столкновениях продольно поляризованных протонов.

Экспериментальное измерение DLSA сопряжено с необходимостью обработки больших объемов экспериментальных данных, которые не всегда могут быть получены в рамках эксперимента. Одним из подходов к решению этой задачи является применение методов генеративного машинного обучения.

В данной работе представлена модель на основе генеративно-состязательной сети, предназначенная для предсказания DLSA в столкновениях продольно поляризованных протонов при энергиях в системе центра масс $\sqrt{s} = 200$ и 510 ГэВ. Продемонстрировано, что предсказания модели с высокой точностью совпадают с результатами эксперимента.

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

РОЖДЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ПИОНОВ В СТОЛКНОВЕНИЯХ ПРОДОЛЬНО ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ПРОТОНОВ ПРИ ЭНЕРГИЯХ 200 И 510 ГЭВ

Изучение двойных продольных спиновых асимметрий применяется для анализа вклада поляризации кварков и глюонов в полный спин протона. Современные экспериментальные данные указывают на то, что поляризация валентных кварков составляет около 30% спина протона. Оставшаяся часть спина определяется поляризацией глюона и угловыми моментами кварков и глюонов.

Данные вклады могут быть оценены с помощью поляризованных функций партонного распределения, которые широко изучаются в современной физике. Одним из способов определения распределения поляризованных функций глюонов (*helicity*) является измерение двойной продольной спиновой асимметрии, возникающая в столкновениях продольно поляризованных протонов

В работе предложена модификация Pythia8 для учета эффектов поляризации сталкивающихся протонов. Приводятся сравнение значений асимметрий заряженных пионов в столкновениях продольно поляризованных протонов, полученных в Pythia8, с экспериментальными значениями, полученными на эксперименте RHENIX. Показано, что расчет согласуется с экспериментом.

Г.В. Филатов¹, П.В. Кравченко², П.А. Кравцов², Б.В. Бочин²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова

ПРЕЦИЗИОННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ КАТОДНЫХ ПРОВОЛОК В СИСТЕМЕ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫХ КАМЕР ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ЗАРЯДОВОГО РАДИУСА ПРОТОНА В УПРУГОМ ЭЛЕКТРОН-ПРОТОННОМ РАССЕЯНИИ.

В Петербургском институте ядерной физики реализуется проект, цель которого прецизионное измерение зарядового радиуса протона в процессе электрон-протонных упругих столкновений. Этот проект имеет важное значение для фундаментальной физики, так как точные значения зарядового радиуса протона могут существенно повлиять на наше понимание структуры материи и взаимодействий на субатомном уровне. Одной из ключевых особенностей методики эксперимента является одновременная регистрация как рассеянного электрона, так и протона отдачи. Это позволяет получить более полную информацию о процессе рассеяния и улучшить точность измерений. Важным компонентом данного эксперимента является система многопроволочных пропорциональных камер высокого давления, предназначенная для регистрации трека рассеянного электрона. Эти камеры должны обеспечить высокую разрешающую способность и позволить восстановить треки частиц. Для обеспечения точного восстановления координат электронного трека разрабатывается комплексная система измерения положения катодных проволок камеры. В рамках проекта был проведён детальный анализ профилей изображений камеры, полученных с помощью системы точных микроскопов. Это включает в себя выделение профилей изображения и оценку ошибок детектирования, что является критически важным для повышения точности эксперимента. В работе рассматриваются методики определения

координат проволок пропорциональных камер, а также проводится анализ распределения профилей каждой из них. Это позволяет минимизировать влияние негативных факторов, таких как провисание анодных/катодных проволочек и их возможная непараллельность расположения. Особое внимание уделяется алгоритму минимизации ошибки определения координат проволок, что напрямую способствует снижению погрешности в определении зарядового радиуса протона в упругом электрон-протонном рассеянии.

С.Д. Комарова, Е.В. Банников, Д.О. Котов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПЛОСКОСТЬ РЕАКЦИИ В P+Au СТОЛКНОВЕНИЯХ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО ПОТОКА

Квантовая хромодинамика (КХД) предсказывает существование фазового перехода от обычной ядерной материи к состоянию свободных кварков и глюонов, которое принято называть кварк-глюонной плазмой (КГП). В лабораторных условиях такой переход изучают путем анализа столкновений ультрарелятивистских ядер (событий). Одной из основных наблюдаемых, характеризующих коллективные эффекты на начальной стадии образования и расширения КГП, является азимутальная анизотропия распределения частиц. Измерение эллиптического потока (v_2), являющегося проявлением коллективной динамики в столкновениях ядер, позволяет определить механизмы образования адронов относительно плоскости реакции, задаваемой направлениями вектора прицельного параметра столкновения (\vec{b}) и оси пучка. Ввиду невозможности измерения направления \vec{b} напрямую в эксперименте, необходимый для измерения v_2 азимутальный угол плоскости реакции оценивается в каждом событии по азимутальным углам зарегистрированных заряженных частиц (φ). Для этой оценки измеряется плоскость события, которую формируют рассчитанные по азимутальным углам заряженных частиц векторы потока $\vec{Q}(\varphi)$ и ось пучка. Степень соответствия между истинной плоскостью реакции и измеренной плоскостью события учитывается с помощью поправки — разрешения плоскости события.

В настоящей работе была оценена плоскость реакции в столкновениях p+Au при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ с помощью измеренной плоскости события. Точность реконструкции плоскости реакции (разрешение плоскости события), была построена как функция от центральности – меры степени перекрытия ядер при столкновении. Из полученной функции видно, что максимальная степень восстановления плоскости реакции наблюдается в самых центральных столкновениях p+Au (0-5%).

Д.А. Трушков, Д.М. Ларионова, Я.А. Бердников
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦЕНТРАЛЬНОСТИ ЯДЕРНЫХ СТОЛКНОВЕНИЙ И ИХ ПРИМЕНИМОСТЬ К ЭКСПЕРИМЕНТУ SPD

Одной из основных геометрических характеристик начальных условий ядро-ядерного столкновения является центральность, которая характеризует степень перекрытия сталкивающихся ядер.

Центральность столкновения может быть теоретически вычислена с помощью прицельного параметра, который характеризует кратчайшее расстояние между центрами

сталкивающихся ядер в поперечной плоскости. Однако, величина прицельного параметра не может быть измерена напрямую в эксперименте, поэтому в экспериментах PHENIX, STAR и ALICE центральность столкновения косвенно определяют по множественности рождённых заряженных частиц. В рамках эксперимента SPD будут реализованы столкновения системы $Al+Al$ при $\sqrt{s_{NN}} = 4$ ГэВ, характеризующиеся малыми множественностями заряженных частиц, поэтому в данном случае измерение центральности стандартным методом является недостаточно точным.

В данной работе представлен обзор существующих методик измерения центральности ядро-ядерных столкновений, а также рассматривается возможность их применения в эксперименте SPD, расположенном на коллайдере NICA.

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

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

ПРОСТОЙ МЕТОД СОВМЕЩЕНИЯ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ПУЧКА ПРОТОНОВ С МИШЕНЬЮ ЦИКЛОТРОНА

Вопрос оптимального совмещения пучка и мишени очень важен с точки зрения стоимости наработки изотопов для медицинских целей.

На основе использования бумажной мишени в работе представлен простой метод визуализации совмещения пучка протонов с мишенью в циклотроне, используемом для наработки изотопа ^{18}F для изготовления радиофармпрепарата, применяемого в ПЭТ томографии.

Хорошо известно, что пучок протонов с достаточной энергией и величиной тока легко прожигает отверстие в бумажной мишени. Форма отверстия и его края определяются геометрическими и энергетическими характеристиками пучка протонов

Суть метода заключается в визуальном совмещении прожжённого отверстия в бумажной мишени и мишени циклотрона.

В данной работе представлены результаты тестов образцов бумаги разной плотности, нужные для выявления оптимальных характеристик образца. Приводится сравнение данных, полученных в ходе тестов, а также делается вывод о наиболее подходящем экземпляре бумаги. Показано сравнение площади поперечного сечения пучка протонов с площадью мишени циклотрона.

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

АННИГИЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННОЙ ПАРЫ В МЮОН-АНТИМЮОН В СИЛЬНОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

Теоретически изучен резонансный процесс аннигиляции электрон-позитронной пары в мюон-антимюонную пару, модифицированный внешним электромагнитным полем.

Такой процесс второго порядка по постоянной тонкой структуры в условиях резонанса эффективно распадается на два процесса первого порядка: стимулированный внешним полем процесс аннигиляции электрона и позитрона и стимулированный внешним полем процесс

Брейта-Уиллера. 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.

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

ВОЗБУЖДЕННЫЕ НЕЙТРАЛЬНЫЕ К-МЕЗОНЫ В ЯДРО-ЯДЕРНЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ

Одним из актуальных направлений исследований в физике элементарных частиц является изучение свойств Кварк-Глюонной Плазмы (КГП) – экзотического состояния вещества, в котором кварки и глюоны не связаны в адроны. Для достижения данного состояния, материя должна обладать необычайно большой плотностью энергии, которая может быть достигнута в столкновениях тяжелых ультрарелятивистских ядер.

Свойства КГП можно изучать, измеряя различные характеристики частиц, рождающихся в столкновениях ядер. Одной из таких характеристик является инвариантный спектр частиц по поперечному импульсу p_T . Помимо этого, информацию о свойствах КГП можно получить, измеряя факторы ядерной модификации.

Особенный интерес представляет изучение образования частиц, содержащих странный кварк, таких как $K^*(892)$, который представляет собой возбужденное состояние K^0 -мезона.

В настоящей работе представлено описание методики измерения инвариантного p_T спектра и факторов ядерной модификации R_{AB} и R_{CP} в столкновениях Au+Au при энергии $\sqrt{s_{NN}}=200$ ГэВ в диапазоне ($0.9 < p_T < 6.5$) ГэВ/с для разных классов событий по центральности. Для выполнения данной работы был разработан алгоритм, позволяющий восстановить сигнал $K^*(892)$ мезона и оценить неопределенности полученных результатов.

К.Н. Басиров, Е.В. Банников, Я.А. Бердников
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ КВАРКОВ И ГЛЮОНОВ В Cu+Au СТОЛКНОВЕНИЯХ ПРИ ЭНЕРГИИ $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГЭВ

Одной из важнейших величин, которые определяют особенности характеристик частиц, рождающихся в ультрарелятивистских взаимодействиях ядер атомов, являются энергетические потери партонов (кварков и глюонов) в кварк-глюонной системе, образующейся в процессе столкновения ядер.

В данной работе получены оценки потери энергии партонов $S_{loss}(p_T, \Delta\varphi)$ в зависимости от азимутального угла вылета π^0 -мезонов относительно плоскости реакции и поперечного импульса p_T в разных центральных столкновениях Cu+Au при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ.

Установлено, что подавление рождения π^0 -мезонов (зависящее от величины $S_{loss}(p_T, \Delta\varphi)$) в периферических столкновениях при азимутальном угле $\Delta\varphi = \pi/2$ (перпендикулярно плоскости реакции) примерно в ~ 1.8 раз больше, чем при $\Delta\varphi = 0$ (в плоскости реакции). При этом средняя доля потери энергии партонов может достигать $\sim 17,5\%$ от величины их начальной энергии. Данные величины, полученные в системе столкновений Cu+Au, оказались меньше аналогичных значений, измеренных во

взаимодействиях Au+Au. Это расхождение может быть объяснено разными средними длинами пути партонов в образующейся в столкновениях ядер среде: чем больше размеры среды, тем больше доля потери энергии партонов.

И.И. Борисов, Д.О. Котов, Е.В. Банников
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ ПАРТОНОВ В U+U ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ПРИ ЭНЕРГИИ $\sqrt{s_{NN}} = 193$ ГЭВ

В столкновениях ультррелятивистских тяжелых ядер (в частности, в столкновениях ядер урана при энергии в системе центра масс $\sqrt{s_{NN}} = 193$ ГЭВ) плотность энергии может достигать и превышать значение 1 ГЭВ/фм^3 , что приводит к переходу ядерной материи в другое агрегатное состояние – кварк-глюонную плазму (КГП). Кварки и глюоны, из которых состоят адроны, при более низких значениях плотности энергии находятся в связанном состоянии (конфайнмент), в то время как КГП характеризуется отсутствием конфайнмента. Образование КГП сопровождается эффектом гашения адронных струй, которые возникают из-за адронизации высокоэнергетических партонов (в столкновениях, где КГП не возникает, адронные струи не ослабляются средой – не гасятся). По эффекту гашения адронных струй можно судить о потерях энергии партонов, прошедших через среду КГП.

Чтобы охарактеризовать подавление рождения каких-то частиц по сравнению с протон-протонными соударениями (при тех же значениях энергии и поперечного импульса), используют физическую величину, называемую фактором ядерной модификации. Факторы ядерной модификации связаны с другой физической величиной – относительной потерей энергии. Она характеризует потерю энергии адронов (а, следовательно, и породивших их партонов) в ядро-ядерном столкновении по сравнению с протон-протонным соударением. Следует отметить, что область перекрытия сталкивающихся ядер сферически асимметрична, вследствие чего партоны проходят неодинаковое расстояние внутри среды КГП. Это приводит к наличию азимутальной зависимости у факторов ядерной модификации и относительной потери энергии.

В данной работе был проведен расчет величины относительной потери энергии партонов с учетом ее азимутальной зависимости в системе столкновений U+U при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 193$ ГЭВ.

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

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИЛАКТИДОВ В КАЧЕСТВЕ ОСНОВНОГО КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ФИЛЬТРУЮЩИХ МОДУЛЕЙ

Исследование направлено на анализ возможности применения полилактидов в качестве основного конструкционного материала фильтрующих модулей применяемых при воздушной радиационной разведки (ВРР).

Методология исследования включает эксперимент, анализ, сравнение и обобщение.

Целью работы является подтверждение возможности применения пластика PLA (PolyLactic Acid) в качестве дешёвого, легко утилизируемого конструктивного материала для фильтрующих модулей, применяемых при ВРР.

Для достижения целей работы был проведён эксперимент, в ходе которого модуль, выполненный из PLA, был помещён в условия, близки к эксплуатационным, на время, превосходящие целевое время работы фильтрующего модуля. Были сопоставлены прочностные характеристики свежееизготовленного модуля и модуля, эксплуатируемого в целевых условиях. Изменений прочностных характеристик обнаружено не было.

Далее, был проведён второй эксперимент, в ходе которого модуль, выполненный из PLA, был разобран и подвергнут процессу утилизации. Не разлагаемые конструктивные элементы были помещены в герметичные контейнеры, разлагаемые элементы были помещены в утилизационную установку. Общий объём пространства, занимаемого модулем, удалось сократить более чем на порядок.

В результате исследования подтверждены прочностные характеристики пластика PLA в качестве конструктивного материала для систем радиационной разведки, и проверена возможность утилизации фильтрующего модуля из пластика PLA.

СЕКЦИЯ «ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД И НАНОСТРУКТУР»

А.И. Брулев, Р.М. Дубровин, В.Ю. Давыдов, Р.В. Писарев
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА НА МАГНОНАХ ПРИ СПИН- ПЕРЕОРИЕНТАЦИОННОМ ПЕРЕХОДЕ $\Gamma_2 \leftrightarrow \Gamma_4$ В РЕДКОЗЕМЕЛЬНОМ ОРТОФЕРРИТЕ

Ортоферриты $RFeO_3$ (R – редкоземельный ион) являются большой группой антиферромагнетиков, кристаллизующихся в орторомбической пространственной группе $D2h16$ ($Z=4$). В этих материалах обнаружено богатое разнообразие интригующих магнитных и оптических свойств, многие из которых связаны с обменным взаимодействием между железной Fe и редкоземельной R подсистемами. Это взаимодействие приводит, в частности, к большому разнообразию магнитных структур и спин-ориентационных фазовых переходов между ними. В последнее время особый интерес вызывают исследования спиновой динамики антиферромагнитной железной подсистемы. В ортоферритах, наряду с изотропным гейзенберговским обменным взаимодействием, имеет место также анизотропное взаимодействие Дзялошинского-Мория. В результате спектр акустических магнитных возбуждений ортоферритов оказывается расщепленным квази-ферромагнитную и квази-антиферромагнитную.

В работе представлено экспериментальное исследование эволюции спиновой динамики в широком интервале температур, включающем спин-ориентационный переход из магнитной структуры Γ_2 в Γ_4 через промежуточную фазу Γ_{24} . Исследование проводилось с использованием поляризационной рамановской спектроскопии в монокристалле ортоферрита $(Sm_{0.5}Tb_{0.5})FeO_3$. При спин-ориентационном переходе спины ионов железа плавно меняют свое направление между орторомбическими осями a и c . Анализ спектров позволил выявить изменения правил отбора по поляризациям для рассеяния света на квази-ферромагнитной и квази-антиферромагнитной модах при спин-ориентационном переходе. Экспериментально обнаружено магнитоупругое взаимодействие для низкочастотной мягкой квази-ферромагнитной моды. Исследованы особенности динамики решетки, обусловленные спин-ориентационным переходом.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №24–72–00106.

А.Г. Бузыкин, К.В. Стародубцева, Д.Д. Карцев, М.И. Морозов
Университет ИТМО

МИКРОСТРУКТУРИРОВАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЁНОК GPOSS-PDMS МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ

Тенденция к миниатюризации объекта исследования в задачах химического синтеза и анализа является одной из ключевых в течение последних 10 лет. Микроструктурированные поверхности с заданными параметрами смачиваемости представляют особый интерес в силу своих омнифобно-омнифильных свойств, позволяющих распределять аналит по поверхности в соответствии с заданными параметрами. В данной работе предложен метод лазерной абляции для формирования микроструктур на тонкоплёночных покрытиях из GPOSS-PDMS, нанесённых на стеклянные подложки. Процесс включает три основных этапа: нанесение полимерного слоя методом спин-коатинга, фотополимеризацию для закрепления структуры и лазерную обработку для создания микрорельефа. Лазерное воздействие осуществляется с использованием системы, работающей в режиме последовательного сканирования

векторного изображения паттерна. Оптимизация параметров лазерного излучения обеспечивает высокое пространственное разрешение формирования микропаттернов без значительного повреждения подложки. Результатом выполненной работы является паттерн из абляционных следов с контролируемым размером, что позволяет формировать поверхности с заданными свойствами. Метод исключает необходимость использования традиционной фотолитографии, что делает процесс более гибким, обеспечивая вариативность паттерна, и снижает экологическую нагрузку.

А.Г. Гварамия^{1,2}, Я.А. Кузнецова², С.В. Некрасов², Ю.Г. Кусраев²
¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ОПТИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ СПИНОВ В КВАНТОВЫХ ЯМАХ И КВАНТОВЫХ ЯМА-ТОЧКАХ (In,Ga)As/GaAs

Квантовые яма-точки (КЯТ) представляют собой промежуточный тип наноструктур между квантовыми ямами (КЯ) и квантовыми точками (КТ), который сочетает преимущества обоих типов структур. Если в КЯ после трёх слоев уже начинаются структурные дефекты, то структуры КЯТ можно выращивать до 16 слоев и более без значительного накопления напряжений и образования дефектов. Также для структур с КЯТ характерна большая плотность энергетических состояний в сравнении с КТ. Приведённые выше обстоятельства приводят к увеличению коэффициента оптического усиления для структур с КЯТ в сравнении со структурами с КЯ и КТ.

В ходе работы были получены спектры фотолюминесценции (ФЛ) и поляризации КЯТ и КЯ. Структуры исследовались методом оптической ориентации. Была измерена зависимость степени циркулярной поляризации от мощности лазера накачки как в КЯТ, так и в КЯ. При приложении магнитного поля в геометрии Фойгта наблюдался эффект Ханле. Полученные из кривых Ханле данные свидетельствуют об уменьшении времени жизни спина в КЯТ в сравнении с КЯ. Было установлено, что структуры заряжены резидентными носителями. Была обнаружена встроенная линейная поляризация, эффект оптического выстраивания при этом отсутствовал.

В результате исследования мы делаем вывод, что спиновые свойства образцов с КЯТ и КЯ (In,Ga)As/GaAs во многом схожи между собой и напоминают свойства КТ, имеющих резидентные носители заряда на основном энергетическом состоянии.

В.Н. Загороднева, Е.Ю. Лобанова, Е.Ф. Канафиева, Д.С. Кузин, И.М. Мамаев
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОПЕРЕЧНОЙ ПРОВОДИМОСТИ СЛОЕВ CaF₂ И ПРОДОЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТИ СЛОЕВ WS₂ И WSe₂

Интерес к микро- и наноэлектронике сохраняется на протяжении десятилетий. В настоящее время ведутся активные поиски и исследования перспективных материалов. В их число входят фторид кальция, который изучается более тридцати лет, и дихалькогениды переходных металлов: MoS₂, MoSe₂, WS₂ и WSe₂.

Полевые транзисторы на основе CaF₂ и MoS₂ продемонстрировали высокую эффективность CaF₂ как изолирующего материала. Это стало стимулом для дальнейшего

изучения электрических свойств эпитаксиально выращиваемого на кремнии CaF_2 с целью его использования в качестве подзатворного диэлектрика. Сверхтонкие слои дихалькогенидов с регулируемой шириной запрещенной зоны и высокой подвижностью носителей востребованы для маломощных устройств и могут использоваться в качестве двумерных каналов.

Настоящая работа посвящена исследованию зависимости поперечной проводимости слоев CaF_2 от температуры предостового отжига и продольной проводимости слоев WS_2 и WSe_2 от плотности энергии лазера на мишени в процессе роста структур. Образцы дихалькогенидов были получены методом импульсного лазерного осаждения на подложках $\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$, а структуры с фторидом кальция – методом молекулярно-лучевой эпитаксии на умеренно легированном n-Si. В результате работы показано, что электрофизические свойства слоев упомянутых выше материалов могут быть существенно улучшены путем подбора технологических условий роста.

Е.Д. Поленок^{1,2}, В.И. Ушанов², В.В. Чалдышев²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

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

³Институт физики полупроводников СО РАН им. А.В. Ржанова

ЛОКАЛИЗОВАННЫЙ ПЛАЗМОННЫЙ РЕЗОНАНС НАНОЧАСТИЦ VI В МАТРИЦЕ GaAs, УСИЛЕННЫЙ БРЭГГОВСКОЙ ДИФРАКЦИЕЙ

Локализованный поверхностный плазмонный резонанс представляет интерес для современной науки из-за ряда его уникальных свойств, среди которых локализация электрического поля световой волны в нанометровом масштабе. В полупроводниках технологии создания наночастиц из традиционных плазмонных материалов на данный момент не существует, из-за чего возникает спрос на альтернативные материалы.

В рамках данной работы будет рассмотрен многообещающий плазмонный материал для полупроводников группы $A_{III}B_V$ – висмут. Для усиления сигнала мы применили особую конфигурацию структуры: периодическое расположение квазидвумерных дельта-слоев наночастиц VI в матрице GaAs. Образец, состоящий из 24 дельта-слоев наночастиц VI в матрице GaAs был выращен методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Были проведены электронно-микроскопические и рентгеноструктурные исследования, в которых определены геометрические параметры системы. Получены спектры оптического отражения образца в окне прозрачности GaAs при различных углах падения света. Проведено численное моделирование, определены параметры модели, адекватно описывающей результаты эксперимента.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ и СПб НФ № 24-22-20012.

К.В. Ненашева¹, А.Н. Терпицкий²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Санкт-Петербургский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН

ОПТИЧЕСКАЯ НЕЛИНЕЙНОСТЬ В ДЕНДРИТНЫХ СТРУКТУРАХ

Среди металлических наноструктур особое место занимают дендритные из-за наличия в них большого количества «горячих точек» – тонких металлических «антенн»,

обеспечивающих многократное увеличение электрического поля вблизи дендритов. Это свойство дендритов может быть эффективно использовано в катализе, поверхностно усиленном комбинационном рассеянии, люминесценции и нелинейной оптике. Следует отметить, что усиление поля зависит от параметров дендритов и степени разветвленности структуры. Металлические дендритные структуры можно выращивать в стеклах с помощью ионного обмена и последующего приложения электрического напряжения. Формирование дендритов внутри стекла обеспечивает устойчивость образующихся структур.

В задачи настоящей работы входило получение и изучение дендритов, сформированных в стекле после ионного обмена серебро-натрий. Дендриты формируются в ионообменном серебросодержащем приповерхностном слое вследствие приложения электрического напряжения к тонкопленочным электродам, нанесенным на ту же поверхность стекла. При использовании этой методики нет необходимости использования жидких реагентов и высокотехнологичного оборудования. В качестве образцов были взяты натриево-силикатные стекла после ионного обмена в расплаве солей $\text{NaNO}_3/\text{AgNO}_3$ при температуре 320°C , время обмена 20 минут. Параметры роста дендритов: напряжение 320-400 В, температура $260\text{-}270^\circ\text{C}$. Были измерены спектры оптического поглощения для областей с дендритами и без. Также были проведены измерения сигнала второй оптической гармоники в образцах с дендритами и исследованы зависимости этого сигнала от поляризации фундаментальной волны при нормальном падении.

А.Ю. Мороз¹, В.П. Каасик^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Санкт-Петербургский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СТЕКОЛ, СОДЕРЖАЩИХ Ag^+ И Ce^{3+}

Исследовано влияние термоэлектрической поляризации на фоточувствительное стекло. В экспериментах использовались стекла ФК и ЛК112, которые обладают светочувствительностью за счет легирования ионами Ag^+ и Ce^{3+} . Основной реакцией, протекающей в этих стеклах под действием УФ излучения, является фотоионизация облученной области, в которой протекает реакция $\text{Ce}^{3+} + h\nu + \text{Ag}^+ \rightarrow \text{Ce}^{4+} + \text{Ag}^0$. Таким образом, фотон «выбивает» электрон атома церия, который захватывается ионом серебра.

После облучения стекло подвергалось термической обработке при 500°C в течение 60 мин., вследствие этого, атомы серебра кластеризуются. Затем при вторичной термообработке при 600°C в течение 40 мин. кластеры серебра выступают в качестве зародышей кристаллизации силиката лития, Li_2SiO_3 , при фазовом распаде стекла. В результате облученные области стекла оказываются закристаллизованными.

При исследовании влияния поляризации, разогретое до температуры активации ионной проводимости (300°C) стекло помещалось между двумя электродами, на которые подавалось постоянное электрическое напряжение 500 В. Далее проводилось УФ облучение образца и два этапа термообработки. Для облучения использовался светодиод, излучающий на длине волны 280 нм. Длительность облучения составляла 30 мин.

Нетривиальным результатом выполненных экспериментов стало понижение температуры стеклования стекла T_g на $\sim 30^\circ\text{C}$ относительно исходного стекла. Авторы связывают этот эффект с изменением состава приповерхностной области стекла в результате поляризации. Ранее подобных эффектов при поляризации стекол не наблюдалось. Также обнаружено изменение условий кристаллизации поляризованной области стекла.

Ч. Цуй¹, Г. Кан², В.В. Журихина^{1,2}, С.А. Щербак^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Санкт-Петербургский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН

ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ГАРМОНИКИ В ИОНООБМЕННОМ СТЕКЛЕ

Применение стекол в нелинейной оптике сильно ограничено центральной симметрией этих материалов. Один из методов, позволяющих снять изотропию стекла, основан на сочетании ионного обмена (ИО), который является одной из наиболее популярных методик модификации стекол, и последующего приложения постоянного электрического напряжения при комнатной температуре. После ИО в стеклах присутствует градиент концентрации, обуславливающий выраженное пространственное распределение диэлектрической проницаемости и проводимости. В таких градиентных системах при приложении электрического поля возникает эффект максвелл-вагнеровской (МВ) поляризации, и на интерфейсе «градиентный слой-объем» накапливается неравновесный заряд. Электростатическое поле данного заряда формирует эффективную квадратичную восприимчивость в модифицированном слое (эффект EFISH). Температура ионного обмена, являясь ключевым технологическим фактором, не только регулирует кинетику процесса, но и существенно влияет на последующее формирование пространственного распределения МВ заряда и на НЛО свойства. В настоящей работе экспериментально исследовано влияние температуры и продолжительности натрий-калиевого ИО в натриево-силикатном стекле на накопление МВ заряда и НЛО свойства. Результаты экспериментов проиллюстрированы моделированием процессов диффузии и накопления заряда МВ, что позволяет обеспечить оптимизацию технологии получения функционализированных стеклянных материалов.

Д.А. Стрижкин¹, К.П. Карасев^{1,2}, П.А. Карасев¹

¹Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого

²Санкт-Петербургский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН

ВОЗМОЖНОСТИ МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ОБЛУЧЕНИЯ КЛАСТЕРНЫМИ ИОНАМИ

Облучение ускоренными ионами – распространенный метод модификации поверхности и приповерхностных слоев твердых тел. Его основным преимуществом является возможность контролировать получаемые свойства мишени, варьируя такие параметры, как тип ионов, их энергия и ток, угол падения и т.д. В настоящее время применяется облучение как одноатомными частицами, так и ионизованными агломератами, т.н. кластерами. Особый интерес представляет именно облучение кластерными ионами, так как при этом происходят коллективные взаимодействия большого количества атомов в малом объеме. Для исследования быстрых процессов (время первичного взаимодействия ускоренного иона с мишенью составляет несколько пикосекунд) удобно использовать метод молекулярной динамики (МД). Его суть заключается в численном решении уравнений движения всех атомов системы с заданным временным шагом. За соответствие результатов МД модели событиям, происходящим в эксперименте, отвечает в первую очередь выбранный потенциал, при помощи которого описывается взаимодействие частиц. В настоящей работе разработан подход к описанию взаимодействия кластерного иона с поверхностью, описаны алгоритмы анализа параметров получающихся структур и распыления. Моделирование было выполнено при помощи свободно распространяемого пакета LAMMPS. Исследовалось влияние

азимутального и зенитного углов падения фуллерена с энергией 8 кэВ на открытую поверхность монокристалла кремния. Рассматривались следующие параметры: количество распыленных частиц, модификация рельефа поверхности и параметры образующегося кратера. Сравнивались описания, получаемые при использовании потенциалов Tersoff/ZBL и Stillinger-Weber/ZBL для пары взаимодействия Si-Si.

Г.И. Шелых¹, Н.И. Руль^{1,2}, К.Б. Таранец^{1,2}, Н.Т. Баграев²
¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

АНДРЕЕВСКИЕ МОЛЕКУЛЫ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ЭНЕРГИЕЙ.

