

Секция 1

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ
И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

ДЕФОРМАЦИЯ И УСКОРЕНИЕ УГЛЕРОДНОЙ МИШЕНИ СВЕТОВЫМ ДАВЛЕНИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА СВЕРХВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Н. А. Андреюк, Н. П. Пятаков, Б. П. Якутов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В работе представлены результаты трехмерных численных расчетов, проведенных по программе PLASMA-3P [1], ускорения ионов углерода и электронов при облучении малоплотных мишеней фемтосекундным лазерным излучением интенсивности 10^{22} – 10^{24} Вт/см². Данный диапазон интенсивности ультракороткого лазерного импульса планируется достичь на лазерном комплексе, создаваемом в рамках проекта XCELS [2]. В работе показано, что при воздействии лазерного излучения круговой поляризации интенсивностью от 10^{22} до 10^{24} Вт/см² на плоскую углеродную мишень толщиной 0,2 мкм и плотностью 2,1 г/см³ происходит деформация мишени световым давлением. Электроны и ионы углерода C⁶⁺ под действием светового давления лазерного поля движутся как единый электронно-ионный сгусток. Получены и проанализированы спектры ионов углерода и электронов, ускоряемых совместно световым давлением лазерного излучения в углеродной мишени. Показано, что при увеличении интенсивности лазерного импульса круговой поляризации от 1×10^{22} до 1×10^{24} Вт/см² средняя энергия электронов возрастает от ≈ 4 МэВ до ≈ 130 МэВ, а ионов углерода C⁶⁺ от ≈ 50 МэВ до 2600 МэВ. В то же время, при изменении интенсивности в том же диапазоне от 1×10^{22} до 1×10^{24} Вт/см² максимальная энергия электронов возрастает от ≈ 170 МэВ до ≈ 1700 МэВ, а ионов C⁶⁺ – от $\approx 0,68$ ГэВ до ≈ 35 ГэВ.

Список литературы

1. Андреюк Н. А., Голубев А. И., Пятаков Н. П., Якутов Б. П. Результаты двумерного и трехмерного моделирования ускорения электронов в плазменной кильватерной волне. // Применение лазерных технологий для решения задач по физике высоких плотностей энергии. XX Харито-

новские тематические научные чтения// Труды конференции. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2019. Т. 1. С. 207–212.

2. Exawatt Center for Extreme Light Studies [Электронный ресурс]: [веб-сайт]. – Электрон.дан. -URL: <https://xcels.iapras.ru/> (дата обращения: 17.05.2022).

КОМПОНЕНТ ПОДКЛЮЧЕНИЯ СТОРОННИХ МОДУЛЕЙ ОПТИМИЗАЦИИ В РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ МОДУЛЬНОЙ ИНТЕГРАЦИОННОЙ ПЛАТФОРМЫ ЛОГОС-ПЛАТФОРМА

Е. Д. Беляков

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Оптимизация при проведении научных расчетов является важным фактором, который существенно влияет на результаты исследований. Это связано с тем, что научные расчеты могут быть очень сложными и требовательными к вычислительным ресурсам. Оптимизация позволяет ускорить процесс расчетов и снизить затраты на вычислительные ресурсы. Кроме того, оптимизация может повысить точность результатов проводимых расчетов.

Компонент подключения сторонних модулей оптимизации представляет собой программный модуль, реализованный в виде исполняемого модуля обработчика сценария ЛОГОС-Платформа [1]. Компонент обеспечивает единый механизм подключения оптимизаторов в расчетные схемы модульной интеграционной платформы ЛОГОС-Платформа. Подключение внешних алгоритмов оптимизации позволяет расширить круг решаемых оптимизационных задач.

Выбор оптимизационного алгоритма является критически важным при проведении оптимизации, так как различные алгоритмы могут давать разные результаты в зависимости от поставленных задач и ограничений. Некоторые алгоритмы могут быть более эффективными при работе с большими объемами данных, другие – при работе с ограничениями на параметры объекта. Поэтому выбор оптимального алгоритма является ключевым для достижения желаемых результатов и может существенно повлиять на время и затраты на проведение расчетов.

Компонент подключения сторонних оптимизаторов предоставляет возможность выбора оптимизационного алгоритма из списка доступных на этапе настройки расчета, а также возможность настройки параметров выбранного оптимизатора и оптимизационного расчета.

В докладе отображены: описание структуры и бизнес-логики компонента подключения сторонних модулей оптимизации, алгоритм внедрения сторонних оптимизаторов с его использованием.

Список литературы

1. Пакет программ ЛОГОС [Электронный ресурс]. – URL: <http://logos.vniief.ru/products/logos>.

ЗАРЯДОВОЕ УПОРЯДОЧЕНИЕ ИОНОВ ЖЕЛЕЗА В СОЕДИНЕНИЯХ RFe_2O_4 В ПРИБЛИЖЕНИИ МОДЕЛИ СРЕДНЕГО ПОЛЯ

*Д. Г. Ботин, Д. А. Маслов*¹

СарФТИ НИЯУ МИФИ, г. Саров Нижегородской обл.

¹ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Исследуется зарядовое упорядочение ионов железа в соединениях RFe_2O_4 , где R – редкоземельный элемент. Предложена модель среднего поля с «естественными» параметрами порядка. Показано, что исходная система для определения параметров порядка может быть преобразована в более простую, в зависимости от числа ненулевых параметров порядка. Каждое решение исходной системы определяет зарядовую фазу, среди найденных фаз определяется фаза с наименьшей энергией, по результатам строится фазовая диаграмма. Рассматривается применимость полученных результатов к ферриту лютетия, материалу-мультиферроику.

СРЕДСТВА ПОСТОБРАБОТКИ ЗАДАЧ ПРОЧНОСТИ И ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА С МНОЖЕСТВЕННЫМИ СЛУЧАЯМИ НАГРУЖЕНИЯ В ЛОГОС-ПРЕПОСТ

О. Ю. Воробьев

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Помимо программ для моделирования различных физических процессов в составе пакета программ ЛОГОС развивается препостпроцессор ЛОГОС-Препост для подготовки и обработки задач прочности и тепло-массопереноса. Данный доклад посвящен развитию средств постпроцессинга, а именно постобработке задач с множественными случаями нагружения.

Зачастую, для проведения полномасштабного моделирования узлов и агрегатов разрабатываемых изделий, требуется проведение множества расчетов на всевозможные нагрузки и режимы работы. Как правило, в плане постановки, такие расчеты являются однотипными (в плане сеточной модели, начального распределения веществ и т. д.) и могут отличаться изменением типов или значений задаваемых граничных условий. В свою очередь, по завершении проведения множества таких расчетов, требуется их корректная и эргономичная постобработка для проведения полноценного анализа всей совокупности полученных результатов. Поэтому, была поставлена задача, реализовать постобработку всех результатов, объединенных в пользовательском интерфейсе для навигации по вы-дам, отражающим состояние модели в процессе расчета. Такие задачи прочности и тепло-массопереноса называют задачами с множественными случаями нагружения или многошаговыми задачами.

В докладе рассматриваются общая концепция и особенности реализации постобработки для случая многошаговых задач, а также приводятся примеры работы ЛОГОС-Препост на стадии постпроцессинга.

ИНСТРУМЕНТ РАЗРАБОТКИ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ГРАФИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕЙСОВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ КОМПЛЕКСНОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СРЕДСТВАМИ ПАКЕТА ПРОГРАММ ЛОГОС

*Е. А. Губайдулина, Е. Д. Беляков, А. Ю. Власова,
А. А. Данилова, А. В. Ломтев, Д. А. Тишкин, А. К. Тряпкин*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В настоящее время одним из важнейших инструментов научно-исследовательской деятельности является математическое моделирование. Процесс проведения многодисциплинарных инженерных расчетов становится все более трудоемким и сложным, следовательно, повышаются требования к техническим навыкам пользователя. Современные программные комплексы для математического моделирования имеют высокий порог вхождения, поэтому разрабатываются специализированные программные средства, позволяющие упростить настройку и автоматизировать многие действия пользователя. Авторами работы предложена реализация инструмента для создания специализированных программных средств, обеспечивающих проведение моделирования комплексных расчетных схем в виде отдельного приложения. Приложение позволяет создавать различный графический пользовательский интерфейс и функционал, в зависимости от реализуемой расчетной технологии.

В докладе описан кроссплатформенный инструмент разработки специализированных программных средств, обеспечивающих проведение комплексных расчетов математического моделирования. Создание нового типа приложения или расширение функционала, существующего заключается в создании нового или модификации существующего шаблона. Шаблон проекта однозначно конкретизирует класс решаемых задач: позволяет выделить этапы моделирования и их последовательность, определить необходимые расчетные модули, выполнить предварительную установку шаблонных данных и определить потоки данных, передаваемых между этапами моделирования. Обмен данными между этапами моделирования осуществляется с помощью разработанных для каждого класса задач специализированных скриптов на языке программирования Python.

