

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
ПРАВИТЕЛЬСТВО НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ  
КОМИССИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО ДЕЛАМ ЮНЕСКО  
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**МАТЕРИАЛЫ  
51-Й МЕЖДУНАРОДНОЙ  
НАУЧНОЙ СТУДЕНЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

**«Студент и научно-технический прогресс»**

**12–18 апреля 2013 г.**

**ФИЗИКА СПЛОШНЫХ СРЕД**

**Новосибирск  
2013**

УДК 553  
ББК 22.3

Материалы 51-й Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс»: Физика сплошных сред / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2013. 103 с.

ISBN

Конференция проводится при поддержке Президиума Сибирского отделения Российской академии наук, Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 13-01-06812), Правительства Новосибирской области, Комиссии РФ по делам ЮНЕСКО, Технопарка Новосибирского Академгородка.

Научный руководитель секции – д-р физ.-мат. наук, проф.,  
академик РАН А. К. Ребров

Председатель секции – д-р физ.-мат. наук, доцент К. В. Лотов  
Ответственный секретарь секции – С. Г. Кундасев

#### **Экспертный совет секции:**

д-р физ.-мат. наук Косинов Александр Дмитриевич,  
д-р физ.-мат. наук Миронов Сергей Григорьевич  
канд. физ.-мат. наук Мурахтин Сергей Викторович  
канд. физ.-мат. наук Тимофеев Игорь Валериевич  
д-р физ.-мат. наук Федоров Александр Владимирович,  
д-р физ.-мат. наук Хайрулин Рашид Амирович  
д-р физ.-мат. наук Чекмарев Сергей Федорович  
д-р физ.-мат. наук Чиннов Евгений Анатольевич  
канд. физ.-мат. наук Шошин Андрей Алексеевич  
канд. физ.-мат. наук Шторк Сергей Иванович

ISBN

© Новосибирский государственный  
университет, 2013

**RUSSIAN FEDERAL MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE  
SIBERIAN BRANCH OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES  
NOVOSIBIRSK REGION GOVERNMENT  
COMMISSION OF THE RUSSIAN FEDERATION FOR UNESCO  
NOVOSIBIRSK NATIONAL RESEARCH STATE UNIVERSITY**

**PROCEEDINGS  
OF THE 51st INTERNATIONAL STUDENTS  
SCIENTIFIC CONFERENCE**

**«STUDENTS AND PROGRESS IN SCIENCE AND TECHNOLOGY»**

**April, 12–18, 2013**

**PHYSICS OF CONTINUOUS MEDIA**

**Novosibirsk, Russian Federation  
2013**

Proceedings of the 51<sup>st</sup> International Students Scientific Conference «*Students and Progress in Science and Technology*». Physics of continuous media / Novosibirsk State University. Novosibirsk, Russian Federation. 2013. 103 pp.

ISBN

The conference is held with the significant support of Presidium of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Russian Foundation for Basic Research (project № 13-01-06812), Novosibirsk Region Government, Commission of the Russian Federation for UNESCO, Technopark of Novosibirsk Akademgorodok.

The conference is held with financial support of Russian Federal Ministry of Education and Science under the federal target program "Scientific and scientific-pedagogical personnel of innovative Russia" in 2009-2013.

Section scientific supervisor – Acad. RAS, Dr. Phys. Math., Prof. A. K. Rebrov

Section head – Dr. Phys. Math., Assoc. Prof. K. V. Lotov

Responsible secretary – S. G. Kundasev

**Section scientific committee:**

Dr. Phys. Math. A. D. Kosinov

Dr. Phys. Math. S. G. Mironov

Cand. Phys. Math. S. V. Murakhtin

Cand. Phys. Math. I. V. Timofeev

Dr. Phys. Math. F. V. Fedorov

Dr. Phys. Math. R. A. Khayrulin

Dr. Phys. Math. S. F. Chekmarev

Dr. Phys. Math. E. A. Chinnov

Cand. Phys. Math. A. A. Shoshin

Cand. Phys. Math. S. I. Shtork

# АЭРОФИЗИКА

УДК 532.517.4; 532.525.2; 534.413; 536.464

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЗАКРУЧЕННЫХ ПЛАМЕН МЕТОДОМ PIV

С. С. Абдуракипов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Общеизвестно, что интенсивная закрутка потока, приводящая к распаду вихревого ядра и образованию приосевой зоны рециркуляции, используется в горелочных устройствах для стабилизации пламени. Этот режим течения характеризуется развитием спиральной моды неустойчивости потока, имеющая форму прецессирующего вихревого ядра (ПВЯ). Информация о характеристиках течений с ПВЯ и, прежде всего, о частотах возникающих неустойчивостей необходима для разработки и совершенствования горелочных устройств. Данная работа посвящена экспериментальному исследованию динамики КВС в закрученном пламени с использованием современной методики измерения Particle Image Velocimetry (PIV), статистических подходов Proper Orthogonal Decomposition (POD), Dynamic Mode Decomposition (DMD) и непрерывного вейвлет-преобразования (НВП).

Для организации закрученного пламени пропано-воздушной смеси было использовано сопло Витошинского с выходным диаметром  $d = 15$  мм. Число Рейнольдса и среднерасходная скорость потока равнялись  $Re = 4100$ ;  $U_0 = 5$  м/с, соответственно. Закрутка потока организовывалась лопаточными завихрителями. Для измерения с частотой 770 Гц полей мгновенной скорости потока в центральной плоскости струи была использована скоростная PIV система. Применение методов POD, DMD и НВП к данным скоростных PIV измерений в закрученном пламени позволило определить характерные частоты турбулентных пульсаций для различных областей потока и проанализировать масштабы соответствующих этим частотам пространственных когерентных структур. Например, при интенсивной закрутке (число крутки  $S = 1.0$ ) нестационарная динамика поднятого пламени определялась ПВЯ (275 Гц) и глобальной модой неустойчивости в форме спиральных КВС. Частота прецессии увеличилась на 12% по сравнению с изотермическим течением, и имели место низкочастотные осцилляции объема внешнего воздуха, вовлекаемого в пламя. На основе POD реконструкции полей мгновенной скорости была проанализирована 3D пространственная структура и динамика спиралевидных КВС.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук В. М. Дулин

## ПРИМЕНЕНИЕ ТОМОГРАФИЧЕСКОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ В ОБЪЕМЕ ПОТОКА К ИССЛЕДОВАНИЮ ТУРБУЛЕНТНОЙ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ

М. В. Алексеенко

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Потоки жидкости и газа являются весьма распространенными видами течений, наблюдаемыми как в натуральных условиях, так и в многочисленных технических устройствах. Большинство потоков характеризуются трехмерностью и нестационарностью, что существенно затрудняет их изучение, необходимое как для понимания сути явления, так и для практического применения.

Относительно недавно (в 2005 году) был реализован томографический метод измерения скорости в объеме потока Tomo-PIV[1]. Принцип работы метода заключается в отслеживании величины смещения трассеров в объеме потока. Особенностью метода является процесс томографической реконструкции измеряемого объема по изображениям трассерных частиц, записанным одновременно, с нескольких камер, направленных под разными углами. Основное преимущество метода состоит в том, что он позволяет измерять мгновенные трехмерные трехкомпонентные поля скорости, что дает возможность визуализировать поток и рассчитывать его осредненные и дифференциальные характеристики.

Целью работы является экспериментальное исследование турбулентной ( $Re \approx 10000$ ) осесимметричной затопленной струи томографическим методом измерения скорости. Валидация полученных результатов на основе сравнения их с ранее измеренными параметрами струи с помощью других методик.

В работе получены трехмерные трехкомпонентные распределения скорости в объеме. Показана вихревая структура потока. Также в рамках работы были проведены измерения с применением методики плоскостных измерений (Stereo-PIV). Сравнение результатов, полученных с помощью разных методик, показывает удовлетворительное совпадение, что говорит о возможности применения томографического метода для аналогичных течений.

---

I.G.E. Elsinga, F. Scarano, B. Wieneke, B.W. vanOudheusden.  
Tomographic particle image velocimetry. Exp. Fluids 2006(41) pp.933–947

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук А. В. Бильский

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ КОГЕРЕНТНЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ

А. П. Винокуров

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Закрученные потоки представляют собой важный раздел современной гидро- и аэродинамики в связи с их многочисленными практическими приложениями[1,2]. Так в промышленности используются скрубберы и циклонные сепараторы для очистки газов и деаэрации топлива. В горелочных устройствах интенсивную закрутку потока применяют для стабилизации пламен. Большое внимание уделяется и нестационарным вихревым явлениям, возникающим за рабочим колесом гидротурбины ГЭС.

Целью работы является исследование нестационарных вихревых структур в жидкости, в частности, прецессирующего вихревого ядра (ПВЯ), образующегося в области истечения интенсивно закрученного потока из цилиндрического сопла. Для решения этой задачи построен замкнутый гидродинамический контур с осесимметричной вихревой камерой. Исследована зависимость параметров ПВЯ от потока массы и геометрических параметров вихревой камеры, таких как параметр крутки завихрителя и диаметра сопла. С помощью лазерного доплеровского анемометра (ЛДА) построен профиль осевой скорости течения. Проведено исследование влияния дисперсной газовой фазы на характеристики вихревых структур. Помимо экспериментального моделирования проведено численное моделирование процесса в коммерческой CFD-программе Star-CCM+.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках реализации Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

---

1. Гупта А., Лили Д., Сайред Н. Закрученные потоки. М.: Мир, 1987.

2. Алексеенко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Монография, 2003.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН  
С. В. Алексеенко

## **ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ АКТИВАТОРОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХСЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКОМ**

О. И. Вишняков

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича  
СО РАН, г. Новосибирск

В настоящее время разработка новых методов управления потоком приобретает все большее значение для развития авиационно-космической техники, поскольку традиционные методы ограничивают рост эффективности летательных аппаратов. Один из наиболее перспективных методов управления основан на использовании электрогазодинамических или плазменных активаторов потока. Преимущества этих устройств заключаются в простоте конструкции, надежности, высокой скорости реакции и прямом преобразовании электрической энергии в кинетическую энергию потока. В свою очередь, среди плазменных активаторов наиболее перспективным является диэлектрический барьерный разряд (ДБР).

На настоящий момент существует множество экспериментальных работ по исследованию ДБР, которые подтверждают возможность его использования для управления отрывом потока, положением ламинарно-турбулентного перехода и характеристиками аэродинамических профилей. Однако эффективное воздействие возможно только на умеренных скоростях, из-за низкой величины генерируемой скорости. Этот недостаток связан с тем, что разряд в течение периода колебаний напряжения затрачивает мощность не только на разгон, но и на торможение потока. При этом существование среднего течения объясняется асимметрией между положительной и отрицательной фазой работы разряда. В настоящее время не существует достаточно достоверной модели, описывающей процесс разгона газа в ДБР. Поэтому для увеличения эффективности плазменного активатора необходимо доскональное изучение процесса разгона газа в ДБР, а также оптимизация геометрических и электрических параметров разряда.

В данной работе проведено исследование зависимости КПД от толщины диэлектрика, а также частоты работы разряда. При помощи метода PIV проведены измерения скорости, генерируемой разрядом в течение периода колебаний напряжения. Рассчитаны массовые силы ускорения течения и произведена оценка КПД активатора.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук А. А. Сидоренко

## **PIV-ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ФАКЕЛА В ГОРЕЛОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ ПРИ СЖИГАНИИ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА В САЖЕПАРОВОМ РЕЖИМЕ**

М. А. Гришин, Е. П. Копьев

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Дефицит качественных видов жидких углеводородных энергоносителей актуализирует задачи разработки энергоэффективных, экологически безопасных технологий и аппаратов, использующих низкокачественные топлива. Один из перспективных подходов к решению данной задачи является сжигание низкокачественных углеводородных топлив в сажепаровом режиме. Предварительные исследования показали, что процесс горения жидких углеводородов резко интенсифицируется при подаче в зону горения перегретого водяного пара. Для создания высокоэффективных горелочных устройств, работающих в таком режиме, необходимы исследования процессов переноса и механизмов реакций, определяющих условия газификации продуктов разложения топлива и состав продуктов горения в модельных устройствах. При сжигании дизельного топлива в исследуемом горелочном устройстве формируется зона горения продуктов пиролиза, в которую под давлением  $\sim 10$  атм подается струя перегретого водяного пара. Газификация топлива при высокой концентрации пара приводит к формированию высокотемпературного факела. В данной работе с применением бесконтактного оптического метода PIV экспериментально исследовано поле скорости в факеле лабораторной горелки (мощностью  $\sim 5$  кВт). Этот метод позволяет регистрировать распределение скорости в выбранном сечении, и основан на измерении перемещений частиц (трассеров) за известное время задержки последовательных импульсов лазера. Экспериментальный стенд был оснащен двухкомпонентной измерительной PIV системой «Полис», разработанной в ИТ СО РАН. Система «ПОЛИС» включает импульсный Nd:YAG лазер (145 мДж), объектив для формирования лазерного ножа, кросс-корреляционную камеру, широкоугольный объектив, светофильтр, синхронизирующий процессор, программное обеспечение ActualFlow. Малоинерционные трассеры создавались путем подачи в зону реакции силиконового масла. В результате измерений получены распределения двух компонент вектора скорости потока в ряде сечений факела с погрешностью не более 10%. Показано, что максимальное значение осредненной скорости достигает 10 м/с. Исследованы пульсационные характеристики турбулентного факела.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук О. В. Шарыпов

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ВИХРЕВОЙ НИТИ

В. В. Денисюк

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Волновые явления, связанные с турбулентными течениями интересны, как с точки зрения фундаментальных исследований, так и с точки зрения их практического применения и учёта в различных устройствах – лопастях, турбинах ГЭС, и т. д.

Среди большого количества вихревых движений выделяются концентрированные вихри, и в частности – вихревые нити. Теоретически предсказываются солитонные волны, которые могут распространяться на вихревых нитях при определённых условиях [1,2]. Однако экспериментального подтверждения этой теории до сих пор не было получено.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию волн на концентрированных вихрях и классификации возмущений на основе внешних характерных признаков. Также целью является сопоставление экспериментальных результатов с теоретическими моделями, анализ того, являются ли определённые волны в вихрях солитонами, и их детальное описание.

Исследования проводились с применением методов высокоскоростной видеозаписи и съёмки профессиональной фотокамерой высокого разрешения. При проведении эксперимента варьировались такие параметры как число Рейнольдса, степень закрутки потока и вид источника возмущения.

В результате исследований были получены бегущие против течения возмущения, проведена их классификация, определены характеристики волн, амплитуда, фазовая и групповая скорости, направление закрутки винтовых возмущений.

---

1. Hasimoto H. A soliton on a vortex filament // J. Fluid Mech. – 1972 – Vol. 51. – P. 477-485.

2. Konno K., Ichikawa Y.H. Solitons on a vortex filament with axial flow // Chaos, Solitons & Fractals, 1992, Vol. 2, N 3, pp. 237-250.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук С. И. Шторк

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ ГРУЗА НА ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ ПАРАШЮТНОЙ СИСТЕМЕ С УЧЁТОМ ДЕФОРМАЦИИ СТРОП

И. В. Деннер

Общевойсковая академия Вооруженных сил Российской Федерации,  
филиал, г. Новосибирск

Целью работы является моделирование движения груза на двухступенчатой парашютной системе (ПС) для наглядной иллюстрации основных фаз её работы и анализа влияния различных факторов на траекторные параметры движения. Расчёт ПС представляет сложную задачу и требует совместного решения уравнений аэродинамики, аэроупругости, динамики полёта [1].

В работе используется инженерный подход [2]. Для расчёта используются уравнения движения материальной точки и тела переменной массы, условие о постоянном пути наполнения [2].

Работа является продолжением решения задачи, представленной в [3]. Но в [3] стропы и купол парашюта предполагались не деформируемыми. В результате значения перегрузки получились завышенными. В настоящей работе для учёта деформации строп между коушем парашюта и грузом помещалась упругая связь, жёсткость которой равнялась суммарной жёсткости строп парашюта.

Была отработана методика расчёта, позволяющая моделировать основные фазы прыжка парашютиста на двухступенчатой ПС и наглядно демонстрировать влияние различных факторов (метеоусловия, скорость десантирования, время стабилизации, масса груза) на параметры его движения и нагрузку, действующую на парашютиста и купол.

---

1. Давыдов Ю.М. Аэродинамика, гидроупругость и устойчивость полета парашютных систем. Авиатика мягких летательных аппаратов. М.: НАПН РФ, НИИ парашютостроения, (2005).

2. Лобанов Н.А. Основы расчета и конструирования парашютов. – М.: Машиностроение, (1965).

3. Деннер И.В. Моделирование движения груза на двухступенчатой парашютной системе. Физика неравновесных процессов. Материалы 50-ой юбилейной международной научной студенческой конференции. Новосибирск, НГУ, с. 11, 2012.

Научный руководитель – канд. техн. наук А. М. Шевченко

## **ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА РАЗВИТИЕ ПУЛЬСАЦИЙ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ НА СКОЛЬЗЯЩЕМ КРЫЛЕ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ**

А. Д. Дрясов

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича  
СО РАН, г. Новосибирск

Определение ламинарно-турбулентного перехода и условий, влияющих на его местоположение, является необходимой задачей для авиационной, ракетной и космической техники.

Эксперименты выполнены в сверхзвуковой малотурбулентной аэродинамической трубе Т-325 ИТПМ СО РАН при числе Маха  $M=2$ . В экспериментах использовалась модель крыла с чечевицеобразным профилем и углом скольжения  $\alpha=45$ . Длина модели 0,38 м, ширина 0,2 м, максимальная толщина 12 мм, относительная толщина 3 %. Радиус притупления модели составлял 1 мм. Возмущения в потоке регистрировались термоанемометром постоянного сопротивления (ТПС). Датчики термоанемометра изготавливались из вольфрамовой нити диаметром 10 мкм и длиной около 1,5 мм. Внешние возмущения создавались с помощью проволоки, натянутой перед сопловыми вставками. В экспериментах использовалась проволока, диаметром  $d = 0,63$  мм, 0,95 мм, 1,9 мм и 3 мм. Возмущения в свободном потоке для проволоки диаметром 0,63 мм не выделяются на фоне естественных пульсаций. Для других диаметров проволоки в свободном потоке отмечено превышение возмущений над естественным фоном и рост интенсивности возмущений с увеличением диаметра проволоки.

Определены положения ламинарно-турбулентного перехода для всех источников внешних возмущений. Показано влияние диаметра проволоки на интенсивность порождаемых в пограничном слое возмущений и положение перехода. Измерены кривые нарастания, профили пульсаций массового расхода и профили средних напряжений, получены амплитудно-частотные спектры и выполнен статистический анализ.

Для различных выбранных профилей ( $x = 50$  мм, 100 мм и 150 мм) были построены амплитудно-частотные спектры массового расхода для различных диаметров проволоки. Полученные результаты представлены в качестве графиков зависимости массового расхода от частоты. Нелинейный рост возмущений характеризуется усилением высокочастотных пульсаций.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук Н. В. Семенов

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКРУЧЕННЫХ ГАЗОКАПЕЛЬНЫХ СТРУЙ ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

И. И. Запрягаев

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Целью данной работы является исследование взаимодействия крупномасштабных вихревых структур с каплями в закрученной газокапельной струе, характера движения капель различного масштаба в турбулентном струйном потоке.

Струйные течения являются каноническими прототипами широкого класса течений, реализующихся во многих практических приложениях, таких как газотурбинные двигатели, двигатели внутреннего сгорания и тепло-массообменные устройства. Для них характерны наличие высоких градиентов гидродинамических параметров, развитие неустойчивостей в слоях смешения, в значительной мере определяющих характер взаимодействия фаз. Экспериментальная информация о характеристиках двухфазных течений такого рода фрагментарна. Наблюдается недостаток информации о прямоточных свободных струях в канонической конфигурации, практически отсутствуют данные по закрученным течениям. Всё это ограничивает возможности по разработке методов моделирования таких течений и способов управления их характеристиками.

В рамках данной работы было проведено экспериментальное исследование газокапельной струи с применением методик PIV (Particle Image Velocimetry) и IPI (Interferometric Particle Imaging), позволяющих измерять поле скоростей и размеры частиц в выбранном сечении струи. Метод PIV основан на измерении перемещения капель дважды подсвеченных лазером с известным интервалом времени. Метод IPI основан на анализе интерференционных картин капель (расстояние между интерференционными полосами на изображении капли зависит от диаметра капель).

В работе были произведены измерения полей средней и пульсационной скорости дисперсной и несущей фазы при различных параметрах потока (число Рейнольдса, степень закрутки), проведен анализ движения частиц в потоке в зависимости от их размера.

Научный руководитель – чл.-корр. РАН Д. М. Маркович

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ НЕНЬЮТОНОВСКИХ ЖИДКОСТЕЙ ЧЕРЕЗ КОЛЬЦЕВОЙ ЗАЗОР С БЛОКИРОВКОЙ

Я. С. Игнатенко

Новосибирский государственный университет

Перспективы развития современных технологий бурения скважин тесно связаны с получением информации о гидродинамических характеристиках во время бурения. В частности, информация о падении давления крайне важна для разработки систем оптимизации и автоматизации процесса бурения. Возникающий при этом класс ламинарных установившихся напорных течения в цилиндрическом зазоре с вращением внутренней трубы является классической задачей гидродинамики, встречающейся во многих устройствах. Однако при бурении горизонтальных и наклонных скважин часто возникает ситуация частичной блокировки канала осевшим шламом. Это оказывает существенное влияние на гидродинамические параметры течения бурового раствора. Моделирование течения жидкости осложняется и тем, что буровая колонна может быть смещена относительно центра скважины и иметь заданную скорость вращения. К тому же, буровая жидкость, как правило, имеет неньютоновскую реологию, где вязкость связана со скоростью сдвига  $|\dot{\gamma}|$  реологическим законом Хершеля-Балкли:  $\mu(|\dot{\gamma}|) = (\tau_0 + |\dot{\gamma}|^n) / |\dot{\gamma}|$ , здесь  $n$  – показатель степени,  $\tau_0$  – предельное напряжение сдвига,  $k$ –индекс консистентности.

Целью работы является изучение влияния геометрии канала, режима течения и реологии жидкости на характеристики течения и гидродинамическое сопротивление канала. Задача решалась численно на основе алгоритма [1]. Выполнено около  $10^6$  расчетов, на основе которых построена база данных. Помимо этого разработан интерполяционный алгоритм, позволяющий быстро определить перепад давления в канале на основе результатов моделирования.

---

1. А.А.Гаврилов, А.В.Минаков, А.А. Дектерев, В.Я. Рудяк. Численный алгоритм для моделирования установившихся ламинарных течений неньютоновских жидкостей в кольцевом зазоре с эксцентриситетом. // Вычислительные технологии, 2012, Т. 17, № 1, С. 44–57.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. В. Я. Рудяк

## ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ И ВОЛНОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИНЕЙНОГО РАЗВИТИЯ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ТОНКОМ СКОльзящем КРЫЛЕ

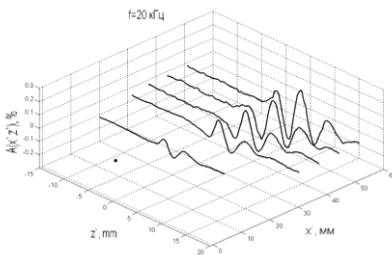
Г. Л. Колосов

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича  
СО РАН, г. Новосибирск

На сегодняшний день одна из важнейших технических задач в аэрофизике – получение и поддержка ламинарного течения над моделью скользящего крыла. Эта задача включает в себя отыскание методов предсказания положения ламинарно-турбулентного перехода и способов контроля над различными неустойчивостями, приводящими к переходу в таком течении. Данная работа посвящена детальному исследованию одного из этапов ламинарно-турбулентного перехода – линейной стадии развития возмущений в трехмерном сверхзвуковом пограничном слое.