Последние несколько лет интенсивно обсуждаются способы создания и исследования андреевских молекулярных состояний. Андреевская молекула (АМ) представляет собой связанное состояние двух джозефсоновских барьеров, обеспечивающих, в свою очередь, создание андреевских граничных состояний за счет многократного андреевского отражения (МАО). В таком случае, спектр АМ меняется в зависимости от объекта исследования, сохраняя некоторые общие черты. Хотя андреевское граничное состояние, возникающее в джозефсоновском переходе за счет МАО, обусловлено наличием слева и справа сверхпроводящей щели, тем не менее функцию барьера, аналогичную сверхпроводящей щели, может выполнять не только сверхпроводник, но и любой потенциальный барьер, существующий в исследуемой структуре. Ключевая особенность такого состояния заключается в необходимости наличия связи двух барьеров, ограничивающих области квантовой интерференции одиночных носителей вследствие МАО.

В данной работе демонстрируется, что в качестве джозефсоновских барьеров целесообразно использовать цепочки, состоящие из дипольных центров с отрицательной корреляционной энергией, что способствует подавлению электрон-электронного взаимодействия и тем самым позволяет изучать макроскопические квантовые явления, в частности, спин-зависимую квантовую интерференцию в условиях МАО при высоких температурах. Показано, что в АМ, содержащих одиночные носители, наличие спин-орбитального взаимодействия приводит к наблюдению оптической версии МАО.

Таким образом, реализация условий бездиссипативного транспорта в АМ открывает широкие возможности для создания оптических генераторов нового типа на основе МАО, спектры индуцированного излучения которых не ограничиваются параметрами зонной структуры материала.

В.Е. Ремеле^{1,2}, М.В. Кузьмин¹
¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
²СПбГЭТУ «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ОЖЕ-СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ГРАНИЦ РАЗДЕЛА И МОРФОЛОГИИ ТОНКИХ ПЛЕНОК

Электронная Оже-спектроскопия (ЭОС) является одним из наиболее часто используемых методов исследования поверхности и тонких пленок. С его помощью можно проводить не только химический анализ верхних слоев рассматриваемого образца, но

получать информацию об особенностях формирования границ раздела тонкая пленка – подложка, анализируя концентрационные зависимости интенсивности Оже-пиков от покрытия.

Описанный выше анализ ранее производился преимущественно на качественном уровне – о состоянии поверхности судили по виду зависимости и по некоторым ее характерным особенностям. Количественный же анализ морфологии проводился только для пленок, растущих послойно, в частности, в случае пленочных систем с химически резкими границами раздела.

В данной работе предлагается общий подход, посредством которого можно количественно исследовать особенности морфологии систем, в том числе с реакционно – способными границами раздела, которые растут по одному из трех классических механизмов: послойному, островковому и Странского – Крастанова.

И.С. Рачеев^{1,2}, М.В. Годяев^{1,2}, И.С. Тетенькин^{1,2}, В.Е. Кабурнеев^{1,2}
¹СПбГЭТУ «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина)
²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

ОСОБЕННОСТИ РОСТА И ПОСТРОСТОВЫХ ОПЕРАЦИЙ ОБЪЕМНЫХ КРИСТАЛЛОВ Ga₂O₃

Оксид галлия является перспективным ультраширокозонным ($\Delta E_g = 4,4-5,3$ эВ) полупроводником нового поколения. Особый интерес представляют объемные кристаллы моноклинной сингонии β -Ga₂O₃. Основным способом их получения является рост по методу Чохральского с возможностью внедрения в промышленность. Одной из сложностей влияющей на качество прозрачных кристаллов в этом методе является их поглощение в ИК диапазоне, которое может приводить к дополнительному разогреву и нарушению цилиндрической симметрии. Наиболее интересными для эпитаксии являются гладкие подложечные кристаллы β -Ga₂O₃, ориентированные основной плоскостью спайности (100). Их довольно легко получить выкалыванием. Скол (100) отличает гладкость и высокая вертикальная подвижность электронов относительно других плоскостей. Однако, поверхность (100) характеризуются микронными ступенями, усложняющими эпитаксию на этой плоскости. Из-за этого подложки (100) β -Ga₂O₃ далеки от непосредственного применения в полупроводниковых структурах.

В нашей работе рассмотрены вопросы, связанные с ростом и постростовыми операциями оксида галлия. С помощью моделирования процесса роста мы впервые демонстрируем влияние поглощения β -Ga₂O₃ в ИК диапазоне на форму фронта кристаллизации. Чтобы решить проблему поверхностных ступеней, было исследовано применение различных кислот и щелочей для химической полировки кристалла. Для изучения электрических свойств кристалла требуются нанесения контактов. Были определены оптимальные режимы термически-вакуумного напыления алюминиево-титановых контактов на подложки β -Ga₂O₃ и последующего их отжига.

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЁТ ПЛОТНОСТИ СОСТОЯНИЙ И КОНЦЕНТРАЦИИ ДЫРОК В ВАЛЕНТНОЙ ЗОНЕ КУБИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ

Моделирование современных полупроводниковых приборов требует достаточно точного расчёта концентрации носителей заряда в приборной гетероструктуре. Самым простым и наиболее часто применяемым на практике решением является использование приближения эффективных масс, предполагающее параболическую зависимость энергии носителей от волнового вектора и допускающее аналитическое выражение для плотности их состояний. Однако в кубических полупроводниках из-за непараболичности и сильной гофрировки валентной зоны такое приближение оказывается слишком грубым, приводя к большой погрешности предсказываемой концентрации дырок. Предсказательность можно улучшить, используя точный энергетический спектр дырок, полученный с помощью $k \cdot r$ -приближения. В данной работе развивается именно такой подход. Вычислительной особенностью предлагаемого подхода является триангуляция поверхности постоянной энергии, позволяющая находить компромисс между временем расчёта и точностью результата.

Особенно актуально использование предлагаемого подхода для анализа ряда практически важных полупроводников (Si, GaAs и др.), в которых непараболичность и гофрировка энергетической структуры зависят, в том числе от приложенных упругих напряжений. За основу используемой численной модели был взят 6×6 гамильтониан Латтинжера-Кона, учитывающий наличие упругих напряжений. Рассмотрены деформации, допускающие аналитические решения кубического секулярного уравнения, для валентных подзон тяжёлых, лёгких и спин-отщеплённых дырок. Интегрирование по изоэнергетическим поверхностям с различной энергией позволяет получить зависимость искомой плотности состояний от энергии.

В работе проводится сравнение результатов расчёта плотности состояний и концентраций, полученных при использовании предлагаемого подхода, метода эффективных масс и аксиального приближения.

А.А. Горшков, Я.А. Могунов, А.М. Калашникова
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

ПЕРВОЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ДИНАМИКИ НАМАГНИЧЕННОСТИ В МАГНИТНОЙ МАХ-ФАЗЕ

МАХ-фазы – семейство слоистых металлических керамик с постоянной решётки между слоями свыше 1 нм, что приводит к значительным различиям физических свойств в плоскости слоя и между ними. У магнитных МАХ-фаз эти особенности обуславливают формирование разнообразных типов магнитного упорядочения (ферро- и антиферромагнитного, спирального). Благодаря такому сочетанию свойств, тонкие плёнки магнитных МАХ-фаз являются перспективными материалами для спинтроники и магнитоакустики. В последние годы с этой целью исследуется динамика намагниченности в схожих материалах – ван-дер-Ваальсовых магнетиках, однако динамические свойства МАХ-фаз до сих пор оставались неизученными.

В данной работе исследовалась динамика намагниченности в тонкой плёнке (40 нм) магнитной МАХ-фазы $(\text{Cr}_{0.5}\text{Mn}_{0.5})_2\text{GaS}$, характеризующейся неколлинеарной магнитной структурой и высокой намагниченностью насыщения. Использовался метод фемтосекундной накачки-зондирования с магнитооптическим детектированием по меридиональному эффекту Керра. Измерения проводились в диапазоне температур от 66 К до 294 К и при внешних магнитных полях до 300 мТ, приложенных в плоскости слоёв изучаемой МАХ-фазы.

В эксперименте выявлено два проявления динамики намагниченности: сверхбыстрое размагничивание с характерным временем ~ 150 пс и прецессия намагниченности в диапазоне частот от 5 до 20 ГГц. Оба явления исчезают при приближении к температуре фазового перехода в парамагнитное состояние (~ 220 К), что подтверждает их магнитную природу и является первой экспериментальной демонстрацией магнитной динамики в МАХ-фазах.

А.С. Некрасов, В.В. Золотарев, И.В. Орешко, А.Е. Казакова, Н.А. Пихтин
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

ПОВЕРХНОСТНО-ИЗЛУЧАЮЩИЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ЛАЗЕР С РЕЗОНАТОРОМ НА ОСНОВЕ ДВУМЕРНОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА

Мощные полупроводниковые лазеры на основе двойных гетероструктур с латеральным волноводом имеют сильную ассиметричную расходимость лазерного пучка в дальней зоне и многомодовый режим работы, что усложняет их применение. Данную проблему можно решить увеличением апертуры излучения вдоль осей излучения, при этом вывод излучения через поверхность лазерного чипа. Сформировав в слоях гетероструктуры двумерный фотонный кристалл, обеспечивающий распределённую обратную связь в плоскости волноводного слоя, можно добиться наличия вывода лазерного излучения перпендикулярно поверхности чипа.

В данной работе проводились теоретические исследования модового состава резонатора лазера на основе двумерного фотонного кристалла с квадратной решёткой конечного размера. Фотонный кристалл был сформирован воздушными отверстиями различной геометрической формы в слоях гетероструктуры AlGaAs/GaAs/InGaAs, излучающей на длине волны порядка 1040 нм. Мы провели сравнение излучательных и пороговых характеристик лазеров, сформированных на основе двух дизайнов гетероструктур: зарощенный фотонный кристалл сформирован в волноводном слое и поверхностный фотонный кристалл сформирован в эмиттерном слое. Расчёты продемонстрировали наличие экстремумов в зависимостях полезной выходной мощности, выходящей перпендикулярно поверхности чипа, и паразитной выходной мощности, распространяющейся латерально в плоскости волновода гетероструктуры за пределы фотонного кристалла, от фактора заполнения фотонного кристалла. Положения экстремумов зависят от дизайна гетероструктуры и геометрической формы отверстий, формирующих фотонный кристалл, что позволяет оптимизировать дизайн фотонного кристалла в лазерной структуре.

Работа выполнена при поддержке РФФ № 23-72-01038

ФРАКТАЛЬНЫЙ ХАРАКТЕР ТЕМПЕРАТУРНЫХ СВОЙСТВ НАНОСТРУКТУР

Целью исследования, представленного в работе, являлось установление влияния фрактальной размерности на коэффициент объёмного расширения у фрактальных структур и наноструктур, находящихся в полостях диэлектрических нанопористых матрицах, экспериментальное исследование физических свойств которых было проделано в работах с сегнетовой солью. Полученный результат $\beta = d\alpha$ применён к известным нанопористым диэлектрическим матрицам (опалам, цеолитам). Структура опала – пример фрактальной структуры, образованной при вложении кремнеземных глобул друг в друга. Упорядоченная гранецентрированная кубическая (ГЦК) структура опала образована плотно упакованными сферами с радиусами ~ 100 нм. Коэффициент объёмного расширения для опала составляет $\beta = 2,33\alpha$. Фрактальную размерность имеют не только нанопористые матрицы, но и ансамбли идентичных упорядоченно расположенных наночастиц вещества-«гостя», которое можно диспергировать в системе полостей и каналов регулярных пористых диэлектрических матриц цеолитов и опалов. Для наночастиц расположенных в α -полостях цеолита А, коэффициент объёмного расширения $\beta = 1,1\alpha$. Полученные результаты показывают, что коэффициенты объёмного расширения как для нанопористых матриц, так и для структур вещества-«гостя», находящегося в полостях и каналах этих матриц, оказываются отличными от коэффициентов массивных трёхмерных объектов.

М.Н. Голубев¹, П.А. Кислицын², А.В. Иванчик²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

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

СВЕРХТОНКИЕ ПЕРЕХОДЫ В АТОМАХ И ВРАЩАТЕЛЬНЫЕ ПЕРЕХОДЫ В МОЛЕКУЛАХ РАННЕЙ ВСЕЛЕННОЙ КАК ВОЗМОЖНЫЙ ИСТОЧНИК СПЕКТРАЛЬНЫХ ИСКАЖЕНИЙ РЕЛИКТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В скором будущем ожидается измерение влияния сверхтонкого перехода основного энергетического уровня атома водорода на спектр реликтового излучения, что позволит измерить температуру Вселенной в эпоху Темных Веков, в свою очередь это позволит определить наличие экзотических источников нагрева в ранней Вселенной, например, первичных черных дыр, и уточнит время образования первых звезд и галактик. В связи с этим встает вопрос, какие элементы могут вносить подобные искажения и насколько сильно. В работе представлен систематический анализ способности других атомов и молекул искажать спектр реликтового излучения. В качестве потенциальных кандидатов было исследовано 5 атомов, 6 молекул, наиболее распространенных в первичной среде, и их ионы. Наибольшее влияние должен оказывать сверхтонкий переход в дейтерии, однако, по сравнению с водородом эффект будет на 6 порядков слабее. Так же рассчитаны диапазоны частот для всех рассматриваемых переходов, в которых они будут наблюдаться.

Д.К. Романов¹, А.В. Бобаков², А.Ю. Кириченко^{2,3}, А.В. Карпова²,
Ю.А. Шибанов², Д.А. Зюзин²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

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

³Институт астрономии, Национальный автономный университет Мексики

ИССЛЕДОВАНИЕ КАНДИДАТА В МИЛЛИСЕКУНДНЫЕ ПУЛЬСАРЫ В ТЕСНОЙ ДВОЙНОЙ ЗВЕЗДНОЙ СИСТЕМЕ, СВЯЗАННОГО С ГАММА-ИСТОЧНИКОМ 4FGL J2054.2+6904

Неотождествленный гамма-источник 4FGL J2054.2+6904, открытый обсерваторией Fermi, был недавно идентифицирован как возможный кандидат в миллисекундные пульсары в тесной двойной звездной системе. Для подтверждения его природы были проведены оптические фотометрические наблюдения с помощью 2.1-метрового телескопа OAN-SPM в широкополосных фильтрах V и R на протяжении 4 ночей в июне 2024 года. После проведения стандартной редукции данных нами были получены кривые блеска исследуемого объекта. Его яркость менялась с амплитудой порядка 0.5 звездной величины. Используя кривые блеска, мы подтвердили полученный ранее орбитальный период, равный ≈ 7.5 часов. Впервые обнаружено, что кривые блеска демонстрируют сильную асимметрию, что может свидетельствовать о наличии горячего пятна на поверхности звезды-компаньона миллисекундного пульсара, обусловленного несимметричным нагревом пульсарным ветром. Это свойство, а также найденные амплитуда переменности и ее период указывают на то, что данная система является миллисекундным пульсаром типа «redback».

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

РЕЗОНАНСНОЕ РАССЕЯНИЕ УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ НА ПОЗИТРОНАХ В СИЛЬНОМ ПОЛЕ РЕНТГЕНОВСКОЙ ВОЛНЫ: КАНАЛ А

Теоретически изучено резонансное рассеяние ультрарелятивистских электрона на позитроне в поле сильной монохроматической рентгеновской волны. В резонансном случае исходный процесс второго порядка по постоянной тонкой структуры эффективно распадается на два процесса первого порядка, стимулированных внешним электромагнитным полем. В условиях резонанса имеются три канала реакции, два из которых рассеятельные, а третий канал – аннигиляционный. Изучен резонанс рассеятельного канала А. В этом случае исходный процесс эффективно распадается на два процесса первого порядка типа стимулированных внешним полем процессов Комптон-эффекта. При этом начальные и конечные электроны и позитроны летят в узком конусе, который находится вдали от направления распространения волны. Детально изучена резонансная кинематика процесса. Показано, что энергии конечных электронов и позитронов определяются углом вылета конечного электрона, квантовым параметром Комптон-эффекта и числом поглощенных фотонов волны. Получено резонансное дифференциальное сечение процесса. Показано, что резонансное сечение в сильном рентгеновском поле может на два порядка величины превышать соответствующее нерезонансное сечение. Полученные результаты могут объяснить потоки высокоэнергетичных электронов и позитронов от нейтронных звезд и сверхновых.

И.Р. Мулюков, А.Г. Полетаева, Е.Г. Кавеева, И.Ю. Сениченков, В.А. Рожанский
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРЯДА С ИЗЛУЧАЮЩЕЙ X-ТОЧКОЙ В УСТАНОВКЕ ASDEX-Upgrade

В этой работе было впервые произведено time-dependent моделирование кодом SOLPS-ITER разряда с режимом с высоким излучением в области X-точки в токамаке ASDEX-Upgrade. Для перехода из режима без излучающего пятна к режиму с ним использовался напуск примесного газа – азота(N). На основе уравнения баланса энергии был проведён наиболее полный анализ формирования холодного излучающего пятна и показано, какие механизмы отвечают за переход в этот режим. Показано, что конвективные радиальные потоки, не рассматриваемые в более ранних моделях, дают значительный вклад в формирование излучающего пятна. Полученные результаты моделирования расширяют упрощённые модели формирования холодного излучающего пятна в области X-точки, опубликованные ранее другими авторами.

М.М. Верязов¹, Д.А Зюзин², А.В. Карпова², А.Ю. Кириченко^{2,3}, Ю.А. Шибанов²
¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
³Институт астрономии, Национальный автономный университет Мексики

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИРОДЫ ОПТИЧЕСКОГО И РЕНТГЕНОВСКОГО ДВОЙНИКА ГАММА-ИСТОЧНИКА 4FGL J1824.2+1231

Проведено исследование оптического и рентгеновского двойника ранее неотожествлённого гамма источника 4FGL J1824.2+1231 в оптическом диапазоне. Для его анализа были использованы оригинальные фотометрические данные с телескопа OAN-SPM 2.1-м и архивные спектроскопические с 8-м Gemini-North. Обработаны фотометрические данные 12 ночей, полученные в течение полугода, суммарно – 439 точек. По построенным кривым блеска наблюдается стабильный уровень светимости, соответствующий $V=20$ звёздной величины, с мерцаниями на уровне 0.3 величины на временах ~ 10 -20 мин, а также аperiodические вспышки ~ 1 величины на масштабах 1 часа. На обработанных спектрах в диапазоне 4500-9000Å наблюдаются эмиссионные линии Бальмеровской и Пашеновской серий водорода и линии HeI. Спектр, вероятно, соотносится с аккрецией вещества на компактный объект в двойной звёздной системе. По результатам работы показано, что исследуемый объект является кандидатом в транзиентный миллисекундный пульсар в тесной двойной системе с маломассивным звездным компаньоном.

С.А. Климова^{1,2}, В.П. Вандеев¹, А.Н. Семенова¹
¹Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова
²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПЕРТУРБАТИВНЫЙ АНАЛИЗ ОБОБЩЕНИЯ ПЯТИПАРАМЕТРИЧНОЙ СИММЕТРИЧНО ТЕЛЕПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ТЕОРИИ ГРАВИТАЦИИ

Общая теория относительности, представленная в 1915 году, стала революцией в теоретической физике благодаря красоте ее формулировки и универсальности ее применимости к физике гравитационных и космологических явлений. Однако, наряду с огромными успехами, общая теория относительности имеет ряд космологических проблем. Поэтому вполне естественно поставить вопрос о возможности построения теории, отличной от теории относительности Эйнштейна, которая соответствовала бы ей в надежно проверенных аспектах, но в то же время адекватно описывала бы те явления, которые в рамках ОТО требуют введения дополнительных темных секторов, или требует точной настройки исходных данных.

Вот почему мы изучаем свойства вакуумных уравнений движения в линейном приближении теории возмущений в плоском пространстве Минковского. Принцип действия теории таков:

$$S = - \int d^4x \sqrt{-g} Q Q, \text{ где } Q - \text{ скаляр неметричности самого общего вида.}$$

$$Q = \frac{a_1}{4} Q_{\alpha\mu\nu} Q^{\alpha\mu\nu} - \frac{a_2}{2} Q_{\alpha\mu\nu} Q^{\mu\alpha\nu} - \frac{a_3}{4} Q_{\mu\nu} Q^{\mu\nu} + \frac{a_4}{2} Q_{\mu} Q^{\mu} + \frac{a_5}{2} Q_{\mu} \tilde{Q}^{\mu}, \text{ где } Q_{\mu} = Q_{\mu\alpha}^{\cdot\alpha}, \quad \tilde{Q}_{\mu} = Q_{\alpha\mu}^{\cdot\cdot\alpha}$$

и $Q_{\alpha\mu\nu} = \partial_{\alpha} g_{\mu\nu}$

Метрика $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + \delta g_{\mu\nu}$, где $\eta_{\mu\nu}$ – метрика Минковского, $\delta g_{\mu\nu}$ – возмущения фона.

Применяя методы теории возмущений, мы получаем систему линейных уравнений, из которой мы устанавливаем, какие степени свободы являются динамическими, какие калибровочными, а какие из оказываются ограничены.

С.О. Башкатов¹, В.Ю. Сергеев¹, Б.В. Кутеев²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

СНИЖЕНИЕ ТОКА ЛАВИНЫ УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ ВО ВРЕМЯ СРЫВА ТОКА С ПОМОЩЬЮ ЛЕТАЮЩЕГО КОЛЛЕКТОРА В ТОКАМАКЕ МАСШТАБА ITER

В докладе обсуждается новый способ управления срывом тока в токамаке без заметного увеличения числа рабочего газа с использованием инъекции в плазму коллектора, собирающего убегающие электроны во время их лавинообразного размножения.

Для этого решалась нульмерная система уравнений, описывающая эволюцию снижения тока плазмы I_{tot} и генерацию тока убегающих электронов I_r по механизму лавинного размножения с учетом их потерь на движущемся вольфрамовом коллекторе. Параметры для моделирования выбирались с учетом напуска в плазму перед срывом Ar соответствующего получению резистивного времени вывода тока токамака $\tau_r = 34$ мс. На стадии вывода тока температура электронов, эффективный заряд, концентрация напускаемого Ar и концентрация плазмы были получены из нульмерного баланса омического нагрева электронов за счет излучения инжектированного Ar и предполагались неизменными. В результате найден оптимальный вариант снижения тока лавины с запуском двух последовательных коллекторов убегающих электронов.

Г.А. Кучеров^{1,2}, А.К. Павлов², А.Ю. Меркулова², Д.В. Белоусов²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

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

НАКОПЛЕНИЕ И РЕКОМБИНАЦИЯ РАДИКАЛОВ КАК ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ ДЛЯ АКТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛЕДЯНЫХ ТЕЛАХ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Наблюдения показывают, что во многих ледяных телах Солнечной системы на больших расстояниях от Солнца происходят активные процессы выделения энергии. Источник энергии, поддерживающий такую активность, остаётся неизвестным. В этой работе в качестве источника энергии предлагается спонтанная рекомбинация радикалов Н и ОН. В рассматриваемой модели эти радикалы накапливаются в водяном льду при низких температурах за счёт радиоактивного распада долгоживущих радионуклидов. Было смоделировано распространение процесса рекомбинации для ледяных тел различного состава и радиуса, учитывая различные начальные концентрации радикалов и начальные температуры в диапазоне от 5 до 50 К. Были определены параметры, при которых такой процесс может поднять температуру до 273 К, и было показано, что такая температура может поддерживаться внутри тела радиусом 250 км в течение более 100 миллионов лет. Также было показано, что рассматриваемый процесс слабо зависит от температуры и может происходить на очень больших расстояниях от Солнца, включая кометы в облаке Оорта.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА
ВБЛИЗИ ЛУННОЙ МАГНИТНОЙ АНОМАЛИИ

В данной работе представлены результаты моделирования взаимодействия солнечной плазмы с магнитными аномалиями на поверхности Луны с помощью гибридного кода. Как известно, Луна не обладает постоянным дипольным магнитным полем, однако на её поверхности существуют небольшие участки с локальными магнитными полями, достигающими нескольких десятков нТл. Гибридный код, сочетающий в себе кинетическое описание ионов как отдельных частиц и гидродинамическое описание электронов как безмассовой нейтральной жидкости, позволяет моделировать образующиеся в результате взаимодействия солнечного ветра с магнитным полем аномалии мини-магнитосферы, которые могут предотвратить прямое проникновение заряженных частиц на поверхность Луны. Моделирование показывает, что лунные магнитные аномалии могут создавать сложные структуры в потоке плазмы, включая области усиления и ослабления магнитного поля. Представлены результаты влияния условий межпланетного магнитного поля на мини-магнитосферу.

Ф.В. Белоус¹, В.В. Солоха², Е.Е. Ткаченко², А.Ю. Яшин¹¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАНМОДЕЛИРОВАНИЕ ПИЛИНГ-БАЛЛОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ
ДЛЯ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2 С ПОМОЩЬЮ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Основной режим работы токамаков в настоящее время – режим улучшенного удержания или H-мода характеризуется большими значениями градиента давления плазмы на периферии, что является причиной возникновения различных неустойчивостей, в том числе, периферийных локализованных мод (ELM). ELM приводят к импульсным выбросам частиц и энергии из области удержания на первую стенку и пластины дивертора, что может привести к повреждению установки. Также в плазме токамаков возникают другие явления, такие как колебания предельного цикла (LCO), которые представляют собой циклические колебательные процессы в установившейся плазме и не представляют опасности для установки. При этом LCO сложно отличимы от ELM с помощью диагностик доплеровского обратного рассеяния (ДОР) и $D\alpha$, что создаёт трудности при изучении процессов, происходящих в H-моду.

Исходя из физической природы этих явлений, их можно классифицировать с помощью расчёта инкремента неустойчивости пилинг-баллонной моды γ (ПБ-мода) с помощью кода BOU+++. Для этого необходимо сгенерировать диаграмму зависимости значений γ от параметров плазмы, что занимает много времени. Применение машинного обучения позволяет сократить время для получения данных в несколько раз, что будет рассмотрено в данном докладе для токамака Глобус-М2.

Настоящая работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания в сфере науки по проекту № FSEG-2024-0005.

Д.Б. Магросова^{1,2}, Ю.А. Кропотина²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

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

ГИБРИДНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАТЕКАНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ЛУННЫЕ МАГНИТНЫЕ АНОМАЛИИ

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. С магнитными аномалиями ассоциируются лунные завихрения (свирлы – swirls) – необычные особенности, которые можно обнаружить в отдельных местах на поверхности Луны. Они характеризуются высоким альбедо, имеют извилистую форму. Все известные завихрения расположены совместно с магнитными аномалиями, но обратное утверждение неверно. Хотя точное происхождение лунных завихрений неизвестно, одно из предположений гласит, что лунные магнитные аномалии защищают поверхность от воздействия протонов солнечного ветра, из-за чего грунт выглядит «моложе».

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

Т.Д. Шохин¹, Ю.Е. Чариков², А.Н. Шабалин²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

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

ПРЕДВЕСТНИКИ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК В УФ ИЗЛУЧЕНИИ

Предвестники солнечных вспышек – это комплекс явлений на предвспышечной стадии, таких как возрастание потока излучения в УФ и мягком рентгеновском диапазонах, свидетельствующих о формировании нестабильной магнитной конфигурации в атмосфере Солнца. Непосредственное восстановление геометрии магнитного поля (МП) в активных областях возможно по данным SDO/HMI с временным разрешением в 720 с. Однако подобного разрешения оказывается недостаточно для качественной интерпретации динамики вспышек. Более детально эволюцию МП в высоком пространственном (~1'') и временном (60 с) разрешении можно наблюдать по изменениям филаментарных структур в УФ-диапазоне по данным SDO/AIA. Совместное применение двух методов может указать на возможные причинно-следственные связи между предвестниками и последующими вспышками.

По данным GOES для анализа было выбрано событие M9 SOL2012-03-09T03:50. Предвспышечная стадия события характеризуется повышением потока в мягком рентгеновском излучении за 15, 25, 45 и 60 минут до вспышки. Для события была проанализирована пространственно-временная структура в линиях УФ, а также восстановлена структура МП в бессиловой модели в пакете SolarSoft/GX_Simulator. Совместный анализ данных проводился в пакете ParaView.

ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНЫХ СУПЕРВСПЫШЕК НА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗОТОПА ^{14}C В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Недавно обнаруженные резкие повышения содержания изотопа ^{14}C в кольцах деревьев обычно связывают с солнечными супервспышками. В работе предложена 6-резервуарная модель для описания эволюции концентрации изотопа ^{14}C в атмосфере под их влиянием. Рассмотрена для примера скорость образования радиоуглерода от солнечной вспышки 23 февраля 1956 года. Составлена неоднородная система 6 линейных дифференциальных уравнений первого порядка с нестационарными коэффициентами (времена переходов между резервуарами). Из системы определены начальные стационарные концентрации ^{14}C , от которых стартует рассматриваемый динамический процесс. Численное решение системы для концентрации радиоуглерода в тропосфере Земли при различных высотах тропопаузы находится в согласии с экспериментальными точками события Мияке 775 г. н.э., что говорит о возможной атмосферной природе этого события. Для его корректного описания необходимо увеличение времени перехода ^{14}C из стратосферы в тропосферу на 10-20%. Получено аналитическое решение неоднородной системы с постоянными коэффициентами, согласующееся с численным методом Рунге-Кутты 4 порядка.

К.А. Кукушкин, В.А. Рожанский, Е.Г. Кавеева

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2 КОДОМ SOLPS-ITER С КИНЕТИЧЕСКИМ ОПИСАНИЕМ НЕЙТРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

В данной работе представлены результаты моделирования пристеночной плазмы токамака Глобус-М2 кодом SOLPS-ITER с согласованным использованием гидродинамического кода V2.5 и кода Монте-Карло для нейтральных частиц EIRENE. В качестве моделируемого разряда был выбран разряд №44644. В моделировании учитывалось распыление углерода с поверхности первой стенки, а также абсорбция частиц плазмы материальными поверхностями. Результаты моделирования удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, полученными в данном разряде.

Показано, что в исследуемом разряде практически отсутствует транспортный барьер. Моделирование продемонстрировало формирование плотной холодной области плазмы вблизи внутренней точки удара между внешней и внутренней сепаратрисами (High Field Side High Density эффект). Продемонстрирована зависимость размера холодной плотной области от расстояния между сепаратрисами. Проведено исследование зависимости параметров плотной холодной области от коэффициента абсорбции частиц плазмы на внутренней пластине.