Данный подход позволяет получить простой и максимально автоматизированный инструмент для подготовки и выполнения сквозного моделирования определенного класса задач. Комплексные расчетные схемы могут быть реализованы на базе расчетных модулей ЛОГОС [1] и расчетных модулей сторонних разработчиков, связи между расчетными модулями обеспечены механизмами ЛОГОС-Платформа.

В докладе отображены: общая архитектура проекта, архитектура клиентской и серверной части, приведено описание структуры шаблона проекта и основных элементов графического интерфейса пользователя.

Список литературы

1. Пакет программ ЛОГОС [Электронный ресурс]. – URL: <http://logos.vniief.ru/products/logos>.

РАЗРАБОТКА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ГРАФИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕЙСА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ ОБОРУДОВАНИЯ И СИСТЕМ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВИБРОПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Е. А. Губайдулина

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Многокритериальная оптимизация конструкций оборудования и систем для обеспечения вибропрочностных характеристик представляет собой серию численных исследований с целью параметрической и геометрической оптимизации конструкции, а также оценки чувствительности целевых функций к изменению варьируемых параметров.

Для упрощения процесса подготовки и проведения многокритериальной оптимизации конструкций оборудования и систем для обеспечения вибропрочностных характеристик разработан специализированный графический интерфейс (СГИ), который позволяет настраивать и проводить серию оптимизационных расчетов с автоматическим перестроением сеточной модели с использованием различных оптимизаторов. Также СГИ предоставляет механизмы автоматического извлечения параметрических и геометрических параметров варьирования, анализа результатов в табличном и графическом виде, наложения сеточной модели и экспериментальных данных формата «*.unv» и пр. Для проведения расчетов СГИ использует оптимизаторы, интегрированные в ЛОГОС-Платформа [1], а также другие программные модули пакета программ ЛОГОС [2].

Специализированный графический интерфейс реализован на базе кроссплатформенного программного обеспечения для создания программных средств для комплексного математического моделирования, разрабатываемого в РФЯЦ-ВНИИЭФ, которое позволяет динамически строить специализированные графические интерфейсы с помощью созданных шаблонов проектов. В шаблоне проекта описаны графические элементы интерфейса, этапы моделирования и их последовательность, используемые программные средства, потоки данных, передаваемые между этапами моделирования и другая информация, необходимая для проведения расчета задач определенных классов.

В докладе отображены: ключевые элементы интерфейса, функциональные возможности, структура и реализация шаблона для динамического построения специализированного графического интерфейса.

Список литературы

1. ЛОГОС-Платформа [Электронный ресурс]. – Программный комплекс ЛОГОС-Платформа. URL: <http://logos.vniief/products/platforma>
2. Пакет программ ЛОГОС [Электронный ресурс]. – URL: <http://logos.vniief.ru/products/logos>.

АЛГОРИТМ ПЕРЕНОСА ПОВЕРХНОСТНОЙ СЕТКИ ПРИ ПОДГОТОВКЕ РАСЧЕТНЫХ СЕТОК ДЛЯ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Е. О. Евстифеева

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Численное моделирование течений жидкости или газа, описываемых уравнениями Навье-Стокса, производится на расчетных сетках [1–4], подготовленных по исходной геометрической модели исследуемого объекта. Использование неструктурированных сеток является наиболее универсальным с точки зрения скорости и эффективности подготовки подходом для дискретизации расчетной области. Для учета особенностей определенных классов задач в сетке могут быть выделены зоны для построения частично структурированной сетки, например, сетки из призматических ячеек между близкими поверхностями тонкостенных конструкций. Для формирования призм с однозначно соответствующими основаниями, представленными треугольниками, необходимо произвести предварительную подготовку поверхностной треугольной сетки, а именно перенести (или «пропечатать») треугольники в тонкой зоне с одной из близких поверхностей на другую.

В работе предложен алгоритм переноса поверхностной треугольной сетки на близких поверхностях тонкостенных конструкций. Показаны реализованные возможности по переносу сетки для смещенной поверхности, а также по интерполяции сформированной сетки на исходную поверхность. Описано, как достигается сохранение характерных особенностей модели и высокое качество итоговой сетки в результате переноса сетки на близких поверхностях.

Разработка ведется в рамках развития препроцессора программного модуля ЛОГОС Аэро-Гидро пакета программ для инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования ЛОГОС [5].

Список литературы

1. Kozelkov A., Kurulin V., Emelyanov V., Tyatyushkina E., Volkov K. Comparison of convective flux discretization schemes in detached-eddy simulation of turbulent flows on unstructured meshes // Journal of Scientific Computing. 2016. Vol. 67. P. 176–191.
2. Sadreghighi I. Mesh generation in CFD. A review – CFD Open Series, Patch 1. 2019. Vol. 86, N 5, P. 405.
3. Смолкина Д. Н., Борисенко О. Н., Черенкова М. В., Гиниятуллина А. Г., Кузьменко М. В., Чухманов Н. В., Потехина Е. В., Попова Н. В., Турусов М. Р. Автоматический генератор неструктурированных многогранных сеток в препроцессоре пакета программ ЛОГОС // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2018. Вып. 2. С. 25–39.
4. Попова Н. В., Борисенко О. Н., Корнеева И. И., Чухманов Н. В., Потехина Е. В., Лазарев В. В., Гиниятуллина А. Г. Автоматический генератор неструктурированных тетраэдральных сеток с призматическими слоями в препроцессоре пакета программ ЛОГОС // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2020. Вып. 1. С. 43–57.
5. ЛОГОС: Пакет программ инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.logos.vniief.ru.

РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ DT-МИШЕНИ УВЕЛИЧЕННОГО РАЗМЕРА В КОМПЛЕКСЕ ПРОГРАММ ЛАСМ

*М. С. Аверин, А. С. Баранова, А. А. Бусалов, А. С. Гнутов,
И. Ю. Ермакова, В. В. Ляпин*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В докладе обсуждаются постановки, методология проведения и результаты двумерных расчетов в комплексе программ ЛАСМ по численному моделированию сжатия мишеней инерциального термоядерного синтеза. Одной из целей данных расчетов является поиск конструкции мишени, оптимизированной под условия облучения в камере перспективной отечественной лазерной установки мегаджоульного класса. Преодоление порога зажигания в мишенях инерциального термоядерного синтеза позволяет достичь плотности энергии порядка 100 ГДж/см^3 и открывает новые возможности и перспективы по исследованию вещества в экстремальных состояниях. Полученные результаты позволяют сформулировать физические и расчетно-методические проблемы, определить направление их решения, а также обосновать принципиальный облик конструкции мишени.

ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД БУТСТРЕП ДЛЯ ПРОВЕРКИ СТАТИСТИЧЕСКОЙ А/В ГИПОТЕЗЫ

*Е. Н. Ерофеев, Д. А. Гришин, Ю. С. Иванушкин¹, С. В. Маерин¹,
О. В. Кривошеев¹*

СарФТИ НИЯУ МИФИ, г. Саров Нижегородской обл.

¹ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Задачи проверки А/В гипотез являются одной из составляющих частей процесса внедрения ИТ (информационные технологий) во все сферы жизнедеятельности, в том числе эти задачи постоянно применяются в бизнес-аналитике для оценки эффективности пилотных проектов. Проверка А/В гипотезы – это статистическая процедура, позволяющая получить вероятностное заключение о том, что после какого-либо воздействия на объект исследования его свойства (параметры объекта) изменились/не изменились. В настоящей работе рассматривается задача проверки А/В гипотезы для заданных выборок А и В, в качестве метрики используется разность средних значений. Выполняется проверка статистической гипотезы о равенстве средних, рассчитываются статистические оценки разности средних и определяются ошибки 1-го и 2-го рода. В статье для решения этой задачи предлагается использовать численный метод бутстрепа, являющийся непараметрическим, что позволяет отказаться от анализа вида распределения выборок и в качестве метрик применять любые статистики. Работоспособность рассматриваемого подхода демонстрируется на примере решения модельной задачи. Приводится краткое описание программы Histogram, разработанной на языке программирования Python, предназначенной для моделирования планируемых и расчета эффективности завершённых пилотных проектов.

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ КЛАСТЕРОВ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В СУБМИКРОННЫХ ТРАНЗИСТОРАХ ШОТТКИ С V-ОБРАЗНЫМ ЗАТВОРОМ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОНИКАЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

И. Ю. Забавичев, А. А. Потехин, А. С. Пузанов

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова»,
Нижний Новгород

Уменьшение топологических норм изделий микроэлектроники приводит к улучшению их характеристик, в частности уменьшению времени пролета рабочей области аналоговых устройств. С другой стороны, уменьшение топологических норм изделий приводит к тому, что размеры разупорядоченной области – кластера радиационных дефектов – становятся сопоставимыми с размерами активной области современных полупроводниковых приборов. Поэтому для моделирования реакции субмикронных полупроводниковых приборов после воздействия проникающих излучений необходимо учитывать особенности переноса носителей заряда в поврежденных структурах.