Эксперименты были выполнены в сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-325 ИТПМ СО РАН при числе Маха  $M=2.0$ . Модель тонкого скользящего крыла с острой передней кромкой имела угол стреловидности  $45^\circ$  и была установлена при нулевом угле атаки. Возмущения в поток вводились с помощью точечного электрического разряда, который располагался внутри модели. Разряд зажигался на частоте 20 кГц. Измерения проводились с помощью термоанемометра постоянного сопротивления. Использовался датчик, изготовленный из вольфрамовой нити длиной 1.5 мм и диаметром 10 мкм.

В работе представлены основные характеристики течения, описывающие линейное развитие возмущений как в декартовых координатах, так и в волновом пространстве. На рисунке приведен пространственный рост возмущений на основной частоте вниз по потоку.



В пограничный слой вводились возмущения на различных частотах, однако наибольшие амплитуды имели пульсации с частотами 10, 20, 30 кГц. Для данных возмущений были определены дисперсионные зависимости  $\alpha(\beta)$ , длины волн, углы наклона к потоку, фазовые скорости и показатели роста.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук А. Д. Косинов

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ДИНАМИКИ СМЕСИ ПРИ АКУСТО-КОНВЕКТИВНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

В. А. Колотилов

Институт теоретической и прикладной механики им. А. В. Христиановича  
СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Пористое тело (древесина, силикагель и др.) представляет собой совокупность капилляров и пор, часто наполненных жидкостью и растворенными пузырьками воздуха. Для использования пористых тел их необходимо сначала осушить. Для этой цели была предложена технология акусто-конвективной сушки. При этом влага экстрагируется из осушаемого материала при его облучении звуком с подходящими характеристиками. Принципиальное отличие акустического способа от традиционного термического состоит в том, что сушка протекает без повышения температуры осушаемого материала.

Однако до сих пор до конца не изучены механизмы процесса экстракции влаги из пористых тел, не учтено влияние пузырьков воздуха в них. Поведение отдельных газовых или парожидкостных пузырьков, возможно, определяет структуру и динамику возмущений в газожидкостной пузырьковой среде при подобном способе сушки.

В качестве первого этапа исследуется динамика пузырька в рамках модели механики гетерогенных сред с учетом уравнения Рэлея. Была построена линейная теория данной модели, рассмотрены три типа динамики пузыря, в том числе и с учетом акусто-конвективного воздействия. Изучаются возможности наступления резонанса в данной гетерогенной системе. Вычисления проводились в пакете программ Радау.

Научные руководители: – д-р физ.-мат. наук А.В. Федоров,  
канд. физ.-мат. наук А. А. Жилин

## ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕЧЕНИЯ В МОДЕЛИ СОННОЙ АРТЕРИИ ЧЕЛОВЕКА

А. А. Крашенин

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича  
СО РАН, г. Новосибирск  
Международный томографический центр СО РАН  
Новосибирский государственный университет

В сравнительно недавнее время в развитии методик измерений как в механике жидкости и газа, так и в медицинской диагностике произошел качественное изменение. Появился целый спектр методов, позволяющих проводить измерения в закрытых каналах, как *in vivo*, так и на моделях сосудов. Как следствие, значительно выросло количество работ, рассматривающих различные аспекты процесса кровообращения.

Сонная артерия снабжает кровью головной мозг и в шейном отделе имеет три изгиба. Их функциональное назначение не вполне понятно. Предполагается, что таким образом демпфируются пульсации кровотока и создаются более статичные условия в системе кровообращения головного мозга, своего рода амортизация.

Данная работа посвящена изучению динамических характеристик потока жидкости в модели бифуркации сонной артерии человека и получению гидродинамического аналога амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) данного участка венозной системы.

Измерения полей скорости проводились методом магнитно-резонансной томографии на МР-томографе «Achieva» фирмы «Philips» с напряженностью магнитного поля 1,5 Тесла в институте «Международный томографический центр» СО РАН.

Использовалась модель здоровой сонной артерии. Расход задавался специализированной помпой, позволяющей получать поток с заданным профилем по времени.

Полученные качественные и количественные данные об особенностях потока жидкости в модели сонной артерии человека могут расширить фундаментальные представления о характере кровоснабжения головного мозга, что, несомненно, позволит глубже раскрыть физиологические механизмы церебральной гемодинамики и откроет принципиально новое направление для дальнейших научных исследований в этой области. Результаты могут иметь и непосредственное практическое применение для развития методик диагностики сосудистых нарушений.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук В. Н. Горев

## **РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУИ ИСТЕКАЮЩЕЙ ИЗ КОСОСРЕЗНОГО СОПЛА С ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ВСТАВКОЙ**

С. Г. Кундасев

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича  
СО РАН, г. Новосибирск

Актуальность работы обусловлена применением подобных сверхзвуковых струй в системах торможения перспективных космических возвращаемых летательных аппаратов. На данный момент, трехмерный характер течения для таких струй недостаточно изучен. Параметры течения и геометрия сопла подобны соплам, которые применяются на моделях разрабатываемого перспективного возвращаемого аппарата.

Объектом исследования является сверхзвуковая струя, создаваемая соплом  $M=3.52$  с цилиндрической вставкой и косым срезом  $\theta=18.7^\circ$ . Для детального изучения ударно-волновой структуры течения выбран комплексный подход, который основан на экспериментальных результатах, полученных на струйном модуле АТ-326 ИТПМ СО РАН. Численный расчет выполнен с использованием программного пакета ANSYS Fluent. Решалась полная система уравнений Навье-Стокса в трехмерной постановке, для расчета турбулентных параметров использовалась RANS-модель  $k-\omega$  SST.

В ходе работы получены новые экспериментальные данные о сложной ударно-волновой структуре сверхзвуковой струи, истекающей из кососрезного сопла. Благодаря используемой системе автоматизации проведено измерение детальных поперечных полей давления Пито. Получены шлирен-изображения струи, поперечные профили давления Пито. По результатам визуализации и по данным зондовых измерений вычислен угол отклонения струи от оси симметрии сопла (для исследуемого режима составляет  $5^\circ$ ).

Показано качественное согласование результатов расчета с экспериментом, что позволяет их использовать для оценки ударно-волновой структуры течения, а также локальных значений параметров в заданной точке пространства и интегральных характеристик сопла.

Научный руководитель работы – д-р техн. наук В. И. Запрыгаев

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГАЗОВОЙ СТРУИ С ЖИДКИМИ ЧАСТИЦАМИ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Р. З. Курмангалиев

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича  
СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Перспективным направлением в современных системах пожаротушения является использование мелкодисперсных частиц воды. Основным преимуществом применения частиц воды с размерами менее 200 мкм является развитая поверхность теплообмена и, соответственно, большая скорость поглощения тепла от горючих газов и пламени. Кроме того, газокапельный туман создает препятствие для поступления кислорода воздуха в зону горения. Технология создания и применения тонкораспыленной воды до настоящего времени остается проблемным вопросом, ограничивающим возможности применения данного направления.

В данной работе рассматривается дробление жидких частиц в нестационарной газовой струе как возможный механизм создания потока тонкораспыленной воды. Выполнен анализ литературных данных по моделям дробления жидких частиц[1-3]. На основе анализа построена программа для вычислений и получены первые результаты расчета движения капли в потоке с учетом аэродинамического дробления. Построены зависимости скорости течения от времени, в течение которого происходит дробление капель. На основании этих результатов предполагается создать методику прогнозирования времени и, соответственно, расстояния, необходимого для формирования газокапельного тумана в потоке воздуха. Разработанная методика будет проверена в эксперименте.

---

1. А. В. Ципенко. Теория и методы повышения эффективности противопожарных систем на воздушном транспорте. Докторская диссертация, М.: 2006.

2. В. М. Бойко, С. В. Поплавский. Физическая модель разрушения капли за ударной волной по срывным механизмам. Международная конференция “Современные проблемы прикладной математики и механики”, ИТПМ СО РАН, Новосибирск, 2011.

3. Р. И. Нигматулин. Динамика многофазных сред. М.: Гл. ред. физ-мат. лит., 1987. – с. 159-172.

Научный руководитель – д-р техн. наук В. И. Звегинцев

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ПАССИВНОГО ПОРИСТОГО ПОКРЫТИЯ НА ВОЗМУЩЕНИЯ В ГИПЕРЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ**

С. О. Морозов, С. В. Лукашевич

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича  
СО РАН, г. Новосибирск

Исследование методов управления ламинарно-турбулентным переходом является одной из актуальных задач высокоскоростной аэродинамики. В ряде экспериментальных и теоретических исследованиях было показано, что пассивное пористое покрытие способствует стабилизации гиперзвукового пограничного слоя. В данной работе проведено экспериментальное исследование влияния положения участка с пассивным пористым покрытием на возмущения второй моды в гиперзвуковом пограничном слое.

Исследования проведены на модели в виде острого конуса с полууглом раскрытия  $7^\circ$ , на поверхности которого располагался участок с пассивным пористым покрытием протяженностью  $L = 38$  мм. Покрытие изготовлено из трех слоев нейлоновой сетки. Толщина покрытия составляла 0,18 мм, со степенью пористости 44%. Положение участка с покрытием менялось вдоль образующей конуса. Для исследования естественных возмущений проведены измерения пульсаций давления на стенке модели при помощи высокочастотных датчиков давления РСВ132А31. Частотный диапазон датчиков давления 11 кГц – 1 МГц. По одному датчику давления установлено со стороны сплошной и пористой поверхностей на расстоянии  $x_g = 343$  мм от носика модели.

Сравнение спектральных характеристик пульсаций давления на сплошной поверхности и на поверхности с пассивным пористым покрытием позволило определить влияние положения участка покрытия на возмущения в гиперзвуковом пограничном слое.

Показано, что эффективность стабилизации второй моды возмущений при помощи пассивного пористого покрытия зависит от его положения на поверхности модели. Определено положение пористого участка, при котором эффективность стабилизации второй моды возмущений максимальна. Показано, что применение пористого покрытия может приводить к дестабилизации второй моды возмущений.

Научный руководитель – член-корр. РАН А. Н. Шиплюк

## **РАЗВИТИЕ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ-ПРЕДВЕСТНИКОВ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ПРЯМОГО КРЫЛА, В УСЛОВИЯХ ПРИБЛИЖЕННЫХ К ЕСТЕСТВЕННЫМ**

П. А. Мотырев<sup>1</sup>, М. М. Катасонов<sup>1,2</sup>, Д. С. Сбоев<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет

<sup>2</sup>Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича  
СО РАН, г. Новосибирск

<sup>3</sup>ЦАГИ им. Н. Е. Жуковского, г. Жуковский

Изучению продольных локализованных возмущений, возникающих в пограничном слое при повышенной степени турбулентности набегающего потока, в последние годы уделяется пристальное внимание. За ними закрепилось название полосчатых структур (“streaky structures”). Внимание обусловлено важностью их роли в процессе ламинарно-турбулентного перехода в условиях повышенной степени турбулентности набегающего потока, что в свою очередь является актуальной задачей прикладной механики.

Данные продольные локализованные возмущения создают в пограничном слое условия для развития неустойчивости, связанной с образованием предвестников вблизи переднего и заднего фронта локализованного возмущения. Предвестники далее трансформируются в турбулентные пятна (“incipient spots”) и в результате течение в пограничном слое переходит из ламинарного состояния в турбулентное.

В работе изучаются волновые пакеты – предвестники, возникающие в областях, предшествующие резкому локальному изменению скорости вблизи фронтов продольного возмущения. Продольные возмущения вводились в пограничный слой из внешнего потока. Такой подход позволяет, в отличие от предыдущих исследований, моделировать условия наиболее приближенные к “естественным”, оставляя при этом эксперимент модельным. Эксперименты проводились в контролируемых условиях, в аэродинамической трубе МТ-324 ИТПМ СО РАН на модели прямого крыла. Исследовалась динамика развития предвестников в зависимости от градиента скорости вблизи переднего фронта продольного возмущения, амплитуды продольного локализованного возмущения и градиента скорости над профилем.

Работа поддержана грантами: РФФИ (08-01-00027), Президента РФ по поддержке ведущих научных школ РФ (НШ-454.2008.1), Министерства Образования и Науки (РФ РНП.2.1.2.541), Гос. Контракта № 14.740.11.0354.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук М. М. Катасонов

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РЕМАСШТАБИРОВАНИЯ ФУНКЦИЙ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ФАЗОВЫХ ПРОНИЦАЕМОСТЕЙ С ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКУЮ**

А. А. Недождей, П. В. Марков  
Тюменский государственный университет

Переход от геологической модели нефтегазового пласта к гидродинамической носит название ремасштабирование (upscaling). Под ремасштабированием понимают процедуру осреднения (переноса) литологии, фильтрационно-емкостных параметров и насыщения с геологической сетки на более грубую гидродинамическую сетку. В процессе перехода число ячеек значительно уменьшается, что существенно снижает требования к расчетной мощности вычислительно техники.

В настоящем времени ремасштабирование насыщенности, параметра литологии и пористости не вызывают трудностей. Эти вопросы решаются методами осреднения с взвешиванием по объему. Сложности возникают при ремасштабировании относительной и абсолютной фазовой проницаемости.

Процедура ремасштабирования, стремясь сохранить потоки жидкости, при увеличении расстояния (укрупнение ячейки) отодвигает прорыв воды по насыщенности, а значит и по времени, но делает прорыв более резким, т.е. искажает кривые ОФП и, как следствие, дает неверные результаты добычи рассматриваемого флюида.

Программные комплексы, такие, как Schlumberger Eclipse, позволяют ремасштабировать ОФП, однако для оптимизации этого процесса имеет смысл на основе куба относительных невязок изменения объема флюидов в ячейках выделять регионы, нуждающиеся в упомянутом ремасштабировании. Для остальных же регионов, где значение относительной невязки невелико, можно использовать функции ОФП геологической модели.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, доцент А. П. Шевелёв

## МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТЕЧЕНИЯ СМЕСИ ГЕЛИЯ С БАЛЛАСТНЫМ ГАЗОМ В НАНОКАНАЛАХ

Д. С. Ожгибесов

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича  
СО РАН, г. Новосибирск

В настоящей работе проведено молекулярно-динамическое исследование течения смеси гелия с балластным газом в наноканалах цилиндрической формы с заданными радиусом и длиной. Затекание атомов гелия и молекул балластного газа из емкости во входное сечение канала проводилось с помощью метода Монте-Карло с использованием вероятности для молекулярного потока с заданными параметрами газов в емкости. Основными рассчитываемыми характеристиками являлись потоки, вытекающие в вакуум через выходное сечение.

Температура газов во всех расчетах предполагалась равной 300 К а давление варьировалось от 0.5 до 5 атмосфер. Радиус каналов был фиксирован – 110 Å, а длина каналов изменялась от 500 Å до 5000 Å т.к. это размеры каналов в мембранах, выпускаемых промышленностью в настоящее время.

Взаимодействие атомов гелия и молекул балластного газа описывалось потенциалом Леннарда-Джонса с константами, найденными в эксперименте. В потенциале учитывался радиус Ван-дер-Ваальса для молекул. Созданный комплекс программ позволил провести концептуальное исследование влияния радиуса и массы молекул на течение гелия в наноканале.

Взаимодействие молекул газов со стенками канала проведено как для модели упругого отражения, так и с учетом теплообмена. Упругое отражение моделировалось с помощью отталкивательной ветви потенциала Леннарда-Джонса. Этот случай является тестовым в иерархии физических моделей. Теплообмен со стенками моделируется с помощью метода Монте-Карло для распределения Максвелла с температурой стенок.

Научные руководители–канд. физ.-мат. наук И. Ф. Головнев,  
акад. РАН В. М. Фомин

## **ФОРМИРОВАНИЕ ПРОФИЛЯ ПОКРЫТИЯ ХГН В МАСКИРОВАННОЙ ОБЛАСТИ**

Ф. В. Орленко

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича  
СО РАН, г. Новосибирск

Новосибирский государственный технический университет

Для получения электрических плат силовой электроники широко используется метод химического травления медного слоя на фольгированном гетинаксе либо на DBC фольгированных керамических подложках. Однако указанный метод характерен технологически сложным и трудоемким процессом. Для упрощения производства и сокращения временных затрат перспективно изготовление плат с помощью высокопроизводительного метода холодно газодинамического напыления (ХГН). Предлагается нанесение методом ХГН алюминиевого и/или медного покрытия на керамические подложки с использованием маски (трафарета). Однако в настоящее время нет достаточных сведений о влиянии маски на процесс ХГН.

В настоящей работе исследовалось влияние маски на профиль формируемого покрытия ХГН. Маска представляла собой круглый цилиндр, введенный в поток так, что ось цилиндра ортогональна оси потока и параллельна плоскости подложки. Для формирования покрытия использовался порошок алюминия АСД-1 со сферической формой частиц. Сформированы отпечатки покрытия при дистанции напыления 30 - 40 мм и расстоянии от маски до подложки 4 – 14 мм. С применением методов оптической и электронной микроскопии получены 3D-профилограммы, микрофотографии поверхности сформированных покрытий, а также микроструктуры этих покрытий в поперечном сечении. Представлена зависимость профиля покрытия в области маскированной зоны от дистанции напыления и дистанции маска-подложка.

Результаты данной работы важны в понимании процесса ХГН при наличии маски и могут быть использованы в производстве покрытий со сложным рисунком в различных отраслях промышленности, например в силовой электронике.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук В. Ф. Косарев

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ВОЛНОВОГО ПОЕЗДА В ПОПЕРЕЧНОМОДУЛИРОВАННОМ 2D ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ПРИ ЧИСЛЕ МАХА 2 И 2,5**

А. В. Панина

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича  
СО РАН, г. Новосибирск

Использование метода контролируемых пульсаций для изучения механизмов нелинейного взаимодействия неустойчивых волн в сверхзвуковом пограничном слое является предпочтительным методом. С помощью этого метода обнаружено, что субгармонический резонанс и механизм наклонного перехода конкурируют в процессе перехода. Тем не менее, до сих пор эксперименты по развитию волнового поезда в сверхзвуковом пограничном слое проводились при числе Маха  $M = 2,0$ . Работа посвящена исследованию нелинейного развития волнового пакета в поперечно модулированном течении в сверхзвуковом пограничном слое при числах Маха 2 и 2,5.

Эксперименты выполнялись в малошумной сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-325 ИТПМ СО РАН при числе Маха 2 и 2,5 на модели плоской стальной пластины с острой передней кромкой. Два элемента шероховатости были размещены на поверхности модели для создания поперечной модуляции среднего течения в пограничном слое. Термоанемометр постоянного сопротивления использовался для измерения средних и пульсационных характеристик течения. Источник контролируемых возмущений был встроен в модель, и пульсации проникали в пограничный слой через отверстие на поверхности модели 0,5 мм в диаметре.

Получено, что шероховатости генерировали неоднородность поперечного течения около 5% при  $M = 2$  и 2,5 (pick-to-pick). Обнаружено, что при  $M = 2,5$  и для субгармонического, и для основного волнового пакета наблюдается почти линейное развитие. Тогда как для числа Маха  $M = 2$  мы имеем конкуренцию двух механизмов взаимодействия неустойчивых волн. Таким образом, впервые экспериментально в одних и тех же условиях контролируемого эксперимента получены результаты по развитию периодического волнового поезда в поперечно модулированном сверхзвуковом пограничном слое при числах Маха 2 и 2,5.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук А. Д. Косинов

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОКРЫТИЙ, НАНЕСЕННЫХ МЕТОДОМ ХГН С ПОМОЩЬЮ СОПЛА С КОСЫМ СРЕЗОМ**

А. А. Примак

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича  
СО РАН, г. Новосибирск

Новосибирский государственный технический университет

Развитие метода холодного газодинамического напыления (ХГН) является актуальной практической задачей. Основной схемой формирования сверхзвукового двухфазного потока в условиях ХГН является использование сверхзвукового сопла, в форкамеру или сверхзвуковую часть которого подаётся газопорошковая смесь. Сверхзвуковая часть сопла представляет собой усеченный конус. При этом форма сопла, в частности, геометрия его среза, и применение закрутки существенно влияют на параметры сверхзвукового потока. Изменение параметров потока такими способами может быть использовано для варьирования профиля напыляемой дорожки в широких пределах и, соответственно, лучшей адаптации метода для решения различных научных и прикладных задач.

В данной работе исследовалось влияние двойного косо́го среза, закрутки, а также их сочетания на профили дорожек ХГН. Сопло представляло собой типичное цилиндрическое сопло, выход которого усечен с двух сторон под заданным углом. Закрутка осуществлялась тангенциальной подачей газа по периметру форкамеры. Промерены профили медных отпечатков на алюминиевых подложках при использовании сопел со срезами под углами  $7.5^\circ$ ,  $15^\circ$  и  $30^\circ$ . Представлены результаты сравнительного анализа рассмотренных сопел. Выбраны геометрия и режим напыления, наиболее перспективные для формирования покрытий с наименьшей неровностью.

Результаты работы демонстрируют возможность технологически простого варьирования параметров процесса ХГН и важны как для решения научных, так и прикладных задач.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук С. В. Клинков

## ДВУХФАЗНЫЕ ТЕЧЕНИЯ В КОРОТКИХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ МИКРОКАНАЛАХ

Ф. В. Роньшин

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Мини- и микроканальные теплообменные системы получают широкое распространение в микроэлектронике, аэрокосмической индустрии, транспорте и энергетике. Для охлаждения микроэлектронного оборудования используются и разрабатываются миниатюрные тепловые трубы (размером 0,1 – 1 мм), микро- и миниканальные теплообменники с однофазным и двухфазным течениями теплоносителя.

В большинстве опубликованных работ рассматривается гидродинамика двухфазных течений в относительно длинных каналах [1]. До исследуемой зоны длина течения двухфазного потока превосходит высоту канала в сотни и тысячи раз. В системах охлаждения микроэлектроники и других жидкостных мини системах длины каналов ограничены. Установлено, что при уменьшении характерных размеров каналов трансформируются ранее известные и появляются новые виды неустойчивости двухфазного течения [2, 3].

В данной работе исследована гидродинамика адиабатного двухфазного течения в коротких прямоугольных горизонтальных микроканалах, построены и уточнены карты режимов течения в широком диапазоне расходов жидкости и газа (изменение на 3-4 порядка) для высоты каналов 200 мкм. Для измерения распределения жидкой фазы использован метод лазерно-индуцированной флуоресценции и Шлирен-методом с отражением.

---

1. Чиннов Е.А., Кабов О.А. Двухфазные течения в трубах и капиллярных каналах // Теплофизика высоких температур. – 2006. Т. 44, № 5, с. 777-795.

2. Chinnov E. A., Guzanov V. V., Cheverda V., Markovich D. M., Kabov O. A. Regimes of Two-phase Flow in Short Rectangular Channel // Micro gravity science and technology.– 2009. 21. S Issue 1, p. 199-205.

3. Чиннов Е.А., Кабов О.А. Нестойчивости течения двухфазного потока в коротких плоских микроканалах// Письма ЖТФ. 2011. Т 37, № 19.с. 65-71.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Е. А. Чиннов

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ**

А. Н. Семенов

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича  
СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Известно, что решение задач устойчивости параллельных течений сводится к нахождению собственных значений системы однородных обыкновенных дифференциальных уравнений с однородными граничными условиями. Одна из проблем классической теории устойчивости состоит в локализации собственных значений, соответствующих неустойчивому состоянию ламинарного течения. Поиск собственных значений, отвечающих наиболее неустойчивым частотам, достаточно сложен из-за большого их количества. Поэтому ставится задача численного моделирования развития возмущений во времени. В этом случае на достаточно больших временах поведение возмущений определяется единственной волной с наибольшим инкрементом.

В данной работе проведено численное моделирование задачи гидродинамической неустойчивости для плоской пластинки, основанное на эволюционном принципе и проведено уточнение результатов согласно классической теории гидродинамической устойчивости.