Д.А. Петров, М.Ю. Гуткин
Институт проблем машиноведения РАН

НАПРЯЖЕНИЯ НЕСООТВЕТСТВИЯ В СЛОИСТЫХ НАНОПРОВОЛОКАХ

В докладе рассмотрены напряжения несоответствия в двух- и трехслойных нанопроволоках. Для определения полей напряжений была решена граничная задача линейной теории упругости для бесконечного двухслойного цилиндра, фазы которого различаются только собственной деформацией. Решение было получено в виде бесконечных рядов с коэффициентами, зависящими от положения межфазной границы. Напряжения несоответствия в трехслойном цилиндре получаются сложением двух решений для двухфазного цилиндра с параллельными границами.

Показано, что напряженное состояние в слоистой нанопроволоке существенно отличается от состояния, реализуемого в тонких пленках (двуосного растяжения/сжатия): осевые напряжения по модулю выше, чем напряжения в плоскости поперечного сечения. Полученные результаты можно использовать при изучении пластической релаксации напряжений несоответствия. В качестве примера в докладе с помощью полученного решения были вычислены энергии взаимодействия полей несоответствия с дислокациями определенного типа.

Ю.А. Беликова
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург

МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ФАЗ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ТЕМПЕРАТУРНОМ СТАРЕНИИ В ЛИТОМ ЖАРОПРОЧНОМ СПЛАВЕ HP40NBТИ

Наиболее эффективными в условиях эксплуатации оборудования нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности являются жаропрочные аустенитные сплавы на основе системы Fe-Cr-Ni – серии HP с карбидным упрочнением. Ресурс установок нефтехимического синтеза в основном определяется структурной стабильностью жаропрочных сплавов в условиях эксплуатации: при температурах 700-900 °С с циклическими перепадами $\pm 150-300$ °С, внешних нагрузках 5-10 МПа, в науглероживающей и окислительной средах. Воздействие температурного поля на жаропрочные HP сплавы вызывает непрерывную трансформацию всех структурных составляющих, что приводит к деградации свойств сплава и преждевременному разрушению при эксплуатации. По этой причине актуальным является исследование процессов эволюции структуры HP сплавов в условиях эксплуатации для возможности прогнозирования и повышения их ресурса.

Выполненные исследования с применением методик сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии позволили установить, что в условиях высокотемпературной эксплуатации сплава HP40NbTi происходит фазовое превращение карбонитридов ниобия с образованием интерметаллического соединения – G-фазы В процессе трансформации образуется комплексная многослойная многофазная частица, которая является нестабильной в условиях эксплуатации сплава и претерпевает дальнейшее превращение с образованием новой фазы, влияние которой на эксплуатационные свойства сплава требует дополнительных исследований.

Д.К. Наумов¹, Р.Э. Шевчук^{1,2}, М.Ю. Гуткин^{1,3,4}, С.А. Красницкий¹, А.М. Смирнов¹

¹Университет ИТМО

²Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

³Институт проблем машиноведения РАН

⁴Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РАСЧЕТ УПРУГОЙ ЭНЕРГИИ МАЛЫХ ИКОСАЭДРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ В РАМКАХ ЧИСЛЕННОГО И АНАЛИТИЧЕСКОГО ПОДХОДОВ

В настоящей работе дано сравнение трех теоретических моделей, описывающих запасенную упругую энергию в малых икосаэдрических частицах (МИЧ) с многократным циклическим двойникованием и ГЦК решеткой: распределенная дисклинационная модель (РДМ), дискретная дисклинационная модель (ДДМ) и численная модель, реализованная с помощью метода конечных элементов (КЭ). В рамках рассмотренных моделей определены упругие деформации, напряжения и упругая энергия МИЧ в приближении линейной изотропной теории упругости. В работе впервые получена аналитическая формула для расчета энергии парного взаимодействия пересекающихся клиновых дисклинаций в упругой сфере, используемая в ДДМ. Установлено, что допущение о радиально однородном распределении собственной дисторсии, положенное в основу РДМ, приводит к незначительным расхождениям (менее 4 %) в определении упругой энергии по сравнению со значениями, полученными согласно более точной ДДМ. Кроме этого, продемонстрировано, что погрешность численного расчета упругой энергии МИЧ методом КЭ существенно зависит от упругих свойств материала частицы – чем больше коэффициента Пуассона материала частицы, тем больше различие между численными и аналитическими расчетами (в предельном случае, когда коэффициент Пуассона принимает наибольшее значение 0,5, погрешность составляет ~14 %). Таким образом, небольшие различия между численным моделированием и аналитическими расчетами позволяют использовать оба метода для последующего анализа физических свойств и механической устойчивости МИЧ.

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

Ю.С. Седова^{1,2}

¹Институт проблем машиноведения РАН

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИСПЫТАНИЯ КОЛЬЦЕВЫХ ОБРАЗЦОВ КОТЕЛЬНЫХ ТРУБ: АНАЛИЗ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ ВОДОРОДНОЙ ХРУПКОСТИ

Статистический анализ данных научно-технической литературы и сведений об эксплуатации котельного оборудования показал, что наиболее частой причиной их выхода из строя является хрупкое или частично хрупкое разрушение труб поверхностей нагрева. Отмечается тенденция к увеличению частоты подобных отказов и сокращению общего срока службы труб.

Экспериментально установлена взаимосвязь между объемным распределением растворенного в материале водорода и механическими свойствами металла. Для исследования этого влияния были проведены испытания на растяжение кольцевых образцов из стали 20, вырезанных из новых и длительное время эксплуатировавшихся труб. Результаты показали существенные различия в диаграммах напряжения-деформации, что

указывает на возможность использования этих параметров для контроля состояния трубной продукции.

Для интерпретации полученных результатов проведено численное моделирование в КЭ-пакете ANSYS с применением классической модели водородной хрупкости. Уже в первом приближении удалось воспроизвести особенности кривых напряжения-деформации, обусловленные различной концентрацией водорода в материале. Применение комплексного подхода, учитывающего влияние растворенного водорода как на предел текучести материала, так и на водородную деградацию когезионных напряжений, связывающих берега трещины, позволило показать смещение инженерной кривой и снижение определяемого по ней предела прочности материала. Кроме того, моделирование позволило объяснить природу экспериментально обнаруженной анизотропии механических свойств, которая связана с наличием множественных микротрещин на внутренней поверхности труб, ориентированных преимущественно вдоль их оси.

Ю.В. Ермолаева¹, С.А. Красницкий^{1,2}, М.Ю. Гуткин^{2,3,4}

¹АО КИС «ИСТОК»

²Университет ИТМО

³Институт проблем машиноведения РАН

⁴Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ КРИТИЧЕСКОЙ ДЛИНЫ ТРЕЩИНЫ В КЕРАМИКЕ α - Al_2O_3

В данной работе представлено параметрическое конечно-элементное (КЭ) моделирование квазистатического роста трещины из круговой поры, расположенной в тройном стыке границ зерен керамики α - Al_2O_3 . Моделирование проводилось в рамках принципов линейной механики разрушения для материала с упругими свойствами, зависящими от температуры. Под действием заданной внешней нагрузки определялось изменение упругой энергии КЭ системы при подрасте трещины. При этом изменение поверхностной энергии оценивалось по эмпирическим зависимостям для удельной поверхностной энергии керамики α - Al_2O_3 , справедливым в интервале температур 300 – 1400 К. Соответствующее изменение полной энергии системы использовано для определения температурной зависимости критической длины трещины Гриффитса при заданной внешней нагрузке. Показано, что критическая длина трещины уменьшается с увеличением температуры. Например, при внешней нагрузке 3 ГПа отношение критической длины трещины к радиусу поры в керамике α - Al_2O_3 составляет 0.033 при $T = 300$ К и 0.017 при 1400 К.

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

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АНИЗОТРОПИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НА УПРУГУЮ ЭНЕРГИЮ ДЕКАЭДРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ

Данное исследование посвящено разработке и верификации конечно-элементного (КЭ) подхода для оценки остаточных напряжений и упругой энергии в декаэдрических частицах (ДЧ) ГЦК металлов с учетом огранки частицы и анизотропии механических свойств. Согласно предложенному подходу, ДЧ рассматривается как геометрически связанная система пяти тетраэдров с заданными анизотропными свойствами кубического кристалла (3 упругие константы в обозначениях Фойгта C_{11} , C_{12} , C_{44} являются независимыми) и ребрами, соответствующими кристаллографическим направлениям типа $\langle 110 \rangle$. Остаточное напряженное состояние ДЧ моделируется в рамках дисклинационного представления – за счет смыкания угловой щели ($\omega \approx 0.128$ рад) между тетраэдрами с последующим восстановлением сплошности частицы путем активации связанного контакта на границах. В рамках разработанной КЭ модели построены зависимости упругой энергии ДЧ от коэффициента анизотропии ($A = 2C_{44} / [C_{11} - C_{12}]$). Показано, что упругая энергия частицы уменьшается с увеличением коэффициента анизотропии A . В частности, значение упругой энергии составляет $0.75GV\omega^2$ для Al-ДЧ с $A \approx 1.22$ и $0.43GV\omega^2$ для Ag-ДЧ с $A \approx 3.01$ (V – объем ДЧ). Кроме этого, показано, что при $A = 1.0$ (изотропный материал) КЭ результаты согласуются с имеющимися в литературе теоретическими оценками поля напряжений и упругой энергии ДЧ.

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

М.А. Рожков, С.А. Красницкий, А.М. Смирнов
Университет ИТМО

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИКОСАЭДРИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

Икосаэдрические частицы (ИЧ) ГЦК металлов обладают уникальными физико-химическими свойствами, обусловленными особенностями их структуры, в частности, многократным двойникованием. Такие частицы являются перспективным функциональным материалом для катализа и фотовольтаики. Главной особенностью структуры ИЧ является ось симметрии пятого порядка, запрещенная законами классической кристаллографии. Структура ИЧ может быть представлена с помощью отдельных элементов – двадцати тетраэдров с огранкой по кристаллографическим плоскостям типа $\{111\}$, имеющих общие вершины, а смежные между ними грани образуют двойниковые границы, приводящие к возникновению неоднородного напряженного состояния внутри ИЧ. Запасенная упругая энергия в таких частицах представляет отдельный интерес, поскольку влияет на образование и развитие дефектов в ИЧ. Эта энергия может быть оценена в рамках приближенных аналитических моделей с использованием дисклинационного подхода, или с помощью атомистического моделирования из первых принципов методом молекулярной динамики. Последний подход позволяет учесть анизотропию ИЧ частиц и их огранку, а также дает возможность прямого наблюдения их кристаллической структуры, включая разнообразные дефекты.

В настоящей работе построена компьютерная модель ИЧ золота, серебра и меди в рамках метода молекулярной динамики в программном пакете LAMMPS. Исследована упругая энергия таких частиц. Определен предел применимости аналитических моделей для описания упругой энергии ИЧ.

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

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

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Институт проблем машиноведения РАН

³Университет ИТМО

ДИСЛОКАЦИОННАЯ РЕЛАКСАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КВАНТОВОМ КОЛЬЦЕ ВБЛИЗИ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Элементной базой современных электронных и оптоэлектронных устройств служат плоские гетероструктуры с квантовыми кольцами (КК) различной формы, в частности, цилиндрическими. По этой причине исследования устойчивости таких гетероструктур к образованию в них дислокаций и других дефектов, приводящих к деградации рабочих характеристик гетероструктуры в целом, чрезвычайно актуальны. Предметом настоящего исследования являлась релаксация напряжений в полой цилиндрической структуре, моделирующей КК. В частности, необходимо было провести анализ релаксации напряжений во включении за счет образования в нем малых дислокационных петель. Рассчитаны поля напряжений и изменение упругой энергии при образовании призматической дислокационной петли. Показано, что с увеличением толщины плёнки зарождение данного дефекта становится энергетически более выгодным.

Д.В. Троцкая, С.А. Филиппов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ ПРОБОПОДГОТОВКИ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ПОЛИРОВКИ

В работе было проведено исследование процессов электрохимического полирования образцов из сплава ЖС32-ВИ. В ходе работы:

- проанализированы особенности процессов электролитического растворения металлов;
- применены различные составы электролитов и режимы полирования, сняты вольт-амперные характеристики;
- осуществлено электрохимическое полирование специально подготовленных образцов.

Контроль проведённого полирования осуществлялся с помощью нескольких независимых методов:

- скорость полирования определялась микрометрическим методом;
- уровень дефектности поверхности фиксировался с помощью микроскопического исследования;
- дополнительно с помощью метода рентгеноструктурного анализа оценивалась глубина искажённого при механической шлифовке слоя.

В результате была разработана методика электрохимического полирования сплава ЖС32-ВИ, включающая в себя состав электролита и оптимальные значения напряжения и плотности тока.

И.Д. Кочетков, Н.И. Зайцева
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ТРАНСПОРТЕ**

Доклад посвящен исследованию и моделированию рекуперации в электротранспорте и разработке алгоритма оптимизации профиля скорости движения транспортного средства с учетом рекуперации. В первой части работы представлено описание разработанной модели системы с электродвигателем для анализа рекуперации при движении электротранспорта, приводится постановка задачи оптимизации профиля скорости, состоящего из участков разгона, стационарного режима и торможения для минимизации энергозатрат, соответствующая реальным условиям эксплуатации транспортных средств. Во второй части доклада рассмотрены особенности, которые не позволяют свести задачу к задачам оптимизации энергозатрат на каждом отдельном участке профиля скорости. В работе предложен метод нахождения оптимального профиля скорости с ограничением на пройденное расстояние. В заключении рассмотрены возможности применения метода, который позволяет оценивать время в пути, что обеспечивает более гибкий выбор оптимального профиля в зависимости от реальных условий эксплуатации.

А.А. Гольдберг, А.А. Елисеев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

**ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА
РАССТАНОВКИ КРЕПЕЖНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Оптимизация процесса сборки крыла самолёта является одной из основных задач в аэрокосмической промышленности. На данный момент только часть производственных процессов механизирована и автоматизирована, многие этапы выполняются вручную. Для интенсификации производства на большинстве этапов сборки необходимо свести к минимуму количество временных крепежных элементов при сохранении качества конечного изделия. У проблемы оптимизации расстановки креплений есть несколько характерных особенностей – это задача комбинаторной оптимизации, в которой необходимо вычислять значение функции цели для каждой расстановки временных крепёжных элементов. Вычисление целевой функции требует множественного решения контактных задач, что делает реализацию стандартных методов оптимизации очень ресурсоемкой. Ранее для решения задачи о расстановке заданного числа фастнеров (крепёжных элементов) по заданным отверстиям с заданными критериями качества был разработан геодезический алгоритм. Этот новый подход к оптимизации позволяет избежать многократных вычислений целевой функции за счёт использования специфики процесса сборки крыла самолетов. Данная работа посвящена поиску оптимальных параметров геодезического алгоритма для получения дополнительного ускорения процесса нахождения оптимального расположения фастнеров. Ускорение достигается за счёт построения и исследования специального графа и нахождения в нём вершины минимального веса по определённому алгоритму. Разработанные алгоритмы были реализованы на языке C++ и протестированы на тестовых и

реальных данных. Результаты показали, что лучший из разработанных алгоритмов позволяет ускорить вычисления в среднем не менее, чем в 10 раз.

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

РАЗЛИЧНЫЕ ПОДХОДЫ К УСКОРЕНИЮ БЫСТРОГО ГРАДИЕНТНОГО МЕТОДА В ПРИМЕНЕНИИ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ СБОРКИ

В докладе изложены различные подходы к ускорению классического быстрого градиентного метода Ю.Е. Нестерова в применении к решению задач сборки в авиастроении. В первой части доклада приведена постановка квадратичной задачи оптимизации, а также описана схема классического быстрого градиентного метода. Во второй части доклада к рассмотрению предлагается эвристический подход, основанный на более «жадном» выборе одного из параметров метода. Предложен способ выбора этого параметра, основанный на проверке неравенства, представляющего собой необходимое условие сходимости метода. Далее рассмотрен вариант «полностью неявного» быстрого градиентного метода, основанный на его проксимальном обобщении. В нашем случае – это переформулировка задачи условной оптимизации в задачу оптимизации композитной целевой функции с дополнительным регуляризирующим слагаемым. Для такого метода было исследовано влияние его параметров (шаг, целевое значение внутренних итераций) на скорость сходимости в сравнении с классическим быстрым градиентным методом. В заключение, приведен сравнительный анализ скорости работы описанных вариантов быстрого градиентного метода применительно к задачам сборки.

Д.А. Петухов, М.Е. Фролов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

АДАПТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ ПЛОСКИХ ЗАДАЧ ЛИНЕЙНОЙ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ С НЕСКОЛЬКИМИ МАТЕРИАЛАМИ НА ОСНОВЕ ЭЛЕМЕНТОВ РАВЬЯРА–ТОМА НУЛЕВОГО И ПЕРВОГО ПОРЯДКОВ

Решение прикладных задач, в основном, не может быть получено аналитическим путем. В большинстве случаев это обусловлено их нелинейностью (сложностью описываемых физических процессов), а также нетривиальностью расчётных областей. В ситуации, когда получение точного решения (в том числе, в обобщенной постановке) аналитическим путем невозможно, приближенное решение строится при помощи численных методов. Использование такого подхода, в частности, в рамках метода конечных элементов (МКЭ), приводит к тому, что на конечный результат, помимо неточности самой математической модели, оказывают влияние ошибка дискретизации и вычислительная погрешность от использования итерационных методов решения. Чтобы на основе результатов расчета обоснованно делать вывод об адекватности математической модели описываемому ей явлению, важно отделять погрешность модели от двух других, а для этого последние необходимо уметь надежно оценивать. В связи с этим актуальны исследования методов апостериорного контроля точности решения. Одним из перспективных путей исследования является применение апостериорных оценок функционального типа. Однако, применение стандартных аппроксимаций метода конечных элементов для оценок

функционального типа может приводить к тому, что при измельчении сетки происходит существенная (вдобавок, еще и растущая) переоценка величины ошибки. Для решения данной проблемы применяют конечные элементы, характерные для смешанных МКЭ (например, элементы Равьяра-Тома). В исследовании показано, что использование элементов Равьяра-Тома первого порядка позволяет существенно снизить переоценку погрешности решения по сравнению с элементами Равьяра-Тома нулевого порядка.

А.В. Афанасьев¹, А.Н. Баженов^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

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

МЕТОД ТЕЙЛА-СЕНА. ИНТЕРВАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

В настоящее время обработка данных является неотъемлемой частью любой сферы исследования, т.к. в большинстве случаев данные, получаемые экспериментально, содержат определенные погрешности, которые необходимо каким-то образом учитывать. В работе рассматривается задача восстановления зависимостей по эмпирическим данным, которая фактически является задачей восстановления некоторой функции известного класса по ее значениям в некоторых измеренных точках. При наличии больших экспериментальных погрешностей очевидно, что такая задача усложняется. В частности, если данные содержат выбросы, т.е. значения, резко отличающиеся от основной выборки, то многие стандартные методы обработки могут давать большие ошибки. Например, к таким методам относится один из самых популярных методов – метод наименьших квадратов. Он основан на вычислении суммы квадратов отклонений между фактическими значениями и значениями, предсказанными методом. Известно, что этот метод является очень чувствительным к большим отклонениям. Поэтому данные, обрабатываемые с его помощью, принято сначала очищать от выбросов и любых аномальных значений. Тем не менее, это не всегда дает гарантию, что все данные действительно будут полностью очищены. Кроме того, часто такая подготовка данных невозможна из-за слишком большого объема данных измерений и влияния человеческого фактора. Альтернативным подходом является использование так называемых робастных или устойчивых по отношению к выбросам методов. В частности, к ним относятся медианные методы, которые оценивают не только сами значения, но и частоту их появления. В работе рассматривается один из таких методов – медианный метод Тейла-Сена. С его помощью проводится исследование данных, полученных в экспериментах на токамаке Глобус-М2 ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. Данные содержат информацию о температуре электронов плазмы, измеренную диагностикой томсоновского рассеяния с использованием лазерного излучения на двух длинах волн.

С.А. Бабахина^{1,2}, А.Н. Баженов^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

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

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕРВАЛЬНЫХ АРИФМЕТИК ДЛЯ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА СИГНАЛОВ

Обработка и анализ экспериментальных данных часто сопровождается неопределенностью, связанной с погрешностью самих измерений, зашумленностью и

наличием во входных данных аномальных значений. В данной работе рассматривается применение математического аппарата интервальной арифметики для устранения перечисленных видов неопределенности при обработке значений эталонных сигналов и вычислении калибровочных коэффициентов в целях получения корректных результатов на этапе анализа. Интервальные методы позволяют описывать сигналы в виде некоторого коридора допустимых значений, полученного с помощью интервальных коэффициентов линейной регрессии. Настоящий подход был применен к данным приборов-регистраторов томсоновского рассеяния. Их особенностью является запись данных в набор кольцевых буферов сверхбыстрой аналоговой памяти с общей точкой останова для каждого фрейма записи. При этом каждая ячейка памяти имеет индивидуальные характеристики, которые необходимо применить при восстановлении сигнала. В работе исследуется эффективность применения различных модификаций бокс-плота Тьюки для предварительной обработки сигналов для получения внешних и внутренних оценок. Эти оценки используются как данные для постановки задачи интервальной линейной регрессии. Задача линейной регрессии решается как для внешних, так и внутренних оценок. В качестве итогов работы приводятся результаты сравнения различных подходов к вычислению оценок временных параметров сигналов.

С.Д. Корпусова¹, А.Н. Баженов^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

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

ПРИМЕНЕНИЕ МАТРИЦЫ ОТНОШЕНИЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ГИСТОГРАММЫ И НАХОЖДЕНИЯ МОДЫ ИНТЕРВАЛЬНОЙ ВЫБОРКИ

В анализе данных с интервальной неопределённостью для описания интервальной выборки существует необходимость в вычислении различных оценок для ее характеристики. Мода интервальной выборки является одной из ключевых мер центральной тенденции и широко применяется в интервальном анализе данных. Однако в случаях, когда интервалы данных имеют значительное перекрытие или высокую точность, мода может терять свою информативность или даже не существовать в классическом понимании. Для решения этой проблемы в работе предложен метод, основанный на использовании специальной матрицы отношений и несимметричного коэффициента Жаккара. Несимметричный коэффициент Жаккара позволяет учитывать долю пересечения интервалов, что делает метод более гибким и применимым для анализа интервальных выборок, нахождение моды для которых осложняется спецификой данных. В работе рассмотрено применение этого подхода для построения диаграммы распределения частот и определения моды выборки. Эффективность метода демонстрируется на примерах с данными, полученными с использованием многоканального измерителя PSI DRS4 на токамаке «Глобус-М2» ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Т.О. Яворук^{1,2}, А.Н. Баженов^{3,4}

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург

²Окинавский институт науки и технологий, Япония

³Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

⁴Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ В СЛУЧАЕ ДВОЙНОГО ОЦЕНИВАНИЯ ОШИБОК ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Калибровка измерительных приборов требует учета как внутренних, так и внешних ошибок данных. В данной работе для их описания используются твины (двойные интервалы). В линейной регрессии внутренние оценки данных позволяют повысить точность, но могут приводить к пустому множеству решений. В то же время использование только внешних оценок приводит к слишком большому числу решений. Оптимальным подходом является комбинирование внутренних и внешних оценок. В работе рассматривается решение твинной системы линейных алгебраических уравнений и его применение в калибровке, сборе и анализе данных на основе LIDAR, используемого в исследованиях ядерного синтеза и физики плазмы. Для решения данной проблемы предложены два алгоритма: первый заменяет внутренние оценки внешними, а второй вводит дополнительные интервалы. Эффективность алгоритмов демонстрируется на примерах с синтетическими данными.

В.А. Карасев, Е.И. Герасимов, В.С. Чуканов, Е.И. Пчицкая
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

НЕЙРОСЕТЕВОЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ, ХАРАКТЕРИСТИК И ПОВЕДЕНИЯ МЫШИ

Для изучения патологических процессов, происходящих при нейродегенеративных заболеваниях (в частности, болезни Альцгеймера), а также тестирования потенциальных методов лечения таких патологий, используются лабораторные мыши. Исследование их поведения в экспериментальной среде с одновременной регистрацией нейрональной активности позволяет изучать фундаментальные изменения в функционировании нейронных цепей в процессе патогенеза болезни Альцгеймера. Однако для определения такой корреляции необходима предварительная автоматизированная обработка огромного массива данных о поведении мыши в различных условиях с последующим переводом данных в текстовый вид для дальнейшего анализа и сопоставления с активностью нейронных ансамблей. В данной работе представлено приложение для детекции и распознавания поведения мыши, реализованное на базе нейросетей семейства YOLO-pose и YOLO-classification. Также для определения местоположения мыши используется классическое аналитическое компьютерное зрение на базе OpenCV. Данные для обучения сетей были получены в тесте открытое поле на мышах дикого типа и трансгенных мышах линии 5xFAD возраста 6,5 месяцев (более 10000 фреймов с размеченным силуэтом и поведением мыши). Обработка данных для обучения распознавания поведения производилась методами создания композитных изображений, которые состоят из последовательности кадров в разных цветовых каналах. Для балансировки датасета также использовались методы аугментации датасета. Процесс генерации данных, обучения сети и записи в csv-формат полученных результатов был разработан на языке программирования Python с использованием

библиотеки нейронных сетей YOLO Ultralytics и библиотеки компьютерного зрения OpenCV.

С.А. Умнов, Е.И. Герасимов, В.С. Чуканов, Е.И. Пчицкая
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОБНАРУЖЕНИЕ ПАТОЛОГИЙ С ПОМОЩЬЮ ОЦЕНКИ АКТИВНОСТИ НЕЙРОННЫХ АНСАМБЛЕЙ ГИППОКАМПА МЫШЕЙ ПОСТРОЕНИЕМ МАНИФОЛДОВ

Изучение нейронной активности головного мозга мышей позволяет продвинуться в области изучения различных нейродегенеративных заболеваний. Современные методы регистрации нейронной активности, например, метод миниатюрной флуоресцентной микроскопии, позволяют детектировать активность большого количества нейронов у свободно передвигающихся животных, однако большая размерность полученных данных затрудняет их прямой анализ. В данной работе предлагается использование методов понижения размерностей для дальнейшего построения нейронных манифолдов. Построенные манифолды сохраняют различные взаимосвязи между нейронами, изучение которых позволяет более детально изучать нарушения, происходящие в функционировании нейронных ансамблей, к примеру, при болезни Альцгеймера. В данной работе представлен подход на основе построения нейрональных манифолдов с целью исследования влияния болезни Альцгеймера (БА) на работу нейронных гиппокампальных ансамблей. Для моделирования этого нейродегенеративного заболевания были использованы трансгенные мыши с генетической моделью БА линии 5xFAD возраста 6,5 месяцев. В качестве контрольных мышей были выбраны их дикие однопометники. Данные о нейронной активности гиппокампальных ансамблей мышей были получены с использованием метода миниатюрной флуоресцентной микроскопии. Эти данные представляют собой временные ряды зависимости интенсивности флуоресценции генетически кодируемого кальциевого индикатора GCaMP6f от времени для индивидуальных нейронов гиппокампа. Полученный временной ряд разбивается на определенные временные участки фиксированной длины для сглаживания активности нейронов при понижении размерности. Затем по обработанным данным строится манифолд с помощью алгоритма понижения размерности. В данной работе используется t-SNE. По полученным манифолдам производится оценка параметров, в данной работе для задачи разделения трансгенных мышей от диких было использовано внутрикластерное расстояние.

И.А. Пучкин, В.С. Чуканов, А.А. Васильев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАЛИСТИЧНОГО ОСВЕЩЕНИЯ В ШИРОКОМ ЦВЕТОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Использование HDR играет ключевую роль в современной компьютерной графике. Он позволяет отображать более широкий спектр яркости и цветов, приближая изображение к тому, что видит человеческий глаз. Это особенно важно для создания реалистичных сцен, где присутствуют как очень яркие, так и очень темные участки. Физически обоснованный рендеринг (PBR) представляет собой подход в компьютерной графике, который стремится к максимально точному моделированию взаимодействия света и материалов, основываясь на

физических принципах. Это позволяет достичь фотореалистичности изображения. Модель Кука-Торренса является одной из наиболее часто используемых интерпретаций PBR в компьютерной графике. Она учитывает как диффузное, так и зеркальное отражение света, что позволяет создавать более детализированные и реалистичные изображения. Основное преимущество этой модели заключается в ее способности работать с широким цветовым диапазоном, что делает ее идеальной для использования в HDR-графике. В данной работе представлен подход к моделированию освещения травы в широком цветовом диапазоне с использованием модели Кука-Торренса. В основе предлагаемой модели лежит принцип просвечиваемости травинок. В реализации используется DirectX 12, который позволяет эффективно использовать возможности системы, улучшая производительность и качество графики.

Г.А. Гребнев, В.С. Чуканов, А.А. Васильев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ FPS ПУТЕМ ГЕНЕРАЦИИ КАДРОВ

Современные графические системы сталкиваются с растущими требованиями к производительности, особенно в условиях популярности мониторов с частотой обновления 100 Гц и выше. Генерация реалистичной графики требует значительных вычислительных ресурсов, что ограничивает возможности достижения высокого FPS на доступном hardware. В данной работе предлагается использование нейросетевых методов интерполяции кадров для повышения частоты кадров в реальном времени. Цель работы — исследование современных подходов к интерполяции кадров с использованием нейронных сетей (CNN, Attention-based) и разработка собственного метода, способного повысить FPS до 60/100/140 кадров в секунду с учетом времени инференса. Основные этапы работы включают анализ существующих методов интерполяции, разработку и обучение нейронной сети для генерации промежуточных кадров, а также тестирование производительности и оценку качества интерполяции. Оптимизация времени инференса является важной задачей, так как она напрямую влияет на плавность геймплея и минимизацию задержек при генерации кадров. Потенциально предложенное решение может быть интегрировано в графические движки, разработанные с использованием DirectX12, для практического применения. Ожидаемые результаты: повышение FPS в реальном времени без значительного увеличения нагрузки на hardware, что позволит улучшить качество визуализации на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами. Решение может быть применено в игровой индустрии, видеоиндустрии и других областях, требующих высокой частоты кадров.