Задача анализа переноса носителей заряда в полупроводниковых структурах после воздействия проникающих излучений предполагает применение в физико-топологических моделях функциональных зависимостей электрофизических параметров от уровней радиационного воздействия. При использовании метода Монте-Карло такими зависимостями являются частоты и углы рассеяния на кластерах радиационных дефектов, так как они выступают в качестве центров рассеяния подвижных носителей заряда. Наибольшее влияние форма потенциала рассеяния оказывает на перенос горячих носителей заряда, так как для термализованных носителей кластер является абсолютно непрозрачным образованием. Проводя анализ экспериментальных зависимостей тока стока субмикронного транзистора Шоттки с V-образным затвором, для различных потенциалов рассеяния, становится возможным оценить концентрацию кластеров радиационных дефектов, образующихся при радиационном воздействии.

В данной работе впервые проведен анализ параметров кластеров радиационных дефектов в субмикронных транзисторах Шоттки с V-образным затвором после воздействия проникающих излучений. Показано, что оценки концентрации кластеров радиационных дефектов являются чувствительными к форме потенциала рассеяния, несмотря на соответствие результатов моделирования для всех исследуемых потенциалов с экспериментальными данными. Данные отличия необходимо учитывать при моделировании реакции субмикронных полупроводниковых приборов на воздействие проникающих излучений.

АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ АРХИТЕКТУРЫ RISC-V ПРИ СОЗДАНИИ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

С. Е. Илларионов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Архитектура RISC-V анонсирована в 2010 году в калифорнийском университете Беркли, является открытой и свободно распространяемой, обладает модульной системой простых и эффективных команд, что позволяет на ее базе разрабатывать гибкие, масштабируемые и энергоэффективные решения.

В докладе рассмотрена структура системы команд RISC-V, приведены достоинства и недостатки архитектуры.

Представлены решения таких компаний как SiFive, Esperanto, Tesla и др., в том числе решения отечественных разработчиков.

На базе доступного процессора архитектуры RISC-V выполнено исследование производительности международных синтетических тестов, представлено сравнение полученных результатов с аналогичными показателями других архитектур RISC-процессоров. На основе анализа полученных результатов собственного тестирования и опубликованных работ независимых разработчиков, приведена оценка возможности построения высокопроизводительных вычислительных систем на базе архитектуры RISC-V.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАЗМЕННО-ПУЧКОВОГО ГАЗОВОГО РАЗРЯДА В ПОЛЕ МАГНИТНОГО КАСПА

Г. Н. Колесов, А. Е. Дубинов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Исследована начальная стадия формирования плазменно-пучкового разряда в цилиндрической газоразрядной камере, находящейся во внешнем магнитостатическом поле с резкой неоднородностью – магнитным каспом. Определены динамические и кинетические характеристики пучка и плазмы в вакууммированной камере и этой же камеры, заполненной газообразным гелием. Исследована зависимость концентрации газа в камере на скорость накопления частиц и время зарядовой компенсации плазменно-пучкового разряда.

Компьютерное моделирование динамики пучка проведено с помощью ПС-кода КАРАТ [1]. Вычислены характеристики разряда: фазовые портреты электронного и ионных ассамблей на стадиях процесса развития плазменно-пучкового разряда до и после зарядовой компенсации, электростатический потенциал, пространственный заряд, зависимость числа электронов и ионов в камере от времени.

Обнаружен рост количества электронов и ионов по экспоненциальному закону. Это объясняется тем, что пучковый разряд развивается лавинообразно.

Список литературы

1. User's Manual for Code KARAT. Berkley Res. Associates / Taranov V. P.: Springfield, 1992.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАСТИНЧАТОГО МОДУЛЯ Nd:YAG УСИЛИТЕЛЯ С ЗИГЗАГООБРАЗНЫМ ХОДОМ ЛУЧЕЙ

*А. С. Копейкин, Г. М. Мищенко*¹

СарФТИ НИЯУ МИФИ, г. Саров Нижегородской обл.

¹ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В пластинчатых усилителях с зигзагообразным ходом лучей имеют место две проблемы. Первая состоит в том, что при зигзагообразном проходе лазерного пучка по пластинчатому усилителю поглощенная мощность накачки не используется полностью. Вторая проблема заключается в неравномерном нагреве активного элемента. Поскольку коэффициент преломления среды зависит от температуры, то элементарные лучи усиливаемого лазерного пучка будут проходить различные оптические пути. Это приводит к искажению волнового фронта пучка.

В данном докладе представлены результаты численного моделирования пластинчатого модуля Nd:YAG усилителя с зигзагообразным ходом лучей в рамках двумерной геометрии. Аналитически определены значения допустимых углов θ_n падения на входе в модуль. Разработан численный алгоритм, моделирующий зигзагообразный ход лучей, написана программа, позволяющая находить факторы заполнения активного объема при двух проходах лазерного пучка по активному элементу. Реализован алгоритм для расчета одномерного профиля удельной мощности накачки в активной области для торцевой накачки с произвольной шириной спектра излучения. Написана программа для нахождения численного решения уравнения теплопроводности в пластинчатом модуле. Разработан и реализован численный алгоритм для моделирования связанных с нагревом активного элемента приращений оптического пути усиливаемого излучения. Проведено параметрическое исследование для пластинчатого модуля Nd:YAG из работы [1]. Рассчитаны потери поглощенной мощности и амплитуды искажений волнового фронта пучка для двух проходов при различных парах углов θ_n . Показано, что разработанная методика позволяет подобрать такие пары углов, для которых рассматриваемые величины имеют минимальные значения.

Список литературы

1. Shin J. S., Cha Y. H., Lim G. et al. "Wavefront improvement in an end-pumped high power Nd:YAG zigzag slab laser"// Optics Express, 2017.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗИРОВКИ 7-КАНАЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ДИНАМИЧЕСКИМИ ТУРБУЛЕНТНЫМИ ИСКАЖЕНИЯМИ ФАЗЫ С УЧЕТОМ ТРАНСПОРТНОЙ ЗАДЕРЖКИ

О. А. Кузиков, М. В. Волков, Ф. А. Стариков

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Работа посвящена численному исследованию когерентной фазировки 7-канального лазерного излучения на удаленный приемник в динамической турбулентной атмосфере с использованием стохастического параллельного градиентного (СПГ) алгоритма [1] с включением времени транспортной задержки излучения как во время этапа, так и в сдвиг между этапами СПГ алгоритма [2]. Динамика фазового фронта лазерного пучка моделировалась на основе гипотезы Тейлора, учитывающей пространственный сдвиг фазового фронта со скоростью ветра. Пространственный спектр турбулентных искажений соответствовал спектру фон Кармана и характеризовался радиусом когерентности атмосферы (параметром Фрида) r_0 . Эффективность фазировки оценивалась при различном отношении r_0 к размеру субапертуры d и отношении частоты фазирующей системы ν_{ph} к частоте Гринвуда ν_G , где ν_{ph} – величина, обратная времени достижения числа Штреля 0,8. Получены условия на отношения ν_{ph} / ν_G и r_0 / d , при которых СПГ фазировка с учетом транспортной задержки обеспечивает уровень числа Штреля $\sim 0,7$ и выше. Показано, что включение транспортной задержки в сдвиг между этапами позволяет увеличить ν_{ph} в 4–5 раз, т. е. позволяет фазировать многоканальное излучение в турбулентной атмосфере с бóльшими значениями частоты Гринвуда.

Список литературы

1. Гаранин С. Г., Маначинский А. Н., Стариков Ф. А., Хохлов С. В. Фазовая коррекция лазерного излучения с помощью адаптивных оптических систем в РФЯЦ-ВНИИЭФ // Автометрия. 2012. Т. 48, № 2. С. 30–37.
2. Weyrauch T., Vorontsov M. A., Carhart G. W. et al. Experimental demonstration of coherent beam combining over a 7 km propagation path // Optics Letters. 2011. Vol. 36, N 22. P. 4455–4457.

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ МИГРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ С УЧЕТОМ ЦЕПОЧЕК РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА В ЦИФРОВОМ ПРОДУКТЕ ЛОГОС-ГИДРОГЕОЛОГИЯ

Г. О. Кузина, М. Л. Сидоров, И. В. Горев

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Одной из важных составляющих процесса геомиграции радионуклидов является учет радиоактивного распада с образованием цепочек дочерних радионуклидов. Для учета радиоактивного распада в цифровом продукте (ЦП) ЛОГОС-Гидрогеология реализован специализированный модуль. В данной работе описаны особенности этого модуля, его связь с модулем миграции, на примерах некоторых задач показана работоспособность реализованных методов.

В ЦП ЛОГОС-Гидрогеология модуль расчета радиоактивного распада с учетом цепочек является частью модуля миграции. Данный модуль основан на составлении и решении системы дифференциальных уравнений в матричной форме.

В рамках данной работы рассмотрены различные методы решения задачи распада, выделены и реализованы методы сборки матрицы распада, как в произвольной, так и в нижне-треугольной форме. В качестве методов решения системы дифференциальных уравнений с подготовленной матрицей распада реализованы модифицированный метод Паде (произвольная матрица распада) [1] и метод решения системы распада с построением иерархичной матрицы распада и использованием свойств матричной экспоненты [2].