Разработанные программы были протестированы на примере пограничного слоя при числе Маха набегающего потока  $M=2,4,5$  и числе Рейнольдса  $Re=500,1000,1500$ . В качестве возмущений бралась монохроматическая в продольном направлении волна с волновым числом от 0.01 до 0.1 распространяющаяся под углом  $60^\circ$ .

В работе приведены результаты, как стационарных параметров течения, так амплитуд возмущений и фазовых скоростей. Основное преимущество реализованного в данной работе метода заключается в том, что в результате получают собственные значения в порядке убывания по реальной части. То есть он позволяет находить наиболее опасные частоты. К сожалению, в настоящее время такой метод не использовался в теории гидродинамической устойчивости и здесь он применен впервые.

На основании проведенных исследований предлагается использовать развитый в работе подход для решения аналогичных задач гидродинамической устойчивости более сложных течений.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук С. А. Гапонов

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ PIV – ТЕХНИКИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ТЕЧЕНИЯ В МОДЕЛИ ОТСАСЫВАЮЩЕЙ ТРУБЫ ГИДРОТУРБИНЫ**

С. Г. Скрипкин

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Отсасывающие трубы (ОТ) оказывают существенное влияние на энергетические и кавитационные характеристики гидротурбин. Актуальность работы обусловлена тем, что в настоящее время при разработке нового гидродинамического оборудования широкое применение получили методы численного моделирования, однако сложная структура закрученного потока под рабочим колесом турбины не позволяет использовать их в полном объёме и разработать единый теоретический подход для расчета рабочих характеристик. Таким образом, для совершенствования таких методов необходимо накопление экспериментальной информации о течении в моделях ОТ.

Целью данной работы является получение качественных PIV данных содержащих мгновенные и осреднённые поля скоростей на рабочем участке выполненном по геометрии TURNINE-99.[1] Основной акцент в исследовании структуры течения в модели ОТ был сделан на использовании оптического бесконтактного метода, так как, данная техника позволяет получить полноценные данные по полям скоростей не внося геометрических изменений и не возмущая поток.

В ходе работы были получены результаты наглядно отражающие сложную структуру течения в ОТ. Проведённый анализ PIV данных позволил выявить важные особенности течения, которые могут приводить к дополнительным энергетическим потерям.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках реализации Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

---

1. Gebart, B.R.; Gustavsson, L.H.; Karlsson, R.I. Proceedings of Turbine – 99 Workshop on Draft Tube Flow in Porjus, Sweden, June 20-23, 1999: technical report Lulea University of Technology, Lulea, 1402-1536, 1999.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук С. И. Шторк

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ МАСШТАБНОГО ФАКТОРА НА ПРОСТРАНСТВЕННУЮ СТРУКТУРУ И ДИНАМИКУ КАВИТАЦИОННЫХ КАВЕРН**

М. В. Тимошевский

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Исследование динамики кавитационных каверн и крупномасштабных вихревых структур (КВС) в нестационарных турбулентных течениях распределений турбулентных характеристик, а также изучение взаимодействия КВС, развивающихся в сдвиговых слоях в жидкости, с парогазовой фазой являются крайне актуальными задачами с точки зрения совершенствования конструкций современного гидротехнического оборудования. Кроме того, современные математические модели требуют наличия комплексных экспериментальных данных по обтеканию гидрокрыльев, которые необходимы для их совершенствования и верификации. Данная работа посвящена экспериментальному изучению нестационарного кавитационного обтекания гидропрофилей различного масштаба.

Эксперименты были выполнены на кавитационном гидродинамическом стенде Института Теплофизики СО РАН. Исследования кавитационного обтекания проводились на профилях NASA0015c длинными хорд 50, 100 и 200 мм. Для изучения динамики и пространственной структуры кавитационных каверн была проведена скоростная визуализация течений. Также в экспериментах с помощью методики PIV, интегрированной в измерительный комплекс «ПОЛИС», были измерены пространственные распределения мгновенной скорости течения при обтекании профилей. На основе измеренных ансамблей полей мгновенной скорости были рассчитаны пространственные распределения средней скорости, а также статистические моменты турбулентных пульсаций скорости жидкости до третьего порядка. Измерения проводились при угле атаки  $3^\circ$  и  $9^\circ$ . В ходе экспериментов число кавитации изменялось от 0,8 до 1,8.

В работе проведено качественное и количественное сравнение кавитационного обтекания всех профилей. Показано сходство картин течения и распределений турбулентных характеристик. При переходе к облачному типу кавитационного обтекания во всех случаях уровень турбулентных пульсаций возрастает примерно на порядок. Выявлено сходство чисел Струхала для режимов обтекания с периодически отрывающейся каверной.

Научный руководитель – чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук  
Д. М. Маркович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ  
СТАЦИОНАРНЫХ И ВТОРИЧНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ  
В ОБЛАСТИ БЛАГОПРИЯТНОГО ГРАДИЕНТА ДАВЛЕНИЯ  
НА СКОЛЬЗЯЩЕМ КРЫЛЕ**

С. Н. Толкачев, К. С. Макарова

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича  
СО РАН, г. Новосибирск

Новосибирский государственный университет

В условиях возрастающих цен на энергоносители задача ламинаризации пограничного слоя, формирующегося при обтекании летательных аппаратов, становится особенно актуальной. Большинство современных самолетов используют скользящие крылья, при обтекании которых формируется трехмерный пограничный слой. В условиях благоприятного градиента давления на передней кромке скользящего крыла в пограничном слое возникает неустойчивость поперечного течения (Cross-flow), проявляющаяся в виде продольных вихрей. Далее на них возникают вторичные высокочастотные возмущения, нарастание которых приводит к ламинарно-турбулентному переходу в пограничном слое.

Эксперимент проводился в малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ с рабочей частью  $4000 \times 1000 \times 1000$  мм. на модели скользящего крыла с цилиндрической передней кромкой и углом скольжения  $45^\circ$ . Угол атаки составлял  $-7.2^\circ$ . Возбуждение стационарной моды происходило с помощью цилиндрической шероховатости высотой 0.8 мм и радиусом 0.8 мм. Для стабилизации линии растекания и предотвращения отрыва потока на участках максимального утолщения крыла были использованы турбулизаторы. Скорость потока составляла от 8.1 м/с до 10.9 м/с.

Комбинация методики жидкокристаллической термографии и термоанемометрических измерений позволила проследить развитие стационарных возмущения с момента образования и до перехода в нелинейную стадию. Показано, что за цилиндрической шероховатостью формируется пара стационарных вихрей. Область максимальной восприимчивости к положению шероховатости располагается на некотором расстоянии от линии растекания. При достаточной амплитуде стационарного возмущения в области его ядра зарождаются и развиваются вторичные возмущения, которые приводят к ламинарно-турбулентному переходу.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук В. Н. Горев

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОАКСИАЛЬНЫХ ГАЗОВЫХ ЭЖЕКТОРОВ

Р. Р. Халиулин, А. С. Шабалин, Т. Х. Мухаметгалиев, Н. В. Давыдов  
Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А. Н. Туполева

Эжектор (франц. Ejecteur, от ejecter – выбрасывать) – устройство для перемещения жидкости, газа и др. сред, действие которого основано на передаче энергии от одной среды, движущейся с большей скоростью, к другой. Принцип эжекции используется во многих областях техники таких, как пожаротушение, снижение токсичности продуктов сгорания, снижение уровня шума, предварительное смешивание для получения однородной смеси и др.

Данная работа посвящена исследованию коаксиальных газовых эжекторов. Цель работы – снижение температуры газовыхлопа газотурбинного двигателя.

Исследования проводились на эжекторах с одинаковым отношением длины к диаметру  $L/D$  близким к двум. Исследованы: 1) влияние размера системы  $D=0,06\div 0,42$  м; 2) соотношение проходных сечений внешнего и внутреннего пассивных потоков; 3) влияние способа подвода активного и пассивного воздуха на форму поля температур на выходе из диффузора; 4) влияние температуры –  $t_1$  и скорости –  $W_1$  на выходные значения  $t_4$  и  $W_4$ .

В результате исследования, подобрано отношение расхода пассивного и активного воздуха  $n=3$ , при котором  $t_4=170^\circ\text{C}$  при  $t_1=360^\circ\text{C}$ . При этом наиболее равномерное поле  $t_4$  получилось при отношении внешнего и внутреннего пассивных потоков 2:1. Из геометрических параметров наиболее интересный результат – это организация подвода внутреннего пассивного потока через пилоны каплеобразной формы установленные в диффузоре. А подвод активного потока через кольцевую щель с вихревым входом.

Расчетные исследования проводились на различных моделях эжекторов в программном комплексе Ansys-Fluent. Подбиралась наиболее подходящая модель вязкости –  $k-\epsilon$  RNG. На пристеночных областях применялось сгущение сетки. Качество сетки составляло  $Y^+ = 1 \dots 3$ . Полученные данные подтвердили экспериментальные результаты.

В итоге получен инструмент для проектирования и расчета характеристик коаксиальных эжекторов с входным устройством в виде кольцевой щели, с вихревым подводом активного потока.

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент В. А. Сыченков

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ГИДРОКРЫЛА НА ЗАРОЖДЕНИЕ И ФОРМИРОВАНИЕ КАВИТАЦИОННЫХ КАВЕРН

С. А. Чуркин

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН  
Новосибирский государственный университет

Как известно, шероховатость поверхности гидрокрыльев является одним из основных параметров, определяющих начальные условия зарождения кавитационных пузырей и влияющих на пространственную структуру кавитационных каверн и их динамику. На сегодняшний день в зарубежной литературе можно найти несколько экспериментальных работ, посвященных изучению влияния шероховатости поверхности на формирование кавитационных каверн, например [1, 2]. Однако они не носят систематического характера, а представленные в них результаты измерений ограничены узким диапазоном значений шероховатости. Вместе с тем, в представленных работах детальная количественная информация, необходимая для оптимизации существующих математических моделей, крайне ограничена даже для упрощенных условий. Поэтому получение систематических экспериментальных данных для различных кавитационных режимов обтекания модельных объектов крайне важно.

В настоящей работе была проведена высокоскоростная визуализация кавитационных каверн, возникающих на поверхности модельного гидропрофиля NASA0015 с длиной хорды 100 мм, при вариации шероховатости его поверхности для нескольких фиксированных значений числа кавитации. Угол атаки гидрокрыла составлял  $3^\circ$ . Измерения проводились на кавитационном гидродинамическом стенде Института теплофизики СО РАН. Экспериментальные данные были получены камерой Photron Fastcam SA5 с частотой дискретизации 20 кГц.

Основываясь на полученных изображениях, можно сделать вывод, что начальные условия возникновения кавитации существенно зависят от шероховатости поверхности гидропрофиля: зарождение кавитационных пузырей наблюдается при больших значениях числа кавитации; переход к облачному типу кавитационного обтекания происходит при больших числах кавитации в сравнении со случаем полированного гидрокрыла. Объемное газосодержание в каверне возрастает с увеличением шероховатости поверхности.

---

1. B. Stutz, Influence of Roughness on the Two-Phase Flow Structure of Sheet Cavitation, ASME J. Fluids Eng., 125: 652-659 (2003).

2. O. Coutier-Delgosha et al., Effect of Wall Roughness on the Dynamics of Unsteady Cavitation, J. Fluids Eng., 127(4): 726-733 (2005).

Научный руководитель – чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук Д.М. Маркович

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА В МОДЕЛИ ВИХРЕВОЙ ТОПКИ НОВОГО ТИПА БЕСКОНТАКТНЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Е. Ю. Шадрин

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Одной из наиболее перспективных технологий сжигания твердых топлив является факельное сжигание пылеугольного топлива в вихревом потоке. Исследование уменьшенных лабораторных моделей топочных устройств является одним из главных этапов в создании новых технологий сжигания топлива.

В данной работе экспериментально исследована структура закрученного потока в изотермической лабораторной модели вихревого топочного устройства нового типа бесконтактными оптическими методами ЛДА и PIV. Основными элементами вихревой топки являются: камера горения с горизонтальной осью вращения, диффузор и камера охлаждения, заканчивающаяся горизонтальным газоходом. Отличительной особенностью нового топочного устройства является дополнительный тангенциальный ввод пылевоздушных струй через горелки, расположенные в нижней части камеры горения.

Измерения поля скорости были выполнены в ряде сечений модели. В качестве рабочей среды использовался сжатый воздух. Для анализа влияния распределенного ввода воздушных струй на аэродинамику вихревой топки варьировалась величина относительного расхода  $\gamma$  (отношение объемного расхода воздуха через верхние и нижние горелки).

Анализ результатов показывает, что течение имеет сложную пространственную структуру. Течение в диффузорной части носит «перчаточный» характер. При  $\gamma=3$  обеспечивается более рациональный режим работы топки, при котором существенно уменьшается отклонение верхней струи от начального направления и, соответственно, предотвращается вынос части топлива из камеры горения (повышается полнота выгорания). Таким образом, благодаря наличию дополнительной нижней горелки в новой конструкции обеспечивается необходимая гибкость управления аэродинамической структурой потока и создаются более благоприятные режимы работы топки (по сравнению с конструкцией Н. В. Голованова).

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук О. В. Шарыпов

## **МЕТАЛЛИЗАЦИЯ ЛЕГКО РАЗРУШАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ХГН**

В. С. Шикалов

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича  
СО РАН, г. Новосибирск

Новосибирский государственный технический университет

Холодное газодинамическое напыление (ХГН) – быстроразвивающийся метод порошкового нанесения покрытий и прототипирования 3D объектов, в котором частицы с характерным размером 10 – 150 мкм ускоряются в сверхзвуковом потоке газа до скоростей 500 – 1200 м/с и при ударе о подложку закрепляются на ней без фазовых переходов [1]. Данный метод перспективен для нанесения защитных, электропроводящих, теплопроводящих и других типов покрытий в различных отраслях промышленности. При этом в современном производстве актуальна проблема использования ХГН для металлизации хрупких или мягких материалов.

В работе анализируется способ металлизации легко разрушаемых материалов методом ХГН с применением эжектора, разрабатываемый в ИТПМ СО РАН. В исследовании использовался алюминиевый порошок со сферической формой частиц АСД-1. С помощью лазерного анализатора проведен анализ распределения частиц порошка по размерам. Измерены скорости движения частиц порошка в сверхзвуковом потоке из эжекторного сопла. Показано, что средняя скорость частиц в потоке ниже критического значения, при котором возможна эрозия хрупкой подложки. Проведена металлизация хрупкого материала (кирпич).

Результаты данной работы демонстрируют возможность применения ХГН для нанесения металлических покрытий на нетипичные для метода материалы. Металлизация хрупких и мягких материалов открывает новые возможности использования ХГН, например, для изготовления плат в силовой электронике, литьевых форм для производства пластиков и других перспективных задач.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук С. В. Клинов

## **ВОЗБУЖДЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ОДИНОЧНОГО ВОЛНОВОГО ПАКЕТА В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ**

А. А. Яцких

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН  
Новосибирский государственный университет

Существует два подхода экспериментального изучения устойчивости пограничного слоя. Один из них – это эксперименты по естественному развитию возмущений. Другим подходом исследования устойчивости пристенных течений является контролируемый эксперимент, когда в поток вводятся возмущения с известными начальными характеристиками. В случае естественного развития возмущений обычно рассматриваются их интегральные характеристики и анализируются спектры мощности. Однако естественный подход не позволяет определить механизмы возникновения турбулентности. Поскольку естественные пульсации по природе случайны, то их волновые характеристики получить невозможно. Контролируемый эксперимент позволяет определить волновые характеристики вводимых в пограничный слой возмущений, и напрямую сравнить полученные результаты с теоретическими расчетами.

При сверхзвуковых скоростях, в отличие от несжимаемого случая, эксперимент сильно ограничен в выборе способов генерации искусственных возмущений в пограничном слое. Поэтому разработка новых способов введения возмущений в сверхзвуковой поток является актуальной задачей. Сейчас общепризнан и широко используется метод высокочастотного тлеющего разряда. Достоинства этого метода известны. Так, с его помощью, экспериментально была подтверждена линейная теория гидродинамической устойчивости. Доказано существование механизма субгармонического резонанса и показана его значимость.

Данная работа посвящена разработке и апробации метода введения одиночных волновых пакетов в сверхзвуковой пограничный слой и изучению их развития вниз по потоку.

Эксперименты выполнены в сверхзвуковой малотурбулентной аэродинамической трубе Т-325 ИТПМ СО РАН при числе Маха  $M=2$ . В качестве экспериментальной модели использовалась стальная пластина с острой передней кромкой, установленная под нулевым углом атаки. Контролируемые возмущения в пограничный слой вводились с помощью импульсного «поверхностного» электрического разряда.

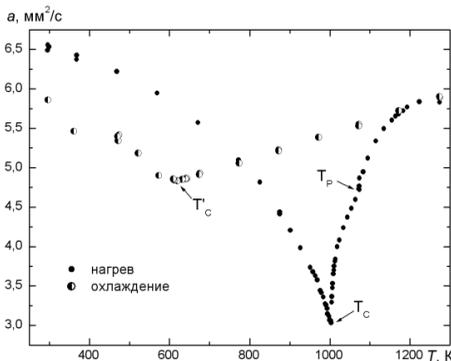
Научные руководители – д-р физ.-мат. наук А. Д. Косинов, канд. физ.-мат. наук Ю. Г. Ермолаев

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ ФЕРРИТНО- МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ ЭК-181 В ШИРОКОМ ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР

А. Ш. Агажанов, Д. А. Самошкин

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск

Методом лазерной вспышки с погрешностью 2 – 4% измерен коэффициент температуропроводности ферритно-мартенситной стали марки ЭК-181 в интервале температур от 296 до 1274 К. Исследовалась жаропрочная комплексно-легированная 12%-ная хромистая сталь нового поколения, которая рассматривается в качестве перспективного конструкционного материала для ТВЭЛов ядерных реакторов на быстрых нейтронах[1].



Температурная зависимость коэффициента температуропроводности стали ЭК-181 (без учета теплового расширения).

По результатам наших измерений (см. рис.) определены точки Кюри стали при нагреве  $T_C$  и охлаждении  $T'_C$ , а также температура полиморфного перехода «мартенсит-аустенит»  $T_P$  с погрешностью  $\pm 5$  К.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-08-00785).*

1. Леонтьева-Смирнова М.В., Агафонов А.Н., Можанов Е.М., Чернов В.М. Свариваемость жаропрочных 12%-ных хромистых сталей ЭК-181 и ЧС-139 // Вопросы атомной науки и техники. – 2011. – № 4. – С. 14 – 21.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. С. В. Станкус

## ТЕРМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И КОЭФФИЦИЕНТЫ ВЗАИМНОЙ ДИФФУЗИИ ЖИДКОЙ СИСТЕМЫ НАТРИЙ-СВИНЕЦ В ШИРОКОМ ИНТЕРВАЛЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ\*

Р. Н. Абдуллаев<sup>1,2</sup>, А. Ш. Агажанов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет

<sup>2</sup>Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск

Основными проблемами при использовании чистого натрия в качестве теплоносителя для ядерных реакторов на быстрых нейтронах являются его пожаро- и взрывоопасность при контакте с водой. Для устранения этих проблем в работе [1] предлагается использовать жидкие сплавы натрия со свинцом. В настоящее время проводятся целенаправленные экспериментальные исследования свойств сплавов Na–Pb для выбора оптимального теплоносителя. Однако их теплофизические свойства исследованы недостаточно надежно и подробно.

В данной работе методом просвечивания образцов узким пучком гамма-излучения исследованы температурные зависимости плотности жидкой системы натрий-свинец в широком интервале концентраций (от 0 до 70 ат. % Pb) и при температурах от линии ликвидуса до 950 К. В изученных интервалах температур плотность расплавов линейно, или слабо нелинейно (для сплава, содержащего 21,03 ат. % Pb) зависит от температуры. Также изучена кинетика гомогенизации расплавов Na–Pb для ряда составов и при температурах 550–950 К. Методика исследований основана на непосредственной регистрации профилей концентрации и плотности в негомогенных жидких образцах и их эволюции во времени. Из этих экспериментов определены коэффициенты взаимной диффузии  $D$ .

По результатам данной работы построены концентрационные и температурные зависимости изученных свойств жидкой системы Na–Pb и проведено сопоставление полученных результатов с литературными данными.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-08-00192\_а).*

---

1. И.И. Засорин, Л.М. Кузнецова, В.В. Кумской и др. Исследование свойств сплава натрий-свинец с целью выбора состава пожаробезопасного теплоносителя // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2008. – № 4. – С. 72–77.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук Р. А. Хайрулин

## **АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДЕРЕВА В ПРОЦЕССЕ РОСТА ПРИ РАЗНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ.**

А. И. Болтаев

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича  
СО РАН, г. Новосибирск

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет

При использовании древесины в качестве конструкционного материала необходимо считаться с рядом особенностей её физико-механических свойств [1,2]. А именно, изменением в процессе роста плотности, теплоёмкости, коэффициентов температурного расширения, теплопроводности; разносопротивляемость; сложный характер зависимости между напряжениями и деформациями. В свою очередь они влияют на способность древесины сопротивляться внешним воздействиям.

В данной работе была поставлена задача исследовать напряжённо деформированное состояние древесины с учётом указанных выше особенностей. А также попытка аналитически связать прочностные и физические свойства древесины.

С этой целью были проанализированы имеющиеся экспериментальные данные по вышеописанным свойствам и характеристикам древесины. На основе метода наименьших квадратов получены аналитические зависимости для описания указанных свойств и характеристик. Это позволило определить напряжения и деформации в стволе растущего дерева, а также их изменение во времени.

Данный подход является новым. Он позволяет уточнить расчётную схему древесины, приближая её математическую модель к действительности, что в дальнейшем позволит уточнить методику расчёта деревянных конструкций.

---

1.Немировский Ю. В. “Расчёт деревянных конструкций с учётом неоднородности свойств” Труды НГАСУ, 2011 г, т.14 N1(SO), с. 5-12.

2.Немировский Ю. В. Расчет и рациональное проектирование деревянных стержневых элементов / Ю. В. Немировский // Современные проблемы совершенствования и развития конструкций в строительстве и на транспорте : тр. III Меж-дунар. науч.-техн. конф. – Самара, 2005. – С. 247–251.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. Ю. В. Немировский

## УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ И УДАРНЫЕ АДИАБАТЫ ГАЗОВ С УЧЕТОМ ДИССОЦИАЦИИ, ИОНИЗАЦИИ И ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ

Т. А. Бондаренко

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Целью работы являлось построение расчетной модели, которая позволит в широком диапазоне температур определять термодинамические параметры разреженных газовых смесей, находящихся в химическом равновесии.

Для построения уравнения состояния использовалось приближение смеси идеальных газов. Предполагая химическое равновесие между всеми образующимися компонентами газовой смеси, в том числе и ионизационными, при заданном брутто составе, фиксированной плотности и температуре определялись равновесные концентрации всех компонент, используя затабулированные константы химических реакций [1]. При этом численно решалась система нелинейных уравнений. Также учитывалось образование конденсированной фазы углерода (С) и оксида кремния (SiO<sub>2</sub>), в этом случае использовались зависимости давлений насыщенных паров от температуры. По известному химическому составу, давление вычислялось как сумма парциальных давлений каждой компоненты смеси. Энтальпия и внутренняя энергия газа зависели только от температуры и определялись как сумма энтальпий отдельных составляющих, которые, в свою очередь, тоже брались из таблицы [1].

На основе построенной модели реализован численный алгоритм, позволяющий вычислять равновесный химический состав около 50 относительно простых химических соединений на основе элементов – С, О, Н, N, Ar, Si в диапазоне температур от 200—20 000 К. Кроме того, в работе реализован «калькулятор» параметров ударных и детонационных волн, позволяющий вычислять параметры реагирующей смеси газов, таких как H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, C<sub>2</sub>N<sub>2</sub>, SiH<sub>4</sub>. Разработанный «калькулятор» представляет собой инструмент с удобным Web – интерфейсом и доступен по адресу [ancient.hydro.nsc.ru/chem](http://ancient.hydro.nsc.ru/chem).

