Федеральное агентство научных организаций

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КРАСНОЯРСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

Институт вычислительного моделирования СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН

ГРНТИ 27.41.19

УТВЕРЖДАЮ Директор ФИЦ КНЦ СО РАН

№ (ЦИТИС) АААА-А18-118011890024-5

ИНВ № 0725/2017

_____Волков Н.В. ______20___ г.

ОТЧЕТ

О ВЫПОЛНЕНИИ ПРОЕКТА

<u>«РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ</u> СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ В БЛИЖНЕМ

KOCMOCE»

(промежуточный)

Номер проекта в ИСГЗ 0356-2016-0725

Приоритетное направление: Транспортные и космические системы

Программа ФНИ (номер и наименование): <u>IV.36 Системы автоматизации, CALS-</u> технологии, математические модели и методы исследования сложных управляющих систем и процессов

Протокол Ученого совета _____

№_____ от «__» _____ 201__ г.

Руководитель проекта член-корреспондент РАН

_____В.В. Шайдуров "____" _____2017 г.

Красноярск, 2017

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы		
член-корреспондент РАН		В.В. Шайдуров
Исполнители:	(подпись,дата)	
зав. отд., д.фм.н.		
	(подпись,дата)	Н.В. Еркаев
г.н.с., д.т.н.		Г.Г. Крушенко
в.н.с., д.фм.н.	(подпись,дата)	
	(подпись,дата)	А.П. Гаврилюк
в.н.с., д.фм.н.		В.В. Денисенко
в.н.с., д.фм.н.	(подпись,дата)	
	(подпись,дата)	И.В. Краснов
в.н.с., д.фм.н.	(И.И. Рыжков
уч. секр., к.фм.н.	(поопись,оата)	
	(подпись,дата)	А.В. Вяткин
с.н.с., к.фм.н.	(nodnuch dama)	Е.Н. Васильев
с.н.с., к.фм.н.	(noonneo,ounna)	
ana na na	(подпись,дата)	В.А. Деревянко
с.н.с., к.фм.н.	(подпись,дата)	Г.И. Щепановская
н.с., к.фм.н.		ПВ Гилева
нскф-мн	(подпись,дата)	JI.D. I HJIODU
	(подпись,дата)	А.Е. Ершов
н.с., к.фм.н.		И.Л. Исаев
н.с., к.фм.н.	(подпись,дата)	
	(подпись,дата)	Л.П. Каменщиков
м.н.с., к.фм.н.		В.В. Деревянко
м.н.с.	(поопись, дата)	
	(подпись,дата)	М.В. Якубович

ведущий инженер		A D Marana
	(подпись,дата)	A.D. Makyxa
старший инженер		CD K
	(подпись,дата)	С.В. Кукушкин
старший инженер		
	(подпись,дата)	И.В. Тимошина
инженер		
	(подпись,дата)	Д.П. Емельянов
инженер		
	(подпись,дата)	С.В. Козлова
инженер		A A IC
	(подпись,дата)	А.А. Корнеева
инженер		
	(подпись,дата)	В.С. Корниенко
инженер		
	(подпись,дата)	Р.П. Магденко
инженер		л л П У
	(подпись,дата)	А.А. Пустынскии
нормоконтролер		
	(подпись,дата)	А.В. Вяткин

ΡΕΦΕΡΑΤ

Отчёт 26 с., 13 рис., 2 прил.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ, МАГНИТОСФЕРА ЗЕМЛИ, УРАВНЕНИЯ НАВЬЕ-СТОКСА ТЕПЛОПРОВОДНОГО ГАЗА, УЛЬТРАХОЛОДНАЯ ПЛАЗМА

Объектом исследования являются сложные динамические процессы в физических средах, включая ближний космос, и работу космических аппаратов в такой среде.

Цель работы – создание и использование новых информационно-математических моделей сложных динамических процессов в физических средах.

Проведена настройка и оптимизация пакета программ для вычислительного моделирования тепловых режимов функциональных узлов и модулей энергопреобразующего комплекса космического аппарата, разработанных с применением плат из низкотемпературной керамики. Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными показало хорошее соответствие, позволяющее оценивать значения температур источников тепла и их мощности при наступлении осушения фитиля, прогнозировать влияние характеристик пористой структуры на работу платы для оптимизации конструкции.

Создана математическая модель магнитосферы Земли на основе решения уравнения Грэда-Шафранова. Использованы многосеточный и каскадный методы численного решения задачи. Создана модель ионосферных электрических полей и токов, обусловленных токами из магнитосферы.

Модифицирована математическая модель нестационарного сверхзвукового обтекания пространственного тела вязким теплопроводным газом. Уравнения Навье-Стокса записаны с субстанциональной производной для постановки задачи в гильбертовых пространствах искомых функций. Предложены новые краевые условия на границе расчётной области и исследовано их влияние. Численные методы реализованы с учетом опыта разработки технологической цепочки алгоритмов для решения двумерных задач Навье-Стокса. В итоге создан комплекс алгоритмов для решения трехмерных нестационарных уравнений Навье-Стокса вязкого теплопроводного газа с выполнением законов сохранения массы и полной энергии на основе конформного метода конечных элементов.

