

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

**МАТЕРИАЛЫ  
50-Й ЮБИЛЕЙНОЙ МЕЖДУНАРОДНОЙ  
НАУЧНОЙ СТУДЕНЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

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

**13–19 апреля 2012 г.**

**ФИЗИКА НЕРАВНОВЕСНЫХ ПРОЦЕССОВ**

**Новосибирск  
2012**

УДК 53  
ББК 22.3

Материалы 50-й Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс»: Физика неравновесных процессов / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2012. 113 с.

ISBN 978-5-4437-0050-2

Конференция проводится при поддержке Президиума Сибирского отделения Российской Академии наук, Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 12-04-06805-моб\_г), Правительства Новосибирской области, Комиссии РФ по делам ЮНЕСКО, Технопарка Новосибирского Академгородка.

Конференция проведена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 — 2013 годы.

Научный руководитель секции –  
академик РАН, д-р физ.-мат. наук, проф. В. М. Фомин  
Председатель секции – д-р физ.-мат. наук, проф. К. В. Лотов  
Ответственный секретарь секции – М. В. Михаэлис

#### **Экспертный совет секции:**

д-р физ.-мат. наук В. В. Кузнецов  
д-р физ.-мат. наук С. И. Лежнин  
д-р физ.-мат. наук С. А. Чекмарев  
д-р физ.-мат. наук И. А. Котельников  
д-р физ.-мат. наук К. В. Лотов  
канд. физ.-мат. наук А. А. Шошин  
д-р физ.-мат. наук А. Д. Косинов  
д-р техн. наук В. И. Запрягаев  
д-р физ.-мат. наук А. В. Федоров

ISBN 978-5-4437-0043-4

© Новосибирский государственный  
университет, 2012

**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 UNIVERISTY**

**PROCEEDINGS  
OF THE 50th INTERNATIONAL STUDENTS  
SCIENTIFIC CONFERENCE**

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

**April, 13–19, 2012**

**PHYSICS OF NON-EQUILIBRIUM PROCESSES**

**Novosibirsk, Russian Federation  
2012**

Proceedings of the 50<sup>th</sup> International Students Scientific Conference «*Students and Progress in Science and Technology*». Physics of non-equilibrium processes / Novosibirsk State University. Novosibirsk, Russian Federation. 2012. 113 pp.

ISBN 978-5-4437-0050-2

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 № 12-04-06805-мо6\_г), 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. V. M. Fomin

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

Responsible secretary – M. V. Mikhaelis

**Section scientific committee:**

Dr. Phys. Math. V. V. Kuznetsov

Dr. Phys. Math. S. I. Lezhnin

Dr. Phys. Math. S. A. Chekmarev

Dr. Phys. Math. I. A. Kotelnikov

Dr. Phys. Math. K. V. Lotov

Cand. Phys. Math. A. A. Shoshin

Dr. Phys. Math. A. D. Kosinov

Dr. Tech. V. I. Zapryagaev

Dr. Phys. Math. A. V. Fedorov

# АЭРОФИЗИКА И ГАЗОВАЯ ДИНАМИКА

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА PIV ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ И ДИНАМИКИ КРУПНЫХ ВИХРЕЙ В ЗАКРУЧЕННЫХ СТРУЯХ И ПЛАМЕНАХ

С. С. Абдуракипов

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

Крупномасштабные вихревые структуры (КВС), формирующиеся в сдвиговых турбулентных течениях, в существенной степени определяют интенсивность процесса тепломассопереноса в таких потоках. В частности, внешнее периодическое возмущение потока или наложение закрутки являются эффективными способами активного и пассивного управления интенсивностью турбулентного переноса на начальном участке струйных течений за счет воздействия на процесс формирования КВС. В частности эти методы могут быть эффективно использованы для повышения стабильности горения газофазных пламен.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию пространственной структуры и динамики КВС в изотермической круглой струе и пропано-воздушном пламени современными методами измерения Particle Image Velocimetry (PIV) и статистического анализа Proper Orthogonal Decomposition (POD), Dynamic Mode Decomposition (DMD) [1] в том числе при периодическом возмущении потока и наложении закрутки. Для организации струи и пламени было использовано сопло Витошинского с выходным диаметром  $d = 15$  мм. Для закрутки потока в сопло вставлялся лопаточный завихритель. Для возмущения начальной скорости струй и пламен использовались электродинамические преобразователи. Для измерения полей мгновенной скорости в центральной плоскости потоков была использована PIV система, в стереоскопической конфигурации (максимальная частота измерений достигала 1,1 кГц). Анализ мод POD разложения полей скорости в потоках позволил выделить КВС, вносящие наибольший вклад в турбулентные пульсации среды, на фоне стохастических пульсаций. Применение метода DMD к данным скоростных PIV измерений позволило определить характерные частоты пульсаций для различных областей потока, проанализировать масштабы соответствующих этим частотам пространственных когерентных структур, а также с использованием низкоразмерного представления динамики системы проанализировать взаимодействие КВС.