Е.О. Крылова, Д.С. Смирнова, Е.И. Пчицкая, В.С. Чуканов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕНДРИТОВ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Создание наборов данных дендритных структур путём конфокальной микроскопии требует значительных временных затрат, что приводит к ограниченным размерам доступных выборок и создает препятствия для применения методов глубокого обучения в анализе морфологии нейронов. Разработка подходов к генерации искусственных изображений

дендритов может способствовать расширению обучающих выборок для нейросетей. В ходе работы в качестве реальных данных был использован набор дендритов, полученных из микроскопических снимков с применением программного обеспечения SpineTool. Из имеющихся мешей извлекаются скелеты, скелеты делятся на сердцевину и на наборы векторов, направленных по восьми возможным направлениям сферы для описания локальной толщины дендритного ствола. Далее данные подвергаются кластеризации методом K-means и обработке с использованием преобразования сферических координат, контекстного моделирования через переходы Маркова высокого порядка и подбора статистических распределений с применением распределений Вейбулла и многомерного нормального распределения. Процесс реконструкции поверхности включает создание цилиндрических сегментов вдоль скелета с адаптивной оценкой радиуса и реализацию методов интерполяции для плавных переходов между участками дендрита. Применение пуассоновского сглаживания обеспечивает более качественную реконструкцию поверхности дендритов.

Е.К. Липс, Д.С. Смирнова, Е.И. Пчицкая, В.С. Чуканов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ НАЛИЧИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ В ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ДЕНДРИТА НЕЙРОНА

Дендритные шипики являются основными постсинаптическими структурами, исследования показывают, что их взаимное расположение и степень их сгруппированности напрямую связано с эффективностью обработки и хранения информации в нейронных сетях. Целью данного исследования является создание методологии структурного анализа закономерностей пространственного распределения дендритных шипиков в норме и при нейропатологии, а также разработка методов оценки их кластеризации на базе морфологических признаков. Для проведения анализа использовались данные двух групп дендритов: дендриты культуры гиппокампа мышей дикого типа (Wt) и культуры моделирующие болезнь Альцгеймера (Ab). В рамках исследования были получены метрики, позволяющие оценить плотность расположения шипиков, их кластеризуемость и автокорреляцию относительно метрик формы. Для оценки различий в пространственном распределении шипиков у мышей разных типов был проведен сравнительный анализ данных метрик. Отдельной задачей данного исследования стала кластеризация шипиков с учетом их расположения и выбор оптимальных параметров кластеризации, который был направлен на получение наибольшей меры различий между кластерами относительно метрик формы. Полученные кластеры были исследованы для выявления корреляции между расположением шипиков и их морфологическими характеристиками. Результаты исследования показали, что пространственная организация шипиков у мышей типа Ab и Wt имеет статистически значимые различия, что подчеркивает важность учета пространственных характеристик при изучении дендритных шипиков в норме и при патологии.

ЯЗЫК PLATO КАК СПОСОБ ЗАПИСИ АВТОМАТИЧЕСКИ ПРОВЕРЯЕМЫХ ДОКАЗАТЕЛЬСТВ ТЕОРЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОНТОЛОГИЙ

С каждым годом сложность разрабатываемого программного обеспечения (ПО) возрастает. Цена ошибок в производимом ПО так же возрастает пропорционально его сложности, как и сложность его тестирования. В идеальном мире ПО должно проходить процедуру верификации, то есть, проверку соответствия требованиям, выраженным на формальном языке. Однако данная парадигма проверки ПО на соответствие требованиям не прижилась не только из-за сложности самой процедуры, но и из-за сложности обучения новых специалистов данной процедуре. Существующие на данный момент инструменты формальной верификации, а попросту инструменты автоматического доказательства теорем, имеют слишком высокий порог вхождения и потребовали бы от преподавателей семестрового курса исключительно только по этому инструменту. PLATO предлагает упростить процесс проверки корректности доказательств, записанных студентами за счет того, что преподаватель сам перечисляет понятия предметной области, их функциональные зависимости и аксиомы предметной области. Таким образом, PLATO предоставляет возможность сконструировать свой мини язык доказательств теорем на основе онтологического подхода к организации хранения существующих и получения новых знаний.

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

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯЗЫКА PYTHON КАК ДЕКЛАРАТИВНОГО DSL ОПИСАНИЯ PlantUML ДИАГРАММ

Инструмент PlantUML является повсеместно распространенным в индустрии для работы с UML диаграммами благодаря лаконичному текстовому языку, сильному сообществу и открытому исходному коду программного модуля, позволяющего из текстового описания диаграммы .puml построить ее визуальное отображение. Одно из ограничений к масштабированию использования языка PlantUML в более широком спектре задач обусловлено его полной декларативностью, то есть в нем отсутствуют какие-либо императивные конструкции, изменяющие поток выполнения или позволяющие параметризовать диаграммы. Также нешироки и возможности статического анализа языка PlantUML, что оказывает негативное влияние на удобство использования специфичного и разнообразного синтаксиса языка. Для расширения возможностей использования PlantUML, его можно использовать в паре с императивными языками программирования, осуществляя с помощью них пост- или пре-процессинг файлов описания диаграмм .puml, что потребует от составителя как знания plantUML, так и реализации стабильной логики обработки файлов .puml посредством императивного языка. Принимая во внимание вероятное внедрение императивного языка для решения нестандартных задач на PlantUML, автор использовал гибкость языка Python для разработки библиотеки, позволяющей описывать UML диаграммы с помощью декларативных определений, соответствующих языку Python, с последующей трансляцией в файлы формата .puml для визуализации стандартными инструментами. API библиотеки представляет собой DSL для описания диаграмм. Разработанная библиотека

имеет ядро, вокруг которого, как авторами, так и пользователями библиотеки, добавляются модули работы с теми или иными типами UML диаграмм. Применение библиотеки открывает следующий набор возможностей: добавление семантики предметной области любым элементам нотации PlantUML; использование императивных конструкций языка Python в файле описания диаграммы, например, для параметризации или организации внутренней структуры; статический анализ корректности использования библиотеки с помощью общедоступных инструментов для Python.

А.Ю. Волгузов, Е.А. Родионова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА ПРИЗНАКОВ В ЗАДАЧАХ КЛАССИФИКАЦИИ И АНАЛИЗА ЭКСПРЕССИИ ГЕНОВ

Современная генетика сталкивается с обработкой огромных массивов данных, где число исследуемых генов значительно превышает количество доступных образцов. Это создает сложности при выявлении ключевых биомаркеров, так как традиционные методы отбора признаков нередко приводят к переобучению и затрудняют интерпретацию результатов. В данной работе разработан гибридный метод, объединяющий метаэвристический алгоритм светлячков (Firefly Algorithm) и метод опорных векторов (SVM) для оптимизации подбора информативных генов. В основе подхода лежит применение бинарной версии алгоритма светлячков с дополнительной штрафной функцией, что позволяет сбалансировать размер выбранного подмножества и точность классификации. Экспериментальное тестирование на классических наборах данных экспрессии генов (Colon, Leukemia) показало, что предложенный метод позволяет повысить точность классификации (до 88–99%) при значительном сокращении числа анализируемых генов. Это критически важно для биоинформатики, так как уменьшение размерности данных делает модель более интерпретируемой, а вычислительные затраты — менее затратными. Предложенный метод открывает новые перспективы для диагностики заболеваний и персонализированной медицины, поскольку обеспечивает эффективное выявление биологически значимых генов среди больших объемов данных. Благодаря сочетанию методов оптимизации и машинного обучения он может стать ценным инструментом в области биоинформатики, особенно в задачах поиска потенциальных биомаркеров.

П.Г. Двас, Е.А. Родионова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПРЕДМЕТНО-ОБЪЕКТНАЯ ИНВЕРСИЯ В ПРИМЕНЕНИИ К ЗАДАЧАМ СМЕШАННОГО ЦЕЛОЧИСЛЕННОГО НЕЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ (MINLP)

В работе рассматривается предметно-объектная инверсия, применительно к задачам MINLP на примере известной задачи оптимизации режима полива подсолнечника. В рамках функционально-структурной модели растения GreenLab задаются интенсивности полива в начале и конце жизненного цикла растения. Предметно-объектная инверсия в данном контексте заключается в перестановке ролей между управляющими параметрами (режимом полива) и целевой переменной (весом плода), что позволяет трактовать задачу как задачу

оптимизации, к которой можно применять различные алгоритмы решения. В работе представлен муравьиный алгоритм как эффективный способ решения данной задачи. Проведённое сравнение с методом из оригинальной статьи показало, что предложенный алгоритм обеспечивает лучшие результаты по конечной массе плода, что подтверждает его эффективность в задачах MINLP.

В.Е. Бакшеев, О.И. Заяц

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИОРИТЕТНОЙ СИСТЕМЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ С ДЕТЕРМИНИРОВАННЫМ ВЫТАЛКИВАЮЩИМ МЕХАНИЗМОМ И РАНДОМИЗИРОВАННОЙ ПРОФИЛАКТИКОЙ КАНАЛА ОБСЛУЖИВАНИЯ

В представленном докладе детально изучена одноканальная приоритетная СМО конечной емкости, относящаяся к классу $\overline{M}_2/M/1/k/f_2^2/V_R$ согласно обозначениям Г.П. Башарина с уточнением М. Доши. Данная система обладает следующими свойствами: одним каналом обслуживания, конечной емкостью $k < \infty$, абсолютным приоритетом, детерминированным выталкивающим механизмом, а также возможностью рандомизированной профилактики. Для описания и подсчета финальных вероятностей подобных моделей обычно используется система уравнений Колмогорова, которая в данном случае имеет высокий порядок, пропорциональный, и не поддается аналитическому решению. Вычисление численного решения при практически интересных также оказывается затруднительным. Для решения вышеприведенных проблем было использовано следующее смешанное решение: используя метод производящих функций все финальные вероятности были выражены через +1 «опорных» вероятностей, а последние были вычислены численно используя «укороченную» систему. Такое решение не только позволило решить поставленную задачу, но и подтвердило эффективность метода производящих функций в подобного рода задачах.

И.М. Маликов, К.Н. Козлов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПРЕДСКАЗАНИЕ ФЕНОТИПА РАСТЕНИЙ НА ОСНОВЕ ГЕНОТИПА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРАНСФОРМЕРОВ

Инновационные подходы в предсказании фенотипа на основе генотипа открывают новые горизонты в области молекулярной селекции нута. Исследование посвящено разработке и оптимизации трансформерных моделей, способных выявлять сложные закономерности в обширных генетических данных. В исследовании рассматривается предсказание фенотипа нута (масса 1000 семян, TSW) на основе генотипа с применением трансформерных моделей. Исходные генетические данные получены в лаборатории СПбПУ на основе SNP-маркеров образцов, собранных на опытной станции ВИР. Для обучения использовались координаты наиболее значимых снипов, отобранных методом Random Forest, и их важность. Данные разделены на обучающую и тестовую выборки в соотношении 80/20. Разработанная трансформерная модель включает 4 слоя энкодера, 8 голов внимания и механизм нормализации. В сравнении с градиентными бустингами и случайным лесом (MAPE $\approx 15\%$) трансформеры показали значительно меньшую ошибку (MAPE $\approx 4\%$) при

схожей корреляции (83–84%). Результаты демонстрируют высокую эффективность трансформеров для анализа геномных данных, что способствует ускорению селекционных процессов. Дальнейшая работа направлена на улучшение интерпретируемости модели и интеграцию дополнительных биологических факторов для повышения точности предсказаний. Такой междисциплинарный подход, объединяющий биоинформатику и машинное обучение, открывает новые возможности для разработки устойчивых агротехнологий и повышения продуктивности сельского хозяйства.

Т.А Чибышев, К.Н Козлов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РАЗРАБОТКА И СРАВНЕНИЕ КЛАССИФИКАТОРОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ КОЛОНИЙ ПСКЧ

С целью выявления закономерностей между морфологией актинового цитоскелета и фенотипом получены экспериментальные изображения с иммуно-флуоресцентным окрашиванием для колоний плюрипотентных стволовых клеток человека (174 изображения: 94 «хороший» фенотип, 80 «плохой»). Разработаны три модели классификации. Inception-ResNetV2 объединяет архитектуру с обработкой метаданных, модифицированная VGG работает с малыми данными через пропускные связи и усредняющий пулинг, Swin Transformer использует трансферное обучение с Mixup/Cutmix и заморозку начальных слоёв. При F1-мере Inception-ResNetV2 и VGG 74%, Swin Transformer достиг 88%. Борьба с дисбалансом включала стратифицированное разделение и аугментацию (повороты, отражения). Ключевые факторы успеха: регуляризация, интеграция метаданных в Inception-ResNetV2, упрощение VGG, комбинация Mixup/Cutmix и поэтапное обучение Swin Transformer. Переобучение указывает на необходимость расширения данных, например, через синтетическую аугментацию или контрастное обучение и оптимизации гиперпараметров (снижение скорости обучения, увеличение коэффициентов регуляризации и т.д.). Результаты подчёркивают потенциал трансформеров в анализе биомедицинских изображений при условии баланса между ёмкостью модели и объёмом данных.

А.А. Усиков, М.В. Лагунова

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МАТЕМАТИКА В АЛГОРИТМЕ ТРАССИРОВКИ ЛУЧЕЙ

Трассировка лучей – это алгоритм, который имитирует поведение света, создавая фотореалистичное изображение. Принцип работы основан на испускании лучей из камеры, их пересечении с объектами сцены и вычислении освещения сцены. Пересечение луча с объектами рассматриваются на примере трех фигур – сферы, плоскости и треугольника. Первые два случая легко обрабатываются средствами аналитической геометрии, треугольник хоть и является частным случаем пересечения с плоскостью, но требует дополнительных исследований на предмет попадания луча внутрь него. После нахождения пересечения со всеми объектами их надо вывести на экран. Для этого используется модель освещения Блинна-Фонга с коэффициентами фонового, диффузного, зеркального освещения, а также с коэффициентом Фонга, отвечающим за блики. Чтобы сделать изображение более реалистичным, можно эмулировать отражение луча от объектов или преломление сквозь

них. Это не только создаст на изображении тени от объектов, но и сделает объекты зеркальными. Наконец, чтобы разнообразить изображение, на объекты накладываются текстуры и карты нормалей, придающие фигурам рельефность.

М.И. Аптуков, В.А. Кожевников
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ НАСТРОЙКИ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ СЕРВЕРОВ VEGMAN С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛГОРИТМОВ ОПТИМИЗАЦИИ

Современные серверы оснащаются высокопроизводительными вентиляторами, обеспечивающими интенсивный воздушный поток внутри корпуса и эффективный отвод тепла от нагревающихся компонентов. Для надёжной и эффективной работы серверов необходима настройка температурного режима системных вентиляторов. Наиболее широко распространены Пропорционально-Интегрально-Дифференцирующие регуляторы. Настройка ПИД-регулятора сводится к подбору величин трёх коэффициентов так, чтобы устройство поддерживало заданный параметр на определенном уровне. Рассмотрим программный вариант настройки температурного режима работы системных вентиляторов с использованием алгоритмов оптимизации. Наиболее эффективными методами оптимизации многофакторной целевой функции являются: метод роя частиц, муравьиный алгоритм, метод байесовской оптимизации, генетический алгоритм. Алгоритмы реализованы и визуализированы на python. Программы, реализующие алгоритмы, протестированы на различных серверах VEGMAN. Полученные результаты визуализированы с помощью графиков зависимостей скорости вращения вентилятора, температуры процессоров до и после подбора коэффициентов. В ходе работы удалось подобрать оптимальные коэффициенты, которые даже при импульсной нагрузке позволяют сохранять стабильное охлаждение. Улучшение работы системных вентиляторов обеспечивает оптимальный температурный режим работы серверов VEGMAN.

К.И. Желудев, Ю.К. Шиндер, А.А. Елисеев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ПРИ СБОРКЕ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В работе сформулирована и решена задача минимизации функционала энергии деформации, зависящего от начального положения крыла самолёта относительно фюзеляжа. Решение данной задачи позволяет индивидуально регулировать положение авиационных конструкций на сборочном стенде с целью минимизации сборочных напряжений, что в свою очередь ведёт к уменьшению усталостного износа и увеличению безопасности полётов. Через формулировку контактной задачи в терминах задачи квадратичного программирования была показана взаимосвязь начального положения деталей конструкции и зазора в области соединения. В ходе исследования значений функционала энергии деформации было установлено, что функционал по поведению похож на многочлен второй степени (квадрику) относительно положений закреплений деталей. Как следствие, для оптимизации функционала, помимо метода покоординатного спуска, было задействовано суррогатное моделирование. На основе вычисленных значений функционала строилась

наиболее подходящая квадратура методом наименьших квадратов, точка оптимума которой находилась аналитически. После выбора тестовой модели и нескольких вариантов начальных положений деталей конструкции, был проведён сравнительный анализ результатов работы рассмотренных методов. В результате работы, был сделан вывод о применимости предложенных подходов на сборочных линиях в авиационной промышленности.

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

ЛОГИСТИЧЕСКАЯ АППРОКСИМАЦИЯ СИСТЕМЫ НЕРАВНООТСТОЯЩИХ ТОЧЕК

В данной работе разработана математическая модель физического процесса $y = f(x)$, представляющая собой новый метод аппроксимации экспериментальных данных. Одной из ключевых особенностей этого метода является неравномерная сетка экспериментальных значений аргумента x_i . На множестве экспериментальных точек $\{x_i; y_i\}$, где индекс i изменяется пределах $i=0, 1, \dots, N-1$, где N – суммарное количество точек, математическая модель аппроксимации основана на композиции сигмоидных функций, зависящих от единственного безразмерного параметра Lg . Важным аспектом предлагаемой математической модели $f(x)$ является учет большого количества существенных выбросов в экспериментально измеряемых величинах y_i , которые свидетельствуют о сильной нестационарности изучаемого процесса. В работе проанализирована зависимость точности аппроксимации предлагаемой модели от параметра Lg и показано удовлетворительное согласие предлагаемой модели с экспериментальными результатами, а также обсуждаются аппроксимационные свойства различных методов аппроксимации.

Я. Тырыкин, К.Н. Козлов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДУКТИВНОСТИ НУТА НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ И СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Нут – важная часть мировой сельскохозяйственной промышленности с продовольственной точки зрения. Главная цель исследования – прогнозирование двух показателей продуктивности данной растительной культуры. Генетические данные и параметры окружающей среды объединялись и кодировались в виде изображений, после чего использовались для обучения и тестирования модели для прогнозирования массы тысячи семян (TSW) и количества семян с растения (SNpP). Модель состоит из компонент сверточной нейронной сети, обученного словаря для разреженного представления образцов и градиентного бустинга для построения регрессии. Точность прогноза модели по обоим признакам составляет 84-85%. Наиболее важные факторы выделялись при помощи регрессионных карт важности. Определены важные SNP для обеих прогнозируемых величин в 34 и 49 генах соответственно. Прогнозирование генотипа вкупе с разработанной моделью может помочь более эффективно выводить сорта с необходимыми качественными показателями, используя генотипическое и фенотипическое разнообразие. Будущее развитие модели – применение рекуррентных моделей и моделей с памятью, а также трансформеров для улучшения точности прогноза и, возможно, уменьшения числа предикторов.

СЕКЦИЯ «МЕХАНИКА И ПРОЦЕССЫ УПРАВЛЕНИЯ»

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

СИНТЕЗ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОУПРУГИХ МОДЕЛЕЙ ПОНИЖЕННОГО ПОРЯДКА ДЛЯ НАНО- И МИКРОСИСТЕМ НА БАЗЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

При моделировании микро- и наноэлектромеханических систем возникает необходимость многочисленных динамических расчетов с учетом геометрических нелинейностей и электростатических сил. Динамическое моделирование с помощью полной конечно-элементной модели системы с учетом нелинейности не является целесообразным. Синтез моделей пониженного порядка позволяет значительно увеличить быстродействие расчетов и использовать системы динамического моделирования. В докладе описан метод синтеза моделей пониженного порядка на основе конечно-элементного метода.

Имеется конечно-элементная модель системы. Первым шагом является определение собственных форм и частот колебаний конечно-элементной модели и выбор собственных форм, необходимых для анализа. Затем принимается, что нелинейная жесткость имеет вид квадратно-кубического полинома модальных координат, и определяются коэффициенты полинома путем приложения к модели линейных комбинаций перемещений собственных форм и определения сил реакций. Электрическая ёмкость выбирается полиномом четвертой степени модальных координат, коэффициенты определяются аналогично коэффициентам полинома нелинейной жесткости. В итоге получается система нелинейных дифференциальных уравнений в модальных координатах, описывающая поведение системы при возбуждении выбранных собственных форм. Работоспособность метода показана на примерах.

М.М. Баккар, А.А. Мхемид-Дбес, А.С. Семенов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СТАТИЧЕСКУЮ И ЦИКЛИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ЛОПАТКИ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ

На основе результатов многовариантного конечно-элементного анализа исследуется влияние температуры и ее градиента, скорости вращения и истории ее изменения в цикле на напряженно-деформированное состояние и прочность неохлаждаемой рабочей лопатки газотурбинной установки, изготовленной из никелевого суперсплава IN738. Результаты выявили различные закономерности локализации напряжений: центробежные силы доминировали при более высоких скоростях вращения, вызывая максимальное напряжение по Мизесу вблизи корня лопатки, в то время как температурные градиенты смещали пиковое напряжение к середине пера лопатки. Взаимодействие этих факторов определяет миграцию зон накопления повреждений в зависимости от режима нагружения. Результаты исследований указывают на необходимость мультифизического моделирования для оптимизации конструкции современных лопаток газотурбинных установок.

А.Н. Булгаков, В.И. Гультяев, А.А. Алексеев, А.Н. Широков
Тверской государственной технический университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СЛОЖНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СТАЛИ 45 В ДВУХМЕРНЫХ ОПЫТАХ В ПРОСТРАНСТВЕ ДЕФОРМАЦИЙ ПО ЛОМАНЫМ ТРАЕКТОРИЯМ

В работе приведены результаты экспериментального исследования деформирования тонкостенных цилиндрических оболочек из материала сталь 45 по плоским двухзвенным ломаным траекториям. Методика проведения экспериментов и экспериментальные результаты представлены в векторном представлении напряжений S_i и деформаций \mathcal{E}_i ($i=1,3$) по А.А. Ильюшину.

Первый участок деформирования, до точки излома траектории, общий для всех программ эксперимента соответствует пропорциональному растяжению с кручением. Излом траекторий производился по ходу часовой стрелки на отрицательные углы -45° , -90° , -135° при достижении значения деформации $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2 = 2\%$. После излома вид нагружения отличался для всех траекторий.

Рассмотрено математическое моделирование сложных упругопластических процессов деформирования и нагружения. Представлены определяющие соотношения, аппроксимирующие функции и параметры аппроксимаций. Приведены результаты численного решения дифференциальных уравнений теории процессов методом Рунге-Кутты 4-го порядка точности для траектории с углом излома -90° .

Я.Ю. Голыженков
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ ПЛАНЕРНОГО ТИПА

Технический прогресс последних десятилетий привел к быстрому развитию микросистемной техники и электроники, миниатюризации аккумуляторов и развитию технологий связи, что обусловило рост популярности малой и беспилотной авиации и ее внедрение в различные сферы деятельности человека. БПЛА имеют ряд преимуществ перед «традиционной» авиацией, таких как: малая стоимость, высокая маневренность, простота обслуживания, быстрое развертывание. На сегодняшний день БПЛА различного типа широко применяются в геодезии и картографии, сельском хозяйстве, в поисково-спасательных работах, в работе служб правопорядка, в индустрии развлечений и в других областях. Целью данной работы является создание алгоритма стабилизации и управления полетом БПЛА планерного типа.

Современные автопилоты, разрабатываемые для БПЛА, зачастую являются более сложными по сравнению с автопилотами в пилотируемой авиации. Это обусловлено тем, что на автоматику современных БПЛА ложится намного более широкий спектр задач, чем у пилотируемых ЛА. В качестве объекта управления рассмотрен БПЛА с известными аэродинамическими характеристиками. В процессе работы решаются проблемы, возникающие при воздействии на аппарат вертикального и бокового ветров, влекущих смещение относительно заданной траектории и изменение высоты полета. Решаются задачи определения требуемой траектории полета, вычисления фактической траектории на основе информации, полученной системой ориентации и навигации. Рассматриваются принципы создания автопилотов тангажа и курса.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОАБРАЗИВНОГО ИЗНОСА РАБОЧЕГО КОЛЕСА В ЛОПАСТНОМ НАСОСЕ

Установки электроприводных лопастных насосов (УЭЛН) являются самым распространенным типом установок, эксплуатируемых на скважинах. С их помощью добывается 81% всей нефти Российской Федерации. Наибольшая проблема при их эксплуатации - наличие твердых частиц во флюиде, вызывающих гидроабразивный износ деталей в ступенях нефтяных насосов. Отказы типа износ и засорения составляют более 60% от общего числа отказов УЭЛН на месторождениях, что приводит к значительным финансовым затратам. Особенно износ деталей сказывается на шельфовых месторождениях, где логистика привоза новых деталей значительно затруднена вследствие суровых погодных условий и отсутствия инфраструктуры для транспортной доставки комплектов оборудования. В работе предлагается к рассмотрению моделирование гидроабразивного износа рабочих колес в УЭЛН различной геометрии. На основе полученных данных приводится подбор геометрии для различных режимов работы УЭЛН.

Е.А. Дегилевич¹, А.С. Смирнов^{1,2}

¹ Институт проблем машиноведения РАН

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРОСА КРАНА МЕТОДАМИ МНОГОТЕЛЬНОЙ ДИНАМИКИ

В докладе обсуждаются вопросы применимости стрержневых схем со сосредоточенными параметрами для моделирования тросов, канатов и схожих цепных объектов. Математическая модель троса представляет собой цепной маятник, где в отличие от классической модели учитывается изгибная жесткость. На основе аналитических расчетов, обобщенных на n-мерный случай, проведена проверка сходимости собственных частот троса с ростом числа составных звеньев модели. Методами многотельной динамики с применением программного комплекса MSC.ADAMS созданы модели троса в составе крана и проведены симуляции разных режимов работы крана для проверки сходимости траекторий движения. В результате исследования удастся продемонстрировать применимость многотельной модели для описания цепных систем с распределенными параметрами с помощью объектов со сосредоточенными параметрами, а также определить оптимальное число звеньев, необходимое для моделирования тросов в зависимости от экстремальности режима работы крана. Результаты представляют научный интерес для продолжения исследования цепных систем и имеют практическую ценность для прикладных задач с применением конечномерных моделей.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПЕРЕХОДА В ЗОНУ СНИЖЕННОЙ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ДЛЯ УРАВНОВЕШЕННЫХ СЛОЕВ КВАЗИБЕССИЛОВОЙ СИСТЕМЫ

Доклад посвящен исследованию и разработке квазибессиловой магнитной системы как альтернативного способа генерации сильных и сверхсильных магнитных полей, исключающего экспоненциальный рост размеров и необходимых энергий такой системы.

Рассматривается осесимметричная задача в статической постановке с учетом идеальной проводимости материала, в которой слои системы уравновешены с точки зрения радиальной механической силы Лоренца, возникающей под действием полоидальных и тороидальных магнитных полей и токов.

Для обеспечения плавного перехода магнитного поля из центральной части системы в зону сниженной магнитной индукции предложена расширенная итеративная методика, основанная на равенстве магнитных потоков в каждом слое. Реализация методики выполнена в программном комплексе Matlab и численно апробирована в Comsol Multiphysics, что позволило получить распределения магнитных полей для снижения механических напряжений в системе.

Результаты исследования являются ключевым шагом в проектировании эффективных квазибессиловых систем, способных генерировать экстремальные магнитные поля без значительного увеличения габаритов. Это открывает перспективы для применения таких систем в научных и инженерных задачах, требующих высоких значений магнитной индукции.

У. Карпыков, А.П. Муслимов
Кыргызско-Российский Славянский университет им. Б.Н. Ельцина

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОДАЧИ ИНСТРУМЕНТОВ В ВЫСОКОТОЧНЫХ ТОКАРНЫХ СТАНКАХ

К современным высокоточным токарным станкам предъявляются повышенные требования к стабильности подачи режущего инструмента, изменение ее колебания приводит к снижению точности изготовления детали, увеличению износа инструмента и снижению качества продукции. Традиционные системы регулирования подачи обладают недостаточной динамической адаптацией к изменениям технологического процесса, что ограничивает их эффективного применения. Поэтому разработка автоматической системы стабилизации подачи инструмента, независимо от изменений нагрузки, позволяет повысить точность обработки и срок службы инструмента, поэтому является актуальной задачей.

Нами разработана новая автоматическая система стабилизации подачи инструментов применительна к высокоточным токарным станкам, содержащее обратную электрогидравлическую связь. Основными оригинальными элементами в этой разработке являются тензометрический датчик давления, регулятор расхода и задающее программное устройство, позволяющее устанавливать различные значения подачи инструмента гидросуппорта станка.

В связи с тем, что качественная работа автоматической системы зависит существенно от правильного проектирования регулятора расхода, возникает необходимость в разработке

его математической модели для расчета его параметров, необходимых для проектирования и изготовления и проведения исследования статических и динамических характеристик этого элемента.

Разработанная автоматическая система обеспечивает стабильность подачи режущего инструмента независимо от колебания сил резания, что существенно повышает качество изготовления детали и стойкость инструмента.

О.А. Князев, Н.А. Смирнова

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ РЕГУЛЯТОР В СИСТЕМЕ СТАБИЛИЗАЦИИ СЛАБОДЕМПФИРОВАННОГО ОСЦИЛЛЯТОРА

Исследованы возможности стабилизации равновесия слабодемпфированного осциллятора Дуффинга с помощью параметрического регулятора, включенного в систему с обратной связью. Процедура настройки варьируемых коэффициентов регулятора основана на определении границы возбуждения первого параметрического резонанса для линеаризованной модели осциллятора. Граница определяется с помощью метода стационаризации периодического параметра. В результате при зафиксированной частоте параметрического возбуждения можно оценить требуемую величину амплитуды возбуждения и разность фаз управляющего и выходного сигналов. Приведены результаты численного моделирования, подтверждающие работоспособность замкнутой системы. Показано, что не требующий точных настроек параметрический регулятор улучшает качество стабилизации положения равновесия. При других настройках регулятора замкнутая система может служить генератором устойчивого периодического процесса.