Исследованы особенности поглощения слабого резонансного излучения в расширяющихся средах, имеющих градиенты скоростей. Такие ситуации возникают в астрофизике, в лабораторных условиях при исследовании рентгеновских и ультрафиолетовых лазеров и получении ультрахолодной лазерной плазмы. Проведен

расчет спектральных характеристик поглощения внешнего резонансного лазерного излучения (оптическая толщина, форма и ширина спектральной линии) в расширяющейся ультрахолодной плазме в отсутствие насыщения поглощения.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ7
1 Настройка и оптимизация пакета программ для вычислительного моделирования тепловых
режимов функциональных узлов и модулей энергопреобразующего комплекса космического
аппарата, разработанных с применением плат из низкотемпературной керамики
2 Создание математической модели магнитосферы Земли с использованием многосеточного
вариационно-разностного метода численного решения задачи Грэда-Шафранова с
произвольно заданным заполнением магнитных силовых трубок плазмой. Создание модели
ионосферных электрических полей и токов, обусловленных токами из магнитосферы13
З Разработка и реализация технологической цепочки алгоритмов и их оптимизация на
современных компьютерных архитектурах для решения трехмерных нестационарных
уравнений Навье-Стокса вязкого теплопроводного газа с высокой точностью17
4 Математическое моделирование поглощения лазерного излучения в ультрахолодной
расширяющейся плазме с целью исследования ее характеристик и предсказания явления
динамического просветления
ЗАКЛЮЧЕНИЕ
ПРИЛОЖЕНИЕ А
ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с планом работ исследования проводились по следующим темам.

- Настройка и оптимизация пакета программ для вычислительного моделирования тепловых режимов функциональных узлов и модулей энергопреобразующего комплекса космического аппарата, разработанных с применением плат из низкотемпературной керамики.
- 2. Создание математической модели магнитосферы Земли с использованием многосеточного вариационно-разностного метода численного решения задачи Грэда-Шафранова с произвольно заданным заполнением магнитных силовых трубок плазмой. Создание модели ионосферных электрических полей и токов, обусловленных токами из магнитосферы.
- Разработка и реализация технологической цепочки алгоритмов и их оптимизация на современных компьютерных архитектурах для решения трехмерных нестационарных уравнений Навье-Стокса вязкого теплопроводного газа с высокой точностью.
- Математическое моделирование поглощения лазерного излучения в ультрахолодной расширяющейся плазме с целью исследования ее характеристик и предсказания явления динамического просветления.

Настоящий отчет представляет результаты по теме "Разработка информационновычислительных моделей сложных динамических систем и процессов в ближнем космосе". 1 Настройка и оптимизация пакета программ для вычислительного моделирования тепловых режимов функциональных узлов и модулей энергопреобразующего комплекса космического аппарата, разработанных с применением плат из низкотемпературной керамики.

В Институте вычислительного моделирования ведутся работы по созданию технологии электронных плат из низкотемпературной керамики (Low Temperature Co-fired Ceramic – LTCC) со встроенной гипертеплопроводящей (ГТП) структурой для эффективного отвода тепла от радиоэлементов с высокой плотностью мощности тепловыделения. Керамические платы предполагается использовать в узлах энергопреобразующих комплексов космических аппаратов, создаваемых в АО «"Информационные спутниковые системы" имени академика М. Ф. Решетнёва».

Для расчета тепловых режимов работы керамических плат со встроенной ГТП структурой разработана вычислительная модель и созданы программы, реализующие численные алгоритмы. Модель обеспечивает проведение расчетов с двухфазным теплообменом внутри ГТП структуры. Созданные вычислительные средства рассчитывают распределение температуры внутри платы, включая ГТП структуру, а также перепады температур в областях тепловых контактов источника тепла и стока тепла с керамической платой.

Созданная вычислительная модель описывает сложные физические явления, связанные с двухфазным теплообменом. Для ее использования определены значения целого ряда параметров: теплофизические характеристики материалов, тепловые сопротивления, характеристики гидравлической проницаемости ГТП структуры для теплоносителя и другие. Кроме того, проведена настройка и оптимизация созданных программ.

Для моделирования были использованы характеристики образца керамической платы со встроенной ГТП структурой. Образец представлял собой керамическую плату размером 50 × 50 мм, которая конструктивно объединена с плоской тепловой трубой (рис. 1). К нижней металлизированной поверхности керамической платы припаивается пористая структура, которая представляет собой ленту толщиной 1 мм из спеченного медного порошка. Внутри пористой ленты предусмотрены каналы для движения пара. Лента накрывается крышкой, которая по периметру с керамической платой обеспечивает герметичный контакт. Крышка является корпусом тепловой трубы, изготавливается из ковара, имеющего близкое значение коэффициента температурного расширения с керамикой. С боковой стороны образца в крышке устанавливается трубка для заправки теплоносителем получившейся плоской тепловой трубы.