---

1. Глушко В.П. Термодинамические свойства индивидуальных веществ // «Наука». 1978.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Э. Р. Прууэл

## **ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ МЕХАНОАКТИВИРОВАННОЙ УГОЛЬНОЙ ПЫЛЕВЗВЕСИ**

Е. Б. Бутаков

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Одной из основных задач сжигания твердого топлива в пылевидном виде является обеспечение быстрого воспламенения и полного выгорания пылевзвеси с высоким. А эти процессы в большой мере определяются кинетическими характеристиками твердых топлив при их воспламенении и горении. Однако при этом до настоящего времени в российской энергетике при пылеприготовлении не обращалось внимание на способы измельчения и процессы механоактивации, оказывающие очень большое влияние на изменение кинетических характеристик исходного топлива.

С точки зрения определения оптимальной системы механоактивационного измельчения угля на основании опытов по сжиганию на различных типах мельниц был выбран дезинтегратор. Эффектом помола дезинтегратора обычно называют приоритет удельной удельной поверхности, получаемый при помоле, т.е фактически число геометрических характеристик дисперсного материала.

Для проведения эксперимента сконструирован и подготовлен к испытаниям стенд работающий на механоактивированных углях микропомола. Происходила калибровка по равномерности температуры в печи, для точного определения начальной температуры на участке воспламенения. Определялась энергия активации при различных стадиях метаморфизма угля.

Результаты проведенных исследований по сжиганию твердых топлив (углей различной стадии метаморфизма и растительного сырья) будут использованы при выработке рекомендаций по: экологически чистому и энергоэффективному сжиганию твердых топлив в существующих энергетических технологиях, разработка новых типов котлов на пылевидном механоактивированном топливе, замещению технологий сжигания угля в слоевых топках факельным сжиганием механоактивированных углей микропомола.

Научный руководитель – д-р техн. наук, проф. А. П. Бурдуков

## **РАСЧЕТ ТЕЧЕНИЯ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ В СОПЛАХ С УЧЕТОМ РАВНОВЕСНЫХ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ В ГАЗОВОЙ ФАЗЕ**

Д. А. Ворожейкина

Томский государственный университет

В настоящее время прорабатываются двигатели, работающие на новых экологически безопасных топливах, либо топливах с добавками нанопорошков металлов. В этих случаях используемые методики расчета должны учитывать изменение состава продуктов сгорания вдоль газодинамического тракта прорабатываемых энергоустановок. Учет изменения состава продуктов сгорания можно проводить в предположении локального химического равновесия в выбранном поперечном сечении газодинамического тракта.

В данной работе предлагается методика расчета квазиодномерных двухфазных течений в соплах с учетом равновесных химических реакций в газовой фазе, основанная на решении обратной задачи сопла Лавала. Рассматривается квазиодномерное двухфазное стационарное равновесное течение (газ + частицы) продуктов сгорания вдоль газодинамического тракта. Газ является идеальным, химически не реагирующим, давление создается только газом. Теплоемкости, массовый расход газа и массовый расход частиц вдоль по течению постоянны. Также эффекты вязкого трения и теплообмена принимаются во внимание только в процессе взаимодействия газа и конденсированной фазы.

Для реализации алгоритма полагается известным распределение давления вдоль газодинамического тракта. Для его определения по заданному начальному контуру сопла из расходной функции рассчитывается число Маха в заданном сечении и определяется само давление. Затем из решения дифференциальной системы уравнений, описывающей течение газа в сопле, определяются остальные параметры течения, и восстанавливается профиль сопла.

Алгоритм реализован в виде программы «CalcOZSL 2.0» на языке C++ с использованием программной платформы NET Framework 4.0. В программу включена библиотека графической визуализации результатов расчетов. При разработке особое внимание уделялось эффективности и удобству использования. Верификация программы расчета проведена путем сравнения с газодинамическими функциями.

Научный руководитель – И. В. Еремин

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ ДВУХ ПЛОСКИХ ТЕЛ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА**

А. А. Егоров

Самарский государственный технический университет

Сложные аналитические решения задач циклического контактного теплообмена в форме систем интегральных уравнений приведены к критериальному виду и экономным численным анализом преобразованы в полиномиальные модели на основе применения методологии планирования эксперимента. Аппроксимация искомых функций осуществлялась по дискретным точкам с использованием формул Бонне, вычисления показали достаточно быструю сходимость приближений и при практических расчетах число итераций составляло 7-11. Получены 13 критериальных уравнений регрессионного типа, содержащие наиболее важные и разнородные по составу и структуре образования характеристики квазиустановившейся стадии циклического контактного теплообмена. Оценка адекватности моделей выполнена с помощью множественного коэффициента корреляции.

Таким образом, на основе разработанной методики планирования численного эксперимента построены в безразмерном виде математические полиномиальные модели изменения наиболее важных характеристик системы, эти модели получены наиболее экономным способом и адекватно описывают тепловое состояние системы "заготовка- пограничный слой-инструмент" на квазиустановившейся стадии ЦКТ. Полученные модели аппроксимационного типа дают возможность в наглядной и компактной форме всесторонне проанализировать тепловой режим контактного взаимодействия двух плоских тел в безразмерном многофакторном пространстве с учетом взаимного влияния и значимости каждого из выбранных факторов, а также определить оптимальные значения параметров.

Научный руководитель – канд. тех. наук В. В. Стулин

## **МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ И ПРОЧНОСТНОЙ АНАЛИЗ КАМЕРЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БИОРЕАКТОРА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS**

С. Д. Замбалов, И. А. Яковлев, Е. В. Сиротинин  
Томский государственный университет

С развитием современной микробиологической промышленности все более ужесточаются требования по безопасности и надежности, аппаратов для проведения исследований. Сложности проектирования современных биореакторов связаны с необходимостью комплексного учета гидродинамики рабочего процесса и механики отдельных узлов конструкции.

В данной работе рассматривается элемент конструкции биореактора – камера распределения. Биореактор относится к аппаратам для проведения биохимических процессов и предназначен для выращивания различных видов микроорганизмов.

Моделируется нестационарный гидродинамический процесс. Нестационарность процессов в биореакторе обусловлена наличием входных пульсации давления, создаваемых насосом. Нестационарность поля давления, в свою очередь, приводит к динамическому отклику стенок конструкции и, соответственно, обратному влиянию на течение.

Решение связанной задачи гидродинамики и прочности осуществлялось в программном комплексе ANSYS с применением технологии FSI (Fluid Solid Interaction – газо-структурное взаимодействие).

Проведено совместное численное моделирование нестационарного течения жидкости на деформируемой расчетной сетке и расчетнапряженно-деформированного состояния конструкции под воздействием динамических нагрузок при рабочем режиме работы биореактора.

В результате компьютерного моделирования получены данные о полях скоростей и давлений внутри камеры распределения, а также параметрах динамической реакции конструкции в виде НДС на нестационарную гидродинамическую нагрузку. Полученные данные учтены для оптимизации последующих вариантов конструкции биореакторов.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. В. А. Скрипняк

## **МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОШАРОВ**

А. М. Игошкин

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича  
СО РАН, г. Новосибирск

В ряде современных технических приложений становятся востребованы наноматериалы, обладающие уникальными свойствами, такие, например, как фотонные кристаллы. Для того, чтобы адекватно описывать свойства конечного материала, необходимо исследование характеристик его составных элементов – различных наноструктур. Для их описания необходимы методы исследования динамических процессов на атомарном уровне. К ним относятся метод молекулярной динамики, Монте-Карло, а также прямые квантовые расчеты. Самым мощным среди них при работе с системами порядка нескольких тысяч частиц является метод молекулярной динамики, что обуславливает его актуальность при решении данной задачи.

В работе исследованы механические свойства металлических наночастиц с радиусами от 10 до 40 ангстрем. Для этого на первом этапе были рассмотрены медные структуры, обладающие идеальным кристаллическим строением. Они подвергались всестороннему сжатию, посредством которого моделировалось давление внешней среды. После чего производился анализ дальнейшей эволюции исследуемых наночастиц. В частности рассматривался комплекс энергетических и геометрических параметров, характеризующих колебательные процессы в данных структурах.

На следующем этапе было произведено формирование наночастиц с внутренней границей раздела посредством моделирования осаждения нанослоев из газовой фазы на наночастицу малого диаметра (10 ангстрем). В результате были получены структуры большего диаметра (25 ангстрем), содержащие дефекты кристаллической решетки. Последующий анализ, аналогичный случаю идеальных наночастиц, показал, что возникшие внутренние дефекты существенным образом влияют на механические свойства конечных структур.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук И. Ф. Головнев

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СОРБЕНТОВ ПО ОТНОШЕНИЮ К ГЕЛИЮ И ПАРАМ ВОДЫ**

И. В. Казанин, А.Ю. Пак

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича  
СО РАН, г. Новосибирск

На сегодняшний день гелий, в основном, получается из природного газа с содержанием гелия менее 0,5% посредством применения криогенных технологий. При этом обычно требуется охлаждение всего объема углеводородов, что делает разделение газовой смеси на компоненты весьма энергоемким и дорогостоящим. Поэтому актуальным является создание новых и более эффективных некриогенных способов производства гелия.

Можно выделить два основных некриогенных метода разделения газовых смесей: мембранный и сорбционный. Целью данной работы было исследование эффекта избирательной проницаемости наноструктурированных микрообъектов для гелия, а также исследование их адсорбционных характеристик по отношению к парам воды.

В работе приводятся результаты экспериментального исследования динамики процессов поглощения и дегазации гелия различными типами сорбентов с наноструктурированными проницаемыми границами: алюмосиликатными модифицированными цеолитами и композитным гранулированным сорбентом на основе стеклянных микросфер и псевдобенита. В качестве рабочих газов при исследовании применялись: воздух, метан, гелий, воздушно-гелиевые и метан-гелиевые смеси. Для насыщения газов и смесей парами воды использовался специальный увлажнитель.

Эксперименты продемонстрировали, что исследованные типы сорбентов являются непроницаемыми для воздуха, метана и проницаемыми для гелия. Композитный сорбент продемонстрировал высокую адсорбционную способность по отношению к парам воды. Также следует отметить, что степень насыщения композитного сорбента парами воды практически не оказывает влияния на темпы процессов сорбции и десорбции гелия данным типом сорбента.

Работа выполнена при финансовой поддержке интеграционного проекта СО РАН № 91, гранта Президента РФ для молодых ученых (МК-6657.2012.1) и гранта Президента РФ для ведущих научных школ (НШ-1541.2012.1)

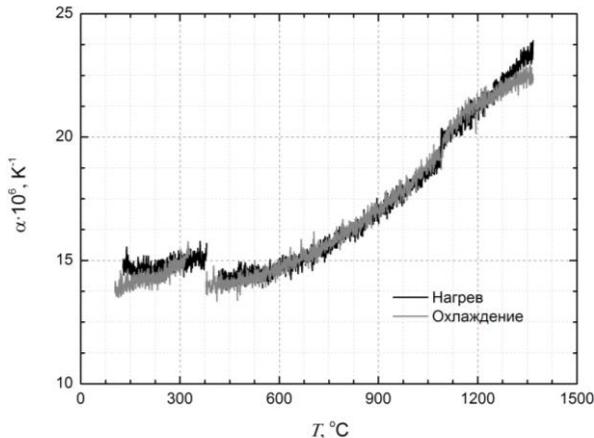
Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, доцент В. Н. Зиновьев

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ ВЫСОКОЧИСТОГО КОБАЛЬТА

Ю. М. Козловский

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск

Дилатометрическим методом в интервале температур 20 – 1400°C подробно исследовано тепловое расширение высокочистого кобальта (99,99 %). Измерения выполнены в атмосфере аргона (99,992 %) с погрешностью не более 3%. На рисунке представлены некоторые результаты по истинному коэффициенту теплового расширения ( $\alpha$ ). Видны две области аномального изменения  $\alpha$ . Первая, при 350 – 400°C, связана со структурным ГПУ-ГЦК превращением, которое протекало с заметным гистерезисом (46°C) в цикле нагрева-охлаждения образца и сопровождалась незначительным скачком плотности. Во второй, при 1088°C, ферромагнитный кобальт переходит в парамагнитное состояние.



Разработаны справочные таблицы температурных зависимостей термических свойств. Подробно изучено изменение  $\alpha$  в окрестности точки Кюри. Данные при температурах выше 1000°C фактически получены впервые и в настоящее время остаются единственными.

*Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований Президиума РАН №2.*

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук С. В. Станкус

## ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕМЕННОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОНФИГУРАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ГОРЕНИЕ

В. С. Козулин

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича  
СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

В настоящее время во всем мире значительная часть энергии вырабатывается при сжигании органических топлив. Поэтому актуальны задачи оптимизации процессов горения, совершенствования технологий, позволяющих повысить к.п.д. энергетических агрегатов и снизить количество вредных выбросов.

Воздействие электрических полей (ЭП) является эффективным средством контроля и управления пламенем (т.к. в зоне реакции присутствует ионизованная среда). Однако отсутствуют публикации, в которых было бы рассмотрено влияние вращения ЭП на горение.

В работе представлены предварительные результаты экспериментального исследования влияния переменной пространственной конфигурации слабого ЭП на диффузионное горение пропана в двух режимах: ламинарном и переходном к турбулентному. Рассмотрено влияние поля на интегральные характеристики пламени: длину факела и, качественно, тепловыделение вдоль него.

Для исследования была разработана и создана схема с изменяемой во времени пространственной конфигурацией ЭП, состоящая из горелки диффузионного типа (анод), расположенной по центру от 8 электродов (катодов), переключаемых механически последовательно.

В опытах наблюдается смещение максимума интенсивности излучения и, соответственно, функции тепловыделения [1], уменьшается эффективная длина факела. Полный интеграл интенсивности сохраняется. Установлено существование частот, при которых пламя не успевает перестраиваться за ЭП.

Работа выполнена при финансовой поддержке ПП РАН №26 «Горение и взрыв» (проект №9).

---

1. С. С. Воронцов, В. А. Константиновский, П. К. Третьяков  
Определение полноты сгорания водорода в сверхзвуковом потоке  
оптическим методом.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. В. Тупикин

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УГАРНОЙ ПЫЛЕВЗВЕСИ ПО ТЕМПЕРАТУРЕ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ**

А. В. Кузнецов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Необходимость перехода на угольное топливо сегодня ни у кого не вызывает сомнений, ведь остальных топливных ресурсов хватит на меньший срок, а стоимость их гораздо выше. Угольное топливо в мировой энергетике используется значительно интенсивнее чем в России, несмотря на то, что наша Россия занимает третье место в мире по запасам угля. Причиной этому является отсутствие технологической. Как показывает зарубежная практика, все затраты окупаются в предельно короткие сроки.

Предлагается технология использования углей микропомола для замещения относительно дорогого газа и мазута при розжиге и стабилизации горения пылеугольного факела в энергетических котлах, а также объектах протеплоэнергетики. Технология включает в себя процессы микропомола, термогазоподготовки и механоактивации.

В данной работе определялись характеристики пылевзвеси механоактивированного угля по температуре самовоспламенения. Температура самовоспламенения измерялась с помощью экспериментальной установки, основными элементами которой являются нагреватель, сделанный из кварцевой трубы и нихромовой проволоки, держатель пыли и баллон с воздухом. Температура измерялась термопарой, а вспышка регистрировалась фотоэлементом. Считается, что воспламенение произошло, если вспышка пламени была видна на нижнем конце кварцевой трубки.

Полученные результаты позволяют определить самый эффективный метод обработки угля, тем самым максимально выгодно использовать уголь в топочных процессах.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН  
С. В. Алексеенко

## **ДИНАМИКА РАСПРОСТРАНЕНИЯ САМОПОДДЕРЖИВАЮЩЕГОСЯ ФРОНТА ИСПАРЕНИЯ ПРИ НОРМАЛЬНОЙ И УМЕНЬШЕННОЙ ГРАВИТАЦИИ**

Д. В. Кузнецов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

В настоящее время существует достаточное количество моделей, описывающих распространение самоподдерживающегося фронта испарения. Во всех моделях межфазная граница рассматривается как гладкая, невозмущенная, в то время как эксперименты показывают наличие мелкомасштабных возмущений, приводящих к резкому увеличению скорости распространения фронта. В одной из моделей было выдвинуто предположение, что причиной возникновения мелкомасштабных возмущений межфазной границы является развитие неустойчивости Ландау.

Плотность теплового потока через межфазную границу, необходимая для развития неустойчивости Ландау зависит, в том числе, от величины ускорения свободного падения. Экспериментальные исследования динамики распространения самоподдерживающегося фронта испарения в условиях измененной гравитации могут дать дополнительную информацию для понимания механизма интенсификации теплообмена через межфазную границу фронта испарения.

Эксперименты проводились в жидком фреоне R21 при температуре насыщения и приведенном давлении 0.04. Ступенчатое тепловыделение обеспечивало разогрев теплоотдающей поверхности с темпами 1250-4970 К/с. Эксперименты проводились в условиях нормальной гравитации, затем при фиксированной уменьшенной гравитации  $0.01 \pm 0.005g$ . В экспериментах определялась зависимость локальной скорости фронта испарения от перегрева теплоотдающей поверхности.

В результате исследований не обнаружено заметного влияния величины гравитации на зависимость скорости распространения самоподдерживающегося фронта испарения от перегрева теплоотдающей поверхности.

Научный руководитель – канд. техн. наук В. Е. Жуков

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕКОНДЕНСИРУЕМЫХ ГАЗОВ НА МАССООБМЕН ПРИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ В ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛАХ

М. Е. Кузнецова

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

В ядерных реакторах на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем над теплоносителем имеется газовая подушка из инертного газа, играющая роль защитной атмосферы, которая в случае разгерметизации контура должна минимизировать взаимодействие теплоносителя с окружающей средой. Хорошо растворимый при высоких температурах газ влияет не только на процесс кипения, но и на процесс последующей конденсации.

В предлагаемой работе:

1) Из анализа температурной зависимости частоты гомогенного зародышеобразования, рассчитанной по предложенной в [1] модели, определена величина достижимого перегрева бинарного раствора натрия – аргон при различных концентрациях растворенного газа.

2) Представлены результаты теоретического исследования влияния неконденсируемых газов на межфазный массообмен при конденсации паров жидких металлов. Получена зависимость коэффициента межфазного массообмена от массовой доли неконденсируемого газа. Наблюдается хорошее согласие с экспериментальными данными [2].

Кроме того, для корректного описания начальных стадий фазовых превращений, которые в случае с жидкими металлами характеризуются большой глубиной проникновения в метастабильную область, на основе эмпирических закономерностей, приведенных в [3], были рассчитаны свойства газообразного и жидкого натрия за границей равновесия фаз.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-08-31010 мол\_a)

---

1. Nucleation theory and applications/ V.G. Baidakov , WILEY-VCH, – 2005. – P. 126 – 214.

2. Kroger D.G , Rohsenow W. M. Condensation heat transfer in the presence of a non-condensable gas// Int. J. Heat Mass Transfer. – 1968. – V. 12. – P. 15 – 26.

3. Метастабильная жидкость / В.П. Скрипов, Наука, – 1972. – 312 с.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук С. И. Лежнин

## ЗАДАЧА КОНТАКТНОГО КРУЧЕНИЯ ДЛЯ ОБЪЕКТА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

А. В. Малоземов, А. В. Уколов  
Томский государственный университет

Механика контактных взаимодействий деформируемых твердых тел занимает центральные позиции в области механики деформируемого твердого тела. В современном машиностроении существует тенденция повышения эксплуатационных характеристик деталей, подвергающихся деформациям, в том числе при скручивании. В частности, знаменитые автомобильные концерны уделяют большое внимание моделированию контактных задач теории упругости. Объектами таких задач являются коленчатые и распределительные валы, передние оси автомобилей, валы и оси трансмиссии, пружины, торсионны. Моделирование выполняется на стадии проектирования деталей и позволяет выбрать оптимальные параметры по различным критериям. К тому же, математическое моделирование позволяет сократить затраты на разработку технологического процесса.

В данной работе рассматривается пространственная задача теории деформации. Отражены модифицированные уравнения Навье – уравнения равновесия записанные в перемещениях. Рассматривается схема численного решения методом простых итераций на неравномерной экспоненциально сгущающейся на пятне контакта разностной сетке.

Далее обосновывается возможность сведения пространственной задачи к плоской задаче контактного кручения. В результате чего, получаем уравнение для окружной компоненты перемещения и соотношения, определяющие напряжения. Таким образом, на основании изложенного материала получена вычислительная технология решения подобных задач, использующая простой итерационный метод. В случае однородного кручения удалось построить достаточно простое аналитическое решение. Была решена задача деформации стального стержня при кручении. На основании анализа полученных результатов сделаны соответствующие выводы. Если возникающие напряжения выше допустимых, следует увеличить пятно контакта, или упрочнить заданную область путем нанесения слоя другого металла. Визуализация результатов представлена с помощью программного пакета MATLAB.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. А. М. Бубенчиков

## **ВЛИЯНИЕ ПАРОЦИКЛИЧЕСКИХ МЕТОДОВ НА ДОБЫЧУ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СКВАЖИНЫ В ОБЛАСТИ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ**

В. Ю. Маслова

Тюменский государственный университет

В последние годы новые месторождения и залежи открываются не так часто, а запасы легкой маловязкой нефти значительно уменьшились, в связи с чем возникает необходимость разрабатывать месторождения с тяжелой высоковязкой нефтью.

На сегодняшний день существует достаточно большое количество методов улучшения нефтеотдачи (МУН), в настоящее время наиболее развиты четыре группы методов: физико-химические, газовые, микробиологические, термические. Данная работа посвящена именно последним, к ним относят внутрислоевого горение, паротепловые воздействия, пароциклические обработки. В частности в работе исследуется пароциклическое воздействие на пласт.

Задача решалась в следующей постановке: в вертикальную скважину, находящуюся в области вечной мерзлоты закачивается теплоноситель (пароводяная смесь). Целью работы было определить какое количество теплоты дойдет до забоя скважины, и на какой глубине смесь полностью сконденсируется. Преимущество работы в том, что до этого задача не решалась в подобном виде, и, что при ограниченном количестве входных данных – параметры теплоносителя, на выходе получаем полную картину тепловых полей. Данная задача была разбита на внутреннюю и внешнюю.

Во внутренней задаче анализировалось движение двухфазного однокомпонентного теплоносителя по стволу скважины, т.е. гетерогенный поток. Для ее решения была составлена фундаментальная система дифференциальных уравнений, состоящая из уравнения неразрывности, закона сохранения импульса и закона сохранения энергии, дополненная замыкающими соотношениями, учитывающих взаимодействие фаз и гидравлические сопротивления.

Во внешней задаче искалась область прогрева грунта при наличии зоны вечной мерзлоты. Решалась тепловая задача, условием термодинамического равновесия которой является равенство температур.

Для поиска решения был составлен программный комплекс, позволяющий оперативно решать подобные задачи. Он основан на методе контрольного объема, в котором рассматривается фиксированный объем, для получения характеристик течения в конкретной точке.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, доцент А. П. Шевелев

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНЖЕКЦИИ ЖИДКОГО АЗОТА В ВОДУ

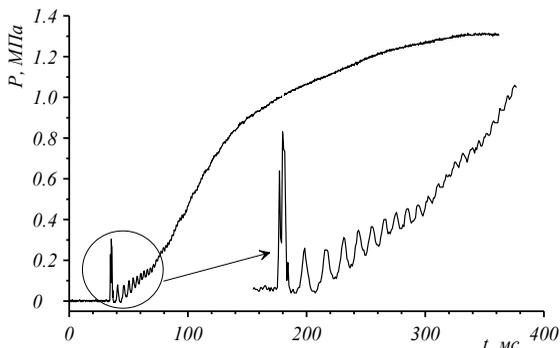
А. В. Мелешкин

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск

Целью данной работы было экспериментальное исследование процесса взрывного вскипания жидкого азота инжектированного в воду. Практической частью работы служит изучение применимости полученных результатов в ударно-волновом методе получения газогидратов.