Верификация методов производилась на задачах, имеющих аналитическое решение (Бейтман, Bauer). Также проводилось сравнение результатов на задачах, не имеющих аналитического решения, с результатами, полученными по стороннему программному обеспечению. Сравнение результатов показало качественное и количественное согласие.

Список литературы

1. Cleve Moler Charles Van Loan Nineteen Dubious Ways to Compute the Exponential of a Matrix, Twenty-Five Years Later // SIAM REVIEW. 2003. № 1.
2. Ladshaw A., Wiecherta A. I. et al., Algorithms and algebraic solutions of decay chain differential equations for stable and unstable nuclide fractionation // Computer Physics Communications. 2020.

СРЕДСТВА ПОСТПРОЦЕССИНГА В ПРЕПОСТПРОЦЕССОРЕ ЛОГОС-ПРЕПОСТ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАДАЧ ПРОЧНОСТИ И ТЕПЛОПЕРЕНОСА

*В. В. Кузьмин, В. В. Ломтев, Ю. В. Козачек, Е. В. Нестеров,
А. Л. Потехин, В. В. Жирнов, О. Ю. Воробьев, П. В. Черенков,
И. В. Логинов*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» г. Саров Нижегородской обл.

Помимо программ для моделирования различных физических процессов в составе пакета программ ЛОГОС [1] развивается препостпроцессор ЛОГОС-Препост для подготовки и обработки задач прочности и тепломассопереноса.

Изначально средства постпроцессинга обеспечивались параллельной системой постобработки ScientificView [2], [3]. Позднее, основные средства постпроцессинга из ScientificView были интегрированы в препостпроцессор ЛОГОС-Препост. Интегрированные средства постпроцессинга позволяют использовать данные всех этапов моделирования для анализа полученных результатов, в частности проводить совместное отображение результатов моделирования и элементов постановки модели.

В докладе обзорно представлены такие возможности как, обеспечение отображения состава результатов расчета в едином дереве модели ЛОГОС-Прочность и ЛОГОС-Тепло, обеспечение загрузки узловых и ячеечных величин, возможность построения различных алгоритмов фильтрации данных и калькуляция величин.

Такой принцип выводит постобработку в ЛОГОС-Препост на качественно новый уровень, поскольку теперь для анализа доступны не только результаты моделирования, но и различные данные, заданные на этапе формирования математической модели.

Список литературы

1. Пакет программ ЛОГОС [Электронный ресурс]. – URL: <http://logos.vniief.ru/products/logos> .

2. Потехин А. Л., Никитин В. А., Логинов И. В., Кузнецов М. Г., Лопаткин А. И., Жирнов В. В., Черенков П. В., Ломтев А. В., Козачек Ю. В., Ломтев В. В. Пакет программ ЛОГОС. Новые возможности графической постобработки результатов моделирования инженерных задач в параллельной системе постобработки ScientificView / Супервычисления и математическое моделирование» // Сборник трудов. Саров, 2012. С. 481–487.

3. Потехин А. Л., Логинов И. В., Никитин В. А., Кузнецов М. Г., Лопаткин А. И., Жирнов В. В., Черенков П. В., Ломтев А. В. Пакет программ ЛОГОС. Методы графической обработки результатов моделирования инженерных задач / Забабахинские научные чтения // Сборник тезисов. Снежинск: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», 2012.

АЛГОРИТМ ПОИСКА ПЕРЕСЕЧЕНИЙ ТРЕУГОЛЬНИКОВ В ПОВЕРХНОСТНОЙ ТРЕУГОЛЬНОЙ СЕТКЕ

А. С. Ларькин, Т. В. Цалко

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Построение качественной поверхностной сетки, а в следствии построение на ней объемной сетки для проведения численного моделирования физических процессов являются одними из наиболее трудоемких и затратных по времени этапов подготовки численной модели в 3D-пространстве.

В препроцессоре пакета программ ЛОГОС [1] для подготовки к моделированию задач аэрогидродинамики реализованы несколько генераторов объемных сеток. Каждый из этих генераторов предъявляет ряд жестких требований к входной поверхностной треугольной сетке, одним из которых является отсутствие в сетке пересекающихся треугольников.

Для выполнения данного требования необходим инструментарий, способный определять пересекающиеся треугольники в поверхностной сетке, чтобы затем их обработать (удалить, перестроить). Для этого существует алгоритм поиска пересечений треугольников. Данный алгоритм является базовым, так как позволяет выявлять проблемные области в поверхностной сетке и исправить их в автоматическом режиме [2], в результате построив корректную поверхностную сетку.

В докладе представлен результат проделанной работы – модернизация алгоритма поиска пересекающихся элементов поверхностной треугольной сетки, в которой учитываются не рассматриваемые ранее особенности, возникающие при поиске пересечений треугольников. Например, учет соседних по ребру/вершине треугольников, которые являются пересекающимися в общем смысле понятия пересечения, но являются корректными для поверхностной треугольной сетки. Также в докладе рассмотрены наиболее распространенные алгоритмы поиска пересечений, приведены результаты сравнения замеров времени работы без использования и с использованием k -мерного дерева, примеры построения сеток с учетом исправления пересечений треугольников.

Список литературы

1. ЛОГОС: Пакет программ инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.logos.vniief.ru.

2. Евстифеева Е. О., Панкратов Д. М., Цалко Т. В. Алгоритмы автоматического исправления пересечений, реализованные в генераторе поверхностных треугольных сеток в пакете программ ЛОГОС/Суперкомпьютерное моделирование и искусственный интеллект. Международная конференция «XXII Харитоновские математические научные чтения, 24-27 мая 2021 года» // Сборник научных трудов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2022. С. 170–180.

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ ЗЕРКАЛА С УПРАВЛЯЕМОЙ КРИВИЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

А. С. Мокеев, Л. М. Лавров, Е. А. Пикалов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В настоящее время существует интерес к повышению яркости пятна лазерного излучения при передаче на большие расстояния (от 1 до 3 км). Кроме того, в ряде практических задач требуется фокусировать излучение на различных расстояниях. Одним из возможных путей решения данной проблемы является использование фокусирующего зеркала с управляемой кривизной поверхности [1–3], позволяющего менять положение условного фокуса в зависимости от расстояния до объекта, а значит получать значительный выигрыш в яркости [4].

Перед переходом на фокусные расстояния ~ 1 км целесообразно провести оценки на более доступных для исследования расстояниях ~ 100 м.

В данной работе проведены расчетно-экспериментальные исследования модельного варианта конструкции зеркала с управляемой кривизной поверхности [3].

На основе расчетной модели [5], позволяющей в скалярном приближении, с учетом волновой природы света, моделировать отражение лазерного излучения от отражающей поверхности заданной формы, проведено сравнение с экспериментальными данными по яркости и размерам пятна в фокусе зеркала. Показано удовлетворительное согласие экспериментальных и расчетных данных.

Список литературы

1. Bin-Nun E. and Dothan-Deutsch F. Mirror with adjustable radius of curvature. The Review of Scientific Instruments. 1973. Vol. 44, N 4. P. 512–513.
2. Xiaopeng Xie, Hui Zhao, Emmanuel Hugot, Liang Xu, Sabri Lemared, et al. Elastic bending of Variable Curvature Mirrors: validation of a simplified analytical method. Applied optics, Optical Society of America, 2019.

3. Пат. 202985 U1, РФ, МПК G02B 7/185, G02B 26/08, F21V 7/16. Зеркало с изменяемой кривизной/ Тимаев Д. С., Гаранин С. Г., Рогачев В. Г., Кудряшов Е. А., Качалин Г. Н., Мокеев А. С., Ямщиков В. М. // Бюллетень изобретений. 2021. № 8.

4. Ахманов С. А. Физическая оптика: Учебник. 2-е изд. / С. А. Ахманов, С. Ю. Никитин. М.: Изд-во МГУ; Наука, 2004. С. 656.

5. Мокеев А. С. Сравнение методов численного интегрирования в задаче дифракции плоской электромагнитной волны на прямоугольном отверстии / А. С. Мокеев, В. М. Ямщиков // Компьютерная оптика. 2021. Т. 45, № 5. С. 773–778. – Doi: 10.18287/2412-6179-CO-877.

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО МЕТОДА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОДНОМЕРНОГО И ДВУМЕРНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

М. А. Нестеров, В. А. Глазунов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Использование численной дискретизации уравнений в частных производных позволило добиться значительного прогресса в моделировании задач математической физики [1]. Однако процесс решения таких задач с использованием этого метода требует значительных вычислительных ресурсов. С другой стороны, развитие нейронных сетей показало, что они являются многообещающей альтернативой каноническим численным методам. Тем не менее, для обучения нейронных сетей требуются большие наборы данных, которые не всегда доступны. В результате чего для поиска решений приходится использовать модели на основе неполной информации.