Рисунок 1 – Схема образца керамической платы: а) внешний вид, б) внутренняя структура

На верхней поверхности платы предусмотрено четыре посадочных места для установки охлаждаемых тепловыделяющих элементов. Два посадочных места представляют собой отверстия в керамической плате для установки нагревателей непосредственно на стенку пористой ленты (лента на поверхности имеет тонкую медную стенку). В области остальных двух посадочных мест в керамической плате встраиваются теплопроводящие столбики из серебра, обеспечивающие перенос тепла от тепловыделяющего элемента к пористой структуре сквозь керамику. Фотография образца керамической платы (без установленных нагревателей) показана на рис. 2.



Рисунок 2 – Фотография образца керамической платы со встроенной тепловой трубой

Для настройки вычислительной модели и сравнения расчетов с результатами моделирования были использованы экспериментальные данные с источниками тепла в виде мощных резисторов прямоугольной формы размером 5.8 × 8.8 мм. Четыре резистора были припаяны на посадочные места до заправки образца теплоносителем. Тепло от источников тепла с высокой плотностью мощности передается к плоской тепловой трубе, распределяется на всю площадь образца и отводится от нижней поверхности.

Значения параметров, используемых для вычислительного моделирования, показаны в следующей таблице.

Таблица 1. Параметры модели

Параметр модели	Значение
Размер керамической платы, мм	50×50
Толщина керамики, <i>d</i> _{LTCC} (мм)	1
Теплопроводность керамики, k_{LTCC} (Вт/(м·К))	4
Толщина слоёв припоя, <i>d</i> _{Sn} (мм)	0.2
Теплопроводность припоя, k _{Sn} (Вт/(м·К))	60
Толщина коваровой крышки, <i>d</i> _{COV} (мм)	0.5
Теплопроводность коваровой крышки, k _{COV} (Вт/(м·К))	19
Теплоноситель для ГТП структуры	ацетон
Коэффициент проницаемости пористой ленты для паровой фазы, K_v (м ²)	$1.7 \cdot 10^{-8}$
Коэффициент проницаемости пористой ленты для жидкой фазы, <i>K</i> _l (м ²)	$1.5 \cdot 10^{-12}$
Эффективная теплопроводность пористой структуры (слой фитиля в пористой ленте), k_{wick} (Вт/(м·К))	9
Эффективная продольная теплопроводность пористой ленты (скелетная, с учетом сплошных стенок ленты), k_{hp} (Вт/(м·К))	81
Минимальный угол смачивания пористой структуры, θ (градус)	10
Суммарное удельное тепловое сопротивление между холодильником и паром в ГТП, r_c (К·м ² /Вт)	$1.7 \cdot 10^{-4}$
Удельное тепловое сопротивление между паром и нижней поверхностью пористой ленты, r_{wick} (К·м ² /Вт)	3.7.10-5
Удельного теплового сопротивления между ГТП и верхней поверхностью платы (с учетом слоя керамики), <i>r_{cb}</i> (К·м ² /Вт)	2.89.10-4
Тепловое сопротивление припоя (под источником тепла), <i>R_p</i> (К/Вт)	0.07
Тепловое сопротивление слоя керамики со столбиками (под источниками тепла, устанавливаемыми на теплопроводящие столбики), <i>R</i> _{st} (К/Вт)	1.0
Тепловое сопротивление корпуса источника тепла, <i>R_{CASE}</i> (K/Bт)	1.0
Тепловое сопротивление пористого слоя (между поверхностью пористой ленты и паром в канале), <i>R_{wick}</i> (К/Вт)	0.45

Пример сравнения расчетных и экспериментальных данных для керамической платы со встроенной ГТП структурой показан на рис. З. Приведены графики температур поверхностей нагревателей № 1 и № 3 (Т1 и Т3 соответственно) в зависимости от мощности нагревателя № 1. Керамическая плата установлена на теплоотводящее основание с температурой +20 °C. Значение температуры нагревателя № 1 возрастает с ростом мощности почти линейно до значения 13-14 Вт. Тепловое сопротивление между верхней частью корпуса нагревателя (верхняя поверхность резистора) и холодильником составляет 1.8 °C/Вт. Оно складывается из теплового сопротивления корпуса резистора 1.0 °C/Вт и теплового

сопротивления между посадочным местом и холодильником 0.8 °С/Вт. По значению температуры нагревателя № 3 можно оценить тепловое сопротивление между паром и холодильником, равное 0.1 °С/Вт. Оно означает, что основной перепад температуры возникает на корпусе самого нагревателя, а также между посадочным местом нагревателя и паров в пористой ленте.