В результате экспериментальных исследований было получено, что струя жидкого азота, достаточно быстро введенная в толщу воды, вскипает взрывным образом, видимо, по типу вскипания при метастабильном перегреве. Амплитуда развивающихся при этом скачков давления определяется геометрией места инъекции, в данном случае граничные условия определяются положением свободной поверхности воды.

На величину давления оказывает влияние наличие свободного объема. Так при заполнении водой на 84% от объема рабочего участка давление достигает 0,8 МПа. При заполнении водой на 92% рост давления составляет 1.3 МПа. Но это не предельные значения, которые можно получить в таком процессе. На рис. 1 показаны экспериментальные данные инжектирования жидкого азота в воду.



*Рис. 1. Профиль волны давления в процессе инжектирования жидкого азота при расположении датчика давления на расстоянии 27 см от места ввода азота.*

Научный руководитель – академик РАН В. Е. Накоряков

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАМЕНИ В МОДЕЛИ МЕЗОМАСШТАБНОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

А. В. Назаров

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Развитие малогабаритных электронных устройств требует разработки особых источников питания высокой энергоемкости. Камеры сгорания микро и мезо масштабов являются альтернативными источниками питания для многих энергопотребляющих систем.

Источники питания на основе термофотопреобразователей (TRV) являются экономически выгодными наряду с другими системами преобразования энергии, благодаря непосредственному преобразованию энергии излучения в электрическую. Благодаря высокой гравиметрической плотности энергии сжиженных углеводородов (~50 МДж/кг), система TRV способна конкурировать с современными литиевыми аккумуляторами (~0.6 МДж/кг).

Основная проблема сжигания топлива в камерах малого масштаба – это неустойчивость процесса горения. Закрутка топливной смеси благоприятно сказывается на структуре течения, что позволяет повысить пределы устойчивости устройства. В зависимости от интенсивности она изменяет размер, форму и устойчивость факела, и интенсивность процесса горения.

Основная цель работы – определение пределов устойчивости горения в цилиндрической камере с тангенциальным подводом топливной смеси, а также влияние различных параметров на распространение пламени внутри камеры.

Для работы была изготовлена модель цилиндрической камеры с двумя тангенциальными входами, которые создают закрученный поток. В ходе проведенных опытов было выяснено, что при уменьшении размеров камеры, возникают сложности с поддержанием устойчивого горения в трубке. Существует некий оптимум между трубкой малого и большого диаметров. Дальнейшую работу целесообразно проводить на трубке с внутренним диаметром 21 мм. Также была обнаружена область рециркуляции потока на выходе из камеры. Для уменьшения зоны рециркуляции целесообразно устанавливать на выход диафрагму. Дальнейшее исследование направлены на коррекцию устройства и получение картины течения внутри камеры.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук С. И. Шторк

## БИМОДАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТИЦ В ПРОДУКТАХ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ

О. О. Петрова-Богданова  
Конструкторско-технологический институт  
научного приборостроения СО РАН  
Новосибирский государственный технический университет

Термин “абляция” означает удаление макроскопического количества материала с твердой поверхности при облучении мишеней высокоэнергетичными пучками частиц или света [1-2]. Это явление все чаще применяется в различных областях лазерных технологий, а также в работах, посвященных фундаментальным исследованиям. Как известно, при низкой мощности импульса вещество испаряется или сублимирует в виде свободных молекул, атомов и/или ионов. В данной работе построена поверхность скоростей зародышеобразования при абляции для образца твердой фазы. Топология этой поверхности позволяет уточнить детали кинетики зародышеобразования в твердом теле и продуктах абляции. Это позволяет корректно объяснить найденные экспериментально бимодальные спектры размеров частиц, где одна мода соответствует кристаллическим, а другая жидким (или аморфным) частицам. Применение одноканальной версии теории нуклеации является ошибочным для описания скоростей зародышеобразования в продуктах абляции, где реализуются два канала нуклеации. Из имеющихся экспериментальных данных по абляции можно сделать вывод, что при малой мощности в импульсе образуются только паровые зародыши. При превышении некоторого порога по энергии появляются зародыши жидкой фазы, которые приводят к появлению второго пика в спектре размеров частиц.

*Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 11-03-00049 а.*

---

1. М. Н. Либенсон, Г. Д. Шандыбина, А.Л. Шахмин. ЖТФ, 2000, т.70, вып.9. с.124-127.

2. Синтез наноразмерных материалов при воздействии мощных потоков энергии на вещества / под ред. А.В. Булгакова, Н.М. Булгаковой, И.М. Буракова и др. – Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2009. – С. 399–444.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук М. П. Анисимов

## **ИССЛЕДОВАНИЕ КАВИТАЦИИ ВЫСОКОВЯЗКОГО ГАЗОНАСЫЩЕННОГО РАСПЛАВА ПРИ ЕГО БЫСТРОЙ РАЗГРУЗКЕ**

А. А. Пильник

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Наблюдения показывают, что при декомпрессии газонасыщенного расплава происходит его кавитация, т. е. в объеме расплава начинают формироваться и расти кавитационные пузырьки. Это связано с тем, что равновесная концентрация летучих компонентов в расплаве уменьшается при уменьшении давления. Таким образом, в результате декомпрессии текущая концентрация растворенного газа может превзойти равновесную и газ начнет покидать расплав. Зарождение пузырьков в пересыщенном расплаве происходит флуктуационным путем. При этом частота зарождения газовых пузырьков (количество пузырьков, появляющихся за единицу времени в единице объема) сильно зависит от величины пересыщения.

Зарождение и рост пузырьков в вулканической магме считается основным механизмом, лежащим в основе эксплозивных вулканических извержений. По данным исследователей некоторые виды магматических расплавов содержат до 6 % растворенных веществ (в основном воды и углекислого газа). В результате столь большого пересыщения при декомпрессии магма начинает интенсивно кавитировать. При этом растущие пузырьки выталкивают магму вверх по вулканическому каналу, являясь движущей силой вулканического извержения.

В работе рассмотрена кинетика зарождения и развития кавитации высоковязкого газонасыщенного расплава быстро приведенного в разгруженное состояние. Детально исследована динамика роста пузырька, с учетом формирующегося вокруг него градиента вязкости. В кинетических уравнениях, описывающих суммарное превращение, учтен эффект формирования вокруг пузырьков диффузионного погранслоя, зарождение новых пузырьков в котором существенно подавлено. Проведены соответствующие оценки, необходимые для проверки сделанных в модели предположений. Проведено численное исследование полученной модели.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, доцент А. А. Чернов

## **ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНАЯ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ НЕСОВЕРШЕННОГО ГАЗА**

А. С. Попова

Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова,  
г. Якутск

До настоящего времени расчеты, необходимые для проектирования разработки и для эксплуатации газовых и газоконденсатных месторождений основаны либо на использовании математических моделей совершенного газа, либо на введении неких поправок на несовершенство газа, но с осреднением соответствующих термодинамических функций (коэффициента несовершенства и коэффициента дросселирования) во всем диапазоне изменения давления и температуры. Очевидно, что такой подход не только имеет ограниченное применение, но и методологически неприемлем, ибо не имеет никакого научного обоснования и не может быть систематизирован. С прикладной точки зрения он также не оправдан, ибо несовместим с современными тенденциями вовлечения в разработку месторождений, расположенных на больших глубинах, то есть имеющих высокие давления и температуры.

В данной работе на примере плоскопараллельных потоков газа в пористой среде выполнен анализ взаимного влияния термодинамики и поля скоростей фильтрации, а также – входных параметров математической модели в терминах граничных и начальных условий. Для математического описания неизотермической фильтрации несовершенного газа использовалась нелинейная система дифференциальных уравнений в частных производных, полученная из законов сохранения массы и энергии и закона Дарси, а в качестве замыкающих соотношений – физическое и калорическое уравнения состояния. Граничные условия соответствуют нагнетанию газа при заданном массовом расходе или давлении. В качестве уравнения состояния принимается уравнение Латонова-Гуревича, которое дает достаточную точность при высоких давлениях и температурах.

Получено, что особенности термодинамических процессов при фильтрации несовершенного газа следует изучать совместно с процессами переноса газа фильтрационным потоком, ибо только в этом случае можно увидеть их взаимозависимость. В настоящем исследовании это проявилось в том влиянии, которое оказывает теплопроводность на изменении температуры за счет эффекта дросселирования (Джоуля-Томсона) и адиабатического расширения (сжатия) газа.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, доцент И. И. Рожин

## ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПАРОВ ХЛАДАГЕНТА R-406A

Е. П. Расчектаева

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г.Новосибирск

Хладагент R-406A является эффективным заменителем для фреонов R-12 и R-500 с точки зрения простоты и быстроты замены, а также низкой стоимости и улучшения рабочих характеристик. Он представляет смесь 4 мас. %  $C_4H_{10}$  (R-600a), 41 мас. %  $C_2H_3ClF_2$  (R-142b) и 55 мас. %  $CHClF_2$  (R-22) и относится к группе переходных хладагентов. К сожалению, в литературе не удалось обнаружить справочных данных по теплофизическим свойствам R-406A в газообразном состоянии.

В работе представлены результаты измерений теплопроводности ( $\lambda$ ) пара R-406A в интервале температур 308 – 424 К и давлений 0,1 – 1,5 МПа, а также их обработки и статистического анализа. Эксперименты были выполнены стационарным методом коаксиальных цилиндров. Погрешность экспериментальных данных составляла 1,5 – 2,5% (погрешность измерения температуры – 0,05 К, давления – не более 4 кПа). Результаты измерений обрабатывались эмпирической зависимостью:

$$\lambda(T, p) = a_0 + a_{10} \cdot \frac{T}{100} + a_{20} \cdot \frac{100}{T} + p \cdot (a_{11} \cdot \frac{T}{100} + a_{21} \cdot \frac{100}{T}) + p^2 \cdot (a_{12} \cdot \frac{T}{100} + a_{22} \cdot \frac{100}{T}), (1)$$

где  $T$  – в К,  $p$  – в бар,  $\lambda$  – в мВт/(м·К). Отклонения экспериментальных данных от уравнения (1) не превышают 1,5%, а среднее квадратичное отклонение составляет 0,5%.

В работе показано, что зависимость (1) можно применить в широкой области параметров от атмосферного давления ( $\lambda_0$ ) до давления на линии конденсации ( $\lambda_d$ ). Получены температурные зависимости для  $\lambda_0$  и  $\lambda_d$ . Установлено, что в идеально-газовом состоянии теплопроводность трехкомпонентной смеси можно рассчитать по правилу аддитивности. Используя (1) рассчитаны справочные таблицы температурных и барических зависимостей теплопроводности хладагента R-406A и определены их погрешности.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 11-08-00065).*

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук С. В. Станкус

## **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ С ВОЛНАМИ В НАГРЕВАЕМОЙ ПЛЕНКЕ ЖИДКОСТИ**

А. А. Родионов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН  
Новосибирский государственный университет

Пленочные течения широко используются в металлургии, пищевой, химической и энергетической отраслях производства.

В большинстве случаев тонкая пленка жидкости стекает по нагреваемой подложке. Как известно, тепло и массоперенос в пленке зависит от ее толщины. При уменьшении толщины пленки возрастает теплоотдача и вероятность её разрыва. При изучении волновых характеристик пленок выделяют три зоны: область гладкой пленки, область двумерных волн и область трехмерных волн. Неустойчивость гладкой пленки к двумерным возмущениям и двумерных волн к трехмерным возмущениям рассматривалась как экспериментально, так и теоретически. Исследование течения изотермической пленки жидкости при распаде двумерных волн на трехмерные приведено в работе [1]. Показано, что длина волны неустойчивости к поперечным трехмерным возмущениям убывает с ростом числа Рейнольдса.

Влияние термокапиллярных возмущений на течение нагреваемой пленки жидкости при высоких числах Рейнольдса исследовано в работе [2].

В данной работе проведены экспериментальные исследования температурных и волновых характеристик стекающих пленок жидкости для числа Рейнольдса 50 и диапазоне тепловых потоков от 0 Вт/см<sup>2</sup> до 6 Вт/см<sup>2</sup>. Проведен анализ деформации двумерных и трехмерных волн при прохождении нагревателя, показано существование термокапиллярного и термокапиллярно-волнового режима течения пленки при числе Рейнольдса 50.

---

1. Liu J., Schneider J. B., Golub J.P. Phys. Fluids. 1995. V. 7. N 1. P. 55–67.

2. E.A.Chinnov, S.S. Abdurakipov. Thermal entry length in falling liquid films at high Reynolds numbers, ИЖМТ. 56 (2013) 775-786.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Е. А. Чиннов

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В СТЕКАЮЩИХ НЕДОГРЕТЫХ ПЛЕНКАХ ЖИДКОСТИ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИИ

В. С. Сердюков

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Режимы испарения и кипения в тонких пленках обеспечивают при малых расходах жидкости высокую интенсивность межфазного теплопереноса. Если теплообмен при испарении стекающей плёнки жидкости изучен достаточно всесторонне то зависимости, позволяющие достоверно описывать опытные данные по теплообмену при кипении и оценивать критические тепловые нагрузки в широком диапазоне изменения режимных параметров, на настоящий момент отсутствуют. Это касается, как кипения насыщенной жидкости, так и недогретой жидкости.

Работа выполнялась на экспериментальной установке для исследования пленочных течений жидкости, подробное описание которой представлено в работе [1]. Эксперименты проводились с использованием дистиллированной воды, подаваемой на рабочий участок при различной степени недогрева. В исследовании в качестве нагревательного элемента использовалась фольга из константана толщиной 25 и 50 мкм. Опытные данные по нестационарному коэффициенту теплоотдачи и температурам вскипания воды были получены с использованием синхронизированных во времени высокоскоростных инфракрасной термографии и видеосъёмки.

В работе показано, что локальный коэффициент теплоотдачи существенно изменяется по длине пробега плёнки жидкости в области малых тепловых потоков и имеет максимальное значение в зоне максимального недогрева жидкости в верхней части тепловыделяющей поверхности вдоль течения плёнки. Также показано, что температура вскипания жидкости зависит от плотности теплового потока при набросе и близка к соответствующим значениям температур, полученным в опытах по вскипанию воды при нестационарном тепловыделении в условиях большого объёма.

---

1. Surtaev A.S., Pavlenko A.N., Tsoi A.N. Transient heat transfer and development of crisis phenomena in falling liquid films at non-steady heat generation // Proc. of the ECI 8th International Conference on Boiling and Condensation Heat Transfer. Switzerland. Lausanne. – 2012. – 10 p.

Научный руководитель –чл.-корр. РАН А. Н. Павленко

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОГО НАГРЕВА ПЛОСКОГО СЛОЯ ЛЬДА

В. П. Слепцова

Физико-технический институт

Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова,  
г. Якутск

При вскрытии рек и озер важную роль играет радиационный нагрев льда [1]. Действие зачернения состоит в нарушении структуры льда при проникновении зачерняющих материалов вглубь ледяного покрова. Поглощаемая слоем льда солнечная энергия идет сначала на повышение его температуры до точки плавления, а затем вызывает внутреннее таяние. Управление таким процессом требует детального изучения формирования температурного поля, динамики фронта фазового перехода [2].

В данной работе решена задача плавления плоского слоя льда под воздействием падающего радиационного потока с использованием однофазной постановки задачи Стефана. В задаче рассчитывали температурное поле и нахождение свободной границы. Сделан анализ особенностей формирования температурного поля, движения фронта плавления или затвердевания в зависимости от определяющих параметров задачи (оптических свойств граничной поверхности, поскольку лед является светорассеивающей и светопоглощающей средой), а также с учетом зависимости оптических свойств от длины волны излучения и температурной зависимости теплофизических свойств льда. Алгоритм решения задачи радиационно-кондуктивного теплообмена реализован на языке программирования Фортран.

Анализ численных результатов свидетельствует о существенном влиянии степени черноты поверхности ледяного покрова на формирование температурного поля в глубинных слоях. Полученные результаты можно использовать для последующего моделирования с целью изучения реакции ледниковых покровов на разные изменения внешних условий, в противообледенительных целях.

---

1. Р. Р. Гилпин, Р. Б. Робертсон, Б. Сингх Радиационный нагрев льда. – Альберта, Канада, 1976.

2. Н. А. Рубцов, А. М. Тимофеев, Н. А. Саввинова Комбинированный теплообмен в полупрозрачных средах. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. – 198 с.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, доцент Н. А. Саввинова

## **ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ НАНОЖИДКОСТИ НА ОСНОВЕ ВОДЫ И ХИМИЧЕСКИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ОДНОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБ**

Р. Е. Соколов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск

С развитием высокоэнергичных технологий и ростом мощности электронных устройств возникает необходимость создания эффективных охлаждающих систем. Один из способов провести интенсификацию теплообмена – улучшить теплофизические характеристики теплоносителя. Этого можно добиться, повысив теплопроводность жидкости путём добавления твёрдых частиц с высокой теплопроводностью.

Особый интерес при создании таких суспензий представляют наночастицы. В отличие от частиц микронного размера они медленнее осаждаются, не приводят к засорению и износу каналов и не подавляют турбулентность дисперсной фазы. Суспензии на основе наночастиц называются наножидкостями.

В данной работе исследуется теплопроводность наножидкости на основе одностенных углеродных нанотруб (ОУНТ) и воды. ОУНТ синтезировались плазменно-дуговым методом на Ni/Co катализаторе роста. Для достижения устойчивости наножидкости использованы химически модифицированные ОУНТ с чистотой около 95%. Измерения проведены нестационарным методом нагретой проволоочки. Измерение параметров используемых ОУНТ осуществлено методами просвечивающей электронной микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света. Синтез наножидкости осуществлен методом ультразвуковой диспергации. Эксперименты проведены в диапазоне объемной доли углеродных нанотруб 0 – 0.2%. Для максимальной концентрации нанотруб обнаружено увеличение теплопроводности на 17% по сравнению с чистой жидкостью. Методика модификации нанотруб, использованная в работе позволила синтезировать устойчивую наножидкость, однако примерно через месяц после модификации наножидкость, синтезированная из того же материала начала терять устойчивость и свои аномальные теплопроводящие свойства. Исследования методами электронной просвечивающей микроскопии и КР показало изменение морфологии материала со временем, что проявилось в практически полной деградация углеродных нанотруб.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук С. А. Новопашин

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ ОТ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

К. Шежау

Казахский национальный технический университет им. К. И. Сатпаева,  
г. Алматы

Результаты изучения естественной конвекции в замкнутых объемах или около твердых поверхностей не теряют своей актуальности и имеют важное научно-практическое значение, что обусловлено значительным вкладом естественной конвекции при некоторых условиях в общий процесс теплообмена. То есть можно уверенно утверждать, что степень точности полученных данных по теплообмену во многом зависит от достоверности сведений о роли свободной конвекции в каждом конкретном случае. Научное значение исследований по естественной конвекции неразрывно связано с практическими приложениями их результатов. В качестве примера можно привести расчет и конструирование практически всех теплообменных технологических устройств, процессы затвердевания металлов, выращивания кристаллов, ядерную энергетику и т.д.

Известные различия между механизмами свободной и вынужденной конвекций, а также большое число разнообразных условий, встречающихся в реальных процессах, усложняют изучение естественной конвекции и вынуждают разрабатывать новые методы её исследования. Данная работа посвящена экспериментальному исследованию теплоотдачи естественной конвекцией от поверхности нагретого шара вязкой жидкой среде в вертикальном канале квадратного сечения.

Для изучения теплообмена естественной конвекцией в стационарном режиме использовался медный шар диаметром  $D=0,040$  м смонтированным во внутрь нагревательным элементом. Хорошая теплопроводность меди позволила свести неоднородность температурного поля до 3% для максимальных значений перегрева. Основные результаты получены в среде, заполненной глицерином или его водными растворами.

В проведенных опытах число Прандтля менялось в пределах  $300 \div 8700$ ; критерий Грасгофа –  $5,20 \div 92,0$ . Ошибка в определении критерия Рэлея составляет 4-5%, в определении числа Нуссельта не превышает 3%.

В работе приведены описание метода экспериментального изучения теплообмена естественной конвекцией и приводятся результаты обработки опытных данных в виде критериальной формулы.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. А. Ж. Турмухамбетов

## ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА В ЕСТЕСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

А. А. Ярославский, И. А. Чумаков, А. А. Любых  
Средняя общеобразовательная школа №1, г. Оха

В ряду наиболее важных проблем физики высоких давлений и температур, существенной частью которой является физика экстремальных состояний вещества (ЭСВ), вопросы изменения структуры вещества и приобретения им особых физических свойств под воздействием внешних факторов, сильно отличающихся от нормальных, в естественных и в лабораторных условиях, весьма актуальны. Они служат необходимым элементом физического фундамента геофизики и планетологии, астрофизики и космологии, многих прикладных наук.

В настоящее время физика ЭСВ предсказывает довольно большое количество экстремальных состояний вещества, но существование не всех из них подтверждено. Это объясняет большое значение задачи изучения процессов формирования ЭСВ в природе, потому что в лабораторных условиях специальные приборы и установки не позволяют достигать таких высоких значений температуры и давления, которые реализуются в космосе под действием сил тяготения. Для решения этой задачи необходимо проследить, как в естественных условиях с ростом внешнего давления изменяется температура и плотность в системе и каких значений эти параметры достигают на разных этапах сжатия. Также это необходимо для того, чтобы определить качественный характер протекающих изменений (ионизация, ядерные реакции), состав и структуру вещества в соответствующих состояниях; выяснить, какие процессы преобладают в веществе на той или иной стадии конденсации: дезинтеграционные – вследствие высокой концентрации внутренней энергии, или интеграционные – вследствие высокого внешнего давления. Выводы о значениях температуры и давления естественных ЭСВ основываются на данных наблюдательной астрономии.

В работе рассматривается уплотнение водородного облака под действием сил гравитации. Такие молекулярные скопления – основные объекты конденсации в естественных условиях. Были определены этапы конденсации; характер изменения температуры и плотности; отмечена высокая степень их концентрации на всех этапах конденсации; определен состав и тип структуры вещества в экстремальных состояниях (за исключением вещества черной дыры); выявлено влияние массы коллапсирующего объекта на направление конденсации; определено наличие экстремальных физических свойств сверхпроводимости и сверхтекучести двух видов ЭСВ; подтвержден решающий вклад внешнего давления в процесс формирования ЭСВ в естественных условиях.

Научный руководитель – Т. Н. Клюкач

# ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

УДК 533.9.03

## ЛАБОРАТОРНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ПЛАЗМЫ

К. Айткабыл

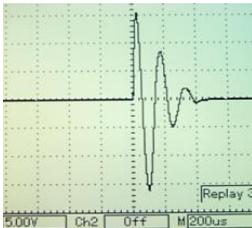
Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики

Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы

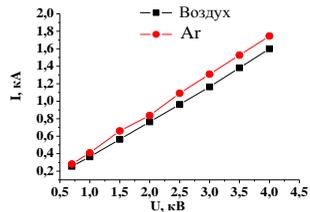
Импульсные плазменные ускорители являются оптимальными источниками плазменных потоков. Плазменные потоки полученные в ускорителях используются в исследованиях для термоядерного синтеза и для улучшения и обработки поверхности материалов. С помощью плазменных ускорителей можно получить поток заряженных частиц с различной скоростью и энергией в широком диапазоне.

В малом импульсном ускорителе напряжение подается от заряженных конденсаторов ИМ 5-150 соединенных между собой параллельно (напряжение до 5 кВ, емкость 300 мкФ). Рабочая камера представляет собой кварцевую трубку с диаметром 60 мм и толщиной стенок 3 мм. Электродная система расположена коаксиально (катод сделан из меди, анод из алюминия) и разделена между собой изолятором. Диаметр внешнего электрода 58 мм, внутреннего 10 мм. Длина внешних и внутренних электродов 50 мм и 20 мм, соответственно.