П.А. Кожанова¹, А.Б. Фрейдин^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Институт проблем машиноведения РАН

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО РОСТА В СФЕРИЧЕСКИ-СИММЕТРИЧНОЙ ЗАДАЧЕ

В докладе рассматривается моделирование поверхностного роста на внутренней поверхности полого шара, находящегося под действием внешнего сжимающего давления. Для моделирования кинетики роста используется введенный ранее тензор поверхностного роста, который позволяет учесть влияние внешней нагрузки на скорость процесса зарастания полости.

Вещество доставляется к поверхности полости в результате распределенного по телу объемного подвода и последующей диффузии, которая описывается уравнением диффузии с источниковым членом, задаваемым функцией объемного подвода, и стоком – потреблением подводимого вещества, сосредоточенным на внутренней поверхности. Зарастание полости сопровождается уменьшением радиуса и соответствующим уменьшением напряжений, что, в свою очередь, влияет на скорость зарастания.

Большое внимание уделено выбору и анализу зависимости функции питательного вещества от напряжений. Предполагается, что напряжения влияют через гидростатическую часть тензора напряжений, которая в случае сферической симметрии не зависит от радиуса

точек тела, но зависит от внешнего давления и изменяющегося радиуса полости. При разных внешних давлениях исследуются зависимости радиуса полости и напряжений в шаре от времени.

Предложенный подход может использоваться для понимания процессов в биологических системах, где рост и обратный процесс резорбции играют ключевую роль в адаптации костных тканей к внешним воздействиям.

А.В. Лапотышкин, А.П. Муслимов
Кыргызско-Российский Славянский университет им. Б.Н. Ельцина

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ЗАЗОРА ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ НАПРАВЛЯЮЩИХ ТОКАРНОГО СТАНКА

Применение автоматических устройств в станках, предназначенных для чистовой обработки изделий, дают следующие результаты: повышение производительности; качество продукции (точность геометрических размеров, чистота поверхности), и стойкости инструмента. В высокоточных токарных станках широко применяются гидростатические направляющие и одним из главных регулируемых параметров их является величина зазора, от постоянства которой зависит качество детали. Для решения данной проблемы была разработана автоматическая система стабилизации зазора с электрогидравлической обратной связью в гидростатических направляющих токарного станка. Поскольку основными элементами системы являются гидростатические направляющие и регулятор расхода, были разработаны математические модели необходимые для расчёта их основных параметров. Данная автоматическая система применима и для других типов металлорежущих станков.

М.И. Лобачев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОДНОМЕРНЫХ КВАЗИБЕССИЛОВЫХ МАГНИТАХ

Доклад посвящен исследованию нестационарных процессов в центральной части квазибессилового магнитных систем, которые предлагаются как альтернативный способ генерации сильных и сверхсильных магнитных полей без экспоненциального увеличения размеров системы и требуемых энергий с ростом максимальной величины магнитной индукции. На основе моделей плоского слоя и полого цилиндра решены одномерные задачи диффузии магнитного поля в проводник, теплопроводности и динамики деформируемого твердого тела при воздействии униполярного импульса тока, заданного полуволной синуса.

Рассмотрено влияние объемных сил, возникающих под действием полоидальных и тороидальных магнитных полей и токов. Аналитические решения приведены с использованием преобразования Лапласа, а численные расчеты выполнены в программном комплексе COMSOL Multiphysics. В качестве ключевого параметра использован параметр k , представляющий собой отношение толщины проводника к толщине скин-слоя. Проведено сравнение приращений тепловой энергии с ранее полученными оценками для плоского слоя.

Результаты исследований подтверждают эффективность квазибессилового систем для создания экстремальных магнитных полей и открывают перспективы для их дальнейшего применения в научных и инженерных задачах.

Д.А. Макаров, И.И. Далматов, Е.Д. Назарова, П.А. Упоров
Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГЕОМЕТРИИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЛУШИТЕЛЯ ШУМА ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

В данной работе будет проведено исследование влияние параметров геометрии и конструктивного исполнения глушителей шума ДВС на их эффективность. Изменяемыми геометрическими параметрами являются длина камеры глушителя и её диаметр. В работе будут исследовано влияние на эффективность следующих конструктивных элементов – наличие перегородок, перфорированных труб, а также не соосная установка входного и выходного патрубков. Эффективность глушителей определяется по снижению уровней звукового давления в октавных полосах частот. Данное исследование будет проводиться с применением конечно-элементного моделирования в программных комплексах ANSYS и Atran. Верификация и валидация полученных моделей будет проводиться на основе сертифицированных измерений, проведенных ранее. После верификации моделей будут разработаны глушители с другими геометрическими параметрами и в различных конструктивных исполнениях. В дальнейшем данные глушители будут изготовлены, с последующим измерением их эффективности

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

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАДЕНИЯ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ОБОЛОЧЕК В ВОДУ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ЛАГРАНЖА-ЭЙЛЕРА

В современной научной практике одним из ведущих методов, использующихся для численного описания взаимодействия твердых тел с жидкими средами, является метод конечных элементов (МКЭ). В данной работе с помощью МКЭ, реализованного в программном комплексе LS-DYNA, производится численное моделирование свободного падения упругих деформируемых тел-оболочек различных форм с последующим соударением и вхождением в водную среду. Описание движения в пространстве основывается на комбинированном методе Лагранжа-Эйлера. Особое внимание в данной работе уделено анализу кинематических характеристик и деформированного состояния упругих оболочек при ударном взаимодействии с водной средой, а также варьированию свойств сбрасываемых тел. Результаты численного моделирования сравниваются с экспериментальными данными, представленными в литературе. Полученные в ходе исследования данные могут быть применены при решении широкого класса задач в области моделирования столкновения с водной поверхностью и погружения деформируемых объектов сложных форм.

Н.А. Мирошников, О.Б. Шагниев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИЕЙ ПЛАТФОРМЫ СТЮАРТА С ШЕСТЬЮ ГИДРОЦИЛИНДРАМИ

Платформа Стюарта – это механическая система, состоящая из двух платформ (верхней и нижней), соединённых шестью ногами переменной длины. Ноги платформы представляют собой гидроцилиндры, длина которых изменяется за счёт регулирования давления внутри цилиндров. Работа посвящена разработке математической модели платформы Стюарта. Управление ориентацией платформы осуществляется за счёт расчёта требуемых длин ног в каждый момент времени, учитывая заданное движение платформы и воздействие внешних сил на платформу. Математическая модель включает кинематические уравнения, связывающие длины ног с положением и ориентацией платформы, динамические уравнения, учитывающие силы и моменты, действующие на платформу и алгоритмы управления ориентацией платформы.

В.В. Осташов, П.А. Упоров
Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛА ПО ХРУПКОМУ И ВЯЗКОМУ МЕХАНИЗМУ

В данной работе будут рассмотрены модели разрушения стали на основе имеющихся достижений в области механики деформируемого твёрдого тела. В дальнейшем планируется реализовать при решении задач разрушения в конечно-элементной модели в среде ANSYS. Для вычислений будут задаваться физико-механические и геометрические характеристики образца для разрушения. В результате работы будет определен вид разрушения в каждом конкретном узле в соответствии с теоретической постановкой условий разрушения. При проведении анализа разрушения используется комплексный подход, который объединяет методы механики сплошных сред, теоретической физики, математической теории упругости и механики разрушения. Таким образом, проведенное решение задачи позволит сделать выводы о характере излома и определить его тип. Это дает возможность не только проанализировать состояние материала или конструкции, но и разработать рекомендации для повышения прочности и долговечности в будущем.

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГИХ ВОЛН В ДВУХФАЗНОМ КОМПОЗИТЕ

Моделирование волновых процессов в анизотропных средах является актуальным для различных задач сейсмологии, биомеханики и строительства. В работе модель анизотропного материала строится на основе теории микромеханики. Для моделирования распространения упругих волн сформулирован вариационный принцип Остроградского-Гамильтона. Эффективный тензор упругих модулей получен для двухфазного композита с сфероидальными неоднородностями с учетом взаимодействия по схеме Мори-Танаки.

На основе вариационной постановки сформулирована конечно-элементная схема численного решения. Дискретизация по пространству осуществлялась на основе метода Рунге-Кутты. Для аппроксимации по времени использовалась схема разрывного метода Галеркина. Интегрирование полученной системы обыкновенных дифференциальных уравнений осуществляется симплектической модификацией метода Ньюмарка.

Проведено численное моделирование распространения плоской волны в анизотропном упругом слое. Исследовано влияние микроструктурных параметров модели материала на характер распространения возмущения.

И.В. Привалов, Л.В. Штукин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ МНОГОМАССОВОГО МИКРОРЕЗОНАТОРА

В докладе представлены результаты исследования частотных характеристик многомассового резонатора с различным расположением упругих элементов. Основная цель работы – разработка электромеханического фильтра для радиотехнических систем, способного заменить каскадные фильтры, которые могут вызывать паразитные связи и самовозбуждение.

В работе предложена конструкция фильтра, состоящего из шести балок, расположенных по кругу и связанных упругими перемычками. Проведены расчеты свободных и вынужденных колебаний системы, учитывающие влияние электрического поля на поведение балок. Использован метод Галеркина для решения уравнений колебаний, а также проведена линеаризация уравнений для анализа спектральных характеристик системы. Также найдены возможные положения равновесия элементов данной системы и исследована их устойчивость.

Результаты показывают, что варьирование длин балок и напряжений электрического поля позволяет контролировать собственные частоты системы, что важно для создания полосового фильтра. Также рассмотрены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) системы при различных параметрах возбуждения, часть из которых подтверждает возможность использования предложенной конструкции для фильтрации частот.

Работа демонстрирует перспективность использования электромеханических резонаторов в радиотехнике, особенно в гигагерцовом диапазоне, с применением современных материалов, таких как графен и пьезопленка.

Е.А. Садовченко¹, М.А. Жмайло¹, Е.М. Черновол²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова

РАЗРАБОТКА УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МАТЕРИАЛА КОСТНОГО БЛОКА С РАЗРУШЕНИЕМ

Костные блоки являются искусственными полимерными изделиями, которые изготавливаются из вспененного полиуретана. Такие объекты используются в стоматологии хирургами-имплантологами для обучения, отработки процесса установки дентальных имплантатов, тестирования различных фрез и инструментов для подготовки ложа.

Одним из основных производителей данного материала является американская компания Sawbones, специализирующаяся на создании медицинского оборудования и различных анатомических тренировочных моделей. Блоки этого производителя фактически являются отраслевым стандартом, поэтому именно они рассматривались в представленной работе.

Разработка новых имплантатов и подбор оптимальных протоколов установки, как и многие другие процессы разработки и исследования, могут быть значительно ускорены и удешевлены с применением компьютерного инжиниринга и цифрового моделирования. Для проведения подобных работ необходимым является наличие высокоадекватных моделей материалов – в частности, костных блоков.

В рамках работы проведено большое количество натуральных испытаний, определены физико-механические константы и построены модели разрушения ductile damage.

В.Е. Свистов, Е.Д. Назарова, П.А. Упоров

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им Д.Ф. Устинова

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТАСТРУКТУР

В данной работе будут рассмотрены акустические метаструктуры. Планируется создание конечно-элементных моделей данных метаструктур для изучения их акустических свойств в зависимости от их формы и размеров. Будут созданы акустические газодинамические модели в программных комплексах ANSYS и Atran. Для верификации и валидации данных моделей при помощи FDM печати будут созданы метаструктуры с лучшими акустическими свойствами. Далее будет проведена серия акустических измерений для оценки их звукоизолирующих свойств в реальных условиях. Метаструктуры, рассматриваемые в данной работе, обладают особыми звукоизолирующими свойствами, что позволяет им эффективно уменьшать уровни звукового давления на низких и средних частотах вплоть до 600 Гц. Также подобные метаструктуры являются достаточно тонкими, что обеспечивает их применение в качестве звукоизолирующих панелей в строительстве.

С.А. Смирнов¹, А.К. Беляев^{1,2}

¹Институт проблем машиноведения РАН

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

СРЕДНЕЕ ПОЛЕ СЛУЧАЙНОЙ ВОЛНЫ, РАСПРОСТРАНЯЮЩЕЙСЯ В СРЕДЕ СО СКРЫТОЙ ПЕРИОДИЧНОСТЬЮ

В данной работе рассматривается задача о распространении упругих волн в случайных средах со скрытой периодичностью. В качестве модели, на основе которой исследуется распространение волн в случайных средах, выбрано одномерное волновое уравнение в полубесконечной области. Принимается, что в начале координат происходит гармоническое возбуждение колебаний, на бесконечности задается условие излучения Зоммерфельда. Актуальность такой постановки задачи заключается в том, что она может использоваться при моделировании распространения волн в упругих средах различной природы, имеющих стохастические свойства. Например, данная постановка может служить для описания распространения волн в земной поверхности, геофизические параметры которой

неоднородны и могут быть приняты случайными, а также для исследования распространения волн в различных конструкциях из поликристаллических материалов, поскольку ориентация и размер кристаллических зерен распределены случайным образом.

Принимается, что случайным параметром упругой среды является ее массовая плотность, модуль Юнга задается детерминированным. Для аналитического исследования задачи используется метод интегральных спектральных представлений, который заключается в разложении случайных составляющих в интеграл Фурье-Стилтьеса по волновым числам. Принимается, что спектральная плотность случайной составляющей в массовой плотности соответствует среде, имеющей скрытую периодичность. Данный подход позволяет получить выражения для нахождения математического ожидания случайной волны, распространяющейся в исследуемой среде. Полученные результаты свидетельствуют о том, что достоверная информация о характеристиках рассматриваемой случайной волны снижается по мере удаления от места возбуждения.

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

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Институт проблем машиноведения РАН

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ РАЗГРУЖЕННОЙ КОНФИГУРАЦИИ ТЕЛА

Пластическое течение отвечает необратимым изменениям материала и его разгруженной конфигурации. При классическом подходе при моделировании пластического течения условие текучести формулируется в виде ограничений на величину напряжений в упруго-пластическом теле. В частности, условие текучести Мизеса ограничивает компоненты девиатора тензора напряжений. В данной работе разгруженная конфигурация присутствует в модели в явном виде, наравне с такими определяемыми в процессе расчета величинами как скорость и смещение, а условие текучести сформулировано в виде ограничения на различие между текущей и разгруженной конфигурациями. Превышение этого различия соответствует возникновению пластического течения, разгруженная конфигурация соответствующим образом пересчитывается, а ее изменение представляет собой неупругую пластическую деформацию. Предложена численная реализация, основанная на методе конечных разностей. Проведено сравнение подходов, получены решения частных задач.

С.С. Степанов, О.В. Антонова

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ АНИЗОТРОПНЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ TPU ПЛАСТИКА, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ

В данной работе исследуется механическое поведение анизотропных образцов из термопластичного полиуретана (TPU), изготовленных методом 3D-печати, с использованием численного моделирования. Основное внимание уделено влиянию паттернов заполнения на распределение напряжений и деформаций в материале при механическом нагружении. Для анализа выбраны четыре различных паттерна печати, каждый из которых создает структуру, определяющую анизотропные свойства образца. Численное моделирование выполнено с

применением метода конечных элементов (МКЭ) в программном комплексе LS-DYNA. Результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными данными, полученными в ходе испытаний на одноосное растяжение, представленными в литературе. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации параметров 3D-печати и проектирования изделий из TPU с улучшенными механическими свойствами, что особенно актуально для применения в гибкой электронике, мягкой робототехнике и биомедицинских устройствах.

Э.Б. Тынышов, А.П. Муслимов
Кыргызско-Российский Славянский университет им. Б.Н. Ельцина

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ИЗНОСА СВЕРЛА НА АВТОМАТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ

Одной из ключевых проблем в машиностроении является контроль состояния режущих инструментов, в частности сверл, которые подвержены износу. Особенно остра проблема износа сверл в автоматических линиях, поскольку современные автоматизированные линии характеризуются высокой степенью интеграции различных технологических процессов, требует точного контроля за состоянием инструмента. Контроль износа сверла осуществляется посредством сочетания традиционных методов мониторинга. Существует контроль износа сверла, которая позволяет существенно повысить их стойкость и производительность изготовления деталей.

Основой системы является контроль износа сверла, нами разработана автоматическая система контроля износа сверла путем регулирования подачи инструмента и математическая модель регулятора расхода. Разработанная математическая модель регулятора расхода позволяет произвести расчет масса-геометрических размеров позволяющие произвести расчет параметров необходимых для их проектирования, изготовления и провести статические и динамические исследование характеристик регулятора расхода.

Р.В. Федоренко, А.В. Лукин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ УПРОЧНЕНИЯ НА ДИАГРАММЫ ПРИСПОСОБЛЯЕМОСТИ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКИ НАГРУЖАЕМОГО СОСУДА ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Современные отечественные и зарубежные нормы проектирования атомных станций позволяют проводить оценку прочности конструкций с учетом неупругого поведения материала с использованием идеально пластической диаграммы деформирования. В классической работе Дж. Бри (J.Bree) показано, что использование подобной модели пластического поведения материала позволяет аналитически получить решение задачи приспособляемости сосуда под давлением в виде характерной диаграммы. При этом наличие упрочнение в системе значительно снижает консерватизм результатов оценки прочности.

В данной работе приводятся результаты решения задачи приспособляемости сосуда под давлением в условиях циклически изменяющегося градиента температуры по толщине стенки в случае использования различных моделей пластического поведения (без и с учетом упрочнения в материале). Получены диаграммы приспособляемости при использовании изотропного, кинематического и смешанного упрочнений.

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТРАЕКТОРИИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИНЫ ПРИ ХРУПКОМ РАЗРУШЕНИИ: ПРЯМОЙ ПОДХОД И ТЕОРИЯ ФАЗОВОГО ПОЛЯ.

Рассматривается моделирование процесса распространения трещины при хрупком и квазихрупком разрушении изотропного тела с помощью метода конечных элементов. Сравняется два подхода к моделированию трещины – с помощью явного учета несплошности и на основе теории фазового поля. Явный метод подразумевает наличие трещины как линии разрыва поля перемещений и расчет траектории трещины на основе параметров разрушения – коэффициентов интенсивности напряжений, J -интегралов и др. Метод, основанный на теории фазового поля, предполагает косвенный учет несплошности через введение параметров поврежденности. Для расчета траектории трещины явным методом применяется автоматизированный подход на основе макроса на языке ANSYS APDL. Расчет по теории фазового поля производится с помощью COMSOL Multiphysics. Результаты моделирования распространения трещины сравниваются между собой и с экспериментальными данными.

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

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Институт проблем машиноведения РАН

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕРМО- И МАССОУПРУГОСТИ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ РАЗГРУЖЕННОЙ КОНФИГУРАЦИИ ТЕЛА

Рассматривается подход к описанию задач термо- и массоупругости, основанный на учете в постановке задачи в явном виде разгруженной конфигурации (начального объема) тела и последующем непосредственном изменении величины этой конфигурации при изменении внешних воздействий - температуры, влажности и пр. В рамках такого подхода в работе предлагается в определяющем уравнении задать зависимость разгруженного объема напрямую от температуры (концентрации), тогда как при классическом подходе определяющее уравнение для напряжений содержит отдельное дополнительное слагаемое, зависящее от температуры (концентрации). Как нам представляется, исследуемый подход больше соответствует физическим представлениям о рассматриваемом процессе и, более того, позволяет учитывать не только малые деформации, в отличие от классического способа. В работе предложена численная реализация, основанная на методе конечных разностей, показаны примеры расчета.

Ф.В. Шаделко, В.С. Модестов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

АНАЛИЗ СИСТЕМЫ СБОРА МАЛЫХ ПРОБ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЫЛИ, ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ В ВАКУУМНОЙ КАМЕРЕ ИТЭР РАБОТАЮЩЕЙ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

ИТЭР – это международный проект по созданию экспериментального термоядерного реактора. Основная задача данного реактора – демонстрация, что термоядерная энергия может быть безопасной альтернативой существующим традиционным источникам энергии. Системы реактора находятся в экстремальных условиях, связанных с высокими температурами плазмы (150 млн °С) и сильными магнитными полями (до 13 Тесла). Успех проекта зависит от инновационных материалов и точного моделирования и систем безопасности. В данной работе представлены результаты исследования, направленного на оценку прочности системы сбора малых проб металлической пыли под действием экстремальных нагрузок. Анализ выполнен методом конечных-элементов с использованием программного комплекса ANSYS.

С.А. Широков, А.С. Семенов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ВЛИЯНИЕ ДЕТАЛИЗАЦИИ МИКРОСТРУКТУРЫ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ЭФФЕКТИВНЫЕ УПРУГИЕ И НЕУПРУГИЕ СВОЙСТВА

Микроструктура поликристаллических материалов оказывает существенное влияние на их физико-механические свойства. Размер, форма, ориентация и пространственное распределение кристаллитов, структура межзеренных границ, наличие пор и дефектов, могут значительно изменить механическое поведение материала и его прочностные характеристики. Экспериментальные и теоретические исследования взаимосвязи микроструктуры и механических свойств имеют важное значение для разработки новых высокопрочных материалов, что актуально для многих отраслей промышленности и различных сфер жизнедеятельности человека. В данной работе рассматривается влияние детализации микроструктуры поликристаллических материалов на их эффективные упругие и неупругие свойства. Представлены результаты исследований взаимосвязи между размерами, формой и ориентацией кристаллитов, и механическими характеристиками поликристаллических материалов, полученными методами конечно-элементной гомогенизации. На основе вычислительных экспериментов с использованием уточненных микромеханических (микроструктурных, физических) моделей упругопластического деформирования кристаллитов исследуются эффективные упругие и упругопластические свойства поликристаллических образцов (трехмерных гетерогенных элементарных представительных объемов) с различной микроструктурой.

М.А. Абакарова, Д.С. Кравченко, Е.В. Кустова
Санкт-Петербургский государственный университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ ЦИЛИНДРА СВЕРХЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ С ЛОКАЛЬНЫМ ЭНЕРГОВЛОЖЕНИЕМ

В работе исследуется обтекание кругового цилиндра сверхзвуковым потоком с локальным вложением энергии в области перед головной ударной волной. Для моделирования используется пакет прикладных программ Ansys Fluent. Актуальность данной задачи обусловлена развитием перспективных методов управления и контролирования аэродинамических характеристик тел с помощью различных разрядов (лазерных, микроволновых и т.п.).

Цель работы – воспроизвести результаты эксперимента с помощью численного моделирования и исследовать влияние колебательной и химической неравновесности на ключевые параметры течения. Моделирование проводилось в двух постановках: 1) упрощенная (без учета химических реакций и колебательной неравновесности); 2) полная (с учетом химических реакций и колебательной неравновесности).

По результатам моделирования было проведено сравнение данных о давлении в точке торможения с экспериментально полученным давлением, результаты находятся в удовлетворительном согласии. С целью исследования влияния колебательно-химических процессов оценивалась величина теплового потока на торце цилиндра, обнаружено существенное влияние колебательной неравновесности.

Исследования по данной тематике продолжаются: рассматривается более сложная постановка задачи с использованием 11-компонентной смеси воздуха и учетом процессов ионизации. Планируется, что результаты моделирования будут сопоставлены с экспериментальными данными.

Исследование поддержано грантом № 22-1-1-17-5 Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

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

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВСТРЕЧНЫХ ПРИСТЕННЫХ СТРУЙ В ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПОЛОСТИ

Представляются результаты параметрических расчетов трехмерного нестационарного течения при распространении встречных пристенных струй. Две струи воздуха поступают в полость, форма которой – прямоугольный параллелепипед высотой H , длиной $L = 3H$ и шириной $W = H$, из размещенных на противоположных торцевых стенках припотолочных щелей высотой $h_{in} = 0.056H$. Вытяжные щели высотой $h_{out} = 0.16H$ размещены на тех же стенках в окрестности пола. Число Рейнольдса, построенное по среднерасходной скорости подачи воздуха и высоте входной щели, составляет 5×10^3 . Результаты расчетов на основе решения нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (URANS подход) и с применением метода моделирования крупных вихрей (LES подход) продемонстрировали развитие низкочастотных автоколебаний, амплитуда которых сравнима с величиной средней скорости приточного воздуха. Показано, что глобальная

неустойчивость течения со встречными струями проявляется и при значениях числа Рейнольдса порядка 10^2 , для которых численно решались уравнения Навье-Стокса. Для рассмотренных режимов течения приводится сопоставительный анализ эволюции картин течения и амплитудно-частотного спектра колебаний.

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

М.В. Акунец, А.В. Гарбарук
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И МЕТОДА ГЕНЕТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ RANS-МОДЕЛИРОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Нередко точность расчетов различных типов турбулентных течений с применением полуэмпирических моделей турбулентности является неудовлетворительной. Одной из основных причин этого является неуниверсальность моделей турбулентности, что обусловлено их настройкой на ограниченном наборе течений. Наиболее распространённым методом усовершенствования существующих моделей для тех или иных классов течений является введение в уравнения переноса турбулентных характеристик поправки, зависящей от локальных параметров течения. Одним из перспективных способов определения этой зависимости на базе результатов эксперимента или DNS является применение методов машинного обучения (ML). Целью данной работы является сравнительный анализ эффективности двух наиболее распространённых в газодинамике ML методов, нейронных сетей и Gene Expression Programming (GEP), для усовершенствования модели турбулентности Спаларта-Аллмараса (SA).

В рамках данной работы рассмотрена задача обтекания выпуклости на поверхности, в которой по результатам DNS величина зоны отрыва существенно зависит от числа Рейнольдса, в то время как в результатах RANS моделирования (в том числе и с применением SA модели) такая чувствительность отсутствует. Выполнена модификация SA модели путем введения в уравнение переноса турбулентных характеристик дополнительного множителя перед генерационным слагаемым, выражение для которого определялось с использованием методов машинного обучения. Проведен сравнительный анализ эффективности нейронных сетей и GEP для решения этой задачи.

С.В. Андрейко, А.В. Павлов, П.Г. Бобылев, В.Ю. Митяков
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОГРАНИЧИТЕЛЯ ПОТОКА ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ НА ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ В БОЛЬШОМ ОБЪЁМЕ

Кипение в большом объёме актуально в областях, где необходимо интенсивное охлаждение. Хороший пример – силовые модули электронных компонентов. Один из способов увеличения интенсивности теплообмена – оребрение поверхности кипения. Вместе с ним могут применять ограничители потока охлаждающей жидкости, создающие зазор, через который она поступает к охлаждаемой поверхности. Это позволяет управлять

коэффициентом теплоотдачи на ней. Данная работы нацелена на изучение влияния подобных ограничителей потока на эффективность теплообмена.

В данной работе используется метод градиентной теплотрии, позволяющий определить плотность теплового потока на заданной поверхности. В его основе лежит анизотропия термо- и электропроводности и коэффициента термоЭДС датчика. В результате проявляется поперечный эффект Зеебека, пропорциональный плотности теплового потока.

Для проведения экспериментов была создана установка, позволяющая менять исследуемые поверхности теплообмена на имитируемом «силовом модуле». Рабочим телом выбрана чистая вода. В ходе экспериментов были исследованы поверхности с разными площадями и шагами оребрения, а также построена зависимость плотности теплового потока при кипении воды от температуры «силового модуля».

Е.В. Бабич, Е.В. Колесник

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ ВЯЗКО-НЕВЯЗКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ ТОРМОЖЕНИИ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА В ЩЕЛЕВОМ ДИФфуЗОРНОМ КАНАЛЕ С ПРОДОЛЬНЫМИ ЛОПАТКАМИ

Одним из элементов центробежного компрессора, в котором потери энергии достаточно велики, является лопаточный диффузор, представляющий расположенную по диаметру крыльчатки кольцевую полость, разделенную неподвижными лопатками на ряд расширяющихся криволинейных каналов. При высокой степени сжатия поток на входе в лопаточный диффузор имеет сверхзвуковую скорость, между лопатками формируется прямой скачок уплотнения, который взаимодействует с турбулентным пограничным слоем, развивающимся на поверхности лопаток.

Настоящая работа посвящена численному исследованию эффектов вязко-невязкого взаимодействия, возникающих при обтекании сверхзвуковым потоком воздуха клиновидной лопатки, закрепленной в канале диффузора. Расчеты осредненных по Рейнольдсу трехмерных уравнений Навье-Стокса для вязкого совершенного газа выполнены при помощи конечно-объемного «неструктурированного» программного кода SINF/Flag-S, разрабатываемого в СПбПУ. Проведены подробные методические исследования, посвященные влиянию на основные газодинамические характеристики течения расчетной сетки, модели турбулентности, а также схем численного метода. Проанализированы детальные картины течения и оценены динамические нагрузки.

А.П. Байнов, А.В. Гарбарук, А.А. Матюшенко

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ И ВОГНУТОСТИ ПРОФИЛЯ КРЫЛА С ВОЛНООБРАЗНОЙ ПЕРЕДНЕЙ КРОМКОЙ НА ЕГО АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

При проектировании крыльев самолетов, лопастей ветровых турбин и пропеллеров летательных аппаратов активно используются методы вычислительной гидроаэродинамики (Computational Fluid Dynamics – CFD). Массивный срыв потока на стороне разрежения, возникающий с ростом угла атаки, приводит к резкому изменению аэродинамических

характеристик, что нежелательно для большинства технических устройств. По этой причине активно разрабатываются подходы, обеспечивающие плавное изменение аэродинамических характеристик от угла атаки. Одним из таких подходов является создание волнообразной передней кромки (ВПК) в плоскости крыла, что эквивалентно периодическому изменению длины крыла по его размаху. Несмотря на обширный набор статей, посвященных влиянию параметров ВПК на обтекание крыла, систематические исследования влияния толщины и прогиба крыла с ВПК на его аэродинамические характеристики до сих пор не проводились.

Данная работа посвящена численному исследованию обтекания крыльев семейства «NASA 4-digit» разной толщины и прогиба с ВПК, и выбору их оптимальных параметров с использованием решений уравнений Рейнольдса (Reynolds-Averaged Navier-Stokes – RANS), замкнутых с использованием модели турбулентности SST HL. Выбор этой модели определило то, что она была настроена на описание обтекания крыловых профилей в режимах близких к срыву потока.