Одним из подходов к обучению моделей с недостаточным количеством данных является обучение на основе физических принципов, которое сочетает входные данные с физическими законами для реализации универсальной модели машинного обучения для задач математической физики. Этот подход известен как *physics-informed neural network* (PINN) [2]. Чтобы минимизировать функцию потерь, PINN аппроксимирует приближенные решения уравнений в частных производных путем обучения нейронной сети. Функция потерь, в свою очередь, учитывает невязку уравнения, начальные и граничные условия.

В данной работе рассматривается применение подхода, основанного на PINN, для решения одномерной и двумерной задачи теплопроводности. Модель искусственной нейронной сети реализована с использованием фреймворка машинного обучения PyTorch [3] на Python. Разработанная модель интегрирована в рамках модуля ЛОГОС-Тепло [4] пакета программ ЛОГОС. Продемонстрировано решение с использованием разработанного метода задач одномерной и двумерной стационарной теплопроводности с различными граничными условиями и внутренним источником энерговыделения. Проведено сравнение с аналитическим решением,

а также с решением, полученным в модуле ЛОГОС-Тепло. В работе исследуется влияние различных конфигураций нейронных сетей и функций активации на сходимость и точность получаемых результатов.

Список литературы

1. Handbook of Numerical Heat Transfer, Second Edition. Edited by W. J. Minkowycz, E. M. Sparrow and J. Y. Murthy Copyright © 2006 John Wiley & Sons, Inc.

2. M. Raissi et al. Physics-Informed Neural Networks: A Deep Learning Framework for Solving Forward and Inverse Problems Involving Nonlinear Partial Differential Equations, J. Comput. Phys. (2018), <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.10.045>

3. Paszke A. et al. 2019. PyTorch: An Imperative Style, High-Performance Deep Learning Library. In Advances in Neural Information Processing Systems 32. Curran Associates, Inc. P. 8024–8035.

4. Цифровой продукт ЛОГОС-Тепло [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://logos.vniief.ru/products/heat>.

**ПРИМЕНЕНИЕ ЛОКАЛЬНО-НЕРАВНОВЕСНОЙ МОДЕЛИ
ПЕРЕНОСА НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА ДЛЯ АНАЛИЗА
ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СУБМИКРОННЫХ СТРУКТУРАХ
«КРЕМНИЙ НА ИЗОЛЯТОРЕ» НА ПРИМЕРЕ ДИОДА ШОТТКИ**

А. А. Потехин, И. Ю. Забавичев, А. С. Пузанов

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова»,
Нижний Новгород

Для анализа переходных процессов, протекающих в изделиях микро- и наноэлектроники при радиационном воздействии на фундаментальном уровне необходимо изучение переноса носителей заряда в полупроводниковых структурах в процессе формирования кластеров радиационных дефектов. Указанная проблема имеет большое значение для оптимизации функционирования и внутренней структуры элементов интегральных схем по критерию радиационной стойкости.

Перенос носителей заряда в квазиклассическом приближении, то есть без учета квантово-механических эффектов, может быть описан с использованием кинетического уравнения Больцмана, решаемого совместно с уравнением Пуассона. Однако непосредственное решение этой системы уравнений представляет собой очень сложную математическую задачу. В качестве возможного упрощения можно рассмотреть вариант, заключающийся в том, чтобы использовать при анализе лишь несколько первых моментов усредненной одночастичной функции распределения. В результате для каждого момента записывается свое уравнение баланса, представляющее из себя закон сохранения (изменения) макроскопической физической величины. Аналогично кинетическое уравнение Больцмана для переноса междоузельных атомов и вакансий при воздействии дефектообразующих излучений редуцируется к системе уравнений тепломассопереноса.

Целью данной работы является обоснование и разработка методов моделирования переноса носителей заряда в локально-неравновесном приближении для структур «кремний на изоляторе» с субмикронными рабочими областями после радиационного воздействия.

РАЗРАБОТКА И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ АППРОКСИМАЦИИ КРИВЫХ

С. А. Рыжов, С. В. Маврин¹, О. В. Кривошеев¹

СарФТИ НИЯУ МИФИ, г. Саров Нижегородской обл.

¹ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В представленной работе выполнена программная реализация расчета и построения NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline – неоднородные рациональные B-сплайны), а также два алгоритма аппроксимации кривых: нативный алгоритм аппроксимации и алгоритм аппроксимации, основанный на интегральной норме. На тестовых примерах кривых был проведен сравнительный анализ данных алгоритмов по метрике Хаусдорфа, кривизне сплайнов и квадратичной разности кривых.

Разработанные математические методы и программное обеспечение реализованы в среде разработки Qt Creator с помощью языка программирования C++, и должны быть частью процесса обмена 2D-данными между программным модулем «Система конструкторского проектирования» комплекса программ в защищенном исполнении «Система полного жизненного цикла изделий «Цифровое предприятие»» (разработчик РФЯЦ-ВНИИЭФ) и сторонними системами автоматизированного проектирования посредством файлов и открытых и проприетарных форматов.

СОПРЯЖЕНИЕ БЕЗЪЕ КРИВЫХ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ

С. А. Рыжов, С. В. Маврин¹, О. В. Кривошеев¹

СарФТИ НИЯУ МИФИ, г. Саров Нижегородской обл.

¹ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

На сегодняшний день кривые Безье являются обязательной составляющей геометрического ядра современных систем автоматизированного проектирования (CAD – *Computer Aided Design*). В данной работе предлагаются математические подходы, позволяющие выполнять аппроксимацию сопряжения (соединения) двух и более кривых Безье таким образом, что в точке сопряжения выполняются условия гладкости (непрерывности) до порядка, равного степени заданных Безье кривых. Сопряженные кривые представляются как одна кривая Безье, со степенью равной степени кривой с наибольшим порядком. На полученную кривую могут быть наложены дополнительные ограничения в виде прохождения через заданную точку и равенства производных заданным значениям в этой точке.

Для решения указанных задач формулируется оптимизационная задача с ограничениями в виде равенств, которая решается методом множителей Лагранжа через сведение к системе линейных алгебраических уравнений. В работе приводятся примеры аппроксимаций с учетом ограничений.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРРЕКЦИИ ФАЗОВЫХ АБЕРРАЦИЙ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СИСТЕМОЙ ИЗ ДВУХ АДАПТИВНЫХ ЗЕРКАЛ ПОД УПРАВЛЕНИЕМ СТОХАСТИЧЕСКОГО ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ГРАДИЕНТНОГО АЛГОРИТМА

Д. А. Саламатин^{1,2}, *Ф. А. Стариков*^{1,3}, *Р. А. Шнягин*¹

¹ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

² Филиал МГУ им. М. В. Ломоносова в г. Сарове,
г. Саров Нижегородской обл.

³ СарФТИ НИЯУ МИФИ, г. Саров, Нижегородской обл.

Проведено расчетно-теоретическое исследование работы адаптивной оптической системы, состоящей из двух последовательно расположенных адаптивных зеркал размером 46×56 мм². Управление адаптивной системой осуществлялось с помощью стохастического параллельного градиентного алгоритма [1, 2]. В качестве целевой функции алгоритма использовалась доля мощности лазерного пучка в пределах его дифракционного угла. Рассмотрены два варианта использования адаптивных зеркал – система с общим контуром управления и два независимых адаптивных контура. Подобные адаптивные оптические системы могут применяться для коррекции фазовых искажений излучения, приобретаемых как при прохождении излучения сильно турбулентной атмосферой трассы, так и оптического тракта лазерной установки. Установлено, что эффективность коррекции фазовых aberrаций такой адаптивной системы высока при использовании двух независимых адаптивных контуров и подаче на первое адаптивное зеркало относительно малых пробных случайных напряжений.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики (проект «Физика высоких плотностей энергии. Этап 2023–2025»).

Список литературы

1. Vorontsov M. A., Carhart G. W. Adaptive optics based on analog parallel stochastic optimization: analysis and experimental demonstration // Optical society of America. 2000. Vol. 17, N 8. P. 1440–1453.

2. Garanin S. G., Manachinsky A. N., Starikov F. A., Khokhlov S. V. Phase correction of laser radiation with the use of adaptive optical system at the Russian Federal Nuclear Center – Institute of Experimental Physics // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2012. Vol. 48, N 2. P. 134–141.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ПОТОКА ПО КОНТАКТНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ

А. Н. Самсонова, В. А. Глазунов, Р. А. Тришин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Для оптимальной организации процесса горения и эффективного использования газа в пламени горелки необходимо знание структуры факела. Метод, с помощью которого это возможно – измерение температуры и ее распределение в факеле. Обычно измеряемые температуры лежат в достаточно широком интервале от 273 до 3000 °С и более. Для измерения температуры факела используют контактные методы измерения температуры, которые предполагают непосредственный контакт с измеряемым объектом. Однако использование контактного термометра может приводить к нарушению структуры пламени. [1, 2] Немаловажным является тот факт, что при температурах свыше 1500 °С точность измерения контактным методом снижается, за счет значительного лучистого потока на поверхности термопары.