В данной работе разрядный ток малого импульсного плазменного ускорителя измерен с помощью пояса Роговского[1], таким образом получен ВАХ разряда который регистрируется на осциллографе UT2042B. Результаты измерений показаны на следующих рисунках.



Осциллограмма пояса Роговского для воздуха,  $U= 1.5\text{кВ}$  и  $P= 8$  торр



ВАХ разряда

1. Хаддлстоун Р., Леонард С. // Диагностика плазмы. – М.: Мир. – 1967. – 17 стр.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук М. К. Досболаев

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПРОВОДИМОСТИ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ СТЕКЛА

О. Н. Алексеева

Новосибирский государственный университет

В данной работе исследован процесс поляризации стекла и протекания токов в нём под действием постоянного внешнего электрического поля в зависимости от времени с момента подачи напряжения.

Как известно, свойства аморфного вещества определяются многими параметрами: его молекулярной структурой, составом и, в случае стекла, его тепловой историей. Работы, исследующие электрические свойства стекла той или иной марки весьма многочисленны, однако, ввиду указанных фактов, данные полученные разными исследователями плохо поддаются теоретическому обобщению. Поэтому иметь несложную методику для установления характеристик конкретного стекла представляется весьма полезным.

Кроме того, знание температурных зависимостей различных электрических характеристик исследуемого стекла позволяет сделать предположения о механизмах поляризации и протекания токов, и посредством этого получить некоторое представление о его структуре и составе.

Методика измерения диэлектрической проницаемости основывалась на использовании исследуемого материала как диэлектрика в плоском конденсаторе. Ёмкость конденсатора, определяемая его геометрией и проницаемостью диэлектрика, измерялась по переходным процессам RC-цепи. Проводимость стекла измерялась по току, устанавливавшемуся в цепи после завершения переходных процессов.

Таким образом, в ходе работы были получены зависимости проводимости и диэлектрической проницаемости стекла неизвестной марки от температуры в диапазоне от 140 до 430 °С. На их основании были высказаны предположения о том, как соотносятся роли различных механизмов поляризации и токопереноса в данном типе стекла. Погрешности оценены, возможные источники систематических ошибок проанализированы, указаны возможные улучшения методики эксперимента.

Научный руководитель – А. В. Судников

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЫ В ПОПЕРЕЧНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

А. С. Аникеев

Саратовский государственный технический университет  
им. Ю. А. Гагарина

Газоразрядная плазма в поперечном магнитном поле используется в газоразрядных измерителях магнитной индукции, газовых лазерах, в плазменных двигателях Холла.

В работе проведен расчет электронной температуры и продольного электрического поля плазмы при условии постоянства частоты соударений электронов с атомами, при реальных граничных условиях на границе плазмы для модели плоской плазмы, ограниченной диэлектрическими стенками. В поперечном магнитном поле помимо диффузионных потоков зараженных частиц к стенкам, образуются дополнительные потоки зараженных частиц, обусловленные эффектом Холла, что изменяет величину пространственного заряда.

Определив частоту ионизации  $Z_i$ , вычисленную с помощью собственных значений уравнения баланса электронов, можно найти численное значение температуры электронов в магнитном поле.

В случае однородного в поперечном сечении разряда показано, что с ростом магнитного поля температура электронов в положительном столбе газового разряда несколько уменьшается за счет уменьшения плотности пространственного заряда плазмы. Продольное электрическое поле рассчитанное с помощью уравнения баланса энергий уменьшается в разы.

Анализ решения уравнения баланса электронов показывает что учет пространственного заряда существенно влияет на электронную температуру при уменьшении давления и поперечных размерах промежутка ( $p \times d$ ). При возрастании ( $p \times d$ ) разряд может стать слоистым в поперечном направлении.

Учет пространственного заряда существенен в узких газоразрядных трубках и его влияние сводится к тому, что продольное электрическое поле, рассчитанное при постоянной частоте столкновений, оказывается в несколько раз меньше чем в модели плазмы при постоянной длине свободного пробега.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук А. С. Банковский

## **ВЫЧИСЛЕНИЕ ИНКРЕМЕНТА НЕУСТОЙЧИВОСТИ РЕЛЯТИВИСТСКОГО ПУЧКА В ГОРЯЧЕЙ ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЕ В РАМКАХ ТОЧНОЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ**

В. В. Анненков

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

В последнее время проблема пучково-плазменной неустойчивости в релятивистском режиме стала активно изучаться в контексте задач связанных с инерциальным термоядерным синтезом, нагревом солнечной короны, высокоэнергетическими космическими лучами и гамма-всплесками. Также исследования этой проблемы актуальны для интерпретации экспериментов по турбулентному нагреву плазмы в открытой ловушке ГОЛ-3, где наблюдается сильное пучково-плазменное взаимодействие в магнитном поле.

На сегодняшний день существует ряд работ, в которых данная проблема изучается в рамках различных приближений. Либо рассматривается упрощённая модель плазмы (одна из компонент полагается холодной, малое или отсутствующее магнитное поле, малая относительная плотность пучка), либо задается извне поляризация волн (потенциальные или электромагнитные).

В данной работе впервые не делается никаких упрощающих предположений ни о величине магнитного поля, ни о характере поляризации неустойчивых колебаний. С единых позиций проводится анализ всех неустойчивых ветвей колебаний, нарастающих в системе горячая замагниченная плазма — горячий релятивистский электронный пучок.

В такой постановке задача требует решения весьма сложного дисперсионного уравнения, численный анализ которого оказывается нетривиальным даже при существующих вычислительных ресурсах. Благодаря новому представлению для тензора диэлектрической проницаемости, обобщённому в данной работе на случай релятивистских скоростей, удастся значительно уменьшить необходимые вычислительные затраты и получить решение дисперсионного уравнения для различных функций распределения частиц.

Полученные данные представляют несомненный интерес и могут быть использованы для анализа турбулентных явлений в замагниченной плазме с релятивистским пучком.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук И. В. Тимофеев

## **ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО ВЧ ПЛАЗМЕННОГО ЭМИТТЕРА НАГРЕВНОГО ИНЖЕКТОРА АТОМОВ ВОДОРОДА**

С. С. Астамиров

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

В современных экспериментах по управляемому термоядерному синтезу (УТС) необходимы инжекторы нейтральных атомов высокой энергии. Кроме энергии пучка, также важнейшими характеристиками являются: плотность тока, однородность и длительность импульса. С повышением параметров пучка растут и технические требования, предъявляемые к конструкции инжектора. Особенно в таких условиях важны стабильность и долговечность работы инжектора, которые обусловлены, в основном, тепловыми нагрузками на элементы ионного источника.

В данной работе проводились эксперименты с высокочастотным генератором плазмы ионного источника, предназначенного для получения отрицательных ионов высокой энергии. Особенностью данного ионного источника является большая длительность импульса пучка ионов, которая должна быть 100 секунд при энергии пучка 120 кэВ и токе отрицательных ионов водорода 1.5А.

Целью работы было создание комплекса диагностик для измерения плотности ионного тока и тепловых нагрузок генератора плазмы. Для измерения плотности ионного тока и распределения использовался многосеточный зонд, а для измерения температур – термодпары, установленные на фарадеевском экране, фланцах, в системе водяного охлаждения и в антенне плазменного эмиттера. Запись сигналов осуществляется сразу по всем каналам с помощью АЦП «АДАМ» и обрабатывается на компьютере.

В работе установлено распределение тепловой нагрузки и её зависимость от времени в плазменном генераторе с водяной системой охлаждения.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук И. В. Шиховцев

## СОСТАВ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ АРГОНА

Г. Б. Ахтанова

Научно-исследовательский институт  
экспериментальной и теоретической физики  
Казахский Национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы

Аргон широко используется в современных люминесцентных лампах, металлургии, а также в плазменной сварке и в резке металлов как плазмообразующий газ.

В данной работе были использованы эффективные потенциалы, которые описывают взаимодействие между заряженными частицами. Взаимодействия между зарядами и атомами в частично ионизованной неидеальной плазме был рассчитан с помощью поляризационного потенциала. Эти потенциалы учитывают на малых расстояниях квантовые эффекты, а на больших – эффекты экранировки. В данной работе рассматривается плотная плазма аргона при параметрах: температура  $T=10^4-10^6$  K и концентрация  $n=10^{18}-10^{24}/\text{cm}^3$ . В пределах рассматриваемых параметров, аргоновая плазма меняется от атомарного до полностью ионизованного состояния, с пятикратной ионизацией.

В данной работе были произведены вычисления состава плотной аргоновой плазмы на основе уравнения Саха с учетом снижения потенциалов ионизации атомов и ионов, вызванного взаимодействием заряженных частиц в системе. Определяя степень ионизации, как отношение числа свободных электронов к полному числу электронов в плазме, полученное нелинейное уравнение решалось численными методами.

В сравнении с теорией Дебая потенциал ионизации снижен, это обусловлено квантовыми эффектами дифракции.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, доцент М. Т. Габдуллин

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ БАРЬЕРОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ В ПЛАЗМЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБЪЕМНОГО РАЗРЯДА**

В. Л. Бескровный

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»,  
г. Санкт-Петербург

Обработка материалов в газоразрядном реакторе с целью очистки, изменения структуры поверхности, повышения адгезионных свойств и др. весьма перспективна, поскольку в низкотемпературной газоразрядной плазме молекулы поверхностного слоя материала подвергаются как воздействию частиц, так и воздействию различного вида излучений, генерируемых в катодном слое разряда.

Формированию однородного самостоятельного разряда в воздухе атмосферного давления препятствует развитие некоторых видов неустойчивостей, для подавления которых можно использовать емкостную стабилизацию: электроды покрывают диэлектрическими барьерами, при этом ток носителей в разрядном промежутке замыкается током смещения (емкостным током) через барьеры. Если в некоторой зоне разрядного промежутка увеличивается плотность тока, то увеличивается падение напряжения на емкости барьеров, что приводит к снижению напряженности электрического поля в столбе разряда и, следовательно, к снижению плотности тока.

Проведены эксперименты по исследованию влияния обработки в плазме на гидрофильность тонких микропористых структур. Образцы помещались в газоразрядный промежуток длиной 4 мм, образованный двумя плоскопараллельными электродами с диэлектрическими покрытиями (стекло толщиной 4 мм). Амплитуда импульсов напряжения на электродах 35 кВ, частота импульсов 50 Гц. Средняя мощность в пределах 2 – 5 Вт/см<sup>3</sup>. В результате обработки пленок из пористого фторопласта весьма существенно изменилась их гидрофильность, которая оценивалась по значению угла, образованного плоскостью пленки с горизонтом, при котором с пленки скатывалась капля воды, помещенная на пленку. Для необработанных пленок этот угол составлял единицы градусов, а для обработанных достигал значения 180<sup>0</sup>. Данный метод обработки материалов может найти применение для повышения адгезионных свойств поверхностей материалов.

Научный руководитель – д-р техн. наук, доцент Н. С. Пщелко

## ОСАЖДЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЁНОК С ПОМОЩЬЮ ИСТОЧНИКА МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПАРА И БЫСТРЫХ АТОМОВ АРГОНА

В. П. Болбуков

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

Известно, что на установках вакуумного осаждения покрытий только малая часть материала распыляемой мишени осаждается на подложке, а остальной материал попадает на стенки камеры. Это является серьёзным препятствием для осаждения пленок драгоценных металлов. В настоящей работе исследовался источник атомов металла и быстрых атомов аргона, позволивший преодолеть указанное препятствие.

Атомы металла образуются в результате распыления металлической фольги на стенках полого катода диаметром 260 мм и глубиной 100 мм ионами аргона с энергией  $\sim 1$  кэВ из заполняющей катод плазмы тлеющего разряда. При токе в его цепи 1,5 А и энергии 100 эВ быстрых атомов аргона, получаемых путем перезарядки прошедших через сетку диаметром 200 мм из того же металла ионов, скорость осаждения плёнки на подложку на расстоянии 0,15 м от сетки составляет 270 нм/ч, а неоднородность ее толщины не превышает  $\pm 4\%$  в пределах зоны диаметром 150 мм.

Энергию атомов аргона, бомбардирующих пленку при ее осаждении, можно изменять от нуля до  $\sim 1$  кэВ, что позволяет в широком диапазоне регулировать параметры осаждаемых пленок.

При энергии атомов аргона  $\varepsilon > 100$  эВ скорость осаждения начинает снижаться, а при  $\varepsilon \sim 600$  эВ падает до нуля. В результате предварительной обработки подложки в течение 10 минут при  $\varepsilon \sim 900$  эВ на поверхности подложки образуются структурные дефекты, обеспечивающие хорошую адгезию ( $\sim 10^9$  Па) пленки, осаждаемой затем при энергии  $\varepsilon = 50\text{--}300$  эВ.

Полый держатель подложки, покрытый такой же фольгой, позволяет снять ее после осаждения пленок и переплавить вместе с использованной сеткой и фольгой из полого катода, что полностью исключает потери материала. Поэтому новый источник можно использовать для осаждения пленок из драгоценных металлов и регулировки их параметров быстрыми атомами аргона.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. А. С. Метель

## **ЛИДАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРИСТЫХ ОБЛАКОВ С АНОМАЛЬНЫМ ОБРАТНЫМ РАССЕЯНИЕМ**

И. Д. Брюханов

Томский государственный университет

Перистые облака образуются в верхних слоях тропосферы под тропопаузой и, как правило, состоят из кристаллических частиц льда. Пластинчатые и столбчатые кристаллы могут быть ориентированы горизонтально, а столбчатые частицы ориентируются ещё и по азимуту. Информация о состоянии ориентации частиц льда в перистых облаках необходима для увеличения точности расчёта радиационного баланса атмосферы. Поскольку перистые облака располагаются высоко над земной поверхностью, для их исследования требуются дистанционные методы с высоким пространственным и временным разрешением.

В течение 2011-2012гг. в ходе экспериментов по исследованию оптических характеристик облаков верхнего яруса с использованием уникального поляризационного лидара ТГУ наблюдались перистые облака на высотах 9-12 км, содержащие так называемые «зеркальные» слои [1].

В настоящем сообщении приводятся результаты оценки оптических свойств перистых облаков с аномальным обратным рассеянием над г. Томском для зондирующего излучения с разным состоянием поляризации. Кроме того, анализируется матрица обратного рассеяния этих облаков и изменчивость ее диагональных элементов. Методика оценки оптических характеристик облаков базируется на использовании уравнения лазерного зондирования [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям...» –ГК №14.518.11.7053, ФЦП «Кадры...» –соглашение от 16.08.2012г. №14.В37.21.0612) и РФФИ (грант №12.05-0675-а).

---

1. Самохвалов И. В., Брюханов И. Д., Насонов С. В., Животенюк И. В. Исследование оптических характеристик перистых облаков с аномальным обратным рассеянием // Изв. вузов. Физика. 2012. Т.55, №8, С.63-67.

2. Зуев В. Е., Кауль Б. В., Самохвалов И.В. и др. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей. Новосибирск: Наука, 1986. 188 с.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. И. В. Самохвалов

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗОНД В АНИЗОТРОПНОЙ ПЛАЗМЕ: ОТ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ К ПРИКЛАДНЫМ

А. С. Мустафаев, А. Ю. Грабовский  
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»,  
г. Санкт-Петербург

Решающую роль в исследованиях плазмы играют методы диагностики, их совершенство, надежность и возможность применения в реальных условиях плазменных устройств.

В работе представлен зондовый метод, позволяющий измерять полную функцию распределения электронов по скоростям (ФРЭС) как в аксиальном, так и в радиальном направлении, и получать нетрадиционную информацию об угловой структуре ФРЭС и процессах ухода заряженных частиц на стенку.

*Разработанные методы диагностики были использованы для исследования электрокинетических характеристик плазменных приборов на базе низковольтного пучкового разряда (НПР) в инертных газах, при этом впервые:*

- Исследовано влияние геометрии границы плазменного канала на устойчивость горения разряда и длину энергетической релаксации ФРЭС. Показано, что конусный проводящий экран обеспечивает при постоянном давлении газа снижение концентрации плазмы вдоль оси прибора в 4 раза, что увеличивает длину энергетической релаксации ФРЭС в 2 раза. Это позволяет увеличить плотность разрядного тока  $j_{\max}$  с 1 до 2 А/см<sup>2</sup> при давлениях 0,5÷1,0 тор. Установлено, что с повышением давления потенциал горения НПР устанавливается на значении потенциала возбуждения метастабильного уровня газа-наполнителя. Разработан и создан плазменный диодный стабилизатор напряжения, в котором для стабилизации напряжения в диапазоне 0±60 В межэлектродный промежуток наполняют инертными газами с различными потенциалами ионизации и возбуждения.

- Разработан новый метод подавления плазменных неустойчивостей, вызванных наличием участка отрицательного сопротивления на ВАХ прибора. Метод обеспечивает стабилизацию рабочих параметров разряда вплоть до разрядных токов 5 А.

Результаты работы могут использоваться при проектировании систем противорадиационной защиты на АЭС и создании радиационно-стойкой высокотемпературной электроники для космических целей.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. А. С. Мустафаев

# **КОМПАКТНЫЙ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ СЕНСОР НА ОСНОВЕ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СОСТАВА ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ**

Н. А. Данилина

Институт автоматики и электротехники СО РАН  
Новосибирский государственный технический университет

Создание малогабаритного и чувствительного сенсора является актуальной задачей для различных областей деятельности и особенно медицины. Существует потенциальная возможность детектирования летучих биомаркеров в выдохе, образующихся в ходе метаболизма, для диагностики различных патологических состояний. Такой метод диагностики является не инвазивным, что особенно актуально во время сложных медицинских операций, в педиатрии, при плановых медицинских осмотрах. Однако такие методы сдерживаются отсутствием необходимого оборудования.

В данной работе описывается оптический сенсор на основе спектрального анализа газового разряда. Созданный прототип устройства имеет компактные размеры и небольшой вес, что делает его удобным в транспортировке и эксплуатации. Чувствительность прибора, то есть минимально обнаруживаемая концентрация исследуемого вещества, например, ацетона, достигает уровня единиц и десятков ppb. Прибор использован в совместной работе с Институтом цитологии и генетики СО РАН для исследования корреляции протекания диабета и содержания ацетона в выдыхаемом воздухе у мышей. В данный момент проходят клинические испытания в Институте физиологии СО РАМН для детектирования в выдыхаемом воздухе ацетона у больных диабетом и проведен успешный эксперимент по детектированию ксенона для целей анестезии.

Кроме того, выполняются исследования по разработке методик детектирования различных газов и веществ для сфер экологии и безопасности (эксперименты по контролю качества бензина, по обнаружению специальных веществ, детектированию паров ртути, диоксида, определению уровня метана в атмосфере) и получены предварительные результаты.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук С. Н. Атутов

## ВЫЧИСЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СТРУКТУРНЫХ ФАКТОРОВ НЕИДЕАЛЬНОЙ КВАЗИКЛАССИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ

Г. С. Дихамбаева

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы

В последнее время широкое распространение получил так называемый метод псевдопотенциалов. В применении к квазиклассической плазме он заключается в том, что при вычислении характеристик неидеальной плазмы используются более простые уравнения классической физики, а учет квантовых эффектов производится непосредственно в микропотенциале взаимодействия частиц системы.

Для описания свойств неидеальной плазмы используются следующие параметры: параметр связи  $\Gamma = (Ze)^2 / ak_B T$ , где  $a = (3/4\pi n)^{1/3}$  – межчастичное расстояние, и параметр плотности  $r_s = am_e e^2 / \hbar^2$ .

Межчастичные взаимодействия описываются потенциалом:

$$\Phi_{\alpha\beta}(r) = Z_\alpha Z_\beta e^2 \cdot \left[ e^{-Ar} / r - e^{-Br} / r \right] / \sqrt{1 - 4\lambda_{\alpha\beta}^2 k^2}. \quad (1)$$

Здесь  $B^2 = \left[ 1 + \sqrt{1 - 4\lambda_{\alpha\beta}^2 k^2} \right] / 2\lambda_{\alpha\beta}^2$ ,  $A^2 = \left[ 1 - \sqrt{1 - 4\lambda_{\alpha\beta}^2 k^2} \right] / 2\lambda_{\alpha\beta}^2$ ,  $k^2 = (4\pi ne^2) / (k_B T)$ ,  $\lambda_{\alpha\beta}^2$  – дебройлевская длина волны пары частиц сортов  $\alpha$  и  $\beta$ .

На основе этого псевдопотенциала вычисляется динамический структурный фактор.

$$S_{ee}^s(k, \omega) = (-k_B T / n\pi\omega) \text{Im} \chi_{ee}^s(k, \omega) \quad (2)$$

Можно найти его поэтапно: для начала необходимо вычислить функцию локальных полей, связанную с прямой корреляционной функцией:  $G(k) = 1 + k_B T \tilde{C}(k) / \tilde{\Phi}_{ee}(k)$ , где функция  $\tilde{C}(k)$  – находится путем решения уравнения Орнштейна-Цернике в гиперцепном приближении. Используя их мы находим функцию отклика

$$\chi_{ee}^s(k, \omega) = \chi_e^0(k, \omega) / [1 - \tilde{\Phi}_{ee}(k) [1 - G(k)] \chi_e^0(k, \omega)] \quad (3)$$

где  $\chi_e^0(k, \omega)$  функция отклика для системы невзаимодействующих частиц.  $\tilde{\Phi}_{ee}(k)$  - фурье образ потенциала (1).

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. К. Н. Джумагулова

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОЛЕКУЛ МОНОСИЛАНА СО СТРУЙНОЙ ГЕЛИЙ-АРГОНОВОЙ ПЛАЗМОЙ В ПРОЦЕССЕ ОСАЖДЕНИЯ ПЛЁНОК КРЕМНИЯ**

В. Д. Зелик

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Тонкие пленки, как современные материалы с уникальными свойствами, получили широкое распространение. Одними из основных методов производства тонких пленок остаются хорошо изученные CVD-процессы (Chemical vapor deposition). Главными недостатками этого способа являются низкая скорость роста пленок и большая площадь, занимаемая производственными средствами.

Газоструйный плазмохимический метод получения пленок – менее изученный процесс. Однако он обеспечивает большие скорости роста материалов, требует меньшую площадь для размещения оборудования, что снижает базовую стоимость производственного процесса.

Газоструйный плазмохимический метод заключается в активации свободной струи газа пучком электроном и последующем быстром конвективном переносе частиц из зоны активации в зону осаждения. В зависимости от условий в реакционной камере (давление, расход рабочего газа) параметры пучка можно подобрать такими, чтобы энергия электронов практически полностью поглощалась газовым потоком.

Существующая технология на базе газоструйного плазмохимического метода позволяет получать эпитаксиальные слои кремния из моносилана с использованием стандартных вакуумных камер и низковакуумных насосов. Имеющаяся модель осаждения не включает в себя механизмы возбуждения и диссоциации молекул моносилана, понимание которых позволит усовершенствовать метод и получать новые виды пленок с требуемыми характеристиками.

Данная работа посвящена исследованию механизмов передачи энергии от струйной гелий-аргоновой плазмы молекулам моносилана. Целью работы было получение методом оптической эмиссионной спектроскопии информации о каналах протекания плазмохимических реакций в активированных струях газа, механизмов возбуждения и диссоциации молекул моносилана.

В работе показано, что основной канал возбуждения молекул моносилана обусловлен передачей энергии от метастабильных состояний нейтрального атома аргона.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук Р. Г. Шарафутдинов

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛОТНОЙ ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ

Т. Н. Исмагамбетова

Научно-исследовательский институт  
экспериментальной и теоретической физики

Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы

В данной работе рассматривается полностью ионизованная водородная плазма, состоящая из электронов и ионов, при концентрации  $n = n_e + n_i = 10^{20} \div 10^{24} \text{ см}^{-3}$  и температуре  $T = 10^5 \div 10^7 \text{ К}$ .