При увеличении мощности нагревателя до 14-15 Вт скорость роста перепада температур возрастает в связи с осушением фитиля под нагревателем № 1. При наступлении осушения тепловое сопротивление между нагревателем № 1 и холодильником увеличивается до 2.4-2.6 °C/Вт. Для нагревателя № 3 тепловое сопротивление не возрастает, поскольку область осушения фитиля его не достигает, и пористая структура под ним остается смоченной для рассматриваемого диапазона мощностей. Более того, температура нагревателя № 3 после начала осушения под нагревателем № 1 почти не возрастает. Повидимому, добавляющаяся мощность начинает отводиться от нагревателя № 1 непосредственно через осушенный фитиль в холодильник, не увеличивая температуру пара.

Пятно осушения можно видеть по результатам моделирования движения теплоносителя в пористой ленте. На рис. 4 показаны поля скоростей жидкости в фитиле для разных значений мощности нагревателя №1. При мощности 11 Вт осушения не наблюдается. При мощности 15 Вт видно, что пятно осушения превышает площадь источника тепла. При мощности 40 Вт пятно осушения значительно больше (четверть платы), но не достигает остальных источников тепла.

Итак, в ходе работы проведена настройка и оптимизация пакета программ для вычислительного моделирования тепловых режимов функциональных узлов и модулей энергопреобразующего комплекса космического аппарата, разработанных с применением плат из низкотемпературной керамики. Определены параметры тепловой модели, обеспечивающей проведение тепловых расчетов керамических плат из низкотемпературной керамики со встроенными ГТП структурами.

На основе модели проведена серия расчетов. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными показало хорошее соответствие. Результаты расчетов демонстрируют возможность оценки температур источников тепла и мощности, при которых наступает осушение фитиля. Модель позволяет учитывать особенности работы встроенной тепловой трубы, прогнозировать влияние характеристики пористой структуры на работу платы. Это дает возможность оптимизировать конструкцию. На основе расчетов будут выработаны рекомендации для создания макетов керамических плат с функциональными узлами для испытаний.



Рисунок 3 – Измеренные и расчетные температуры нагревателей № 1 и № 3; нагревается только № 1; холодильник смонтирован по всей площади платы



Рисунок 4 – Капиллярная нагрузка в виде градаций серого цвета (показана шкала в %); поле скоростей жидкости в фитиле и области осушения (красным цветом) для разных значений мощности нагревателя № 1; холодильник смонтирован по всей площади платы

2 Создание математической модели магнитосферы Земли с использованием многосеточного вариационно-разностного метода численного решения задачи Грэда-Шафранова с произвольно заданным заполнением магнитных силовых трубок плазмой. Создание модели ионосферных электрических полей и токов, обусловленных токами из магнитосферы

1. Математическая модель магнитосферы Земли, основанная на численном решении уравнения Грэда-Шафранова.

Уравнение Грэда-Шафранова описывает равновесное состояние плазмы и магнитного поля в двумерном случае. Рассмотрена замкнутая модель магнитосферы Земли, в рамках которой геомагнитное поле не проникает за заданную границу. Это условие означает единое заданное значение функции тока на всей границе.

В частном случае, когда предполагается отсутствие плазмы в магнитосфере, уравнение Грэда-Шафранова существенно упрощается и становится уравнением Лапласа. Использован многосеточный вариационно-разностный метод численного решения. Численное решение соответствующей задачи Дирихле показано на рис. 5. Построены магнитные силовые линии, начинающиеся в высокоширотной ионосфере. Между соседними линиями поток одинаковый.

В общем случае уравнение Грэда-Шафранова нелинейно. Поэтому существенно построение хорошего начального приближения. Это делается в рамках каскадного алгоритма, то есть сначала задача решается на крупной сетке, полученное решение интерполируется на более мелкую сетку и используется в качестве начального приближения на этой сетке. Одновременно с измельчением сетки увеличивается параметр в уравнении Грэда-Шафранова, задающий максимальную концентрацию плазмы, поскольку рост концентрации приводит к уменьшению пространственного масштаба особенностей решения.



Рисунок 5 – Двумерная модель пустой магнитосферы. Показаны магнитные силовые линии, начинающиеся в высокоширотной ионосфере

Одно из построенных решений показано на рис. 6. Его принципиальное отличие от представленной на рис. 5 пустой магнитосферы заключается в вытягивании геомагнитного поля в хвост магнитосферы, которое сопровождается образованием токового слоя. Во многих моделях магнитосферы плотность такого тока задается на основе измерений магнитного поля, а в построенной модели он получается автоматически.





Токовый слой, построенный в разработанной самосогласованной модели Грэда-Шафранова, разделяет антипараллельные магнитные поля в хвосте магнитосферы. В такой конфигурации возможно развитие локальных плазменных неустойчивостей, приводящих к формированию областей нестационарного пересоединения магнитных полей. В этой связи выполнено моделирование развития пересоединения магнитных полей на основе численного решения нестационарных магнитогидродинамических уравнений с учетом конечной электропроводности плазмы. Показано, что импульсное пересоединение магнитных полей в токовом слое магнитосферного хвоста приводит к интересному эффекту – формированию области ускоренного потока плазмы с конфигурацией типа «клешни краба», показанной на рис. 7.