В.А. Баранов, А.Г. Абрамов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПРИМЕНЕНИЕ ГРАФОВЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРЕДСКАЗАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В КАНАЛЕ

В работе изучаются возможности применения графовых нейронных сетей для предсказания характеристик пульсирующего течения вязкой несжимаемой жидкости в плоской трубе длиной 1 м и шириной 0.1 м. Наборы данных с временными метками, необходимые для обучения моделей нейросетей, были сформированы в результате проведения нестационарного расчета при числе Рейнольдса 560 на равномерной сетке размерностью 200x20 ячеек в пакете Ansys Fluent. В рамках исследования были апробированы различные виды графовых сверток с выбором нескольких наилучших для последующего применения. Изучение разных режимов работы моделей, в том числе по прогнозированию полей на один шаг по времени, а также на 10 и 100 шагов, позволило оценить предсказательную способность на примере нестационарного течения. Полученные результаты продемонстрировали, в целом, приемлемое качество работы задействованных моделей машинного обучения в разных режимах. Предполагается, что разработанные и апробированные методики и полученные результаты будут использованы в дальнейших исследованиях по применению графовых нейронных сетей, направленных на сокращение вычислительных затрат и улучшение точности предсказаний в задачах из области гидродинамики и теплофизики.

В.А. Баранов, Д.С. Пашкевич, Т.А. Фёдорова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРЕДСКАЗАНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗОНЕ РЕАКЦИИ ГЕКСАФТОРИДА УРАНА, МЕТАНА И КИСЛОРОДА В РЕЖИМЕ ГОРЕНИЯ

Одним из методов переработки обеднённого гексафторида урана (ОГФУ) является его взаимодействие с CH_4 и O_2 в режиме горения. Основным параметром, определяющим состав продуктов, является максимальная температура в зоне реакции, для расчёта которой была

разработана математическая модель турбулентного диффузионного горения, реализованная в «Ansys Fluent».

CFD-расчёты показали, что максимальная температура в зоне реакции составляет около 2220 К.

Для снижения вычислительных затрат при расчёте профиля температуры была разработана регрессионная модель с использованием метода опорных векторов (SVR). Входными данными для обучения модели служили расходы ОГФУ, а выходными – распределения температуры в двух различных сечениях и максимальная температура, полученные при CFD-расчётах. Модель была успешно обучена с малой среднеквадратичной ошибкой. Затраты машинного времени на обучение составили величину порядка единиц секунд.

Результаты предсказания распределения температуры с использованием SVR-модели позволили выявить максимум на зависимости максимальной температуры от расхода ОГФУ, что связано с увеличением турбулентности потока. CFD-расчёты подтвердили наличие этого максимума, различия в значениях максимальной температуры для CFD- и SVR-расчётов составили величину порядка единиц процентов.

Построенная регрессионная модель позволяет предсказывать поля температуры в реакторе реконверсии ОГФУ при различных расходах реагентов. Кроме того, подтверждена эффективность применения методов машинного обучения при малом объёме данных при решении задачи, связанной с диффузионным горением. Затраты машинного времени при использовании SVR-модели значительно ниже, чем при CFD-расчёте.

К.И. Белов, Н.А. Монахов, Т.А. Лапушкина
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА УМЕНЬШЕНИЯ ЧИСЛА МАХА ПАДАЮЩЕЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО КЛАПАНА НА УДАРНОЙ ТРУБЕ

Использование современных методов диагностики ударных волн, таких как измерение теплового потока и ионизации, требуют исключения возможных рисков, связанных с методом запуска ударной трубы. Наиболее распространенный метод – диафрагменный – влечет за собой риск отрыва элементов диафрагмы во время ее раскрытия, что, как следствие, может привести к повреждению поверхности датчиков, используемых для диагностики. Наиболее рациональным решением данной проблемы является переход к бездиафрагменному методу запуска ударной трубы с использованием быстродействующего клапана. Однако, данный метод при всех своих очевидных преимуществах, имеет и ряд недостатков.

В данной работе будет рассмотрен, пожалуй, самый существенный недостаток использования быстродействующего клапана – это уменьшение числа Маха падающей волны по сравнению с диафрагменным методом. Эксперименты проводились на малой ударной трубе ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Выполнены измерения числа Маха падающей ударной волны на нескольких режимах, покрывающих весь рабочий диапазон ударной трубы. Проведен сравнительный анализ данных, полученных в экспериментах, проведенных с использованием быстродействующего клапана и диафрагмы.

А.А. Васильев, С.В. Булович
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА С НАГРУЗКОЙ В ВИДЕ ЛИНЕЙНОГО ГЕНЕРАТОРА

В работе рассмотрена математическая модель термоакустического двигателя Стирлинга на стоячей волне с линейным генератором в качестве нагрузки. Устройство состоит из тепловых блоков, регенератора, акустического резонатора и подвижного поршня, который совершает колебания под воздействием электромагнитных сил и сил давления. Размер резонатора акустического двигателя Стирлинга является переменным и определяется с учетом уравнения движения поршня. Температура поверхности нагревателя и охладителя задается явно в виде граничных условий первого рода. Поле температуры в регенераторе определяется из решения уравнения теплопроводности с учетом сопряженного теплообмена между газом и поверхностью стека. Значение газодинамических функций устанавливается в рамках численного интегрирования системы дифференциальных уравнений Навье-Стокса в двумерной постановке при помощи пакета программ ANSYS Fluent 2023 R1.

А.Н. Габараев, С.В. Булович
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РАСЧЕТ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВНУТРЕННИХ БАРОТРОПНЫХ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКОГО ГАЗА В ПРИБЛИЖЕНИИ УЗКОГО КАНАЛА

В баротропном приближении, в рамках системы уравнений Прандтля, проведено исследование течения сжимаемого газа в замкнутом плоском протяженном канале. В работе рассмотрено асимптотическое поведение газодинамических функций при различных начальных данных, включая разрывы. Проведены расчеты различных нестационарных режимов течения. Поля давления и продольной компоненты скорости сравниваются с решением, полученным численным интегрированием системы уравнений Навье-Стокса в пакете программ Ansys Fluent. На основании сопоставления вычислительных затрат и точности совпадения поведения функций делается вывод об оправданности применения системы уравнений Прандтля для моделирования течения в акустическом двигателе Стирлинга.

Для численного интегрирования системы дифференциальных уравнений Прандтля по времени использована явно-неявная схема, позволившая реализовать безытерационный алгоритм вычислений. В программе реализовано преобразование координат, которое отображает физическую область в расчетный прямоугольник. Также использованы различные методы интерполяции значений функций на грани ячеек.

ВАЛИДАЦИЯ ОСНОВАННОГО НА ГЛОБАЛЬНОМ АНАЛИЗЕ УСТОЙЧИВОСТИ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА В ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЯХ С НЕОДНОРОДНОСТЯМИ ПОВЕРХНОСТИ

Определение положения ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП) в пограничных слоях (ПС) – важная задача внешней аэродинамики. В таких задачах одним из самых распространённых является естественный сценарий ЛТП, при котором переход наступает в результате конвективной неустойчивости волн Толлмина-Шлихтинга (ТШ). Неоднородности поверхности, неизбежно присутствующие в реальных конструкциях, могут значительно влиять на эволюцию волн ТШ и положение естественного ЛТП. В этом случае положение ЛТП может быть определено с использованием недавно предложенного метода, основанного на Глобальном Анализе Устойчивости (ГАУ). Настоящая работа посвящена валидации этого метода.

Для валидации использовались два набора экспериментальных данных. В первом эксперименте рассматривался ПС на плоской пластине с обратными уступами без градиента давления. Во втором рассматривался ПС на плоской пластине с прямыми и обратными уступами с градиентом давления, индуцированным профилированной стенкой аэродинамической трубы над пластиной. Поскольку экспериментальный профиль стенки неизвестен, была решена обратная задача по поиску формы верхней стенки, обеспечивающей распределение давления, соответствующее эксперименту.

Положения ЛТП, предсказываемые ГАУ, близки к экспериментальным, что подтверждает применимость разработанной методики для рассматриваемого класса течений.

Н.Д. Дегтярев
Балтийский государственный технический университет им. Д.Ф. Устинова

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНОГО ОБТЕКАНИЯ МОДЕЛИ ЛА С ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ УПРАВЛЕНИЯ

В рамках данной работы было проведено численное моделирование обтекания двух конфигураций выдува струи воздуха с задней кромки крылового профиля: выдув струи с задней кромки и с нижней поверхности.

По результатам получены зависимости коэффициентов сил, действующих на крыловой профиль, от коэффициента импульса струи и угла атаки. При помощи коэффициента влияния показано, что для значений коэффициента импульса струи в пределах от 0 до 1 максимальный вклад реактивного закрылка в подъемную силу составляет около 2%, в то время как для закрылка с управлением циркуляцией это значение составляет около 50%. Для того чтобы добиться аналогичного результата при управлении выдувом с нижней поверхности крыла необходимо значительно увеличивать импульс струи, что делает этот способ управления в исследованной конфигурации менее эффективным. Для устранения этого недостатка необходимо пересмотреть конфигурацию выдува с нижней поверхности в части угла выдува и расположения сопла.

Для более эффективного метода управления обтеканием была показана возможность получения непрерывной зависимости подъемной силы от импульса струи и угла атаки при

безотрывном обтекании. Частное уравнение для такой зависимости было получено для аэродинамического профиля GOE 134. Поле значений подъемной силы, полученное по этому уравнению, совпало с результатами численного моделирования.

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

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОУПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ТОНКОЙ ПЛАСТИНЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НЕЁ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

В работе представляются результаты численных расчётов теплопередачи и напряжённого состояния в тонкой квадратной кремниевой пластине при воздействии на неё лазерным излучением. Расчёты выполнялись с использованием специализированного программного кода CVDSim3D, в котором было реализовано уравнение термоупругих напряжений в изотропном стационарном случае с использованием метода конечных объёмов. Также для анализа термоупругих напряжений использовалась программа «SCAD+», основанная на методе конечных элементов, где были заданы температурные нагрузки, проведён расчёт и определены напряжения, возникающие вследствие нагрева. Проведено параметрическое исследование влияния мощности лазерного излучения и некоторых параметров пластины на величину и характер термоупругих напряжений. Результаты расчётов сравниваются с численными и экспериментальными данными других авторов и демонстрируется хорошее согласие результатов.

А.С. Еропов, Е.М. Смирнов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РАЗВИТИЕ ТУРБУЛЕНТНОЙ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ У ВНЕЗАПНО НАГРЕВАЕМОЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ С ЛОКАЛЬНЫМИ ИНТЕНСИФИКАТОРАМИ ТЕПЛООБМЕНА В ВИДЕ НАКЛОННЫХ РЕБЕР

Представляются результаты численного моделирования нестационарной свободной конвекции, развивающейся у внезапно нагреваемой пластины, на которой периодически расположены локальные интенсификаторы теплообмена в виде тонких наклонных ребер. Расчетные данные получены посредством решения нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (URANS-подход) с применением двухпараметрической модели турбулентности $k-\omega$ SST. Анализируется структура эволюционирующего во времени решения, характеризуемого наличием низкочастотных осцилляций, и изменения в средней теплоотдаче по мере роста толщины пограничного слоя. Показывается, что установка макрошероховатостей рассматриваемого типа приводит к значительной интенсификации теплоотдачи по сравнению со случаем гладкой пластины.

К.К. Забелло, А.В. Гарбарук
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О МОНОПОЛЕ МЕТОДОМ РЕШЕТОЧНЫХ УРАВНЕНИЙ БОЛЬЦМАНА

В работе исследуются применение метода решеточных уравнений Больцмана (LBM) для решения задачи о монополе в неподвижной среде. Основное внимание исключению влияния ключевых параметров метода, таких как вид граничных условий, оператор столкновений, количество узлов сетки на длину волны и акустическое число Кнудсена. Показано, что выбор оптимальных параметров характеристических граничных условий с демпфирующим слоем обеспечивает отсутствие отражения волн от выходной границы.

Исследование выявило, что оператор ВГК (Бхатнагара-Гросса-Крука) приводит к возникновению паразитных осцилляций в решении, в то время как оператор MRT (Multiple Relaxation Time) демонстрирует более гладкое решение. Для обоих операторов определен порядок ошибки в зависимости от акустического числа Кнудсена и шага сетки.

Полученные результаты позволяют сформулировать практические рекомендации для проведения акустических расчетов методом LBM.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭФФЕКТОВ ПЛАВУЧЕСТИ НА ДВИЖЕНИЕ ВИХРЕВОЙ СТРУКТУРЫ, ФОРМИРУЮЩЕЙСЯ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ПОДАЧЕ СТРУИ В ЗАТОПЛЕННОЕ ПРОСТРАНСТВО

В работе выполнено численное моделирование течения и теплообмена, формируемого при импульсной подаче турбулентной струи ($Re = 1,5 \cdot 10^4$). Значение перепада температуры ΔT между импульсной струей и окружающей средой варьировалось от 10 до 40°C, соответствующие значениям числа Грасгофа, определенные в момент подачи струи, равны $(2...8) \cdot 10^5$. Угол между направлением подачи импульсной струи и гравитационной силой α изменялся от 0° (направления совпадают) до 180°. Задача решалась в осесимметричной (2D) и 3D постановках, на основе URANS подхода с использованием стандартной $k-\varepsilon$ модели турбулентности.

Показано, что после окончания подачи струи наблюдается формирование вихревого облака и его последующее распространение. С увеличением угла α вихревое облако дольше находится в движении и распространяется на большие расстояния. Так, при $\alpha = 180^\circ$ облако распространяется на 40 калибров дальше, чем при $\alpha = 0^\circ$ (здесь $\Delta T = 20^\circ\text{C}$). Для вариантов $\alpha = 30^\circ...150^\circ$ сформировавшееся вихревое облако отклоняется от оси распространения импульсной струи, максимальное отклонение происходит при $\alpha = 120^\circ$ и составляет 13 калибров.

При изменении ΔT существенно изменяются во времени характеристики вихревых облаков. Так с увеличением ΔT при $\alpha = 0^\circ$ вихревое облако быстрее останавливается, его центр смещается на меньшие расстояния, при $\alpha = 180^\circ$, наоборот, продвижение облака осуществляется на большие расстояния, время движения облака увеличивается.

ТЕРМОХИМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ РЕГЕНЕРАЦИИ ФТОРА В ФОРМЕ ФТОРИДА ВОДОРОДА ИЗ ТЕТРАФТОРМЕТАНА ПРИ ЕГО ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИМИ ВЕЩЕСТВАМИ В РЕЖИМЕ ГОРЕНИЯ

Фториды углерода, в том числе тетрафторметан (далее ТФМ), гексафторэтан, политетрафторэтилен и другие являются весьма термо- и химически стабильными веществами в связи с высоким значением энергии ковалентной связи С-Ф (485 кДж/моль) и стерической изоляции С-С связи атомами фтора. В тоже время в современной промышленности образуется значительное количество отходов этих веществ. Например, только в России накоплено до 100 тыс. тонн отходов политетрафторэтилена, эффективные технологии переработки которого отсутствуют.

Известно, что эффективным методом регенерации фторида водорода, основного фторирующего агента при производстве коммерческих соединений фтора, из различных фторидов является их взаимодействие с водородсодержащими веществами и кислородом в режиме горения.

Поэтому были проведены термодинамические расчёты зависимости изменения энергии Гиббса для реакций взаимодействия ТФМ (наиболее стабильно фторуглерода) с водородом, метаном, аммиаком и кислородом, воздухом в зависимости от температуры, теплового эффекта этих реакций и адиабатической температуры продуктов без учёта их диссоциации.

Показано, что полная регенерация фтора в форме HF на основе указанного метода термодинамически не запрещена во всём реальном диапазоне изменения температуры, когда количество атомов фтора равно количеству атомов водорода. Адиабатическая температура продуктов реакции без учёта их диссоциации составляет величину порядка 3000 К при использовании кислорода, и порядка 2000 К при использовании воздуха, что позволяет предположить, что эти процессы могут быть реализованы в режиме горения.

С.А. Князев, В.В. Сероштанов, А.А. Гусаков
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ВЛИЯНИЕ СТЕРЖНЕЙ-ТУРБУЛИЗАТОРОВ НА ТЕЧЕНИЕ И ТЕПЛООБМЕН ВБЛИЗИ ЦИЛИНДРА

Повышение энергоэффективности теплообменного оборудования – наиболее актуальное направление исследований в области тепло- и массообмена. Использование поверхностных интенсификаторов позволяет увеличить коэффициент теплоотдачи (КТО) и снизить гидравлическое сопротивление.

Представлено экспериментальное исследование конвективного теплообмена на поверхности одиночного кругового цилиндра, оснащенного круглыми стержнями-турбулизаторами относительной толщиной $d/D = 0,024$ и $0,048$ (d и D – диаметры турбулизаторов и несущего цилиндра, соответственно). Два стержня симметрично устанавливались вдоль образующих цилиндра на угол $\psi = 30...60^\circ$, отсчитываемый от лобовой образующей. Экспериментальная модель – полый цилиндр, обогреваемый насыщенным водяным паром при атмосферном давлении. Таким образом на поверхности

цилиндра обеспечивается постоянство температуры. Исследования проводились при числе Рейнольдса $Re = 9600$.

В работе применены две методики: Particle Image Velocimetry (PIV), позволившая получить поля скоростей вблизи цилиндра, и градиентная теплометрия, применявшаяся для измерения местной плотности теплового потока и коэффициента теплоотдачи по поверхности цилиндра.

Комплексное исследование позволило определить влияние стержней-турбулизаторов на структуру потока в лобовой части цилиндра и распределение местного КТО. Наибольшее влияние на течение и теплообмен оказывает установка стержня диаметром 1,6 мм во всем рассматриваемом диапазоне углов установки ψ .

В.Ю. Коёкин, С.В. Булович

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ РОТОРНО-ЛОПАСТНОЙ МАШИНЫ ПО ХОЛОДИЛЬНОМУ ЦИКЛУ

В работе рассматривается роторно-лопастная машина (РЛМ) в производстве холода, работающая по открытому термодинамическому циклу. Модель охладителя включает в себя рабочие камеры, теплообменный аппарат и выходной коллектор.

Исследование холодильного цикла машины проводилось с помощью математического моделирования методом узлового анализа. Термодинамическое состояние рабочего тела в элементах охладителя представлено сосредоточенными узловыми значениями. В рамках метода учитывалось изменение объема камер и их массообмен, через окна газораспределения, с другими конструктивными элементами. В качестве рабочего тела выступал воздух. На вход в холодильный аппарат газ подавался при атмосферных условиях, выпуск производился также в атмосферу.

Выполнен анализ холодильного цикла РЛМ. Исследовано влияние геометрических параметров двигателя на выходные параметры холодильной машины.

Л.Д. Кондратьев, С.В. Булович

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СЕГМЕНТЕ ТЕПЛОВОГО БЛОКА АКУСТИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА

В двумерной постановке, в рамках численного интегрирования системы дифференциальных уравнений Навье-Стокса, проведено математическое моделирование течения газа в акустическом двигателе Стирлинга. Для определения значения температуры в регенераторе решена нестационарная задача теплопроводности.

Рассмотрена упрощенная конструкция устройства, состоящая из тепловых блоков, регенератора и акустического резонатора. Выбраны значения параметров задачи, приводящих к возбуждению в резонаторе двигателя стоячей волны. Для режима течения, близкому к установившемуся, в области регенератора и тепловых блоков, проанализированы нестационарные поля температуры, давления и вектора скорости.

Исследован процесс сопряженного теплообмена газа со структурой регенератора в виде решетки параллельно расположенных друг к другу плоских пластин. При рассмотрении

одного периода колебания газа в резонаторе двигателя Стирлинга получены мгновенные поля температуры в пластине с учетом теплотехнических свойств материала стека и знакопеременного, нестационарного теплового потока. Установлена закономерность продольного распределения значений температуры в пластине, как среднее значение по сечению, являющейся определяющим параметром для анализа работы акустической тепловой машины.

Д.Ю. Конин, А.Г. Пулин, И.Ю. Талабира, В.С. Модестов, А.А. Попович
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПОВЫШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ГЛУБИНЫ ОХЛАЖДЕНИЯ В КАНАЛАХ ЛОПАТОК ГАЗОВЫХ ТУРБИН С ПОМОЩЬЮ ТПМП РЕШЕТЧАТЫХ СТРУКТУР

В данной работе исследуется процесс охлаждения канала. Исследуемый канал моделирует фрагмент системы охлаждения лопатки газовой турбины. Тепло подводится к внешней поверхности канала, тогда как внутри него протекает охладитель, обеспечивающий теплоотвод от стенок канала и лопатки. Для повышения эффективности теплообмена в данном исследовании применяется решетка с трижды периодической минимальной поверхностью (ТПМП), способствующая срыву пристенного слоя нагретого охладителя, формированию завихрений и интенсивному перемешиванию потоков с разными температурами, что увеличивает интенсивность конвекции.

В ходе работы были произведены расчеты гладкого модельного канала системы охлаждения, а также канала охлаждения с гироидной ТПМП решетчатой структурой, были получены значения числа Нуссельта, безразмерного коэффициента глубины охлаждения, а также значения потерь давления в канале в зависимости от числа Рейнольдса.

ТПМП решетка увеличивает число Нуссельта до 6 раз в сравнении с гладким каналом. Установлено, что применение решетки с ТПМП приводит к увеличению безразмерного коэффициента охлаждения в среднем на 50 % по сравнению с гладким каналом. Однако коэффициент местных потерь давления в случае интеграции решетчатой структуры более чем в 10 раз больше, чем у гладкого канала.

Для верификации численных расчетов планируется проведение эксперимента на экспериментальном стенде для гидравлических испытаний. Будут измерены потери давления в канале с ТПМП-решёткой при различных режимах течения. Ожидается, что экспериментальные данные подтвердят расчётные значения потерь давления.

Т.С. Корскова, М.А. Засимова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ВОЗДУХА В ВЕНТИЛИРУЕМОМ ПРОСТРАНСТВЕ ПРИ ПОДАЧЕ ПРИТОЧНОЙ СТРУИ ЧЕРЕЗ ОСЦИЛЛЯТОР

Рассматривается задача о движении воздушной среды в вентилируемом пространстве при подаче воздуха (при $Re = 10^4$) через осциллятор, который формирует автоколебания приточного расхода и периодически изменяет направление подачи струи. Решалась задача установления течения в помещении: в начальный момент температура воздуха в помещении задавалась равной 36°C , температура охлаждающей струи – 20°C . Параметры течения и теплообмена сравниваются с результатами для задачи постоянным расходом приточного

воздуха (стационарная подача приточного воздуха). Моделирование течения и теплообмена выполнено в 2D и 3D постановках для случаев подачи воздуха через щелевое отверстие и ограниченное по размаху отверстие квадратной формы. Расчеты проведены в пакете ANSYS Fluent на основе URANS подхода с использованием модели $k-\omega$ SST. В работе подробно описываются характеристики нестационарного течения в осцилляторе. Показано, что при подаче воздуха через осциллятор обеспечивается лучшее перемешивание потока в вентилируемой области в сравнении с результатами, полученными при стационарной подаче.

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

Н.В. Кутузова, С.И. Мезенцев, Д.А. Усов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕННОЙ НАСАДКИ РЕКУПЕРАТОРА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРЫ ТРИЖДЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ МИНИМАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Качественный воздух необходим для хорошего самочувствия и здоровья дыхательной и иммунной систем человека. Индустриализация и научный прогресс привели к тому, что человек большую часть времени проводит в закрытых помещениях: цехах, офисах и административных зданиях. С течением времени городская жизнь в многоэтажных домах стала преобладать над жизнью на собственных земельных участках на свежем воздухе. Поэтому в современных реалиях существенное внимание уделяется вентиляционным системам.

Бытовые децентрализованные системы, например, рекуператоры, доступные и удобные для решения проблемы проветривания помещений. Рекуператор осуществляет приток свежего воздуха и вытяжку отработанного, а теплообменная насадка, как его составная часть, способствует передачи тепла от выходящего воздуха к входящему. Такой физический процесс характеризует энергоэффективность насадки и позволяет достичь комфортной температуры в помещении, особенно в холодное время года.

Эффективность насадки зависит от её материала и структуры. Наиболее распространенный представитель такой насадки зарубежного производства — это керамическая насадка с прямоугольным сечением каналов внутри. Однако такая конфигурация не является лучшей. В данной работе рассматривается теплообменная насадки с внутренней структурой из трижды минимальных периодических поверхностей. Сложное заполнение достигается благодаря применению аддитивных технологий. В результате натурных испытаний были найдены зависимости коэффициента теплоутилизации, который характеризует эффективность теплообменной насадки, от параметров структуры трижды минимальных периодических поверхностей.

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

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ РАЗЛИЧНЫХ RANS МОДЕЛЕЙ К РАСЧЁТУ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ В СЛОЕ С ОБЪЁМНЫМ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЕМ

В данной работе проводится численное моделирование турбулентной естественной конвекции в слое жидкости с объёмным источником тепла и охлаждаемыми горизонтальными стенками. Основная цель исследования – оценка применимости различных RANS-моделей для предсказания осреднённых характеристик течения, таких как температура и тепловые потоки. Для расчётов используется программное обеспечение OpenFOAM v11. Также исследуется влияние числа Рэлея на характер течения, рассмотрены значения 10^6 , 10^8 , 10^{10} . Результаты расчётов сравниваются с эталонными данными DNS-расчётов (Goluskin D., van der Poel E.P, 2016). Проведённое исследование позволяет сделать выводы о применимости различных RANS моделей турбулентности для описания теплообмена в рассматриваемой задаче.

П.В. Любимов, Е.М. Ротинян
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ РАСХОДОМЕРА СРЕДЫ ДЛЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТРУБНЫХ УЧАСТКОВ, ОСНОВАННОГО НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ

Объектом исследования в работе является датчик расхода среды, на основе крыла НАСА, где основополагающей функциональной зависимостью будет зависимость между расходом жидкости и подъемной силой, возникающей на плоскости крыла. Предметом исследования выступает горизонтальный участок трубы с водой, где для измерения устанавливается датчик. Основная задача сводится к построению математической модели, связывающей подъемную силу со скоростью течения среды в условиях горизонтальной трубы, а также к решению проблемы разнородных углов атаки, применением профилирования крыла для его стабилизации. Для построения 3-D модели и проведения исследования в качестве прототипа аэродинамического профиля крыла выбран профиль НАСА 2412. Основные данные о конструкции крыла: максимальная толщина 12% на расстоянии 30% хорды от входной кромки, максимальный развал 2% при 40% хорды.

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

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РАВНОВЕСНОЙ МОДЕЛИ ВЛАЖНОГО ВОДЯНОГО ПАРА В КОДЕ SINF/FLAG-S И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ТРАНСЗВУКОВЫХ ТЕЧЕНИЙ

В большинстве случаев при расчетах течений сжимаемого газа для замыкания системы уравнений Навье-Стокса используется уравнение состояния совершенного газа. Однако данное термодинамическое соотношение не позволяет рассматривать поведение газа в достаточно широком диапазоне температур и давлений, обусловленном движением с

высокими скоростями и возникновением таких особенностей как скачки уплотнения. Этот факт имеет критическое значение в случае приближения термодинамических параметров газа к значениям, предполагающим фазовый переход. При этом, на практике нередко достигаются подобные состояния. В данной работе рассматриваются течения, в которых наблюдаются равновесные конденсация водяного пара и испарение жидкости.

Для возможности учета указанного фазового перехода был модифицирован код SINF/Flag-S, разрабатываемый в ВШПМиВФ, путем реализации равновесной модели конденсации, а также добавления вириального уравнения состояния для сухого водяного пара. Верификация внедренной модели была выполнена на примере течения влажного пара в сопле Лавала. Выполнен расчет двумерного трансзвукового турбулентного течения водяного пара через решетку турбинных лопаток. Проведена кросс-верификация найденного решения для случая сухого пара с результатами, полученными в коммерческом программном пакете ANSYS CFX. Для условий эксперимента выполнены расчеты с использованием равновесной модели влажного пара, получено хорошее согласие с экспериментальными данными.

А.В. Масюкевич¹, П.А. Попов¹, Е.В. Колесник², Е.В. Бабич², Н.А. Монахов¹

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

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ ТЕЛОМ, ЗАКРЕПЛЕННЫМ ПОПЕРЕК ПРЯМОУГОЛЬНОГО КАНАЛА

Настоящее исследование сфокусировано на анализе взаимодействия ударной волны с закрепленным поперек прямоугольного канала телом цилиндрической формы. Задачи сверхзвукового обтекания, характеризующиеся сложными эффектами вязко-невязкого взаимодействия, являются актуальными для многих практических приложений, в частности, для энергомашиностроения, поскольку течения такого типа возникают, например, в проточных частях турбомашин. Исследование сложных отрывных течений применительно к внутренним задачам представляет значительный интерес и для фундаментальной газодинамики. В работе используются испытания в прямоугольной ударной трубе ФТИ им А.Ф. Иоффе, разработанной для изучения плоских сверхзвуковых течений. Для диагностики потока применяется высококачественная теневая система на базе прибора ИАБ-451, дополненная импульсной подсветкой с использованием светодиодов Luminus, в качестве источника подсветки и датчиков импульсного давления с высоким временным разрешением.

Проводится экспериментальное исследование взаимодействия ударной волны с цилиндрическим телом, закрепленным между стенками прямоугольного канала. Теневые фотографии применены для визуализации ударно-волновой картины течения. Их регистрация осуществлялась с помощью высокоскоростной камеры. Благодаря чему, определены границы передней отрывной области, временные и пространственные масштабы исследуемого процесса, что принципиально важно для выбора положения датчиков давления и теплового потока.

АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ ОДНОМЕРНОГО ПОДХОДА К РАСЧЕТУ ТЕЧЕНИЯ В УДАРНОЙ ТРУБЕ С ОТРАЖАЮЩИМ СОПЛОМ

В настоящее время для сопровождения эксперимента на ударных трубах активно используются различные газодинамические коды. Полное моделирование ударной трубы со сверхзвуковым соплом с учетом всех особенностей течения чрезвычайно затратно с вычислительной точки зрения и не позволяет в достаточной степени учесть уникальные особенности конкретной экспериментальной установки и исследуемого режима течения. Возникает необходимость компромиссного подхода, позволяющего проанализировать основные нестационарные газодинамические процессы в ударной трубе, но не требующего при этом значительных вычислительных ресурсов. Одним из удобных инструментов, позволяющих реализовать подобный подход, является GasDynamics Toolkit (GDTk). Входящие в его состав коды позволяют проводить одномерный расчет равновесных параметров рабочего газа за падающей и отраженной ударной волной и ускорения в сопле с учетом неравновесных химических реакций, моделировать на основе квазиодномерного лагранжева подхода с приближенным учетом вязких эффектов и теплообмена нестационарные газодинамические процессы в ударных трубах, осуществлять двух- и трехмерное моделирование высокоскоростных течений с учетом физико-химических процессов при высоких температурах.