Целью работы является расчет термодинамических характеристик. Для этого были использованы квазиклассические потенциалы, учитывающие квантово-механические эффекты дифракции и симметрии на малых расстояниях:

$$u_{ab}(r) = \frac{e_a e_b}{r} \left\{ 1 - ih \left( \sqrt{2} \frac{\lambda_{ab}^2}{a_B^2 + br^2} \right) e^{-ih \left[ \frac{\sqrt{2} \lambda_{ab}^2}{(a_B^2 + br^2)} \right]} \right\} \left( 1 - e^{-r/\lambda_{ab}} \right) - \delta_{ae} \delta_{be} k_B T \ln \left( 1 - \frac{1}{2} \exp \left( -\frac{r^2}{\lambda_{ee}^2} \right) \right), \quad (1)$$

где  $\lambda_{ab} = \hbar / \sqrt{2\pi m_{ab} k_B T}$  - тепловая длина волны Де-Бройля,

$m_{ab} = m_a m_b / (m_a + m_b)$  - приведенная масса частиц сорта  $a$  и  $b$ . В данном выражении первое слагаемое учитывает эффект дифракции, а второе – эффект симметрии.

Эффект экранировки был учтен использованием гиперцепного приближения при решении интегрального уравнения Орнштейна-Цернике. На основе этого решения были получены радиальные функции распределения.

Через радиальные функции распределения и потенциалы взаимодействия были рассчитаны поправки к внутренней энергии и давлению.

Учет квантовых эффектов дифракции и симметрии ведет к уменьшению абсолютного значения поправок на взаимодействие в плотной плазме.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, доцент М. Т. Габдуллин

## **РАЗРАБОТКА ГЕЛИКОННОГО ИСТОЧНИКА ПЛАЗМЫ ДЛЯ ЛИНЕЙНОЙ УСТАНОВКИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ С МАТЕРИАЛАМИ**

В. А. Карелин

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

В ИЯФ СО РАН разрабатывается геликонный источник плазмы для линейной плазменной установки по изучению взаимодействия плазмы с материалами, которые предполагается использовать для внутренней облицовки установок термоядерного синтеза. Интерес к такому типу разряда вызван его высокой эффективностью и он может быть использован в качестве мощного источника плазменного потока. В настоящее время в Исследовательском центре Юлих (Германия) работает плазменная установка, источником плазмы в которой является дуговой источник плазмы с накаливаемым катодом, ресурс работы которого ограничен процессами распыления. Предполагается разработать высокочастотный геликонный источник плазмы на замену источнику с накаливаемым катодом.

Водородный разряд в источнике создается с помощью геликонной антенны на частоте 13,56 МГц. Газоразрядную камеру, изготовленную из кварцевой трубы диаметром около 10 см, окружают катушки, которые создают продольное магнитное поле. Плазма в геликонном разряде в основном нарабатывается в приосевой области и распространяется вдоль силовых линий. Для исключения контакта кварцевой стенки с плазмой установлены лимитеры, на которых заканчиваются крайние силовые линии, которые еще не контактируют с кварцевой стенкой. Источник подсоединен к вакуумному объему экспериментального стенда. В качестве источника высокочастотной мощности предполагается использовать промышленный генератор COMDEL СВ-5000 мощностью до 5 кВт. Для измерения параметров плазмы будут использоваться интерферометр, лентгмюровский и сеточные зонды.

Начальный этап работы предполагает зажечь разряд в импульсах до 1 сек и измерить его характеристики – плотность плазмы, которая должна быть около  $10^{12}$  см<sup>-3</sup>, и электронную температуру, которая должна составлять несколько электрон-вольт.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук И. В. Шиховцев

## ОБЛУЧЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КАПИЛЛЯРА ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

И. Е. Карпов

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

В настоящее время в Институте лазерной физики СО РАН готовится эксперимент по изучению взаимодействия лазерного импульса с узким плазменным капилляром. Предполагается, что лазерный импульс высокой интенсивности (до  $5 \cdot 10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup>) и длительностью  $\sim 50$  фс будет сфокусирован в металлический капилляр диаметром  $\sim 50$  мкм. Образованная в пристеночной области плазма высокой плотности будет приводить к каналированию лазерного излучения. В центральной части капилляра, в плазме с низкой плотностью, будет возникать кильватерная волна и происходить ускорение заряженных частиц.

Особенностью лазерных импульсов с высокой интенсивностью и малой длительностью является наличие пьедестала с контрастом  $10^5$ - $10^6$  по отношению к основному импульсу и длительностью в несколько нс. В рассматриваемом эксперименте плотная плазма, образованная на торце капилляра лазерным предимпульсом, может перекрыть плазменный канал, что приведет к отражению основного импульса лазера.

В данной работе рассмотрены условия формирования плазмы при воздействии лазерного импульса с интенсивностью до  $10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup> и длительностью несколько нс. Проведено моделирование взаимодействия лазерного излучения с узким металлическим капилляром с помощью кодов MULTI2D[1] и MULTI-fs [2]. Определена оптимальная геометрия капилляра, при которой интенсивность лазерного предимпульса максимальна и отсутствует отражение основного импульса.

Автор выражает благодарность В. Т. Астрелину, А. В. Бурдакову, К. В. Лотову, Е. В. Пестрякову и В. И. Трунову за полезные обсуждения. Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашения 14.В37.21.0784, № 8387.

---

1. R. Ramis, J. Meyer-ter-Vehn, J. Ramirez, Computer Physics Communications, 2009, Volume 180 (6), 977 – 994.

2. R. Ramis, K. Eidmann, J. Meyer-Ter-Vehn, S. Hüller, Computer Physics Communications, 2012, Volume 183 (3), 637 – 655.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, доцент К. В. Лотов

## ТЕОРЕМА ВЗАИМНОСТИ В ЗАДАЧЕ РАССЕЯНИЯ СВЕТА НА КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦАХ. ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

А. В. Коношонкин, И. Д. Брюханов  
Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, г. Томск  
Томский государственный университет

Теорема взаимности является одним из основных следствий прямого решения уравнений Максвелла и, как следствие, является базовым критерием для проверки асимптотического, численного или экспериментального решения задачи рассеяния.

В институте оптики атмосферы разработан метод физической оптики для решения задачи рассеяния света на ледяных кристаллических частицах перистых облаков [1]. Данный метод позволяет эффективно решать задачу для кристаллов с характерными размерами более 30 мкм. Однако данный метод является приближенным по своей сути и нуждается в проверке границ применимости.

Совместно с Томским государственным университетом данная задача решается экспериментально на уникальном поляризационном лидаре [2], который позволяет получить всю матрицу обратного рассеяния. Сравнение теории с экспериментом позволяет убедиться в точности данных.

Данная работа посвящена проверке точности эксперимента и метода физической оптики с использованием теоремы взаимности. Показано что расчетные данные, полученные методом физической оптики, полностью удовлетворяют теореме взаимности для случая зеркального рассеяния света. В экспериментальных данных наблюдается небольшое отклонение от теоремы взаимности, что обусловлено погрешностью измерений и временным расхождением в измерении различных элементов матрицы обратного рассеяния.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (№12-05-00675-а) и Минобрнауки Российской Федерации (соглашения № ...8616 и №..0612).

---

1. A. Borovoi, A. Konoshonkin, N. Kustova, and H. Okamoto. Backscattering Mueller matrix for quasi-horizontally oriented ice plates of cirrus clouds: application to CALIPSO signals // Optics Express.2012. V.20, P.28222-28233.

2. И. В. Самохвалов, И. Д. Брюханов, С. В. Насонов, И. В. Животенюк. Исследование оптических характеристик перистых облаков с аномальным обратным рассеянием // Изв. вузов. Физика. 2012. Т.55, №8, С.63-67.

Научные руководители – д-р физ.-мат. наук, проф. А. Г. Боровой, д-р физ.-мат. наук, проф. И. В. Самохвалов

## ВЛИЯНИЕ МИКРОНЕУСТОЙЧИВОСТИ НА ПРОДОЛЬНЫЕ ПОТЕРИ БЫСТРЫХ ИОНОВ В УСТАНОВКЕ ГДЛ

О. А. Коробейникова

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

На установке Газодинамическая ловушка (ГДЛ) проводятся эксперименты с нагревом плазмы при помощи инъекции пучков атомарного дейтерия. Эти исследования направлены на создание физической модели генератора термоядерных нейтронов с высокой плотностью потока [1]. Плазма в ГДЛ состоит из двух компонент: относительно холодной “мишенной” плазмы с температурой около 200 эВ, плотностью  $2.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и быстрых ионов со средней энергией 10 кэВ, плотностью в точках останова  $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и энергосодержанием более 2 кДж, образующихся при захвате инжектируемых атомов.

В ряде экспериментальных выстрелов наблюдается развитие альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивости, регистрируемой магнитными зондами, расположенными вблизи точки останова. Одним из способов получения дополнительной информации о влиянии неустойчивости на продольные потери является изучение энергетического спектра ионов, движущихся вдоль силовых линий магнитного поля в расширителе. Для измерения потоков ионов, покидающих плазму, применяются многоканальные атомные анализаторы [2]. В торец бака расширителя был установлен доработанный электростатический энергоанализатор на основе пятиканального анализатора атомных частиц, разработанного в ФТИ им. А. Ф. Иоффе [3]. Регистрируемая плотность тока ионов позволила отказаться от эксплуатации энергоанализатора в счётном режиме с использованием ВЭУ и перейти в потоковый режим с заменой ВЭУ на цилиндры Фарадея, что заметно упростило схему регистрации.

---

[1]. А. А. Иванов, I. A. Kotelnikov, E. P. Kruglykov, et al. In Proc. Of XVII Symp. on Fusion Technology, Rome, Italy, v.2. (1992) 1394.

[2]. В. И. Давыденко, А. А. Иванов, Г. Вайсен// “Экспериментальные методы диагностики плазмы”. МО РФ НГУ. 1999. стр. 57-80.

[3]. В. В. Афросимов, В. Л. Березовский, И. П. Гладковский и др.// ЖТФ. 1975. Т. 45. Вып. 1. стр. 56-63.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук С. В. Мурахтин

## ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЛАСТИ ФИЛАМЕНТАЦИИ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ РАЗЛИЧНОГО ДИАМЕТРА

О. И. Кучинская, Е. Е. Быкова, А. В. Петров

Томский государственный университет

Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, г. Томск

Среди нелинейных явлений, сопровождающих распространение мощного лазерного излучения ультракороткой длительности в газовой и жидкой средах, наиболее масштабным является филаментация лазерного пучка. Визуально филаментация проявляется в виде тонких светящихся нитей, визуализирующих путь лазерного излучения в среде. Физическая причина филаментации заключается в сильной пространственно-временной самомодуляции фемтосекундного импульса в нелинейной самофокусирующей среде, проявляющейся в компрессии импульса и последующем распаде пучка в поперечном сечении на области с высокой интенсивностью. При этом средний диаметр одиночного филамента в атмосферном воздухе для ближнего ИК-излучения составляет порядка сотни микрометров, пиковая интенсивность достигает сотен тераватт на квадратный сантиметр, а средняя протяженность варьирует в зависимости от мощности импульса и может превышать длину свободной дифракции пучка [1].

В данной работе представлены результаты лабораторных экспериментов по измерению длины и положения области филаментации фемтосекундного лазерного излучения гигаваттной мощности на длинах волн 800нм и 400нм с апертурой миллиметрового размера, распространяющегося в воздухе в условиях острой внешней фокусировки. Исследована зависимость длины участка филаментации излучения от его начального радиуса и мощности. Обнаружена качественно новая закономерность, заключающаяся в инвариантности наблюдаемой длины области филаментации пучка к изменению его диаметра при условии равенства начальных интенсивностей. Указанная закономерность не характерна для коллимированного излучения и связана с преобладанием геометрической фокусировки над керровской самофокусировкой пучка в процессе формирования филамента.

---

1. Ю.А. Гейнц, А.А. Землянов, А.М. Кабанов, Г.Г. Матвиенко, Нелинейная фемтосекундная оптика атмосферы, Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2010. – 212 с.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук А. М. Кабанов

## ДЕТЕКТИРОВАНИЕ КСЕНОНА МИКРОПЛАЗМЕННЫМ СЕНСОРОМ CES С ГЕЛИЕВЫМ БУФЕРОМ

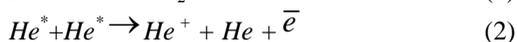
Е. Н. Максимова, П. А. Петров

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»,  
г. Санкт-Петербург

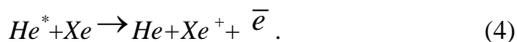
Разработка нового поколения плазменных сенсоров для анализа молекулярного и атомарного состава вещества имеет важное значение, как в фундаментальном, так и в прикладном отношении.

В качестве нового подхода к проблеме предлагается микроплазменный сенсор, основанный на столкновительной электронной спектроскопии (CES – Collisional Electron Spectroscopy). В отличие от известных в настоящее время средств анализа газов, этот сенсор не требует вакуума, может иметь размеры сотового телефона, и межэлектродный зазор при атмосферном давлении порядка 0,1 мм.

Показано [1], что в сенсоре CES, заполненном чистым гелием, 2-ая производная ВАХ представляет собой спектр энергии характеристических электронов в послесвечении и определяется реакциями Пеннинговской ионизации (1,2) при парных столкновениях метастабильных атомов He (пик 14,5-15 эВ) и ударами 2-го рода (3) метастабильных атомов He с тепловыми электронами (пик 20 эВ):



Представлены спектры энергии электронов в смеси He + 0,3% Xe при давлении 10 Торр. Межэлектродный зазор – 5 мм, время задержки измерения ВАХ после обрыва разряда -150 мкс. Пик в области 4 эВ вызван ионизацией водорода и углеводородов, выделяющихся из электродов под действием плазмы, пик в области 8 эВ соответствует ионизации атомов ксенона метастабильными атомами гелия:



Показано, что микроплазменный сенсор CES позволяет надежно детектировать ксенон в буферном газе, что иллюстрирует возможности его применения для газовой хроматографии.

---

[1]. Кудрявцев А.А., Мустафаев А.С., Цыганов А.Б. и др. Журнал технической физики, 2012, т.82, вып.10, с.1-6.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. А. С. Мустафаев

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФФУЗИИ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЫ

Р. У. Машеева

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы

В данной работе рассматривается пылевая плазма, которая содержит частицы микронных и субмикронных размеров твердого вещества.

Метод Ланжевеновой динамики нашел свое широкое применение в изучении свойств пылевой плазмы. Моделирование пылевых частиц по пространственно-временным траекториям было выполнено на основе следующих уравнений движения пылинок:

$$m_d \frac{d^2 \vec{r}_i}{dt^2} = \sum_j F_{\text{int}}(r) \Big|_{r=|\vec{r}_i - \vec{r}_j|} \frac{\vec{r}_i - \vec{r}_j}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|} - m_d \nu_{fr} \frac{d\vec{r}_i}{dt} + \vec{F}_{br}(t), \quad (1)$$

здесь  $F_{\text{int}}(r) = -\partial\Phi(r)/\partial r$  – сила взаимодействия частиц,  $r = |\vec{r}_i - \vec{r}_j|$  – расстояние между зернами,  $F_{br}(t)$  – случайная сила,  $\nu_{fr}$  – коэффициент трения,  $m_d$  – масса пылевой частицы. Взаимодействие пылинок в такой плазме описывается потенциалом Юкава; в безразмерном виде он записывается следующим образом:

$$\Phi(R) = \frac{\Gamma}{R} e^{-\kappa R}, \quad (2)$$

где  $\Gamma = (Z_d e)^2 / (4\pi \epsilon_0 T_d)$  – параметр связи,  $\kappa = a / r_D$  – параметр экранировки,  $a = (3 / 4\pi n_d)^{1/3}$  – среднее расстояние между пылевыми частицами.

На основе полученных значений микросостояний, т.е. координат и скоростей частиц, можно получить коэффициент диффузии с помощью соотношения Грина-Кубо, связывающего коэффициент диффузии с автокорреляционной функцией скоростей:

$$D_{G-K} = \frac{1}{3} \int_0^\infty A_{vv}(t) dt, \quad (3)$$

$$A_{vv}(t) = \langle \vec{v}(t) \vec{v}(0) \rangle,$$

Получена скейлинговая формула для коэффициента диффузии пылевой плазмы, которая имеет следующий вид:

$$D = \frac{A(\Gamma) k_B T_d}{(\nu_{fr} + B(\Gamma, Z)) m_d}, \quad (4)$$

где  $A(\Gamma) = \frac{6}{(4 + \sqrt{\Gamma^2})}$ ,  $B(\Gamma, Z) = \frac{0.156Z}{5 + \Gamma^{1/2}}$ .

Научный руководитель – д.-р. физ.-мат. наук, проф. К. Н. Джумагулова

## **СТОЙКОСТЬ МАТЕРИАЛОВ ПЛАЗМОПРИЕМНИКОВ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

А. А. Медведева

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Одной из основных задач разработки термоядерного реактора нового поколения является выбор материалов, которые будут подвергаться воздействию больших тепловых нагрузок с плотностью потока энергии 0,1-20 МДж/м<sup>2</sup>. При таких параметрах происходит сильная эрозия материалов и продукты эрозии существенно влияют на работу реактора.

Данная работа посвящена исследованию стойкости материалов плазмоприемников при их взаимодействии с мощным потоком термоядерной плазмы, определению параметров падающего плазменного потока и поверхностной плазмы на установках ГОЛ-3 и ГДМЛ.

Уникальной особенностью гофрированной открытой ловушки ГОЛ-3 является высокая температура электронов плазмы и возможность проводить эксперименты по моделированию воздействия плазменных потоков большой мощности на материалы.

Исследована эрозия образцов из вольфрама после их облучения при средних нагрузках порядка 1 МДж/м<sup>2</sup> в расширителе установки ГОЛ-3. Запланированы эксперименты по изучению взаимодействия плотных потоков плазмы с образцами из меди, вольфрама, молибдена и графита в сильном магнитном поле открытой ловушки нового поколения ГДМЛ. При этом характеристики плазмы, попадающей на образцы, будут изменяться в широких пределах для моделирования как стационарного потока плазмы на диверторные пластины токамака типа ИТЭР, так и выбросов плазмы из рабочей области при ELM, срывах за счет неустойчивостей в реакторе. Диапазон изменения температуры плазмы – от 1 до 100 эВ, плотности плазмы – от 10<sup>18</sup> м<sup>-3</sup> до 10<sup>20</sup> м<sup>-3</sup>. Разработаны соответствующие задаче экспериментальные методики: держатели мишеней, диагностики плотности потока энергии с помощью магнитных, оптических итермопарных измерений.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук А. А. Шошин

## **ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО РЕГИСТРАЦИИ СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА УСТАНОВКЕ ГОЛ-3**

Н. А. Мельников

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Субмиллиметровое и миллиметровое излучение, генерируемое на установке ГОЛ-3 при взаимодействии релятивистского электронного пучка с плазмой, представляет интерес как в плане понимания процессов происходящих при данном взаимодействии, так и в плане создания источника излучения в этом диапазоне.

Для регистрации излучения используется полихроматор, установленный напротив небольшого окна в вакуумной камере установки. Размер окна составляет 30х30 мм, что при длине волны  $\sim 1$  мм обуславливает небольшую угловую расходимость вследствие дифракционных эффектов. Таким образом, полихроматор регистрирует излучение из большей области плазмы, чем определяемая геометрией окна. Тем самым мощность излучения, обнаруженная им из единицы объема оказывается меньше чем могла бы быть без влияния дифракции.

Величина области, из которой регистрируется излучение, существенно увеличивается если учесть отражение от стенок вакуумной камеры. Стенки камеры металлические, но покрыты слоем сажи, образующейся в процессе работы установки. В этом случае излучение, попавшее в детектор, складывается из излучения из геометрически видимой области и излучения из прилегающих к этой области зон, ослабленного после многократных отражений от стенок камеры. Измерение отражающей способности стенки вакуумной камеры, покрытой сажей, в диапазоне 200-550 ГГц показало, что коэффициент отражения равен в среднем 0,75.

В работе представлены результаты моделирования такой системы без учета влияния плазменного столба в программе Zemax и холодных измерений на реальном участке вакуумной камеры установки ГОЛ-3.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук И. А. Иванов

## НАНОКЛАСТЕРЫ ВОЗБУЖДЁННЫХ АТОМОВ ЦЕЗИЯ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ

А. Минибаев, С. Жигульский

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»,  
г. Санкт-Петербург

Формирование ридберговского вещества, или конденсата возбуждённых атомов, уже почти полвека является объектом исследования как теоретической, так и прикладной физики. Наряду с твёрдой, жидкой, газообразной и плазменной формами существования материи обнаружена метастабильная фаза, проявляющая свои свойства относительно непродолжительное время. Система из большого числа возбуждённых атомов (порядка 1000) может переходить в конденсированное возбуждённое состояние (КВС), которое при определённых условиях находится в форме упорядоченного плазменного кристалла.

Обнаружение КВС – важное фундаментальное открытие для физики неидеальной плазмы и открывает перспективы использования конденсированного вещества в плазменной энергетике (термоэмиссионных преобразователях (ТЭП), лазерах и проч.).

В дуговом термоэмиссионном преобразователе энергии удалось воспроизвести результаты [1] и получить метастабильный КВС атомов газообразного цезия. Обнаружено, что режим динамической подачи паров цезия в межэлектродный зазор приводит к появлению таких характеристик, которые не укладываются в рамки традиционного представления о работе ТЭП и подтверждают образование КВС.

Свойства полученного ридберговского вещества изучены с помощью электрофизических и оптических методов.

Установлено, что КВС снижает барьерный индекс (суммарные потери потенциальной энергии электрона в плазме и на поверхности коллектора) вплоть до 1.6 эВ и эмиссионную работу выхода коллектора до 1.0 эВ. Анализ оптического спектра межэлектродной плазмы показал, что помимо линий цезия, существуют линии, связанные с углеродным соединением, которым был обработан коллектор ТЭП.

Таким образом, экспериментально доказано возникновение нанокластеров возбуждённых атомов цезия в низкотемпературной плазме ТЭП. Обнаруженные высокоэффективные характеристики ТЭП, представляют большой интерес для малой энергетики. Продолжается дальнейшее изучение свойств ридберговского вещества и условий его образования.

---

1. Yarygin V.I. Journal of Cluster Science. Springer, 2012.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. А. С. Мустафаев

**ДЛИНА ФИЛАМЕНТАЦИИ МОЩНОГО ФЕМТОСЕКУНДНОГО  
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С НАЧАЛЬНЫМ ГАУССОВЫМ  
ПРОФИЛЕМ ИНТЕНСИВНОСТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ  
НАЧАЛЬНОГО РАДИУСА И МОЩНОСТИ ПУЧКА**

О. В. Минина

Томский государственный университет  
Институт оптики атмосферы СО РАН

Явление филаментации заключается в сильной пространственно-временной самомодуляции фемтосекундного лазерного импульса при его распространении в среде и проявляется во временной компрессии импульса и последующем распаде пучка в поперечном направлении на области с высокой интенсивностью. Эти области называются филаментами.

Применение данного явления в различных системах атмосферной оптики ставит конкретные задачи оптимизации параметров фемтосекундного лазерного импульса, а также управления характеристиками филаментов. Последнее возможно осуществить при изменении длительности и мощности фемтосекундных лазерных импульсов, а также за счет пространственной и временной (чирпирование) фокусировки. В связи с этим представляет интерес задача об установлении зависимости длины филаментации от начальной мощности лазерного пучка и его радиуса.

В данной работе на основе численного решения нелинейного уравнения Шредингера (НУШ) было рассмотрено распространение в воздухе фемтосекундного лазерного излучения с начальным гауссовым профилем интенсивности при различных значениях начального радиуса и мощности светового пучка. Для нахождения длины филаментации рассчитывалась концентрация свободных электронов на оси лазерного пучка вдоль дистанции распространения.