В рамках данной работы проведен расчет измерения температуры факела кислород-водородной горелки с помощью термопар, защищенных графитовыми колпачками. Анализ полученных данных указал, на существенное отклонение величины температуры факела от данных измеренных открытыми термопарами. Часть теплового потока, получаемого от факела, терялось за счет излучения на внешней поверхности термопары, что занижало измеряемую температуру.

Для получения корректных значений температуры факела, необходимо в ходе численного моделирования решить обратную задачу теплопроводности – оценить граничное условие для известного изменения температуры точки внутри расчетной области. Для этого проведена серия расчетов теплопроводности измерительной системы в программном модуле ЛОГОС-Тепло, входящий в отечественный пакет программ инженерного анализа ЛОГОС [3]. На поверхности графитового колпачка задается комбинированное граничное условие – конвективный теплообмен

и тепловое излучение. Параметры конвективного граничного условия брались постоянными величинами, а также из результатов газодинамического расчета.

Список литературы

1. Линеверг Ф. Измерение температур в технике. Справочник. Пер. с нем. 1980. С. 544.
2. Свет Д. Я. Оптические методы измерения истинных температур. М.: Наука, 1982. С. 296.
3. Пакет программ ЛОГОС [Электронный ресурс]: – режим доступа: <http://logos.vniief.ru/products/logos>.

РАСЧЕТ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ В ДВУХ ПЕРЕСЕКАЮЩИХСЯ В ПЛАЗМЕ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКАХ

И. Р. Смагин, С. В. Бондаренко

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Эффект перераспределения мощности лазерного излучения между пересекающимися в докритической плазме лазерными пучками (Cross-Beam Energy Transfer) может оказывать существенное влияние на эффективность сжатия мишени в экспериментах по инерциальному термоядерному синтезу. В экспериментах по схеме прямого облучения мишеней он приводит к существенным потерям энергии лазерного драйвера [1]. При этом данное явление используется для управления симметрией облучения стенок цилиндрического бокса на установке NIF за счет введения необходимой отстройки длин волн между пересекающимися под разными углами группами пучков. В этом случае перераспределение мощности лазерного излучения происходит в разреженной плазме, образовавшейся в результате испарения перегородок вблизи отверстий для ввода пучков в бокс [2, 3].

В работе представлены результаты расчетов перераспределения мощности излучения между двумя пересекающимися в разреженной плазме лазерными пучками в трехмерной геометрии для случая симметричной конфигурации пучков относительно нормали к мишени [4]. Для моделирования условий экспериментов на мощных лазерных установках по схеме непрямого облучения рассматривалось использование сверхзвуковой газовой струи, а также мишеней из малоплотных пен. По результатам расчетов определены величины отстройки длин между двумя пучками при которой предполагается наблюдать наибольший уровень перераспределения мощности лазерного излучения.

Список литературы

1. Igumenshchev I. V. et al. Crossed-Beam Energy Transfer in implosion experiments on OMEGA // *Physics of Plasmas*. 2010. Vol. 17. 122708.
2. Michel P. et al. Saturation of multi-laser beams laser-plasma instabilities from stochastic ion heating // *Physics of Plasmas*. 2013. Vol. 20. 056308.
3. Michel P. et al. Symmetry tuning via controlled crossed-beam energy transfer on the National Ignition Facility // *Physics of Plasmas*. 2010. Vol. 17. 056305.
4. Marion D. J. Y. et al. Modeling crossed-beam energy transfer for inertial confinement fusion // *Physics of Plasmas*. 2016. Vol. 23. 052705.

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ НА КОНТАКТНЫХ ГРАНИЦАХ СЛОИСТЫХ СИСТЕМ

Ю. А. Степанова, Д. И. Бобровский, И. Ю. Бобровская

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В настоящее время большой практический интерес представляют задачи, в которых исследуется развитие процесса турбулентного перемешивания на контактных границах слоистых систем. Для расчета таких задач в мире существует ряд подходов и несколько десятков физических моделей, среди которых широкое применение получил RANS метод или полуэмпирические модели турбулентности. Одной из основных проблем данного метода является инициализация процесса турбулентного перемешивания, включающая в себя подзадачи: расчет этапа развития неустойчивости, определение момента перехода к процессу турбулентного перемешивания и формирование начальных данных для решения уравнений полуэмпирических моделей. От корректности моделирования этапа инициализации процесса турбулентного перемешивания зависит точность дальнейших вычислений.

В данной работе авторами исследуются различные эмпирические модели [1], [2], численно реализованные в «лагранжево-эйлеровой» методике МИМОЗА [3] и предназначенные для описания этапа развития неустойчивости, а именно неустойчивостей Рихтмайера-Мешкова и Рэля-Тейлора. Помимо этого, приводятся алгоритмы поиска положения ударных волн [4] с целью определения момента ударно-волнового взаимодействия. Представлены результаты верификации и валидации реализованных моделей и алгоритмов на тестовой задаче, моделирующей развитие неустойчивости Рихтмайера-Мешкова на границе раздела веществ воздух-фреон при прохождении ударной волны из «легкого» вещества в «тяжелое». Приводится сравнение полученных результатов расчетов с экспериментальными данными и результатами аналогичных расчетов, выполненных по методике ЛЭГАК [5].

Список литературы

1. Mansoor M. M., Dalton S. M., Martinez A. A., Desjardins T., Charonko J. J., Prestridge K. P. The effect of initial conditions on mixing transition on the Richtmyer-Meshkov instability // *Fluid Mechanics*. 2020. Vol. 904. P. A3.
2. Dimonte G., Ramaprabhu P. Simulations and model of the nonlinear Richtmyer-Meshkov instability // *Physics of Fluids*. 2010. Vol. 22, N 1. P. 014104-17.
3. Софронов И. Д., Афанасова Е. А., Винокуров О. А. и др. Комплекс программ МИМОЗА для решения многомерных задач механики сплошной среды на ЭВМ «Эльбрус» // *ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов*. 1990. Вып. 2. С. 3–9.
4. Разин А. Н. Моделирование турбулентного перемешивания в газовых слоях: Монография. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2020. С. 290.
5. Бахрах С. М., Величко С. В., Спиридонов В. Ф. и др. Методика ЛЭГАК-3D расчета трехмерных нестационарных течений многокомпонентной сплошной среды и принципы ее реализации на многопроцессорных ЭВМ с распределенной памятью // *ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов*. 2004. Вып. 4. С. 41–50.

ДВУМЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСА, ГЕНЕРИРУЕМОГО СИСТЕМОЙ (ЭМИГС)

Е. С. Столмакова, А. А. Соловьев, А. А. Филатова

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Искусственные спутники Земли и другие аппараты, находящиеся в космосе, могут подвергаться воздействию мощных потоков ионизирующих излучений (ИИ) как естественного, так и искусственного происхождения. При падении ИИ на элементы корпуса спутника с поверхности в космос выбивается поток фотоэлектронов. Между отрицательно заряженным электронным облаком и положительно заряженным корпусом возникает разность потенциалов, что приводит к генерации в окрестности космического аппарата электромагнитных полей. Воздействие таких полей на радиоэлектронную аппаратуру спутника может вызывать ее сбои или полный отказ.

По этой причине начиная с 70 – 80 гг. XX века в ряде стран проводились масштабные исследования процесса генерации ЭМИГС. Работы велись как в направлении создания расчетно-теоретических методик, так и лабораторного моделирования на лазерных установках. Для расчетно-теоретического сопровождения этих экспериментов в ИТМФ начата разработка численной методики определения параметров ЭМИГС.

На первом этапе работ предполагается разработка двумерной осесимметричной численной методики расчета и проведение соответствующих лабораторных экспериментов в цилиндрической геометрии. Такой выбор обусловлен характерной цилиндрической формой большинства объектов ракетно-космической техники и относительной простотой реализации двумерной методики по сравнению с трехмерной.

Целью данной работы является описание разработанного к настоящему времени варианта данной методики. Она основана на численном интегрировании уравнений Максвелла в цилиндрических координатах и использовании метода частиц [1] для расчета плотности тока фотоэлектронов.

Для тестирования разработанной численной методики были взяты две модельные задачи [2].

Список литературы

1. Yee K. S. Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media// IEEE of Ant. Prop. 1966. Vol. AP-14, N 3. P. 302–307.

2. Z. Xu, C. Meng, Y. Jiang and P. Wu. 3D Simulation of cavity SGEMP interference generated by pulsed X-rays// IEEE Trans. on Nucl. Sci. 2020. Vol. 67, N 2. P. 425–433.

**ПОСТРОЕНИЕ НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЕТОК,
АДАПТИРОВАННЫХ ПОД ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ
МОДЕЛИРУЕМЫХ ТЕРРИТОРИЙ, ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ
ПОДЗЕМНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ В ЦИФРОВОМ ПРОДУКТЕ
ЛОГОС-ГИДРОГЕОЛОГИЯ**

Т. С. Трушкина^{1,2}, *М. Л. Сидоров*¹

¹ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

² Филиал МГУ им. М. В. Ломоносова в г. Сарове,
г. Саров Нижегородской обл.