В докладе выполнен анализ применимости каждого из компонентов GDTk для оценки параметров рабочего газа за отраженной ударной волной и сверхзвукового потока в сопле в режиме сопровождения эксперимента на Большой ударной трубе ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Получены оценки рабочего времени, длительности запуска сопла, параметров сверхзвукового потока газа в месте установки модели. Результаты расчета сравнивались с измерениями.

В.Ю. Неянин, В.А. Талалов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ МИКРОКАЛОРИМЕТРА ПРИ ПИРОЛИЗЕ

Метод кислородной микрокалориметрии (КМК) является одним из инструментов для исследования пиролиза – процесса термического разложения материалов в отсутствие кислорода. В отличие от классических методов, таких как термогравиметрический анализ (ТГА), который измеряет изменение массы образца, кислородная микрокалориметрия фокусируется на тепловых эффектах, возникающих при последующем взаимодействии продуктов пиролиза с кислородом.

Итогами исследования КМК являются характеристики пиролиза материала, такие как максимальная скорость реакции, температура при максимальной скорости реакции, теплота сгорания исходного материала и летучих, массовая доля углистого остатка. Также величины, входящие в уравнение Аррениуса: энергия активации, предэкспоненциальный множитель.

Работа посвящена созданию программы для обработки сигнала, получаемого с установки. После получения результатов эксперимента, они проходят первичную обработку с помощью скрипта на языке `bash`. Итогом первичной обработки является приведение результатов в читаемому виду для программы, написанной на языке `Fortran`. Процесс

обработки начинается со сглаживания методом средней с подбором параметров сглаживания (количество точек для осреднения, количество сглаживаний). После сглаживания всех сигналов, методом наименьших квадратов находится средняя зависимость из сглаженных сигналов, далее идет построение кинетической модели пиролиза. С помощью усредненной зависимостью проводятся расчеты характеристик пиролиза и входящих величин в уравнение Аррениуса.

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

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РЕГЕНЕРАЦИИ ФТОРА ИЗ ПОЛИФТОРИДА АММОНИЯ

Расширение производства литий-ионных аккумуляторов потребует увеличения производства безводного фторида водорода (далее БФВ), основного носителя фтора при производстве фторсодержащих компонентов электролита, на 20% в ближайшие годы.

Известно, что природные запасы фтора в составе фторapatитов примерно в 10 раз превышают его запасы в составе плавикового шпата, основного источника БФВ. Поэтому целесообразно разработать научные основы получения БФВ из побочных фторсодержащих продуктов сернокислотного разложения фторapatита при производстве экстракционной фосфорной кислоты, которыми являются водные растворы гексафторкремниевой кислоты.

Известно, что одним из методов регенерации фтора в виде HF из фторсодержащих веществ является их взаимодействие с водородсодержащими веществами и кислородом в режиме горения. Поэтому авторами был предложен метод переработки гексафторкремниевой кислоты, заключающийся в её аминировании с получением полифторида аммония (далее ПФА) и последующей обработки ПФА в режиме горения.

Для систем элементов N-H-F-O и N-H-F-O-C с помощью программного комплекса «Астра-4» были проведены расчёты термодинамически равновесных составов веществ, моделирующие составы продуктов взаимодействия ПФА с кислородом, ПФА с кислородом и метаном, ПФА с кислородом и углеродом в режиме горения.

Показано, что в широком диапазоне изменения температуры, когда количество атомов водорода больше количества атомов фтора, единственным фторсодержащим веществом в термодинамически равновесной смеси является фторид водорода, а фториды и фториды-оксиды азота и углерода, а также фториды кислорода отсутствуют.

Ф.А. Орлов, Н.А. Монахов, К.И. Белов
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ТОЧНОСТЬ КАЛИБРОВКИ ДАТЧИКОВ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА НА АНИЗОТРОПНЫХ ТЕРМОЭЛЕМЕНТАХ ИЗ ВИСМУТА С ПОМОЩЬЮ ОТРАЖЕННОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Измерение локального теплового потока является одной из основных задач в газодинамическом эксперименте на ударных трубах. В настоящее время для этой цели активно используются датчики на анизотропных термоэлементах из висмута. Для повышения достоверности измерений необходима индивидуальная калибровка таких датчиков.

Целью данной работы является развитие методики калибровки тепловых датчиков по отраженной ударной волне. Характерными особенностями экспериментов, используемых для калибровки, являются: малое время регистрации, не превышающее $100 \mu s$, малая величина приведенного теплового потока $q\sqrt{t} \approx 3000 W\sqrt{s}/m^2$ и соответственно низкий уровень электрического сигнала теплового датчика $\sim 40 mV$. Получение достоверных результатов измерений требует применения малошумящих усилителей с достаточной полосой пропускания, а также аккуратной процедуры фильтрации электрического сигнала, не искажающей его форму.

Эксперименты проводились на малой ударной трубе ФТИ им. А.Ф. Иоффе. В качестве рабочего газа использовались аргон и азот. Проанализировано влияние свойств рабочего газа при высоких температурах за отраженной ударной волной на получаемый вольт-ваттный коэффициент датчика. Определен временной диапазон, в течение которого справедлива одномерная модель течения за отраженной ударной волной и наблюдается постоянство приведенного теплового потока $q\sqrt{t}$.

Ф.А. Орлов, П.А. Попов, К.И. Белов
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ЗА ОТРАЖЕННОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ В ОДНОАТОМНОМ И МОЛЕКУЛЯРНОМ ГАЗЕ

Исследование нестационарных физико-химических процессов за падающими и отраженными ударными волнами является одним из стандартных экспериментальных приемов в химической кинетике. Такой способ позволяет мгновенно нагреть газ до высоких температур и далее исследовать релаксационные процессы с помощью различных методов диагностики.

В настоящей работе представлены результаты измерения теплового потока за отраженной ударной волной и численного моделирования данных экспериментов. В качестве рабочего газа использовался аргон и углекислый газ. Принципиальное отличие данных режимов состоит в формирующейся ударно-волновой структуре и возможности изменения состава газа из-за химических реакций. В первом случае не наблюдается бифуркации отраженной ударной волны и возмущение газа вблизи торца минимально. Во втором случае, появление трехударной конфигурации существенно влияет на структуру течения. Возникает нестационарное циркуляционное течение, возникающее в области сочленения боковой поверхности и торца, которое постепенно увеличивается в размерах в радиальном направлении. Начальные условия экспериментов выбирались таким образом, чтобы охватить диапазон температур, при которых отклонения от модели идеального газа малы и до начала диссоциации углекислого газа за отраженной ударной волной.

Для выбранных режимов проведено численное моделирование в осесимметричной и одномерной постановке с учетом реальных свойств газа, но без учета химических реакций при высоких температурах. На режимах, когда состав рабочего газа не изменяется, получено хорошее совпадение с экспериментальными результатами. В случае даже слабой диссоциации наблюдается заметное отличие измеренного теплового потока от расчетного значения. Проведенные исследования позволили проанализировать возможности экспериментальной установки и средств диагностики что является необходимым этапом в дальнейших исследованиях теплообмена в условиях заметной диссоциации углекислого газа.

Д.С. Осадчий¹, Е.В. Колесник^{1,2}, П.А. Попов²
¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ТЕЛ СВЕРХЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ

Исследование структуры течения и теплообмена вблизи поверхности тел, обтекаемых сверхзвуковым потоком, остается одной из актуальных задач газодинамики. К настоящему моменту достаточно подробно теоретически, экспериментально и численно исследованы тела простых геометрических форм. Иначе обстоит дело с телами с изломом образующих, вблизи которого формируется отрывная область и сложная ударно-волновая конфигурация, что приводит к образованию локальных зон экстремального теплового и силового воздействия.

Достоверное моделирование обтекания тел сложных форм при высоких температурах даже в случае ламинарного режима является чрезвычайно сложной задачей. Неотъемлемым этапом при проведении расчетных исследований является сопоставление с экспериментальными данными. Поскольку эксперименты проводятся на импульсных установках различного принципа действия, результаты измерений помимо самих исследуемых процессов отражают и их индивидуальные особенности. По этой причине, наиболее полным и достоверным является численное моделирование, учитывающее газодинамические процессы во всей экспериментальной установке.

В работе представлены результаты комплексного численного моделирования газодинамических процессов, происходящих при проведении экспериментов на Большой ударной трубе с отражающим соплом ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Расчеты проведены с использованием пакета Gas Dynamics Toolkit: определение равновесных параметров за падающей и отраженной ударной волной в Nenzfld, моделирование основных газодинамических процессов в ударной трубе с помощью квазиодномерного кода L1d, а также осесимметричное моделирование обтекания модели в Eilmer. Проведено сравнение расчетных данных с результатами экспериментов для тел различной формы.

Н.С. Паксялин, Н.А. Щур
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ КРЫЛОВОГО ПРОФИЛЯ, МАШУЩЕГО В ОДНОРОДНОМ НАБЕГАЮЩЕМ ПОТОКЕ С НЕНУЛЕВЫМ СРЕДНИМ УГЛОМ АТАКИ

В последние десятилетия появляется всё больше работ по численному моделированию течения вблизи машущего профиля. Данные работы позволяют лучше понять природу силы тяги, возникающей на машущем профиле, которая приводит в движение рыб, или птиц. Стоит отметить, что большинство постановок посвящены колебаниям в потоке с нулевым средним углом атаки, что вполне справедливо для хвостового плавника рыб. Однако для машущих крыльев птиц в условиях горизонтального полёта нулевой средний угол атаки не характерен. Настоящая работа посвящена исследованию силовых характеристик машущего профиля NASA 0012 в условиях набегающего однородного потока с ненулевым углом атаки. Фокус исследования направлен на изучение разницы силовых воздействий при движении крыла вниз и вверх.

А.А. Петров, Е.Э. Китанина
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАМИНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА В ВИТЫХ ТРУБАХ КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ

В работе представлены результаты численного моделирования установившегося течения и теплообмена в витом канале квадратного поперечного сечения. Численно решалась система уравнений Навье-Стокса и энергии для ламинарного течения. На границах области задавались условия периодичности. Температура стенок канала полагалась постоянной. Расчеты проводились в программном комплексе ANSYS Fluent. В рамках методических исследований рассмотрено влияние сеточной зависимости решения и проанализирована чувствительность результатов расчетов к протяженности расчетной области. Проведено параметрическое исследование влияния числа Рейнольдса, шага закрутки канала и числа Прандтля на локальные и осредненные характеристики течения и теплообмена. Проанализировано влияние вторичных течений на интенсификацию теплообмена в витом канале. Результаты численного моделирования сопоставлены с известными расчетными и экспериментальными данными.

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

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ СЛАБОСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ЩЕЛЕВОМ ЗАЗОРЕ РОТОРНО-ЛОПАСТНОЙ МАШИНЫ

В работе проведено исследование течения несжимаемой и слабосжимаемой (в рамках термодинамического уравнения состояния Тэта) жидкости в щелевом зазоре. Форма зазора соответствует реальной геометрии лопасти роторно-лопастной машины и представляет усеченный сектор. Вычислительная модель построена в пакете прикладных программ ANSYS Fluent. В трехмерной постановке, при помощи численного интегрирования системы уравнений Навье-Стокса, установлена структура течения в зазоре и определено значение утечек жидкости через щелевые зазоры роторно-лопастной машины. В ходе исследования варьировалась высота щелевого зазора (от 20 мкм до 100 мкм) при неизменном перепаде давления. Проведена оценка влияния вращения лопасти при попутном и встречном движении жидкости в зазоре. Полученные результаты сравниваются с теоретическими оценками расхода в щелевом зазоре, которые основаны на геометрических и режимных параметрах задачи. В результате проведено обобщение теоретической формулы расхода жидкости на случай формы щелевого зазора, типичного для роторно-лопастной машины.

Д.К. Попова^{1,2}, Н.Н. Кортиков¹
¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
²АО «ОДК-Климов», Санкт-Петербург

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОХЛАЖДАЕМОЙ СТУПЕНИ ТУРБИНЫ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ГАРМОНИЧЕСКОГО БАЛАНСА

В работе рассматривается перспективный вариант численного решения рассматриваемого класса задач, основанный на методе гармонического баланса (НВ) и встроенный в пакет STAR-CCM+. Этот метод обеспечивает приближенное решение нестационарных задач при существенном уменьшении объема вычислений. Главным условием успешного применения метода НВ является, во-первых, обоснование правомерности перехода от реального количества лопаток в венце рабочего колеса к одному межлопаточному каналу с применением условий периодичности; во-вторых, определение количества мод для адекватного описания переноса нестационарных возмущений в проточной части ступени.

В качестве объекта исследования выбрана ступень двигателя семейства РД33. В ходе работы было показано, что увеличение количества мод ведет к усложнению формы колебаний параметров потока, а также было определено оптимальное соотношение количества мод.

В результате была показана приемлемая точность НВ-метода для расчета регулярных колебаний потока в осевом зазоре, вблизи рабочих лопаток и на выходе рабочего колеса двигателя семейства РД33. Такой вывод был сделан на основе сравнения результатов расчета с опытными данными и результатами численного моделирования, в котором применялся URANS подход и метод скользящих сеток.

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

ЛОКАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА В ОРЕБРЕННЫХ КАНАЛАХ, ТИПИЧНЫХ ДЛЯ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ГАЗОВЫХ ТУРБИН

В последние несколько десятилетий в мире наблюдается ряд тенденций, направленных на увеличение показателей мощности и эффективности теплового энергетического оборудования, в частности, газовых турбин различного назначения. Среди множества подходов к достижению этих целей наиболее перспективным и концептуальным является повышение температуры термодинамического цикла. Реализация данного подхода невозможна без наличия эффективного охлаждения лопаточных аппаратов ГТУ. Развитие методов численного моделирования процессов газодинамики и тепломассопереноса позволило достичь существенного прогресса в области проектирования высокоэффективных систем охлаждения лопаточных аппаратов газовых турбин, что отображено в большом количестве как научных, так и инженерно-практических работ.

В рамках данного исследования были рассмотрены две задачи: течение сжимаемой жидкости в прямом канале с двухсторонним оребрением под углом 45° и течение несжимаемой жидкости в U-образном вращающемся канале с аналогичным оребрением. На основе решения этих задач проведен детальный анализ особенностей турбулентного течения, оказывающих значительное влияние на процессы теплопереноса.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУМЕРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА ВЯЗКОГО ГАЗА СО СТРУЕЙ, ВДУВАЕМОЙ С ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИНЫ

Задача о поперечно-щелевом вдуве струи в сверхзвуковой поток возникает во многих практических приложениях, в частности, использование поперечного вдува позволяет достичь высокой степени смешивания топлива и воздуха в сверхзвуковых потоках в камере сгорания с ограниченным временем работы. Другим примером является использование вдува струи с поверхности для управления вектором тяги в ракетных двигателях. Поэтому изучению особенностей течения в такого рода конфигурациях посвящено большое число работ, и особую актуальность в настоящее время приобретают методы численного моделирования, позволяющие воспроизвести в деталях все особенности сложного течения.

Настоящая работа посвящена численному моделированию струи, вдуваемой с поверхности пластины в сверхзвуковой поток, а также изучению физических процессов, происходящих при их взаимодействии. Постановка задачи основана на экспериментальной работе (Spraid & Zukoski, 1968), в которой приведены данные измерений давления вдоль поверхности пластины, с которой вдувается струя. Численные расчеты осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса для совершенного газа выполнены при помощи конечно-объемного «неструктурированного» программного кода SINF/Flag-S, разрабатываемого в ВШПМиВФ СПбПУ. Исследована сложная структура течения, содержащая области рециркуляции, состоящих из вращающихся в противоположных направлениях восходящих вихрей, скачки уплотнения и диски Маха. Проведен анализ полученных распределений статического давления на пластине; результаты сопоставлены с экспериментальными данными.

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

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

²ООО «Аврора Кемикалс», Северск

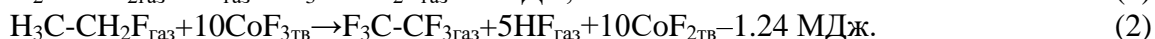
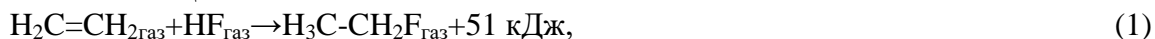
КИНЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФТОРИРОВАНИЯ ЭТИЛЕНА И ФТОРЭТАНОВ ТРИФТОРИДОМ КОБАЛЬТА

Фторирование этилена трифторидом кобальта применяют для синтеза гексафторэтана (далее ГФЭ) C_2F_6 , реагента для сухого травления кремния при производстве микропроцессоров. В России производство ГФЭ отсутствует, поэтому разработка научных основ промышленной технологии его получения является весьма актуальной задачей.

ГФЭ синтезируют при температуре 200-450 °С, при этом тепловыделение в процессе фторирования составляет 1.2 МДж, а адиабатический разогрев целевых веществ достигает 1035 К. ГФЭ в условиях синтеза является веществом термодинамически неравновесным. Поэтому необходимо отводить выделяющееся тепло из зоны реакции.

Для численного моделирования теплового состояния реактора по фторированию этилена трифторидом кобальта необходимо знание кинетических моделей фторирования C_2H_4 и фторэтанов, промежуточных продуктов процесса получения ГФЭ. В литературе не были обнаружены эти модели, но опубликованы данные по глубине превращения этилена и фторэтанов при их фторировании CoF_3 в изотермических условиях. На основе этих данных

были построены формальные кинетические модели и показано, что в процессе получения ГФЭ из этилена имеют место два процесса с принципиально различными значениями энергиями активации:



Для (1) энергия активации составила 102 кДж/моль. Для (2) – 19-48 кДж/моль, что характерно для процессов твёрдофазной диффузии и позволяет предположить, что лимитирующей стадией фторирования фторэтанов трифторидом кобальта является перенос фтора через слой дифторида кобальта к поверхности частицы.

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

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

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КИПЕНИЯ НЕДОГРЕТОЙ ВОДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНЫХ ПАКЕТОВ ANSYS FLUENT И ANSYS CFX

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 RPI (Rensselaer Polytechnical Institute). Формулировка этой модели чрезвычайно сложна, а ее использование сопряжено со значительными вычислительными трудностями. Целью настоящей работы является использование этой модели, реализованной в двух коммерческих кодах Ansys Fluent и Ansys CFX, для решения модельной задачи.

Рассматривается течение недогретой воды (с температурой, меньшей температуры насыщения) в круглой вертикальной трубе с нагреваемой стенкой, на поверхности которой происходит закипание. Параметры течения соответствуют эксперименту (Бартоломей, 1967). Расчеты проводились в осесимметричной постановке.

В работе продемонстрировано влияние расчетной сетки и используемого кода, а также приведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными.

А.А. Смирнов, Ю.М. Циркунов
Балтийский государственный технический университет им. Д. Ф. Устинова

АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ МОДЕЛЕЙ ГОРЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Рассматриваются особенности, преимущества и недостатки основных моделей горения, получивших широкое распространение для моделирования процессов горения в камерах сгорания энергетических установок различного назначения. Подробно анализируется кинетика горения метана с учетом особенностей химических реакций. Формируется математическая модель и численно исследуется процесс струйного истечения, смешения и горения метана в камере сгорания.

Приводится сравнение данных, полученных в ходе реального эксперимента, с результатами численных расчетов при использовании различных моделей горения.

Дополнительно анализируется влияние подходов к моделированию турбулентности на получаемые результаты. Рассматриваются два основных подхода – RANS и LES.

Сформулирован вывод об ограничениях использования рассмотренных моделей горения и методов моделирования турбулентности для исследования физико-химических процессов в камерах сгорания энергетических установок. Показана эффективность модели частично предварительно перемешанной смеси для моделирования процесса горения и преимущество использования метода LES для моделирования турбулентности в сопряженных задачах о течениях с физико-химическими превращениями.

Д.А. Усов, Н.В. Кутузова, С.И. Мезенцев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЧЕНИЯ ЕДИНИЧНОГО КАНАЛА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛООБМЕННОЙ НАСАДКИ

С течением времени значение энергоэффективности систем увеличивается. Одним из предложений являются рекуперативные вентиляционные системы. Они закрывают потребность в проветривании образовательных учреждений и жилых домов, что нередко отсутствует в данных помещениях. Следствием недостатка кислорода может являться сниженная работоспособность, ухудшение работы органов и даже развитие гипоксии.

Необходимость соблюдения параметров микроклимата придало актуальность регенеративному теплообменнику на рынке товаров. Регенеративный теплообменник – устройство, представляющее фундамент для проектирования систем вентиляции и обладающее энергосбережением. Главным элементом теплообменника является теплообменная насадка. Её предназначение состоит в уменьшении тепловых потерь за счёт сменяющихся циклов работы в процессе притока и вытяжки воздуха, позволяющих аккумулировать и отдавать тепловую энергию. Важную роль в эффективности работы теплообменной насадки играют характеристики сечения единичного канала, конкретно соотношение размеров геометрии, охватывающей форму канала.

Данная работа была посвящена исследованию влияния параметров сечения канала на эффективность теплообменной насадки. В качестве типов сечений были рассмотрены квадрат, гексагон и круг. Для них были подготовлены цифровые объекты исследования, в которых моделировалось течение воздуха. Были выявлены зависимости коэффициента теплоутилизации от соотношения размеров внутренней полости канала и его внешней стенки с материалом. Определён наиболее эффективный тип сечения и его параметры с наибольшим коэффициентом теплоутилизации за единицу материала.

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

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕТОДОЛОГИИ МАСШТАБИРОВАНИЯ РЕАКТОРА ТИПА ТУННЕЛЬНОЙ ГОРЕЛКИ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕКСАФТОРИДА УРАНА С ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИМИ ВЕЩЕСТВАМИ И КИСЛОРОДОМ В РЕЖИМЕ ГОРЕНИЯ

Масштабирование оборудования является ключевой стадией при промышленной реализации любого технологического процесса, в том числе процесса реконверсии

гексафторида урана при его взаимодействии с метаном или водородом и кислородом в режиме горения с использованием реактора типа туннельной горелки.

Основным фактором стабильной работы такого реактора является исключение срыва фронта пламени при превышении локальной скоростью потока скорости турбулентного распространения пламени. Расчёт последнего параметра затруднён. Поэтому было предложено использовать в качестве параметра, обеспечивающего стабильное горение, максимальную локальную скорость потока, при которой процесс был стабилен при опытно-промышленной реализации. Физические измерения в средах, содержащих коррозионно-активные вещества, такие как, например, фторид водорода, практически невозможны. Максимальную локальную скорость потока, как и максимальную температуру в зоне реакции – важнейший параметр, определяющий состав продуктов горения, было предложено определять методом численного эксперимента, реализованного на основе разработанной и верифицированной математической модели турбулентного диффузионного горения. Расчёты проводили с помощью программного комплекса «Ansys Fluent».

Было показано, что в успешных экспериментах максимальная локальная скорость потока и максимальная температура в зоне горения составили 49 м/с и 2180 К для реакции с метаном и 119 м/с и 1890 К для реакции с водородом.

При выборе конструктивных параметров промышленного реактора и допустимого расхода компонентов необходимо, чтобы максимальная локальная скорость потока была не выше полученных значений, а максимальная температура во фронте пламени – не ниже полученных значений.

Также были рассчитаны и значения прочих параметров масштабирования реактора.

Р.Р. Хозин^{1,2}, Д.В. Лещев², А.А. Смирновский¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
²ООО «СофтИмпакт»

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ПОДЛОЖКИ И КОНЦЕНТРАЦИИ CH_4/H_2 НА ОДНОРОДНОСТЬ ОСАЖДЕНИЯ АЛМАЗА МЕТОДОМ MPCVD

Плазмохимическое осаждение из газовой фазы в смеси CH_4/H_2 является одним из перспективных методов получения алмазных покрытий высокого качества для применения в электронике. В типовых реакторах для плазмохимического осаждения локализация электрического поля вблизи подложки позволяет сформировать плотную СВЧ плазму с последующим нагревом газа в камере реактора до 2500 °С и увеличенной концентрацией химически активных радикалов CH_3 и H , ответственных за рост алмазных покрытий. Одной из ключевых проблем остается обеспечение однородности роста, зависящей от распределения температуры, электрического поля и концентрации радикалов (CH_3 , H) над подложкой.

Настоящая работа посвящена анализу влияния некоторых геометрических размеров держателя НРНТ подложки на радиальный профиль осаждения алмаза методом плазмохимического осаждения из газовой фазы. Показано, что увеличение высоты держателя смещает пик напряженности электрического поля к краям подложки, вызывая локализацию плазмы и снижение температуры в центре реактора. Это приводит к уменьшению мольной доли CH_3 и H над подложкой и формированию двух пиков радикалов: над подложкой и у стенок реактора. Результатом является изменение величины средней скорости роста и смещение положений ее максимумов на поверхности затравки.

Исследованы режимы работы реактора в следующих диапазонах параметров: частота СВЧ-плазмы – 2.45 ГГц, мощность – 2–5 кВт, давление – 100–200 Торр, доля метана в газовой смеси CH_4/H_2 варьировалась в диапазоне 1–40%. Валидация разработанной модели осаждения алмаза выполнена посредством сопоставления с данными численного моделирования, представленными в работе Манкелевича и др.

П.В. Чайка, Ю.М. Циркунов
Балтийский государственный технический университет им. Д. Ф. Устинова

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИКИ ОСЕВОЙ ТУРБИНЫ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЕЛИЧИНЫ РАДИАЛЬНОГО ЗАЗОРА НА ХАРАКТЕР ТЕЧЕНИЯ

Основной целью работы являлась разработка расчётной модели качественно и количественно попадающей в эксперимент. Было проведено исследование сеточной сходимости. Анализ влияния модели турбулентности, величины радиального зазора рабочей лопатки и скорости вращения на распределение коэффициента полезного действия и угла выхода потока по высоте канала, а также на картину течения в целом. Ознакомление с областью применения газотурбинных двигателей и их классификацией.

Рассматривалось три сетки различной подробности. В процессе расчёта решалась система уравнений RANS. Исследовались следующие модели турбулентности: k - ε , Спаларта-Аллмараса, SST и явная алгебраическая модель Рейнольдсовых напряжений. Исследован характер течения и интегральные характеристики турбины в зависимости от величины зазора и скорости вращения. Был проведён сравнительный анализ результатов расчётов с экспериментальными данными. Проведён анализ интегральных параметров на ротор-статор интерфейсе.

Е.В. Шапков, Н.В. Тряскин
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОТОРНО-ВИНТОВОГО ДВИЖИТЕЛЯ, ЧАСТИЧНО ПОГРУЖЕННОГО В ВОДУ

В последнее время эксперты отмечают перспективное соединение трассы Северного морского пути с Байкало-Амурской и Транссибирской магистралями путем создания новых транспортно-логистических узлов и перекрестных маршрутов, в том числе на внутренних реках и каналах Крайнего Севера, которое позволит значительно улучшить снабжение арктических регионов. Предыдущий опыт эксплуатации показывает, что для эффективного передвижения по внутренним водным маршрутам, а также по прилегающим к ним территориям с разными опорными основаниями, целесообразно применение амфибийных машин с частично погруженными роторно-винтовыми движителями (РВД). Вместе с тем информация о характеристиках работы в воде полупогруженных РВД носит ограниченный характер, а влияние свободной поверхности на пропульсивные характеристики последних в отечественной практике предлагается учитывать через эмпирический коэффициент аэрации, величина которого также оказывается труднодоступной. Вышесказанное делает актуальной настоящую работу, в которой представлены результаты расчетов частично погруженной модели РВД методами вычислительной гидродинамики в некоммерческом пакете OpenFOAM

с открытым исходным кодом. Представлены диаграммы гидродинамических характеристик («кривых действия») движителя в зависимости от степени его погружения в воду. Дополнительно представлен результат использования (применения) кожуха, ограничивающего степень негативной аэрации поверхности движителя и напрасное разбрызгивание воды при его работе вблизи свободной поверхности (пересекая ее). На основании полученных результатов выполнена оценка коэффициента аэрации, для его интеграции и использования в будущих исследованиях гидродинамических характеристик роторно-винтовых движителей.

С.С. Бахметьев, И.Е. Груздев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ДИСТАЛЬНОГО СУХОЖИЛИЯ ДВУГЛАВОЙ МЫШЦЫ ПЛЕЧА

В данной работе представлена разработка математической модели дистального сухожилия двуглавой мышцы плеча, предназначенная для анализа его механических свойств при нагрузках, возникающих при подъеме веса (гантели). Исследование выполнено с использованием программного пакета Ansys. В Ansys Material Designer был создан волокнистый материал, позволяющий смоделировать гомогенизированные свойства сухожилия, также учтены нелинейные свойства материала. В Ansys Mechanical рассмотрены различные постановки кинематики и граничных условий для задачи моделирования подъема гантели. Проведен анализ этих вариантов и выбрана конфигурация, наиболее точно отражающая механику сухожилия при нагрузке. Особое внимание уделено исследованию влияния угла в локтевом суставе на величину напряжения в сухожилии. Путем моделирования нескольких вариантов установлено положение, при котором сухожилие испытывает максимальную нагрузку.

В критическом положении выполнен статический расчет для различных весов гантели. Дополнительно проведен анализ усталостной прочности, что позволило оценить влияние повторяющихся нагрузок на долговечность сухожилия. Полученные результаты позволили определить критическую нагрузку, при которой существует риск разрыва сухожилия, а также выявить рабочие режимы, при котором интенсивность износа ткани становится существенной, что делает данную работу актуальным вкладом в изучение спортивных травм бицепса.

В.А. Гуляева, И.Б. Сулова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ СЕРДЕЧНОГО РИТМА МАТЕРИ И ПЛОДА КАК ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ

В работе проведен математический анализ сердечного ритма – сложного нестационарного сигнала, отражающего физиологическое состояние организма. Исследование основано на модели сердечного ритма как частотно-модулированного сигнала, где каждому удару сердца соответствует гауссовский пик заданной высоты. В данной работе были построены модели ритмограммы сердца матери и плода в виде суперпозиции гауссовских пиков с заданной частотной модуляцией, что дало возможность вычислить вейвлет-преобразования этих сигналов аналитически. На основе заданных формул частотной модуляции определены RR_n – интервалы между ударами сердца, которые затем использовались для получения вейвлет-преобразований.