Разработанная модель магнитосферы может применяться для описания магнитной конфигурации не только в околоземном космическом пространстве, но и для других планет, обладающих собственным магнитным полем. Помимо планет солнечной системы в настоящее время активно изучаются сравнительно недавно открытые планеты, вращающиеся вокруг других звезд. Многие их этих планет имеют собственное магнитное поле. В целом, магнитосферы представляют собой крупномасштабные объекты, обтекаемые

солнечным/звездным ветром. Характер этого обтекания существенно зависит от величины и направления межпланетного магнитного поля в набегающем потоке. Относительно хорошо изучен случай обтекания магнитосферы Земли, когда скорость ветра существенно превышает скорость распространения магнитозвуковых возмущений. При этом возникает головная ударная волна. Гораздо менее изучен интересный случай обтекания экзопланет в условиях достаточно сильного межпланетного магнитного поля, при котором ударная волна отсутствует. В этой связи выполнено численное моделирование магнитогидродинамического дозвукового обтекания магнитосферы. В этом случае учитывалось проникновение нейтральных атмосферных атомов в солнечный ветер, где они ионизовались и уносились вместе с потоком ветра.



Рисунок 7 – Результат расчета поля скоростей типа «клешни краба» в токовом слое в результате импульсного пересоединения магнитных полей

Полученное в результате расчета распределение интенсивности межпланетного магнитного поля показано на рис. 8. Красным цветом выделена довольно значительная область усиленного межпланетного магнитного поля, которое имеет максимальную интенсивность в лобовой точке обтекания. При этом модули межпланетного и магнитосферного полей могут сравняться по величине в лобовой точке магнитосферы.



Рисунок 8 – Распределение интенсивности магнитного поля в области обтекания

2. Модель ионосферных электрических полей и токов, обусловленных токами из магнитосферы.

При проникновении электрических полей и токов из атмосферы в ионосферу значительная часть токов уходит в магнитосферу вдоль магнитных силовых линий из-за высокой продольной проводимости магнитосферной плазмы. Эти токи замыкаются в сопряженной ионосфере, в которой их можно рассматривать как заданные токи из магнитосферы. Для построения пространственных распределений ионосферных электрических полей и токов приходится решать задачу электропроводности при заданных (в соответствии с эмпирическими моделями) распределениях компонент тензора проводимости. Нетривиальность задачи определяется изменением значений этих компонент на 15 порядков в области решения задачи.

Одно из построенных решений показано на рис. 9. Рассмотрен участок среднеширотной ионосферы с наклоном геомагнитного поля 30°. Плотность тока из магнитосферы задана по гармоническому закону с периодом 400 км и максимумом 0.75 пА/м ². При этом линейная плотность тока около 20 мкА/м. В ионосфере напряженность электрического поля достигает 1 мкВ/м, а разность потенциалов – 0.25 В. Эти поля существенно меньше обычно наблюдаемых в среднеширотной ионосфере, и поэтому их практически невозможно измерить.



Рисунок 9 – Распределение электрических полей и токов в ионосфере и атмосфере, обусловленных током из магнитосферы. Сплошные линии – линии тока с интервалом, равным 1/20 полного тока. Штриховые линии – эквипотенциали с интервалом 40 мВ

В силу линейности задачи решениям можно придать другой масштаб, умножая все параметры на общую константу. В частности, для авроральной ионосферы характерны токи с плотностью, большей на 5 порядков. Соответственно, напряженность электрического поля может достигать 0.1 В/м. Построенная модель показывает пространственное распределение этого поля, определяющего движение среды.

Результаты представлены на трех всероссийских конференциях.

3 Разработка и реализация технологической цепочки алгоритмов и их оптимизация на современных компьютерных архитектурах для решения трехмерных нестационарных уравнений Навье-Стокса вязкого теплопроводного газа с высокой точностью

Модифицирована математическая модель нестационарного сверхзвукового обтекания пространственного тела вязким теплопроводным газом. Уравнения Навье-Стокса записаны в форме с субстанциональными производными, приводящими к поиску неизвестных функций в гильбертовых пространствах. Численное моделирование трехмерных задач реализовано по аналогии с разработанной ранее технологической цепочкой алгоритмов для решения с высокой точностью аналогичных двумерных задач Навье-Стокса на основе конформного метода конечных элементов. Предложены новые краевые условия на границе расчётной области в методе конечных элементов, выведенные по аналогии с известными краевыми условиями «do nothing» для вязкой несжимаемой жидкости, и исследовано их влияние.