Построение качественной расчетной сетки для расчетов трехмерных задач – трудоемкий и затратный этап при подготовке численной модели. Качество получаемых расчетных сеток существенно влияет на качество проводимых на них расчетов.

Геологическая модель имеет сложную литологическую структуру и может быть дискретизирована неструктурированной сеткой, адаптированной под различные типы объектов: скважины, выклинивания слоев, пласты, разрывы слоев и др.

В цифровом продукте ЛОГОС-Гидрогеология [1] можно производить построение сеток с типами ячеек: тетраэдры, призмы с треугольным и многоугольным основаниями, гексаэдры, многогранники.

Имеется возможность строить сетки в геологических слоях с пересекающимися поверхностями разделов геологических слоев, задавать зоны дополнительных детализаций и строить сетки с более высокой дискретизацией в местах наибольшего интереса. Метод балансировки разбиений обеспечивает плавный переход от зон с дополнительной детализацией к остальной области моделирования. Для учета технологических объектов и строений на поверхностной сетке применяется метод учета кривых-ограничений.

Разработанные методы работают как в последовательном, так и параллельном режимах.

В работе демонстрируются примеры построения сеточных моделей, среди которых модели реальных объектов. Проведен контроль качества

получаемых ячеек сеточных моделей. Даны оценки скорости работы и требуемой памяти для сеток, состоящих из разных типов ячеек в последовательном и параллельном режимах.

Список литературы

1. Пронин В. А., Горев И. В., Сидоров М. Л. и др. Цифровой продукт ЛОГОС-Гидрогеология для решения задач поверхностного стока и подземной гидродинамики. / XVIII Международная конференция «Супервычисления и математическое моделирование» // Сборник тезисов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2022. С. 95.

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ОДНОМЕРНЫХ УРАВНЕНИЙ ГИДРОДИНАМИКИ

М. С. Турбылев, А. Г. Данилов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Для описания динамики течений газов или жидкостей в одномерном приближении используется система дифференциальных уравнений Эйлера. В качестве способов дискретизации по пространству применяется метод конечных разностей и метод конечных объемов. В данной работе производится сравнение двух методов на примерах реализации соответствующих численных схем.

Рассматривается балансно-характеристическая схема «Кабаре» второго порядка точности. Для переноса консервативных переменных в ней применяется метод конечных разностей, а для переноса потоковых переменных – метод характеристик.

В конечно-объемных схемах значения консервативных величин усредняются в пределах ячейки, а потоки между ячейками рассчитываются по формуле. Рассматривается схема HLL (Harten, Lax, van Leer) первого порядка точности, а также ее модификация TVD (total variation diminishing), имеющая второй порядок точности.

Численные методы сравниваются между собой на задачах с распадом разрыва, в том числе и со сверхзвуковыми скоростями. Показано, что модификация TVD заметно уменьшает диссипативные свойства счетной схемы. В результате оба численных метода показывают сравнимую высокую точность на тестовых задачах.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСХОЖДЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В ВОДНОЙ СРЕДЕ

А. С. Хорева, Е. В. Глазунова, И. В. Будникова

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Численное моделирование движения объектов в водной среде является актуальной и при этом достаточно трудной и ресурсоемкой задачей судостроения. При моделировании расхождения дополнительным фактором усложнения задачи является тот факт, что в рассмотрение берется несколько движущихся относительно друг друга объектов (носитель и отделяемый объект от него). При этом очевидно, что носитель до определенного момента времени оказывает влияние на отделяемый от него объект.

В связи с вышесказанным для расчета расхождения объектов морской техники требуется применение целого набора моделей и подходов к моделированию:

- модель твердого тела;
- технология сеток с перекрытием (сетки типа «Химера») для моделирования взаимного движения тел;
- модель турбулентности и пр.

В качестве базового решателя, обеспечивающего возможность использования перечисленных моделей и подходов, используется гидродинамический модуль пакета программ ЛОГОС [1].

В докладе представлены результаты моделирования расхождения объектов морской техники для различных режимов движения носителя. Представлены результаты предварительной верификации характеристик движения простых тел (диск, шар) [2, 3] с применением сеток типа «Химера».

Для расчета совокупности случаев расхождения объектов при различных скоростях и режимах движения носителя в модуле ЛОГОС-Платформа реализована возможность проведения серии параметрических исследований. Результатом параметрических исследований является файл, содержащий время расхождения объектов и их координаты. В дальней-

шем данный файл может использоваться для моделирования сценариев взаимодействия между объектами морской техники при различных условиях их движения.

Список литературы

1. Пакет программ ЛОГОС [Электронный ресурс]. – URL: <http://logos.vniief/products>.
2. Девин С. И. Аэрогидромеханика плохообтекаемых конструкций: Справочник. Л.: Судостроение, 1983. С. 320.
3. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. Перев. с немецкого. М.: Наука», 1974.

ГЕНЕРАЦИЯ И ПРОЕЦИРОВАНИЕ ОБЪЕМНОГО ТЕКСТА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ «ВИРТУАЛЬНЫЙ 3D-ПРИНТЕР»

О. И. Червякова, И. Г. Милешин, В. В. Попов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В рамках проекта «Виртуальный 3D-принтер», реализуемого в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», ведется разработка программного комплекса, позволяющего моделировать физические процессы при изготовлении деталей методами аддитивных технологий, а также создавать и редактировать детали, подготавливать их к производству.

Одним из видов функциональности при создании и редактировании деталей для последующего изготовления является набор инструментов, необходимый для генерации объемных текстов на поверхности деталей с использованием системных шрифтов.

В статье [1] рассмотрены вопросы получения контуров символов, заданных системными шрифтами. В данном докладе описана функциональность, посредством которой из сгенерированных ранее контуров получают спроецированные на поверхность деталей объемные символы. Описывается идея и реализация алгоритмов генерации объемных символов и их проецирования на поверхность деталей. Рассматривается созданный графический пользовательский интерфейс, содержащий данную функциональность.

Список литературы

1. Титов М. А. Реализация в программном комплексе «Виртуальный 3D-принтер» возможности применения векторных шрифтов для аддитивного производства. // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2022. Вып. 3. С. 86–96.

АДАПТАЦИЯ АЛГОРИТМА ВЫЧИСЛЕНИЯ ДИСКРЕТНОЙ КРИВИЗНЫ ПОВЕРХНОСТНОЙ СЕТКИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ПОСТРОЕНИИ ОБЪЕМНОЙ СЕТКИ МЕТОДОМ ОТСЕЧЕНИЯ В ПРЕПРОЦЕССОРЕ ЛОГОС АЭРО - ГИДРО

А. И. Шавхитдинова, М. В. Черенкова

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

На данный момент интенсивно развивается такое направление научной деятельности как моделирование физических процессов для более детального их исследования. Для подобных целей в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» разработан пакет программ ЛОГОС [1]. Одной из составных частей этого пакета является ЛОГОС Аэро-Гидро для решения задач аэрогидродинамики, в котором возможно проводить расчеты физических процессов, построение 3D сеток разными методами, например, построение поверхностных треугольных сеток [2] или неструктурированных расчетных сеток методом отсечения [3].

При генерации поверхностных сеток размер результирующего элемента вычисляется в зависимости от кривизны исходной поверхности. Это позволяет получить качественную аппроксимацию искривленных участков исходной фасеточной модели. Однако в некоторых случаях размер результирующих треугольников на искривленных местах намного больше того, что был вычислен заранее. В итоге при дальнейшем построении объемной сетки методом отсечения размер адаптивной ячейки, соответствующий усредненному весу, вычисленному по размеру результирующего элемента поверхностной сетки, может быть завышен, что может негативно сказаться на моделировании задач аэрогидродинамики.

Для улучшения качества аппроксимации ячейками объемной сетки исходной модели в этап расчета весов был внедрен алгоритм вычисления весов, основанный на анализе кривизны элементов поверхностной сетки и дополнительной адаптации поверхностных элементов.

В докладе описан алгоритм вычисления весов треугольников поверхностной сетки, основанный на вычислении кривизны исходной фасеточной модели, реализованный для генератора методом отсечения. Описаны два разных подхода к вычислению веса треугольника. Приведены приме-

ры распределения значений весов по треугольникам для различных исходных моделей и примеры результирующих объемных сеток, построенных на исходных данных с вычисленными весами.