Исследовано влияние глубины и частоты модуляции на поведение во времени локальной частоты для моделей ритма матери и плода. Локальные частоты рассчитывались по максимальному значению вейвлет-спектра $|V(v, t)|^2$ для каждого момента времени. Поведение локальной частоты во времени отражает турбулентность сердечного ритма.

Проведен анализ поведения локальной частоты в зависимости от частоты и глубины модуляции. Увеличение глубины модуляции приводит в обоих случаях к увеличению амплитуды колебаний локальной частоты. Однако в случае фетального сигнала (ритмограмма ребенка) амплитуда колебаний локальной частоты возрастает более интенсивно. В процессе работы было отмечено, что изменение локальной частоты плода отслеживает тенденцию локальной частоты матери.

На основе данных моделей было проведено сравнение вейвлет-спектров и Фурье-спектров сигналов и отмечено преимущество вейвлет-преобразования для анализа сигналов с вариабельностью частоты ритма, характерной для биомедицинских сигналов.

С.Д. Иванов, О.В. Антонова

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВРАЧИВАНИЯ БАЛЛОНА ДЛЯ АНГИОПЛАСТИКИ

Баллонные катетеры являются ключевым инструментом в ангиопластике, однако, подготовка и использование этих устройств сопровождаются определенными сложностями. Различные дефекты и нарушения технологии на этапе сворачивания баллона могут привести к повреждению или неравномерному раскрытию баллона, что, в свою очередь, может в дальнейшем вызвать повреждение стента или стенок сосуда. Поэтому крайне важно изучить ключевые этапы проведения этого процесса. В данном исследовании особое внимание уделено моделированию основных этапов сворачивания баллона и последующему анализу его напряженно-деформированного состояния. В качестве объекта исследования был выбран баллон из полиамида (Grilamid L25), для описания поведения этого материала была использована модель материала Огдена 1-го порядка. Численное моделирование проводилось с использованием системы конечно-элементного анализа ABAQUS. Были изучены и промоделированы различные этапы сворачивания баллона, проанализированы поля напряжений и деформаций, возникающие после завершения всего процесса.

Н.А. Иванов¹, Я.А. Гатаулин^{1,2}, А.Д. Юхнев^{1,2}, Д.К. Зайцев¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Институт экспериментальной медицины

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЖИДКОСТИ В ЧАСТИЧНО ЗАПОЛНЕННОМ КОНТЕЙНЕРЕ, РАСПОЛОЖЕННОМ НА ОРБИТАЛЬНОМ ШЕЙКЕРЕ

В биохимических исследованиях для смешивания, встряхивания и аэрации различных образцов в пробирках, колбах, планшетах и других контейнерах используются специальные движущиеся платформы – орбитальные шейкеры. Они обеспечивают плавное, круговое движение, что обуславливает широкий спектр их применений. В опытах с культивированием клеток на шейкере устанавливают емкость, которая заполнена физраствором, а на ее дне размещены равномерным слоем клетки.

Целью данной работы является расчет сдвиговых напряжений на дне емкости при различных значениях уровня жидкости в емкости и частоте вращения шейкера. Требовалось подобрать такие значения уровня жидкости и частоты, при которых сдвиговые напряжения являются близкими к физиологическим.

Для расчетов использовался код общего назначения ANSYS Fluent 2019. Проведены расчеты по модели двухфазного течения по методу VoF (Volume of Fluid). Течение полагалось ламинарным. Динамика жидкости анализировалась по распределению скорости, положению границы «жидкость-воздух», давлению и сдвиговым напряжениям на дне емкости. Последние осреднялись по площади и по циклу. Определены уровень жидкости и частота вращения шейкера, при которых на дне емкости сдвиговые напряжения являются близкими к физиологическим.

Я.В. Жулего, Я.А. Гатаулин, Е.М. Смирнов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТРЕХМЕРНОГО ТЕЧЕНИЯ В МОДЕЛИ АРТЕРИОВЕНОЗНОЙ ФИСТУЛЫ

Артериовенозная фистула (АВФ) – соединение вены и артерии, которое используется для гемодиализа у пациентов с хронической почечной недостаточностью. Главная проблема с АВФ – это образование тромбов (сгустков крови), которые сокращают срок службы фистулы и приводят к осложнениям. Гидродинамические расчеты позволяют определить, в каких местах АВФ тромбы возникают чаще всего, данная информация могла бы быть полезна при разработке оптимальной конструкции фистулы.

В данной работе проведено исследование течения в среднестатистической модели АВФ при различных входных скоростях течения в артерии и вене. Ввиду формирующейся локальной турбулизации течения в местах отрыва потока, для численного моделирования течения в АВФ решались уравнения Навье-Стокса по методу DNS (Direct Numerical Simulation).

Моделирование течения осуществлялось с применением программного комплекса ANSYS CFX 19.3. Анализ расчетных полей сдвигового напряжения на стенке и зон рециркуляции позволили определить возможные места тромбообразования. Полученные результаты сопоставлены с экспериментальными данными.

Н.А. Кабин, О.В. Антонова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ МАТЕРИАЛА ОГДЕНА ДЛЯ ОПИСАНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ МИТРАЛЬНОГО КЛАПАНА

Данная работа посвящена исследованию и анализу особенностей применения гиперупругой модели материала Огдена 1-3 порядков для описания механического поведения митрального клапана. Основной целью исследования является возможность дальнейшего использования этой модели в численном моделировании аннулопластики митрального клапана.

В рамках работы было изучено влияние порядка гиперупругой модели Огдена на напряженно-деформированное состояние митрального клапана человека. Кроме того, проведён анализ влияния параметров материала Огдена на результаты конечно-элементного моделирования, что необходимо для более точного прогнозирования поведения митрального клапана.

Исследование выполнено с использованием программного комплекса ABAQUS. Результаты, полученные в ходе данной работы, могут быть полезны для дальнейших исследований в области кардиохирургии и разработки новых, более эффективных методов лечения. В перспективе это позволит улучшить результаты хирургических вмешательств и повысить эффективность лечения пациентов с заболеваниями сердца.

Е.И. Кокшарова¹, А.Д. Юхнев¹, Е.М. Смирнов¹, В.А. Рева²
¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
²Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В МОДЕЛИ ВРЕМЕННОГО ПРОТЕЗА КРОВЕНОСНОГО СОСУДА ИЗОГНУТОЙ ФОРМЫ

При доставке раненых в госпиталь применяют временные синтетические протезы кровеносных сосудов, изогнутые в форме петли. Данная форма позволяет надежно сохранять соединение протеза с сосудом при любых случайных движениях поврежденных конечностей. Детальное исследование структуры кровотока в месте соединения сосуда с протезом меньшего диаметра поможет разобраться в причинах тромбоза таких протезов.

Работа посвящена экспериментальному исследованию влияния негладкости входа на развитие течения в изогнутой трубке, моделирующей форму временного протеза кровеносного сосуда. Негладкий вход представлен в виде внезапного сужения, рассмотрены как ламинарный, так и переходный и турбулентный режимы течения. Исследование проведено для изогнутой трубки с коэффициентом кривизны $K = 0.083$ и внезапным сужением с отношением диаметров $D/d = 2.5$. Рассмотрены два варианта расположения входной кромки трубки: заподлицо с плоскостью внезапного сужения и выступающей на один калибр от внезапного сужения. Сконструирован стенд для визуализации течения с возможностью задания широкого диапазона расходов модельной жидкости. Выбрана методика визуализации структуры течения алюминиевой пудрой в продольных и поперечных сечениях трубки с использованием лазерного ножа. Таким образом исследовано трёхмерное поле скорости в изогнутой трубке с негладким входом, включая явления ламинарно-турбулентного перехода. Установлено, что рассмотренное течение является ламинарным при $Re \leq 500$ и становится развитым турбулентным при $Re \geq 2000$.

Работа выполнена в рамках проекта ВМА им. С.М. Кирова по программе стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

А.П. Корчагин¹, А.О. Охотников¹, О.В. Антонова¹, О.И. Охотников²
¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
²Курский государственный медицинский университет

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЖЕЛЧИ ВДОЛЬ ДВЕНАДЦАТИПЕРСТНОЙ КИШКИ С УЧЕТОМ ДВИЖЕНИЯ СТЕНКИ

Эндобилиарное стентирование является основным методом устранения непроходимости желчных протоков в области сужения. Моделирование процесса стентирования представляет собой сложную задачу, требующую учета многих факторов, таких как динамика жидкости, движение стенки, а также их непосредственное взаимодействие со стентом. Одним из главных шагов в решении данной задачи является

рассмотрение распространения желчи в двенадцатиперстной кишке за счет перистальтического движения стенок.

Целью работы является разработка математической модели, описывающей течение желчи в протоке двенадцатиперстной кишки. В процессе работы проводится моделирование вытеснения смесью (желчь + вода) чистой воды. Применен FSI (Fluid Structure Interaction) подход для моделирования взаимодействия жидкости и деформируемого твердого тела. В дальнейшем результаты работы могут быть использованы для моделирования иных хирургических вмешательств, связанных с эндобилиарной системой человека. Использование модели послужит повышению эффективности и безопасности операций, улучшения качества жизни пациентов и снижения риска осложнений.

О.О. Мочалова, Я.А. Гатаулин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ КРОВЕИМИТИРУЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ В МОДЕЛЯХ ТИПОВЫХ КОНФИГУРАЦИЙ ПРИ ЭКСТРААНАТОМИЧЕСКОМ ШУНТИРОВАНИИ

Лечение критической ишемии нижних конечностей при окклюзии аорто-подвздошного отдела у пациентов с повышенным хирургическим риском представляет значительную трудность в сосудистой хирургии. В таком случае при односторонней закупорке или стенозе проводят перекрестное бедренно-бедренное экстраанатомическое шунтирование, так как непрямая реконструкция аорты с консервативной терапией приводят в большинстве случаев к потере конечностей.

Целью работы является получение новых данных, которые могут способствовать оптимизации бедренно-бедренного шунтирования для восстановления кровотока и минимизации риска тромбообразования. В рамках представляемого исследования проведено сравнение результатов, полученных с применением двух программных пакетов для численного моделирования гидродинамики – COMSOL Multiphysics и ANSYS CFX. Проведены расчеты распределения скорости и напряжения сдвига (WSS) на стенке при различной геометрии шунта. Результаты численного моделирования позволили оценить эффективность различных конфигураций шунта в восстановлении кровотока в пораженной артерии, а также выявить зоны повышенного риска тромбообразования, связанные с низким WSS и областями застоя.

А.Н. Плотников, И.Е. Груздев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ СУХОЖИЛИЯ КЛЮВОВИДНО-ПЛЕЧЕВОЙ СВЯЗКИ ПРИ ИМПИНДЖМЕНТ СИНДРОМЕ ПЛЕЧА

Импинджмент синдром плеча – это синдром, включающий в себя воспаление сухожилий мышц вращательной манжеты плеча, когда они проходят через пространство под акромиальным отростком лопатки. Данный синдром приводит к следующим последствиям: боль, слабость, потеря подвижности в плечевом суставе. Это распространенная проблема у

людей, кто много работает с поднятыми руками (электрики, монтажники), а также у спортсменов любителей.

В данной работе был смоделирован материал сухожилия человека, как композит, состоящий из коллагеновых волокон и матрицы. Путем гомогенизации модели были получены инженерные константы (коэффициенты Пуассона, модули упругости и сдвига). После этого проведены расчеты на прочность и получены Поля напряженно-деформированного состояния и усталостных характеристик. Проанализировав результаты расчетов, можно получить набор параметров для оптимальной модели материала сухожилия и качественной настройки контактов в конечно- элементной модели.

А.А. Татарина, Е.И. Кокшарова, А.Д. Юхнев, Е.М. Смирнов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТЕЧЕНИЯ В МОДЕЛИ КОРНЯ АОРТЫ ПРИ ПОДАЧЕ ОБОГАЩЕННОЙ ОКСИДОМ АЗОТА КРОВИ ЧЕРЕЗ КАТЕТЕР

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию течения в проточном резервуаре при струйной подаче подмешиваемой жидкости. Данное течение моделирует движение крови в корне аорты в фазу диастолы при подаче в него обогащенной оксидом азота крови. Новая медицинская методика разрабатывается с целью улучшения послеоперационных результатов стентирования коронарных артерий.

Целью исследования является изучение влияния расхода подаваемой жидкости и расположения входного катетера относительно моделей выходных коронарных сосудов. Для визуализации потока сконструирован и изготовлен экспериментальный стенд постоянного расхода, моделирующий течение в корне аорты в диастолу (в фазу закрытого состояния аортального клапана). Входные и выходные расходы задаются регуляторами расхода и контролируются датчиками электромагнитного расходомера. Визуализация течения в плоскости лазерного ножа осуществляется с помощью алюминиевой пудры. Фото и видеорегистрация течения проводится мобильным телефоном. Варьируется расстояние модели входного катетера от моделей левой и правой коронарных артерий, отводящих жидкость из корня аорты, а также величина входного расхода через катетер. Результаты исследования могут быть использованы при планировании разрабатываемой медицинской технологии, в частности, при выборе оптимального расхода перфузии и расположения катетера относительно устьев коронарных артерий.

СЕКЦИЯ «МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА И КОНВЕРСИИ ЭНЕРГИИ»

М.А. Алешина, Е.Ф. Грекова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПРЕЛОМЛЕНИЕ В УПРУГОЙ ЛИНЕЙНОЙ РЕДУЦИРОВАННОЙ ИЗОТРОПНОЙ СРЕДЕ КОССЕРА НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ

Редуцированная среда сложной структуры – это упругий континуум, который может быть представлен в виде «несущего континуума» и связанного с ним «распределенного динамического гасителя». Упругая энергия среды зависит от всех возможных видов деформации «несущего континуума», но не зависит от деформации «распределенного динамического гасителя», а лишь от его обобщенного смещения. В работах Е.Ф. Грековой было показано, что такие изотропные континуумы проявляют свойства акустических метаматериалов, то есть обладают либо запрещенными зонами, где волны не распространяются, либо падающими участками дисперсионных кривых при положительной фазовой скорости. В последнем случае фазовая и групповая скорости имеют разные знаки, то есть энергия в системе переносится в сторону, противоположную продвижению фазы. Считается, что такие участки соответствуют зонам отрицательного преломления, однако доказательства этого факта для сред сложной структуры произвольного вида нет в литературе. В качестве примера такой среды предложена линейная упругая редуцированная изотропная среда Коссера на трансляционно упругом основании. В этой среде тела-точки могут совершать независимые повороты (соответствующие «распределенному динамическому гасителю») и перемещения (соответствующие «несущему континууму»), причем упругая энергия деформации не зависит от градиента поворота, но зависит от поворота тела-точки относительно окрестности. В работе получены ее дисперсионные соотношения, показано, что в зависимости от параметров существуют либо две запрещенные зоны частот, либо одна запрещенная зона и падающий участок дисперсионной кривой.

Поставлена задача о преломлении волн на границе данной среды и классической изотропной линейной упругой среды. Сформулированы условия равенства трансляционных перемещений, сил и моментов на границе. Они зависят от частоты. Из этих условий планируется найти углы преломления и отражения для волн различного типа и проверить гипотезу о том, что падающий участок дисперсионной кривой соответствует отрицательному преломлению.

П.С. Алферова¹, Е.Ф. Грекова^{2,1}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Институт проблем машиноведения РАН

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН В РЕДУЦИРОВАННОЙ СРЕДЕ КОССЕРА С УЧЕТОМ МАЛОЙ АНИЗОТРОПИИ ОСОБОГО ВИДА

Редуцированные среды Коссера – среды с вращательными степенями свободы, в которых возникают напряжения при повороте частицы относительно континуума центров масс, но градиент поворота не вызывает напряжений. Они применяются для моделирования материалов сложной структуры, например, геосреды, композитов с включениями. При этом недостаточно исследовано распространение волн в подобных анизотропных средах.

Особенный интерес представляют собой волновые свойства сред с взаимосвязью поворотной-вихревой и трансляционной деформаций, отсутствующей в изотропном материале.

В работе исследовано распространение плоских волн в безграничной среде, где присутствует малая трансверсально-изотропная взаимосвязь между классической и поворотной-вихревой деформацией. Найдены асимптотические приближения для дисперсионных соотношений и амплитуд трансляционного и углового перемещений. Вблизи точки пересечения дисперсионных кривых для изотропного случая проходят три кривые, одна из которых близка к кривой поперечной волны в изотропном случае, а две другие – к гиперболе с центром в данной точке. В зависимости от частоты в кинетической энергии колебаний преобладает трансляционная или поворотная составляющая.

Е.С. Бутузова, С.Д. Ляжков

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПЕРЕНОС ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В ОДНОМЕРНОМ БЕСКОНЕЧНОМ ЛИНЕЙНОМ КРИСТАЛЛЕ НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ

Предлагается к рассмотрению перенос тепловой энергии в одномерном бесконечном линейном кристалле на упругом основании. Написаны уравнения динамики кристалла с нулевыми начальными перемещениями и случайной начальной скоростью для частицы с нулевым индексом, имеющей нулевое математическое ожидание и ненулевую дисперсию. С использованием прямого и обратного дискретных преобразований Фурье найдено точное фундаментальное решение для скорости частицы, с помощью которого, в свою очередь, получено дискретное (точное) решение для кинетической температуры. На основе асимптотического анализа фундаментального решения на фронте бегущей тепловой волны получены выражения для быстрой и медленной компонент кинетической температуры. При этом медленная компонента представляется как континуальное решение. Проведенные аналитические расчеты продемонстрировали согласование с результатами молекулярно-динамического моделирования, выполненного с использованием численного интегрирования исходных уравнений динамики методом leap-frog.

И.Е. Груздев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛНОВОГО УРАВНЕНИЯ С ВЯЗКИМ ТРЕНИЕМ

Давно известна и исследуется аналогия между массой и энергией. В последнее время начинают рассматриваться аналогии не только между этими двумя величинами, но и импульсом тела для материального тела и потоком в «теле» энергии, моментами инерции и суперпотоками энергии. Такой подход позволяет использовать междисциплинарные методы в решении различных задач, а энергетическая динамика становится связующим мостиком между различными дисциплинами.

В данной работе рассматривается многомерное волновое уравнение, описывающее упругую изотропную среду, с учетом вязкого трения. Для данной системы вычисляются баланс локальной энергии и баланс локального потока энергии. Показываются отличия от «классического» случая без учета трения. В рассматриваемом случае будет еще одна характеристика и еще одно уравнение, замыкающее систему.

ДИНАМИКА ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

В данной работе рассматриваются процессы распространения энергии в электромагнитном поле с позиции метода энергетической динамики. В рамках этого метода строится аналогия между динамикой массы в механике сплошной среды и динамикой энергии в электромагнитном поле.

В частности, вводится понятие энергетического центра возмущения по аналогии с понятием центра масс. Показано, что в случае однородной среды энергетический центр возмущения движется с постоянной скоростью. При этом в неоднородной среде скорость движения энергетического центра непостоянна, что согласуется с тем фактом, что при распространении электромагнитного поля в неоднородной среде импульс поля переходит в импульс среды и наоборот. Показано, что в приближении плоской электромагнитной волны траектория движения энергетического центра совпадает с траекторией луча света в геометрической оптике.

Также в рамках построения механической аналогии при анализе распространения энергии в электромагнитном поле были рассмотрены уравнения баланса энергии и потока энергии, которые образуют систему уравнений энергетической динамики. При этом уравнение баланса энергии играет роль уравнения баланса массы, а уравнение баланса потока энергии играет роль уравнения баланса импульса в механике сплошной среды. Однако эта система уравнений не замкнута, вследствие чего возникает необходимость поиска дополнительных уравнений. В рамках данной работы представлены два различных способа построения замкнутой системы уравнений энергетической динамики электромагнитного поля в однородной среде.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА ТОНКОГО НЕРАСТЯЖИМОГО КОЛЬЦА

Энергетическая динамика – раздел классической динамики, описывающий волновой перенос энергии по аналогии с законами механического движения материальных тел. Такой подход позволяет значительно упростить решение некоторых задач переноса энергии, поскольку движение материальных тел описывается сравнительно несложными уравнениями. В данной работе предлагается рассмотреть модель вращающегося тонкого нерастяжимого кольца и описать движение локального возмущения по нему с помощью методов энергетической динамики.

В ходе доклада будет получено дифференциальное уравнение вращающегося тонкого нерастяжимого кольца с использованием теории стержней. Будут определены дисперсионные соотношения, выведены баланс энергии и баланс потока. Также будет определена координата энергетического центра и его скорость, которая, исходя из своего определения, является скоростью движения локального возмущения по кольцу. Будет проведено сравнение полученных законов и выражений, составляющих основу энергетической динамики для кольца и балки Бернулли-Эйлера.

А.А. Кедров, В.А. Кузькин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ГАУССОВОГО ВОЛНОВОГО ПАКЕТА В ЦЕПОЧКЕ ГУКА

Данная работа посвящена распространению гауссового волнового пакета в диспергирующих линейных средах на примере цепочки Гука. Использование длинноволнового приближения первого порядка позволяет описывать скорость распространения волновых пакетов в среде, однако оно не учитывает изменение их формы. Для гауссового пакета возможно получение решения более высокого порядка, которое показывает «расплывание», т.е. возрастание «ширины», волнового пакета с течением времени.

В работе получено приближенное решение распространения гауссового пакета в цепочке Гука, которое демонстрирует «расплывание» волнового пакета с течением времени, а также получена оценка для скорости «расплывания» волнового пакета. Проведено сравнение с численным моделированием. Рассмотрена задача о распространении гауссова волнового пакета со случайно заданной фазой.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ НЕЛИНЕЙНОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ π -МОДЫ В ВОЗМУЩЕННОЙ ЦЕПОЧКЕ ТОДЫ

Работа посвящена исследованию устойчивости нелинейного колебательного режима, соответствующего π -моды, в цепочке Тоды с помощью теоретико-групповых методов. Цепочка Тоды представляет собой простую модель нелинейного одномерного кристалла с парными межчастичными взаимодействиями, знаменитую своим свойством полной интегрируемости. Исследуемый колебательный режим, π -мода, характеризуется тем, что колебания любых двух соседних частиц происходят в противофазе. Этот режим является периодическим, и его устойчивость может быть проанализирована с помощью стандартного метода Флоке. Однако при значительном увеличении числа частиц в цепочке использование этого метода становится затруднительным. В случае, если соответствующая исследуемому режиму картина атомных смещений обладает дискретной симметрией, это затруднение может быть преодолено с помощью метода, предложенного в работе Г.М. Чечина и К.Г. Жукова и использующего аппарат неприводимых представлений групп симметрии. Этот метод позволяет расщепить сколь угодно большую вариационную систему, возникающую после линеаризации исходных динамических уравнений в окрестности нелинейного периодического режима, на независимые подсистемы конечного размера, каждая из которых вполне поддаётся анализу с помощью метода Флоке. Таким способом была исследована устойчивость π -моды в классической цепочке Тоды, а также в цепочке, с потенциалом Тоды, возмущённым посредством кубической добавки. Было установлено, что в классической цепочке Тоды π -моды, по-видимому, устойчива при любой амплитуде и при любом числе частиц в цепочке. Для возмущённой же цепочки Тоды была построена диаграмма устойчивости, показывающая возможность потери модой устойчивости.

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

ДВИЖЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЦЕНТРА ВОЗМУЩЕНИЯ В ИЗОТРОПНОЙ СРЕДЕ

Изучение глубинного строения Земли и выделение месторождений полезных ископаемых, таких как нефть и газ, требуют подробного изучения динамики сейсмических волн и их взаимодействия с геологическими формациями.

В работе рассматривается проблема распространения сейсмического возмущения в изотропной среде. Исследование направлено на получение приближенного аналитического решения уравнения динамики среды.

Рассматривается сферически симметричная задача. С помощью методов энергетической динамики получено аналитическое решение, описывающее движение математической точки, определяющей энергетический центр сейсмической волны. Показано, что при определенной зависимости жесткости среды от радиуса движение описывается гипоциклоидой. Рассматривается предельный случай, при котором решение сводится к циклоиде. В качестве верификации полученные результаты сравниваются с численным решением и с данными из литературных источников по сейсморазведке.

С.Д. Ляжков^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
²Институт проблем машиноведения РАН

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ОДНОМЕРНОГО КУБИЧЕСКОГО НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ШРЁДИНГЕРА ДЛЯ СВОБОДНОЙ ЧАСТИЦЫ В РАМКАХ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД

Обсуждается интерпретация одномерного кубического нелинейного уравнения Шрёдингера (НУШ) для свободной частицы с позиции механики сплошных сред. С помощью подхода Маделунга показана равносильность НУШ и системы локальных уравнений энергетической динамики, аналогичной системе локальных уравнений баланса массы и импульса для сплошной среды. Показана аналогия между малыми возмущениями волн энергии в носителе Шрёдингера и возмущениями в балке Бернулли-Эйлера под действием осевой силы растяжения/сжатия постоянной интенсивности. Продемонстрированы стационарные решения системы локальных уравнений энергетической динамики в зависимости от постоянных по пространству значений плотностей потока и суперпотока энергии и установлена взаимосвязь между этими решениями и частными решениями НУШ, соответствующие волновым пакетам с огибающими светлого и тёмного солитонов.

А.Д. Работинский, Е.Ф. Грекова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

СВОБОДНЫЕ ВОЛНЫ В СРЕДАХ БЕЗ СИММЕТРИИ ОТРАЖЕНИЯ

Данная работа посвящена исследованию волновых свойств особого класса акустических метаматериалов – редуцированных сложных сред без симметрии отражения.

Особое внимание уделяется редуцированной гиротропной среде, являющейся дважды отрицательным акустическим метаматериалом. Предложена микроструктурная модель одномерной редуцированной гиротропной среды, совершающей трехмерные движения. Найдены параметры, качественно влияющие на прохождение поперечных волн в редуцированных гиротропных средах, в частности, на частотные диапазоны зон существенного поглощения и аномального преломления. Проведено как численное, так и аналитическое исследование влияния этих параметров на вид дисперсионных кривых. Результаты были верифицированы при помощи сравнения численных и аналитических результатов и анализа предельного случая, в котором гиротропная среда становится близка к изотропной, чьи дисперсионные соотношения были найдены и исследованы в других работах.

В работе также представлены две модели одномерных сред без симметрии отражения, являющиеся лишь единожды отрицательными акустическими метаматериалами. Найдены параметры, качественно влияющие на ширину зон существенного поглощения в данных средах. Рассмотрены все возможные варианты распространения смешанных волн в данных средах и предложены условия реализации для каждого случая.

Д.А. Семенин¹, К.П. Фролова^{2, 1}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Институт проблем машиноведения РАН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛА С НЕИДЕАЛЬНЫМИ КОНТАКТАМИ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ФАЗ

Микроструктура материалов оказывает существенное влияние на их характеристики. В связи с этим, вычисление эффективных свойств материалов с учетом их зависимости от микроструктурных параметров является важной задачей для промышленности. Зачастую, матрица композита может обладать отличными от включений свойствами различной природы. В частности, матрица может характеризоваться тензором теплопроводности, не совпадающим с тензором теплопроводности включения. Чаще всего в моделях учитывается идеальность контактов на границе раздела фаз. Тем не менее в ряде случаев может иметь место нарушение таких контактов. В работе исследован случай, когда температура на границе не непрерывна. Это может быть учтено посредством рассмотрения неоднородности с бесконечно тонким теплоизолирующим покрытием.

В ходе работы было получено выражение для тензора вклада единичной сфероидальной неоднородности с изолирующим покрытием и помещенной в однородную матрицу. Для определения свойств материала с множественными неоднородностями, имеющими различное распределение по ориентациям, были использованы методы гомогенизации Максвелла и Мори-Танаки.

И.Н. Трунова^{1,2}, В.А. Кузькин^{1,2}, А.М. Кривцов^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Институт проблем машиноведения РАН

ПРИМЕНЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ОПИСАНИЮ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ

Работа посвящена вопросам кинетического описания процессов переноса энергии. Обсуждаются аналогии между движением множества невзаимодействующих частиц и транспортом энергии в волновой среде.

Рассмотрены два примера:

1) описание теплопроводности в нелинейных цепочках на основе модели случайных блужданий Леви. Известная модель блуждания обобщена на случай ненулевого начального потока энергии. Решена задача о затухании потока при однородном начальном распределении. Также с точки зрения модели Леви рассмотрено блуждание квазичастиц в цепочке с разрывами;

2) вывод кинетической функции распределения, соответствующей волновому процессу, описываемому уравнением Шредингера. Получен алгоритм, позволяющий найти все моменты распределения энергии для уравнения Шредингера, а также восстановить функцию распределения по найденным моментам.

Н.Э. Шелехов, А.М. Кривцов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОПИСАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ТОНКОГО НЕРАСТЯЖИМОГО КОЛЬЦА ПРИ ПОМОЩИ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ

Энергетическая динамика – раздел классической динамики, описывающий волновой перенос энергии по аналогии с законами механического движения материальных тел.

В данной работе будет решено дифференциальное уравнение свободных колебаний в тонком нерастяжимом вращающемся кольце с заданными граничными и начальными условиями численным методом конечных разностей. Волны в таком кольце обладают инерциальными свойствами.

В работе предлагается рассмотреть распространение волн в тонком нерастяжимом вращающемся кольце при помощи энергетической динамики. Также будут рассмотрены инерционные свойства волны при помощи энергетической динамики. Будут построены зависимости скорости распространения волны, ее релокализация в зависимости от угловой скорости вращения кольца через скорость энергетического центра и энергетический радиус.

Полученные результаты для кольца предлагается сравнить с распространением поперечных волн в балке Бернулли-Эйлера.

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ «ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ В ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И МЕДИЦИНСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ»	2
..	
СЕКЦИЯ «ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД И НАНОСТРУКТУР»	10
..	
СЕКЦИЯ «ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И КОСМОСА»	20
..	
СЕКЦИЯ «ФИЗИКА ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ»	27
..	
СЕКЦИЯ «ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА»	32
..	
СЕКЦИЯ «МЕХАНИКА И ПРОЦЕССЫ УПРАВЛЕНИЯ»	46
..	
СЕКЦИЯ «ГИДРОАЭРОДИНАМИКА, ГОРЕНИЕ И ТЕПЛООБМЕН»	60
..	
СЕКЦИЯ «БИОМЕХАНИКА»	87
..	
СЕКЦИЯ «МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА И КОНВЕРСИИ ЭНЕРГИИ»	93
.	