В качестве примера приведем сравнение решений уравнения Навье-Стокса для обтекания клина с числом Маха M = 4 и числом Рейнольдса Re = 2×10³ для краевых

условий Неймана и "do nothing" на границе расчетной области. На рис. 10 приведены расчёты для продольной составляющей скорости: слева с условиями Неймана, а справа – с условиями "do nothing". Из рисунка видно, что при решении задачи с условиями Неймана на границе расчётной области у приближенного решения присутствуют возвратные течения (отрицательные значения скорости). А при решении задачи с условиями "do nothing" поток проходит через границу расчётной области без отражения.



Рисунок 10 – Распределение продольной составляющей скорости

Известно, что при сверхзвуковом обтекании оптимальные конфигурации имеют поверхность, приближающуюся к конической и состоящую из треугольников и двугранных углов. Составлен программный комплекс реализации вычислительного эксперимента на современных компьютерных архитектурах для исследования сверхзвукового течения в прямом двугранном угле. Для M = 4 и $Re = 2 \times 10^3$ на рисунках 11-12 представлены результаты численного моделирования течения вязкого теплопроводного газа в двугранном угле, образованном плоскостями *xy* и *xz*. Вектор скорости набегающего потока направлен вдоль оси *x*.



Рисунок 11 – Распределение компоненты скорости и

На Рис. 11 представлены результаты расчетов в окрестности ребра двугранного угла. Вдоль оси *х* наблюдается увеличение области с возвратным течением.



Рисунок 12 – Распределение компоненты скорости и в различных сечениях

На Рис. 12 компонента скорости u нанесена в сечениях x = 2.5 и x = 3.0 двугранного угла в плоскости y_z и демонстрирует нарастание возвратного течения вдоль оси x.

4 Математическое моделирование поглощения лазерного излучения в ультрахолодной расширяющейся плазме с целью исследования ее характеристик и предсказания явления динамического просветления

Исследованы особенности поглощения слабого резонансного излучения в расширяющихся средах, имеющих градиенты скоростей. Такие ситуации возникают в астрофизике, В лабораторных условиях при исследовании рентгеновских и ультрафиолетовых лазеров и получении ультрахолодной лазерной плазмы. Проведен расчет спектральных характеристик поглощения внешнего резонансного лазерного излучения (оптическая толщина, форма и ширина спектральной линии) в расширяющейся ультрахолодной плазме в отсутствие насыщения поглощения. На рис. 13 приведена зависимость интегральной по сфере оптической толщины $au_0^i(t)$, определенной с учетом формирования радиальных скоростей ионов.



Рисунок 13 – Зависимость интегральной оптической толщины $\tau_0^i(t)$ с учетом радиальных скоростей. На вставке эта величина приведена для $t \le 0.2$ мкс

Из рисунка видно, что на начальном этапе (см. вставку) оптическая толщина среды τ_0^i уменьшается за счет корреляционного нагрева ионов, а в последующем уменьшение τ_0^i обусловлено формированием радиальных скоростей ионов. Радиальные скорости ионов приводят к смещению частоты поглощения излучения из-за эффекта Допплера и увеличивают ширину линии поглощения, соответственно уменьшая оптическую толщину сферы τ_0^i . Выполненный анализ экспериментальных данных из работы [Killian T.C., Pattard T., Pohl T., Rost J.M. *Physics Reports*. **449**, 77-130 (2007)] подтверждает этот вывод.

Полученные результаты показывают, что оптически плотные расширяющиеся среды становятся прозрачными для резонансного излучения, когда отношение радиальной скорости разлета частиц на границе сферы к тепловой скорости становится больше начальной оптической толщины среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В течение отчетного периода выполнен полный цикл исследований, запланированных по данному проекту. В ходе его выполнения получены результаты, приоритет которых подтверждается рейтинговыми публикациями в ведущих Российских и зарубежных научных журналах, сравнениями с патентными данными.

Для вычислительного моделирования тепловых режимов функциональных узлов и модулей энергопреобразующего комплекса космического аппарата, разработанных с применением плат из низкотемпературной керамики со встроенными ГТП структурами, проведена настройка и оптимизация пакета программ, определены параметры тепловой расчетов. Сравнение результатов модели, проведена серия моделирования с экспериментальными данными показало хорошее соответствие, позволяющее оценивать температуры источников тепла и мощности, при которых будет наступать осушение фитиля. особенности работы Модель позволяет учитывать встроенной тепловой трубы, прогнозировать влияние характеристик пористой структуры работу платы, на оптимизировать конструкцию. На основе расчетов будут выработаны рекомендации для создания макетов керамических плат с функциональными узлами для испытаний.

Создана математическая модель магнитосферы Земли на основе решения уравнения Грэда-Шафранова. Использованы многосеточный и каскадный методы численного решения задачи. Выполнено моделирование развития пересоединения магнитных полей на основе численного решения нестационарных магнитогидродинамических уравнений с учетом конечной электропроводности плазмы. Показано, что импульсное пересоединение магнитных полей в токовом слое магнитосферного хвоста приводит к интересному эффекту – формированию области ускоренного потока плазмы с конфигурацией типа «клешни краба». Разработанная модель магнитосферы может применяться для описания магнитной конфигурации не только в околоземном космическом пространстве, но и для других планет, обладающих собственным магнитным полем. Создана модель ионосферных электрических полей и токов, обусловленных токами из магнитосферы.