Установлено, что при достижении характерных значений начального радиуса светового пучка и его мощности реализуется эффект продольной неустойчивости решения. Для области устойчивых решений могут быть получены аппроксимационные формулы, описывающие зависимость длины филаментации от начального радиуса и мощности пучка.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. А. А. Землянов

## СЕЧЕНИЕ РАССЕЯНИЯ ЧАСТИЦ В ПЛОТНОЙ КВАЗИКЛАССИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ

Б. Т. Мутанов

Научно-исследовательский институт  
экспериментальной и теоретической физики  
Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы

На данный момент накоплен достаточно обширный материал по экспериментальному генерированию и диагностике плотной неидеальной плазмы, охватывающий плотности только до  $n_e \leq 10^{23} \text{ см}^{-3}$ . Отметим, что продвижение в сторону высоких плотностей связано с различными техническими трудностями, возникающих при экспериментальной генерации сверхплотной плазмы. В такой ситуации роль теоретических исследований очень важна.

Параметры исследуемой плазмы таковы: температура системы  $T \cong (2 \cdot 10^4 \div 5 \cdot 10^6) \text{ К}$  и плотность числа частиц  $n_e \approx n_i = n \cong (10^{21} \div 10^{26}) \text{ см}^{-3}$ .

В работе использован обобщенный парный потенциал взаимодействия заряженных частиц плазмы:

$$\Phi_{ab}(r) = \frac{e_a e_b}{r} \left\{ 1 - th(\sqrt{2} \frac{\lambda_{ab}^2}{a_{cp}^2 + br^2}) e^{-th(\sqrt{2} \frac{\lambda_{ab}^2}{a_{cp}^2 + br^2})} \right\} \left( 1 - e^{-\frac{r}{\lambda_{ab}}} \right)$$

Данный потенциал получен из сопоставления квантомеханической слэтеровской суммы и больцмановского фактора, и учитывает эффекты дифракции. Для описания взаимодействий «заряд-нейтрал» использована поляризационная модель, учитывающий эффект дифракции.

При расчете сечений рассеяния были использованы методы фазовых функций и Борна. Для реализации метода фазовых функций необходимо решить уравнение Калоджеро с Кулоновскими функциями для фазового сдвига рассеяния:

$$\frac{d}{dr} \tan \delta(r, k, \eta) = -\frac{1}{k} \Phi_{ab}(r) [F(kr, \eta) + \tan \delta(r, k, \eta) G(kr, \eta)]^2$$

$$\tan \delta(0, k, \eta) = 0$$

На основе полученных фазовых сдвигов были рассчитаны дифференциальные, полные и транспортные сечения рассеяния частиц системы. Проведено сравнение полученных результатов с имеющимися данными других авторов и моделей.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, чл.-корр. НАН РК, проф. Т. С. Рамазанов

## **ПЕРЕНОРМИРОВКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В ПЛАЗМЕ**

Л. Т. Еримбетова, Е. С. Мухаметкаримов

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы

В настоящее время в современной физике плазмы одной из актуальных проблем как с научной, так и с практической точек зрения является исследование свойств плазмы, в которой, наряду с электронами и ионами буферной плазмы, присутствуют проводящие или диэлектрические дисперсные частицы, называемые пылинками. Большой интерес обусловлен, главным образом тем, что пылинки образуют упорядоченную структуру, называемую плазменно-пылевым кристаллом.

Данная работа посвящена теоретическому исследованию новых, ранее не изученных механизмов во взаимодействии пылевых частиц на основе предлагаемой псевдопотенциальной модели взаимодействия. Для ее построения выбирались микропотенциалы взаимодействия структурных элементов пылевой плазмы, то есть парные потенциалы взаимодействия частиц. При описании характера взаимодействия пылевой компоненты с составляющими плазму заряженными частицами (электроны и ионы) и между собой, учитывались поляризационные эффекты, обусловленные явлением электростатической индукции и конечность размеров самой пылевой частицы. Тем самым считается, что пылевые частицы являются проводящими. Учет конечности размеров приводит к ограниченности микропотенциалов при сближении пылевых частиц, а поляризационные эффекты ослабляют отталкивание между ними. После этого для описания процессов взаимодействия частиц используется развитая ранее теория перенормировки, приводящая к фактическому учету корреляционных эффектов.

Из анализа зависимостей псевдопотенциала от расстояния обнаружено, что увеличение параметра неидеальности приводит к росту соответствующих значений псевдопотенциала взаимодействия пылевых частиц. В полном соответствии со своим названием, увеличение параметра экранирования приводит к ослаблению взаимодействия между пылевыми частицами вследствие экранировки поля. Полученные выражения для псевдопотенциалов взаимодействия могут быть использованы как в теоретических подходах, так и в компьютерном моделировании свойств пылевой плазмы.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук А. Е. Давлетов

## **ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КОРОННОГО РАЗРЯДА В МАСС- СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОМ ИОННОМ ИСТОЧНИКЕ**

О. О. Очиров

Институт нефтегазовой геологии и геофизики  
им. А. А. Трофимука СО РАН  
Новосибирский государственный университет

Коронный разряд широко применяется в масс-спектрометрических ионных источниках с ионизацией при атмосферном давлении. Данный метод ионизации имеет преимущества при следовом анализе в сложных смесях благодаря высокой эффективности и селективности ионизации определенных классов веществ, имеющих высокое сродство к протону. При сопряжении ионного источника с системой предварительного хроматографического разделения параметры внешней газовой среды в области разряда отличаются от нормальных условий пониженным давлением и повышенной температурой. Это может приводить к изменениям режима горения разряда, нестабильности и даже изменению состава ионов-реагентов. В работе приведены результаты изучения влияния этих параметров на характеристики коронного разряда в источнике ионов, спроектированном для малогабаритного масс-спектрометра [1].

Получены вольт-амперные характеристики коронного разряда в воздухе (относительная влажность 50%) при различных значениях давления и температуры в диапазоне 200 ÷ 955 мБар и 25 ÷ 120 °С соответственно. На основе экспериментальных данных определены зависимости напряжения стабильного горения, напряжения зажигания от относительной плотности воздуха, на основании чего установлена область параметров стабильного горения коронного разряда. Выявлено отклонение вольт-амперной характеристики от теоретической при превышении напряжения некоторой величины, что, возможно, вызвано изменением ионного состава. Это предположение требует проверки с помощью масс-спектрометрического анализа.

---

1. Makas A.L., Troshkov M.L., Kudryavtsev A.S., Lunin V.M. Miniaturized mass-selective detector with atmospheric pressure chemical ionization; Journal of Chromatography B, 800 (2004) 63-67

Научные руководители – А. С. Кудрявцев, канд. техн. наук  
А. Л. Макасы

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АНИЗОТРОПИИ ФРЭ НА ИЗЛУЧЕНИЕ НЕПРЕРЫВНОГО СПЕКТРА ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

В. А. Пинаев

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск

В работе рассмотрено влияние магнитного поля на тлеющий разряд низкого давления. Показано, что с увеличением напряжённости продольного магнитного поля происходит сжатие разряда и уменьшение его напряжения. Концентрация и температура электронов увеличиваются. Возрастает излучение линейчатого и непрерывного спектра [1].

Было обнаружено[2], что измеренная интенсивность непрерывного спектра  $J_{\lambda_{\text{exp}}}$  превосходит расчётную величину тормозного излучения на нейтральных частицах  $J_{\lambda_{\text{brems}}}$ , причём в зависимости от магнитного поля разность между измеренной и расчётной величиной интенсивности непрерывного спектра составляет  $50\text{-}10^3$  раз. Такое сильное расхождение наблюдалось только в области отрицательного свечения. С увеличением давления до 200 Па величины  $J_{\lambda_{\text{exp}}}$  и  $J_{\lambda_{\text{brems}}}$  в пределах погрешности измерений начинают совпадать, при этом регистрация излучения происходила уже в области положительного столба.

Сильное электрическое поле характерное для катодного падения приводит к образованию анизотропии функции распределения электронов (ФРЭ) и наличию в плазме тлеющего разряда нескольких групп электронов с разной энергией. В [3] показано, что к началу тёмного фарадеевского пространства группа быстрых электронов полностью исчезает и происходит максвеллизация электронов. Установлено, что излучение  $J_{\lambda_{\text{brems}}}$  возникающее вследствие анизотропии ФРЭ составляет малую величину от наблюдаемого значения и не может объяснить наблюдаемого расхождения.

---

1. И.М.Уланов, А. Ю. Литвицев, В.А. Пинаев, Влияние продольного магнитного поля на рекомбинационное излучение тлеющего разряда низкого давления в водороде и гелии, ТВТ. Т. 49. № 1. С. 3. (2011).

2. Pinaev V. A., Ulanov I. M. Investigation of electric and spectral characteristics of the low-pressure glowing discharge in longitudinal magnetic field// VII international conference PPPT-7. Minsk: «kovcheg», 2012. P. 208.

3. Ю. П Райзер, Продольная структура катодных частей тлеющего разряда, ТВТ. Т.29. № 6. С.1041. (1991).

Научный руководитель – канд. техн. наук И. М. Уланов

## О ВОЗМОЖНОСТИ ГЕЛИКОННОГО НАГРЕВА ПЛАЗМЫ В УСТАНОВКЕ ГДМЛ

А. В. Смагина

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

В настоящее время в Институте ядерной физики СО РАН разрабатывается новая плазменная установка — газодинамическая многопробочная ловушка (ГДМЛ). Проектные параметры этой установки близки к параметрам термоядерного реактора. Благодаря открытой магнитной конфигурации, конструкция такого реактора оказывается более простой по сравнению с токамаками. В качестве одного из методов нагрева плазмы в установке ГДМЛ рассматривается создание геликонного разряда. При этом в замагниченной плазме возбуждается высокочастотная электромагнитная волна, передающая свою энергию электронам плазмы.

Для геликонных источников существует обширная экспериментальная база, демонстрирующая их высокую эффективность и подкрепленная аналитическими и численными моделями. Однако некоторые параметры установки ГДМЛ заметно отличаются от типичных условий реализации геликонных разрядов. В частности, из-за сильного продольного магнитного поля (2–7 Т), не выполняется условие  $\omega_{ce} \ll \omega_{pe}$ , которое используется в качестве приближения в большинстве аналитических моделей. Кроме этого, при выбранной частоте генератора, в плазме установки ГДМЛ могут выполняться условия для нижнего гибридного резонанса, что меняет условия распространения и поглощения электромагнитных волн и требует учитывать движение ионов.

В данной работе рассматривается возможность создания геликонного разряда в условиях установки ГДМЛ. Рассчитаны дисперсионные кривые для «быстрых» и «медленных» электромагнитных волн. В качестве механизмов потерь учитывались кулоновские столкновения и затухание Ландау. В результате определены диапазоны параметров (плотности плазмы и продольного магнитного поля), в которых возможен геликонный нагрев. Методом прямого численного моделирования определены структуры полей волн для неоднородных распределений плотности плазмы по радиусу установки. Найдены области максимального поглощения ВЧ мощности. Сделаны выводы об оптимальных размерах антенны для возбуждения ВЧ колебаний.

Научный руководитель – П. В. Калинин

**ВЛИЯНИЕ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНО ВОЗРАСТАЮЩЕЙ  
КОНЦЕНТРАЦИИ РЕКОМБИНИРУЮЩЕЙ ПРИМЕСИ НА  
СУБЛИНЕЙНЫЙ УЧАСТОК ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ p-n-n<sup>+</sup> СТРУКТУРЫ**

В. Г. Стельмах

Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз, г. Ташкент

Процесс диффузионно-дрейфового транспорта носителей заряда в p-n-n<sup>+</sup> структурах в условиях, когда амбиполярная скорость дрейфа определяется модуляцией заряда глубоких центров прилипания для дырок, описывается уравнением для концентрации неравновесных носителей  $p$  :

$$\frac{d^2 p}{dx^2} - Ja \frac{dp}{dx} - \frac{N_R c_p}{D} p = 0. \quad (1)$$

Для случая встречных направлений диффузионного и дрейфового потоков на вольт-амперной характеристике (ВАХ) возможно появления сублинейного участка вида:

$$U(J) \sim \int_0^d J / p(x) dx \approx \exp \{ a J d \}, \quad (2)$$

где в формулах (1) и (2)  $J$  – плотность тока в p-n-n<sup>+</sup> структуре,  $d$  – длина базы этой структуры,  $D$  – коэффициент амбиполярной диффузии,  $N_R$  и  $c_p$  – концентрация и коэффициент захвата дырок, соответственно, рекомбинирующей примесью,  $a = 2qD_n N_t$  – параметр, зависящий только от концентрации глубоких примесных центров прилипания  $N_t$  и коэффициента диффузии электронов  $D_n$ ,  $q$  – величина элементарного электрического заряда (см. [1]). Экспоненциальное возрастание  $N_R$  было задано как  $N_R = N_{R0} + \beta \cdot \exp(\alpha \cdot x)$  и поэтому в уравнении (1) появляется член с  $\beta \cdot \exp(\alpha \cdot x)$ . Полученное дифференциальное уравнение затем решали методом последовательных приближений и далее определяли ВАХ. Было установлено, что экспоненциальное возрастание  $N_R$  приводит к удлинению сублинейного участка ВАХ по напряжению и появлению за ним участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

---

1. Адирович Э.И., Карагеоргий-Алкалаев П.М., Лейдерман А.Ю. Токи двойной инжекции в полупроводниках. Москва, Советское Радио, 1978

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. А. Ю. Лейдерман

## ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫЕ СТРУКТУРЫ В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ.

С. Р. Устабаев

Научно-исследовательский институт  
экспериментальной и теоретической физики  
Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы

Большой интерес представляет исследование отклика пылевой плазмы на различные внешние воздействия. Такие воздействия могут использоваться для управления пространственным положением, степенью упорядоченности и динамикой плазменно-пылевых структур. Одним из основных способов воздействия на пылевую плазму является наложение внешнего магнитного поля. Учет влияния магнитного поля важен, например, при рассмотрении поведения частиц конденсированной дисперсной фазы в пристеночной плазме в установках ТОКАМАК.

В данной работе представлены исследования о влиянии постоянного магнитного поля на плазменно-пылевые образования в тлеющем разряде. Данные были получены на экспериментальной установке для изучения свойств пылевой плазмы и плазменно-пылевых структур в плазме тлеющего разряда [1].

В данной установке на газоразрядную трубку были добавлены соленоиды, при помощи которых создавалось магнитное поле. При прохождении тока через соленоиды наблюдалось вращение пылевой структуры. Вращение пылевых частиц в аксиальном магнитном поле происходит под действием сил ионного увлечения. Найденные параметры вращения анализировались и сравнивались с результатами аналогичных работ других авторов [2,3].

---

1. Т. S. Ramazanov, M. K. Dosbolaev, K. N. Dzhumagulova, A. N. Jumabekov, //Phys.Plasmas.-2008.-vol.15.№5-P.053704.

2. Dzlieva E. S., Karasev V. Yu., Eikhval'd A. I., About rotational mechanism of dusty structures in magnetic field // Intern. Conf. PPPT-VI. Minsk: IMAP NASB, 2009. V. II. P. 751–753.

3. M. M. Vasilev, L. G. Dyachkov, S. N. Antipov, O. F. Petrov, and V. E. Fortov, JETP Lett. 86, 358 (2007)

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук М. К. Досболаев

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫХ ОБРАЗОВАНИЙ В СМЕСИ ГАЗОВ В ВЧЕР

А. У. Утегенов

Научно-исследовательский институт  
экспериментальной и теоретической физики  
Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы

Одной из актуальных задач физики пылевой плазмы является вопрос о влиянии состава фоновой плазмы на характеристики плазменно-пылевых структур. Одним из возможных подходов в изучении данного вопроса является исследование поведения плазменно-пылевых структур в смеси легкого и тяжелого газов [1, 2].

В данной работе экспериментально исследовались структурные свойства плазменно-пылевых образований в высокочастотном емкостном разряде (ВЧЕР) в смеси инертных газов. В эксперименте в качестве плазмообразующего газа использовались смесь гелия с аргоном, с 97 % концентрацией газа легких атомов и соответственно для сравнения полученных результатов, газы в чистом виде гелия и аргона. Выбор такой газовой смеси, связан с увеличением соотношения атомных масс различных газов, тем самым, для наблюдения заметного эффекта влияния ионного потока или же пропорциональным распределением молекул газов в плазменно-пылевом образовании.

Для характеристики структурных свойств пылевого формирования были рассчитаны парные корреляционные функции распределения пылевых частиц. Также для исследования динамических свойств пылевой плазмы рассчитаны распределения скоростей пылевых частиц.

На основе анализа макроскопических свойств системы обнаружено, что с добавлением малого количества тяжелого газа, расширяется диапазон давления газа, при котором наступает кристаллизация пылевой структуры.

---

1. Maiorov S.A., Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Dosbolayev M.K., Jumabekov A.N. Investigation of plasma-dust structures in He-Ar gas mixture // Phys. Plasmas. – 2008. – Vol. 15. – № 9. – P. 84.

2. Ramazanov T.S., Daniyarov T.T., Maiorov S.A., Kodanova S.K., Dosbolayev M.K. and Zhankarashev E.B. // Contrib. PlasmaPhys. – 2011. – Vol. 51. – Issue 6. – P. 505-508.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, чл.-корр. НАН РК, проф.  
Т. С. Рамазанов

## К ВЫБОРУ МОДЕЛИ ИНДИКАТРИСЫ РАССЕЯНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ОБЛАКОВ

Э. Ж. Эрдыниева

Томский государственный университет

В современном мире при разработке средств контроля за состоянием атмосферы большое внимание уделяется методам лазерного зондирования. Для интерпретации данных лидарных экспериментов используется уравнение лазерного зондирования, полученное в приближении однократного рассеяния, границы применимости которого ограничены зондированием оптически слабых аэрозольных образований. Распространение излучения в плотных рассеивающих средах сопровождается многократным рассеянием. Во многих практически значимых случаях можно ограничиться приближением двукратного рассеяния [1]. Уравнение лазерного зондирования может быть решено аналитически, для этого требуется аналитическое представление характеристик светорассеяния – полной угловой зависимости интенсивности рассеянного света (индикатрисы рассеяния) и коэффициента рассеяния среды.

В работе рассмотрены результаты численного моделирования лидарного сигнала двукратного рассеяния с использованием двух аналитических моделей индикатрисы рассеяния капельных облаков. Несмотря на то, что пятипараметрическая модель, которая, как предполагалось, учитывает угловую зависимость рассеянного света в задней полусфере, величина относительного вклада двукратного рассеяния с использованием данной аппроксимации существенно завышена (на 60–70%). Превышение вклада двукратного рассеяния в лидарный сигнал от кучевого облака с использованием трехпараметрической модели составляет не более 10%. Это позволяет утверждать, что для решения обратной задачи данная аппроксимация предпочтительнее.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям...» – ГК №14.518.11.7053, ФЦП «Кадры...» – соглашение от 16.08.2012 г. №14.В37.21.0612).

---

1. Креков Г.М., Кавкянов С.И., Крекова М.М. Интерпретация сигналов оптического зондирования атмосферы. Н.: Наука, 1987. – 173 с.

Научный руководитель – В. В. Брюханова

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>АЭРОФИЗИКА.....</b>	<b>5</b>
С. С. Абдуракипов .....	5
М. В. Алексеенко .....	6
А. П. Винокуров .....	7
О. И. Вишняков .....	8
М. А. Гришин, Е. П. Копьев .....	9
В. В. Денисюк .....	10
И. В. Деннер .....	11
А. Д. Дрясов .....	12
И. И. Запругаев .....	13
Я. С. Игнатенко .....	14
Г. Л. Колосов .....	15
В. А. Колотилоv .....	16
А. А. Крашенин .....	17
С. Г. Кундасев .....	18
Р. З. Курмангалиев .....	19
С. О. Морозов, С. В. Лукашевич .....	20
П. А. Мотырев, М. М. Катасонов, Д. С. Сбоеv .....	21
А. А. Недождий, П. В. Марков .....	22
Д. С. Ожгибесов .....	23
Ф. В. Орленко .....	24
А. В. Панина .....	25
А. А. Примак .....	26
Ф. В. Роньшин .....	27
А. Н. Семенов .....	28
С. Г. Скрипкин .....	29
М. В. Тимошевский .....	30
С. Н. Толкачев, К. С. Макарова .....	31
Р. Р. Халиулин, А. С. Шабалин, Т. Х. Мухаметгалиев, Н. В. Давыдов .....	32
Е. Ю. Шадрин .....	34
В. С. Шикалов .....	35
А. А. Яцких .....	36
<b>ТЕПЛОФИЗИКА.....</b>	<b>37</b>
А. Ш. Агажанов, Д. А. Самошкин .....	37
Р. Н. Абдуллаев, А. Ш. Агажанов .....	38
А. И. Болтаев .....	39
Т. А. Бондаренко .....	40
Е. Б. Бутаков .....	41
Д. А. Ворожейкина .....	42
А. А. Егоров .....	43

С. Д. Замбалов, И. А. Яковлев, Е. В. Сиротинин.....	44
А. М. Игошкин .....	45
И. В. Казанин, А.Ю. Пак .....	46
Ю. М. Козловский.....	47
В. С. Козулин.....	48
А. В. Кузнецов.....	49
Д. В. Кузнецов .....	50
М. Е. Кузнецова.....	51
А. В. Малоземов, А. В. Уколов .....	52
В. Ю. Маслова .....	53
А. В. Мелешкин.....	54
А. В. Назаров .....	55
О. О. Петрова-Богданова .....	56
А. А. Пильник.....	57
А. С. Попова .....	58
Е. П. Расчектаева.....	59
А. А. Родионов .....	60
В. С. Сердюков .....	61
В. П. Слепцова.....	62
Р. Е. Соколов .....	63
К. Шежау.....	64
А. А. Ярославский, И. А. Чумаков, А. А. Любых.....	65
<b>ФИЗИКА ПЛАЗМЫ .....</b>	<b>66</b>
К. Айткабыл.....	66
О. Н. Алексеева .....	67
А. С. Аникеев.....	68
В. В. Анненков .....	69
С. С. Астамиров.....	70
Г. Б. Ахтанова.....	71
В. Л. Бескровный.....	72
В. П. Болбуков.....	73
И. Д. Брюханов .....	74
А. С. Мустафаев, А. Ю. Грабовский .....	75
Н. А. Данилина .....	76
Г. С. Дихамбаева .....	77
В. Д. Зелик .....	78
Т. Н. Исмагамбетова .....	79
В. А. Карелин.....	80
И. Е. Карпов.....	81
А. В. Коношонкин, И. Д. Брюханов .....	82
О. А. Коробейникова .....	83
О. И. Кучинская, Е. Е. Быкова, А. В. Петров.....	84

Е. Н. Максимова, П. А.Петров .....	85
Р. У. Машеева .....	86
А. А. Медведева .....	87
Н. А. Мельников .....	88
А. Минибаев, С. Жигульский .....	89
О. В. Минина .....	90
Б. Т. Мутанов .....	91
Л. Т. Еримбетова, Е. С. Мухаметкаримов .....	92
О. О. Очиров .....	93
В. А. Пинаев .....	94
А. В. Смагина .....	95
В. Г. Стельмах .....	96
С. Р. Устабаев .....	97
А. У. Утегенов .....	98
Э. Ж. Эрдыниева .....	99

МАТЕРИАЛЫ  
51-Й МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ  
СТУДЕНЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

«Студент и научно-технический прогресс»

ФИЗИКА СПЛОШНЫХ СРЕД

*Материалы конференции публикуются в авторской редакции*

---

Подписано в печать 03.04.2013 г.

Офсетная печать

Заказ № \_\_\_\_\_

Формат 60x84/16

Уч.-изд. л. 4,9. Усл. печ. л. 6,5.

Тираж 145 экз.

---

Редакционно-издательский центр НГУ  
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2