---

1. P. J. Schmid, Dynamic mode decomposition of numerical and experimental data, J. Fluid Mech. Vol. 656, P. 5-28 (2010).

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

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОЙ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ МЕТОДОМ ТОМОГРАФИЧЕСКОЙ ЦИФРОВОЙ ТРАССЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

М. В. Алексеенко

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

Ввиду широкого использования струйных течений в различных технических приложениях, таких как, например, камеры сгорания, химические реакторы, системы охлаждения не вызывает сомнений вопрос об актуальности их изучения. Затопленные струйные течения являются одним из фундаментальных объектов исследования в гидромеханике.

Цифровая томографическая анемометрия по изображению частиц [1] (Томо-PIV) относительно недавно реализованный бесконтактный оптический метод, являющийся расширением стандартного метода PIV, применяемый к диагностике турбулентных потоков. В основе метода лежит 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 и дает возможность рассчитывать дифференциальные характеристики потока.

Целью работы является экспериментальное исследование турбулентной ( $Re \approx 10000 \div 20000$ ) осесимметричной затопленной струи методом Томо-PIV. Валидация полученных результатов на основе сравнения их с ранее измеренными параметрами струи с помощью общеизвестных методик. А также идентификация крупномасштабных вихревых структур в слое смешения с помощью « $\lambda_2$ » критерия [2].

В работе с помощью Томо-PIV метода были измерены поля скорости в осесимметричной затопленной струе воды, вытекающей из профилированного сопла диаметром 15мм.

---

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

2.J. Jeong, F. Hussain. On the identification of a vortex. J. Fluid Mech. 1995, vol. 285, pp. 69-94

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

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР

Е. С. Анохина

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

Данная работа направлена на экспериментальное и численное исследование вихревых структур в модели вихревой топочной камеры тангенциального типа. Полезные свойства закрутки находят применение в камерах сгорания, топках, циклонных сепараторах [1, 2].

В работе был использован общий подход, основанный на решении осредненных по числу Рейнольдса уравнений Навье – Стокса. Стандартная  $k-\varepsilon$  модель турбулентности наиболее точно описывает данного рода течения. Это связано с универсальностью  $k-\varepsilon$  модели для турбулентных течений с высокими числами Рейнольдса.

В редакторе Star-Design была построена расчетная геометрия камеры, идентичная экспериментальному рабочему участку. Количество ячеек было порядка 800 000. При численном моделировании течения в камере с центральной диафрагмой и плоским дном была получена вихревая структура течения.

В ходе работы с использованием экспериментальной техники и CFD процедур было проведено физическое и математическое моделирование турбулентного закрученного течения.

---

1. Гупта А., Лили Д., Закрученные потоки // М.: Мир, 1987.-590 с.

2. Алексеенко С.В, Окулов В.Л. Закрученные потоки в технических приложениях (обзор) // Теплофизика и аэромеханика.- 1996.- Т. 3, №2. –С. 101-138.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы и ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы» (госконтракт № 16.518.11.7010), РФФИ (гранты №№ 11-08-01063, 10-08-01096, 10-08-01093), гранта Правительства России № 11.G34.31.0046 для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских вузах (ведущий ученый – К. Ханьялич, НГУ).

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

# ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И РАЗРАБОТКА ОСНОВ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С НАНОВКЛЮЧЕНИЯМИ

Т. А. Борисова, А. А. Филиппов  
Институт теоретической и прикладной механики  
им. С. А. Христиановича СО РАН

Целью настоящей работы является разработка технологии получения гетерогенных материалов и изучение их физико-механических характеристик на основе эпоксидного олигомера ЭД-20 и Праймер-204 наноупрочненных диоксидом кремния- Таркосил Т-20(удельная поверхность 139.5 м<sup>2</sup>/г, средний размер частиц около 20 нм).

В качестве метода диспергирования частиц в матрице предложено использовать ультразвуковые колебания (УЗК). Проведены электронно-микроскопические исследования образцов, в результате которых сделана оценка объема занимаемого пузырьками воздуха. Доказано, что пузырьки воздуха являются концентраторами напряжений. Образцы изготовленные по ГОСТ 11262-80 проходили испытание на растяжение на испытательной машине Zwick Roell Allround.

В результате были получены диаграммы нагрузки от удлинения, а также напряжения образца от деформации в зависимости от объемных концентраций компонент. При этом был получен максимальный модуль упругости при 12% объемной концентрации наполнителя, он увеличился на 23%. При использовании ультразвука максимальное увеличение модуля упругости (32%) зафиксирован при 25%м содержании нанопорошка. Полученный гетерогенный материал дает удовлетворительное согласие с математической моделью предложенной Рейссом до 15% объемной концентрации наночастиц.