Модифицирована математическая модель нестационарного сверхзвукового обтекания пространственного тела вязким теплопроводным газом. Уравнения Навье-Стокса записаны в форме с субстанциональными производными, приводящими к поиску неизвестных функций в гильбертовых пространствах. Предложены новые краевые условия на границе расчётной области, выведенные по аналогии с известными краевыми условиями «do nothing» для вязкой несжимаемой жидкости, и исследовано их влияние. Численное моделирование трехмерных задач реализовано с учетом опыта разработки технологической цепочкой

алгоритмов для решения двумерных задач Навье-Стокса на основе конформного метода конечных элементов.

поглощения Исследованы особенности слабого резонансного излучения в расширяющихся средах, имеющих градиенты скоростей. Такие ситуации возникают в астрофизике, В лабораторных условиях при исследовании рентгеновских и ультрафиолетовых лазеров и получении ультрахолодной лазерной плазмы. Проведен расчет спектральных характеристик поглощения внешнего резонансного лазерного излучения (оптическая толщина, форма и ширина спектральной линии) в расширяющейся ультрахолодной плазме в отсутствие насыщения поглощения. Полученные результаты показывают, что оптически плотные расширяющиеся среды становятся прозрачными для резонансного излучения, когда отношение радиальной скорости разлета частиц на границе сферы к тепловой скорости становится больше начальной оптической толщины среды

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Научные публикации в журналах, индексируемых в российских и международных информационно-аналитических системах научного цитирования

- Gerasimov V.S., Ershov A.E., Karpov S.V., Gavrilyuk A.P., Zakomirnyi V.I., Rasskazov I.L., Ågren H., Polyutov S.P. Thermal effects in systems of colloidal plasmonic nanoparticles in highintensity pulsed laser fields [Invited] // Optical Materials Express. – V. 7 (2). – P. 555-568. DOI: 10.1364/OME.7.000555.
- 2. Vasil'ev E.N. Calculation and optimization of thermoelectric cooling modes of thermally loaded elements // Technical Physics. V. 62 (1). P. 90-96. DOI: 10.1134/S1063784217010248
- Gerasimov V.S., Ershov A.E., Karpov S.V., Gavrilyuk A.P., Zakomirnyi V.I., Rasskazov I.L., Ågren H., Polyutov S.P. Thermal effects in systems of colloidal plasmonic nanoparticles in highintensity pulsed laser fields [Invited]: Publisher's note // Optical Materials Express. – V. 7 (3). – P. 799-799. DOI: 10.1364/OME.7.000799
- Cubillos P., Erkaev N.V., Juvan I., Fossat, L., Johnstone C.P., Lammer H. Lendl M., Odert P., Kislyakova K.G. An overabundance of low-density Neptune-like planets // Mon. Not. Roy. Astron. Soc.: Oxford univ press, 2017. – Vol. 466 Is. 2. – P. 1868-1879. DOI: 10.1093/mnras/stw3103
- Fossati L., Erkaev N.V., Lammer H., Cubillos P.E., Odert P., Juvan I., Kislyakova K.G., Lendl M., Kubyshkina D., Bauer S.J. Aeronomical constraints to the minimum mass and maximum radius of hot low-mass planets // Astronomy and Astrophysics. – V. 598. – P. A90. – DOI: 10.1051/0004-6361/201629716
- Zamay T.N., Zamay G.S., Belyanina I.V., Zamay S.S., Denisenko V.V., Kolovskaya O.S., Ivanchenko T.I., Grigorieva V.L., Garanzha I.V., Veprintsev D.V., Glazyrin Y.E., Shabanov A.V., Prinz V.Y., Seleznev V.A., Sokolov A.E., Prokopenko V.S., Kim P.D., Gargaun A., Berezovski M.V., Zamay A.S. Noninvasive Microsurgery Using Aptamer-Functionalized Magnetic Microdisks for Tumor Cell Eradication // Nucleic Acid Therapeutics. – V. 27 (2). – P. 105-114. DOI: 10.1089/nat.2016.0634
- Kiehas S.A., Volkonskaya N.N., Semenov V.S., Erkaev N.V., Kubyshkin I.V., Zaitsev I.V. Large-scale energy budget of impulsive magnetic reconnection: Theory and simulation // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – V. 122 (3). – P. 3212-3231. – DOI: 10.1002/2016JA023169
- 8. Shaydurov V., Shchepanovskaya G., Yakubovich M. A mathematical model and a numerical algorithm for an asteroid-comet body in the earth's atmosphere // Lecture Notes in Computer

Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – V. 10187 LNCS. – P. 119-131. DOI: 10.1007/978-3-319-57099-0_11

- Shaydurov V., Vyatkin A., Kuchunova E. A semi-Lagrangian numerical method for the threedimensional advection problem with an isoparametric transformation of subdomains // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – V. 10187 LNCS. – P. 599-607. DOI: 10.1007/978-3-319-57099-0_68
- Ershov A.E., Gerasimov V.S., Gavrilyuk A.P., Karpov S.V. Surface plasmon resonances in liquid metal nanoparticles // Applied Physics B: Lasers and Optics. – V. 123 (6). – P. 182. DOI: 10.1007/s00340-017-6755-2.
- Kamenshchikov L., Krasnov I. Supercomputer modeling of stochastic dynamics of the mercury ion array in an optical lattice // CEUR Workshop Proceedings, 2017. – Vol. 1839. – P.324-333. DOI: 2-s2.0-85020512782
- Venugopal N., Gerasimov V.S., Ershov A.E., Karpov S.V., Polyutov S.P. Titanium nitride as light trapping plasmonic material in silicon solar cell // Optical Materials. – V. 72. – P. 397-402. DOI: 10.1016/j.optmat.2017.06.035
- 13. Krasnov I.V. Kinetic model of the bichromatic dark trap for atoms // Laser Physics. V. 27 (8).
 Art. 85501. DOI: 10.1088/1555-6611/aa786c
- Belyanina I.V., Zamay T.N., Zamay G.S., Zamay S.S., Kolovskaya O.S., Ivanchenko T.I., Denisenko V.V., Kirichenko A.K., Glazyrin Y.E., Garanzha I.V., Grigorieva V.V., Shabanov A.V., Veprintsev D.V., Sokolov A.E., Sadovskii V.M., Gargaun A., Berezovski M.V., Kichkailo A.S. In vivo cancer cells elimination guided by aptamer-functionalized gold-coated magnetic nanoparticles and controlled with low frequency alternating magnetic field // Theranostics. – V. 7 (11). – P. 2956-2967. DOI: 10.7150/thno.17089
- 15. Krushenko G.G. Welding aluminium alloys with nanobeam electrodes // Welding International.
 V. 31 (5). P. 394-398. DOI: 10.1080/09507116.2016.1263463
- Erkaev N.V., Odert P., Lammer H., Kislyakova K.G., Fossati L., Mezentsev A.V., Johnstone C.P., Kubyshkina D.I., Shaikhislamov I.F., Khodachenko M.L. Effect of stellar wind induced magnetic fields on planetary obstacles of non-magnetized hot Jupiters // Mon. Not. Roy. Astron. Soc.: Oxford univ press, 2017. – Vol. 470 Is. 4. – P. 4330-4336. DOI: 10.1093/mnras/stx1471
- 17. Vasil'ev E.N. Optimization of thermoelectric cooling regimes for heat-loaded elements taking into account the thermal resistance of the heat-spreading system // Technical Physics. V. 62 (9). P. 1300-1306. DOI: 10.1134/S1063784217090286

- Zakomirnyi V.I., Rasskazov I.L., Gerasimov V.S., Ershov A.E., Polyutov S.P., Karpov S.V. Refractory titanium nitride two-dimensional structures with extremely narrow surface lattice resonances at telecommunication wavelengths // Applied Physics Letters. – V. 111 (12). – P. 123107. DOI: 10.1063/1.5000726
- Dyadechkin S., Semenov V.S., Kallio E., Erkaev N.V., Alho M., Lammer H. Global kinetic hybrid simulation for radially expanding solar wind // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – V. 122 (8). – P. 7854-7864. DOI: 10.1002/2017JA023992
- 20. Cubillos P.E., Fossati L., Erkaev N.V., Malik M., Tokano T., Lendl M., Johnstone C.P., Lammer H., Wyttenbach A. Aerosol Constraints on the Atmosphere of the Hot Saturn-mass Planet WASP-49b // Astrophysical Journal. – V. 849 (2). – P. 145. DOI: 10.3847/1538-4357/aa9019

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Выписка из плана научно-исследовательской работы на 2017 год

 Пакет программ для расчета тепловых режимов функциональных узлов и модулей энергопреобразующего комплекса космического аппарата, разработанных с применением плат из низкотемпературной керамики.
 Математическая модель магнитосферы Земли с использованием многосеточного вариационно-разностного метода численного решения задачи Грэда- Шафранова с произвольно заданным заполнением магнитных силовых трубок плазмой; модель ионосферных электрических полей и токов, обусловленных токами из магнитосферы.
 3. Технологическая цепочка оптимизированных алгоритмов на современных компьютерных архитектурах для решения трехмерных нестационарных уравнений Навье-Стокса вязкого теплопроводного газа с высокой точностью. 4. Новая математическая модель поглощения лазерного излучения в ультрахолодной расширяющейся плазме для предсказания явления динамического просветления.