Список литературы

1. Пакет программ ЛОГОС [Электронный ресурс]: – режим доступа: <http://logos.vniief.ru/products/logos>.
2. Евстифеева Е. О. Перестроение поверхностных треугольных сеток высокой детализации на основе алгоритма упрощения в ЛОГОС Аэро-Гидро. / Международная конференции «Марчуковские научные чтения - 2022» // Сборник тезисов: Ин-т вычислит. математики и матем. геофизики СО РАН, 2022. С. 30–31.
3. Смолкина Д. Н., Борисенко О. Н., Черенкова М. В., Гиниятуллина А. Г., Кузьменко М. В., Чухманов Н. В., Потехина Е. В., Попова Н. В., Турусов М. Р. Автоматический генератор неструктурированных многогранных сеток в препроцессоре пакета программ ЛОГОС // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2018. Вып.2. С. 25–39.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭФФЕКТА ПЛЕНЕНИЯ
РЕЗОНАНСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПРОСТРАНСТВЕННО-
ВРЕМЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАСЕЛЕННОСТИ В ЛАЗЕРНОЙ
СРЕДЕ, АКТИВИРОВАННОЙ ИОНАМИ Yb^{3+} , МЕТОДОМ
КВАДРАТУР ГАУССА**

А. А. Суворов, О. С. Щербачева

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск Калужской обл.

В работе исследуется влияние процесса пленения излучения (по теории Бибермана-Холстейна) на динамику населенности верхнего лазерного уровня в двухуровневой системе. Проводится численный расчет пространственно-временного распределения населенности с использованием квадратурной формулы Гаусса. На первом этапе рассматривается одномерная стационарная задача, имеющая аналитическое решение. Точное решение сравнивается с результатами численных расчетов стационарного уравнения методом квадратур Гаусса для разного числа ординат. Далее исследуется стационарное уравнение для пространственного распределения населенности. В предположении накачки гауссовым пучком уравнение решается методом двенадцатиточечной квадратуры Гаусса. По полученному фурье-образу восстанавливается пространственное распределение населенности. Аналогичный метод используется для решения нестационарной задачи. Полученные результаты применены для анализа процессов, протекающих в жидкой лазерно-активной среде, активированной ионами Yb^{3+} , на которой недавно в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» была получена лазерная генерация.

ЭФФЕКТЫ ЗАТЕНЕНИЯ И РЕАДСОРБЦИИ В КИНЕТИКЕ РОСТА НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ

М. А. Шипуля

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск

Процесс образования и развития ансамбля нитевидных нанокристаллов (ННК) в методе осаждения из газовой фазы возможно условно разделить на три основных этапа: зарождение, образование ансамбля, а также непосредственно рост в ансамбле. Для каждой из указанных фаз развития характерен свой физический механизм, определяющий основной вклад в изменение средней скорости роста ансамбля. В частности, возможно выделить вклады в изменение скорости роста ННК от атомов следующих сортов: диффундирующих по подложке ансамбля; попавших на боковую поверхность отдельно стоящих ННК и от атомов, оторвавшихся от боковой поверхности таких ННК в результате десорбции. Первый из указанных вкладов является основным во время зарождения ансамбля. По мере увеличения высоты ННК увеличивается также и площадь его боковой поверхности, поэтому, на втором этапе формирования ансамбля ведущую роль начинает играть вклад от атомов второго типа. При превышении высоты ННК длины свободного пробега атомов по боковой поверхности ННК, начинает сказываться влияние вклада от атомов третьего типа.

Указанные выше механизмы изменения скорости роста ННК носят явно случайный характер. Соответственно, для описания физических процессов, связанных с данными механизмами, целесообразно применять методы имитационного моделирования. В частности, при исследовании кинетики роста нитевидных нанокристаллов во время процесса осаждения ростового вещества из газовой фазы, применение численных методов имитационного моделирования возможно формализовать в виде использования алгоритма Монте-Карло для фиксации начальных условий, определяющих геометрию и термодинамические свойства рассматриваемой системы, совместно с применением алгоритмов теории клеточных автоматов, описывающих, в свою очередь, кинематику ростового вещества в рассматриваемой системе. Такой подход позволяет учитывать эффекты, связанные с наличием в системе случайных процессов, подчиняющихся строгим физическим закономерностям.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОБМЕНА ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО СВИНЦОВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В РЕГУЛЯРНОЙ ЯЧЕЙКЕ ТВС С ПРИМЕНЕНИЕМ ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩИХ МЕТОДИК

Д. В. Ширяев

НИУ «МЭИ», Москва

В настоящее время одним из перспективных направлений мировой ядерной энергетики является создание реактора IV-го поколения на быстрых нейтронах со свинцовым жидкометаллическим теплоносителем. БР-1200 эволюционно продолжает концепцию БРЕСТ-ОД-300 и является первым проектом коммерческого реактора большой мощности со свинцовым теплоносителем.

Сегодня расчеты реакторного оборудования базируются на CFD-моделировании, в котором в основном используется метод RANS, хорошо согласующийся с эмпирическими формулами лишь по интегральным характеристикам. Это обусловлено тем, что вихреразрешающие методики требуют больших временных затрат и вычислительных ресурсов. Поэтому моделирование крупных вихрей LES необходимо для проверки RANS моделей в отсутствии экспериментальных данных, особенно в области отрывных течений.

В работе представлены результаты численного анализа течения свинцового теплоносителя в области расположения дистанционирующей решетки сотового типа регулярной ячейки тепловыделяющей сборки БР-1200 с применением метода LES в CFD-коде STAR-CCM+. Расчетная область состоит из 162 миллионов ячеек; число Рейнольдса составляет порядка 149 тысяч, на внутренней поверхности оболочек твэлов задается тепловой поток $1,5 \text{ МВт/м}^2$, что соответствует режимным параметрам энергетической коммерческой установки БР-1200.

В результате моделирования получены пульсации интегральных параметров по теплоотдаче и гидродинамике, определены локальные характеристики в месте расположения дистанционирующей решетки. Вычисле-

ны составляющие турбулентности, отвечающие за ее генерацию и диссипацию, построены энергетические спектры турбулентных пульсаций компонент скорости и температуры, демонстрирующие наклон инерционного интервала спектра близкий к колмогоровскому закону $-5/3$, что свидетельствует о полном разрешении крупных вихрей и реализации каскадного переноса энергии турбулентности.

ПОЛУЧЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ О ПЕРЕНОСЕ НЕМОНОХРОМАТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ПАРЫ АТОМОВ КАЛИЯ С ЦЕЛЬЮ АПРОБАЦИИ РАСЧЕТНЫХ ПРОГРАММ

В. М. Ямщиков

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В работе рассматривается процесс переноса направленного немонохроматического излучения в среде, состоящей из атомов калия [1–2]. Учитываются процессы нелинейного поглощения и вынужденного испускания излучения, спонтанные переходы атомов, зависимость длины свободного пробега фотона от координаты, в которой он находится, и спектральная зависимость коэффициентов поглощения и переизлучения.

Для теоретического изучения распространения излучения в резонансно поглощающей среде, состоящей из атомов щелочных металлов, обычно используются уравнения кинетики населенностей и уравнения переноса излучения. В общем случае система этих уравнений является нелинейной. Для нахождения решения подобных задач обычно создаются расчетные программы, которые необходимо тестировать с помощью аналитических тестов и/или натурального эксперимента [3–5].

Список литературы

1. Binglin Shen, Bailiang Pan, Jing Yang, Aiqing Qian, Jian Jiao // Appl. Phys. B. 2014.
2. Gordon D. Hager, Glen P. Perram // Appl. Phys. B. 2013.
3. Ямщиков В. М., Рогачев В. Г., Кудряшов Е. А., Качалин Г. Н. // Оптика и спектроскопия. 2020. Том 128. № 8. С. 1160.
4. Завьялов В. В., Козманов М. Ю., Селезнев В. Н., Черняков В. Е., Шестаков А. А. // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2005. Вып. 3. С. 26–36.
5. Галанин М. П., Лукин В. В., Четкин В. М. // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2010. № 59. С. 30.

СРАВНЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО И ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА РОСТА ГАЗОВОГО ПУЗЫРЯ

М. А. Ямщикова, В. М. Ямщиков

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Из повседневного опыта известно, что пузырьки могут образовываться в объеме жидкости или на поверхности стенок резервуара, однако механизм их роста предполагается одинаковым, независимо от места образования. Динамика роста пузырька описывается системой уравнений диффузии в движущейся среде и уравнениями движения. В общем случае такая система может решаться только численными методами. Также на примере газированных напитков (в воде растворен газ CO_2) можно заметить, что пузырьки в основном образуются после открытия бутылки. При открытии достаточно быстро происходит перепад давления. Этот процесс быстрый, но не мгновенный. Поэтому важной задачей является определение характерного времени этого процесса и поиск зависимости изменения давления в бутылки от времени [1]. Данная зависимость необходима для решения уравнений движения.

В работе приведены аналитические результаты автомодельного решения задачи о росте газового пузыря в воде и результаты численного моделирования сферически симметричной связанной задачи диффузии и гидродинамики. Получены расчетные зависимости размера пузырька в зависимости от времени, а также распределение концентрации от расстояния до его центра.

Список литературы

1. Тарасов В. В. Расчет времени истечения идеального газа из резервуара постоянного объема в среду с постоянным давлением при адиабатическом процессе // Вестник Тюменского государственного университета. Физ. – мат. Моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2016. Т. 2, № 2. С. 84–95.