---

1. Polymer-matrix Nanocomposites, Processing, Manufacturing, and Application: F. Hussain, M. Hojjati, M. Okamoto, R.E. Gorga. An Overview. J. Composite Mater., 40 (2006) 1511-1575.

2. Теория армированных материалов / Ван Фо Фы. – Киев : Наука Думка, 1971. – 232 с.

3. Исследования влияния нанодисперсных частиц на механические свойства гетерогенного материала : тезисы доклада 10-го Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики / А.А. Филиппов, Т.А. Борисова // Вестник нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2011. – Т.4. – С. 1081-1083

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, акад. РАН. В. М. Фомин

# ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ КОГЕРЕНТНЫХ СТРУКТУР В ВИХРЕВОЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ

А. П. Винокуров

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

Сегодня закрученные потоки получили широкое применение в различных технических приложениях, в связи с чем актуальность их изучения не вызывает сомнений [1,2]. Так в промышленности используются скрубберы и циклонные сепараторы для очистки газов и деаэрации топлива. В горелочных устройствах с помощью закрутки потока добиваются большей устойчивости пламен. Немало внимания уделяется нестационарным явлениям, имеющим место в вихревом течении 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, в частности от параметра закрутки завихрителя и диаметра сопла. Проведено исследование влияния дисперсной газовой фазы на характеристики вихревых структур. Помимо экспериментального моделирования было проведено численное моделирование процесса с помощью коммерческого пакета программ 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

## ИЗУЧЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ ТОНКИХ СТЕРЖНЕЙ

Н. Е. Голованов, А. А. Лобанов

Сибирский государственный университет путей сообщения,  
г. Новосибирск

Цель работы заключалась в изучении частоты колебаний тонких стержней от их физических параметров. Исходя из физических соображений было предположено, что частота колебаний тонкого стержня зависит от момента инерции стержня  $I$ , модуля упругости материала  $E$ , из которого изготовлен стержень, и ускорения свободного падения  $g$ . В рамках теории размерностей физических величин имеем уравнение:

$$\nu = J^\alpha \cdot E^\gamma \cdot g^\rho \quad (1)$$

Относительно единиц измерения в СИ уравнение (1) имеет вид

$$\kappa\text{г}^0 \cdot \text{м}^0 \cdot \text{с}^{-1} = (\kappa\text{г} \cdot \text{м}^2)^\alpha \cdot \left(\frac{\kappa\text{г}}{\text{м} \cdot \text{с}^2}\right)^\gamma \cdot \left(\frac{\text{м}}{\text{с}^2}\right)^\rho$$

Решая это уравнение относительно показателей, получим, что  $\gamma = \frac{1}{8}$ ;  $\alpha = -\frac{1}{8}$ ;  $\rho = \frac{3}{8}$ . Таким образом, уравнение (1) принимает следующий вид:

$$\nu = \sqrt[8]{\frac{E \cdot g^3}{J}} \quad (2)$$

Измерение частоты колебаний стержней, изготовленных из различных материалов (сталь, алюминий, древесина) проводилось с помощью акселерометра. Возникающие при колебаниях стержней в акселерометре электрические сигналы поступали в ЭВМ с последующей обработкой на основе специального программного обеспечения.

Экспериментальные исследования зависимости частоты колебаний стержней от их моментов инерции и модулей упругости подтвердили расчеты на основе формулы (2). Расхождение данных, полученных экспериментально и теоретически, не превышало величины одного порядка.

Таким образом, полученное уравнение на основе теории размерностей физических величин можно использовать для оценки частоты колебаний тонких стержней, изготовленных из других различных материалов.

Научный руководитель – д-р пед. наук, проф. В. Ф. Глушков

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ГРУЗА НА ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ ПАРАШЮТНОЙ СИСТЕМЕ

И. В. Деннер

Филиал Военного учебно-научного центра Сухопутных войск  
Общевойсковая академия Вооруженных Сил Российской Федерации,  
г. Новосибирск

Расчёт параметров движения парашютных систем (ПС) требует привлечения экспериментальных данных, совместного решения уравнений аэродинамики, аэроупругости, динамики полёта [1]. Поэтому полезна разработка упрощённых моделей, позволяющих получить приближенные, но реалистичные данные о движении груза на ПС [2,3].

В работе моделируются основные фазы движения груза на двухступенчатой ПС Д-6 [4]: 1) движение на стабилизирующем куполе; 2) выход строп основного купола; 3) наполнение; 4) раскрытие и снижение на основном куполе. Для расчёта используются уравнения движения материальной точки (фазы 1 и 2) и тела переменной массы (фаза 2). В отличие от [2], где для расчёта раскрытия купола использовались экспериментальные данные, в представленной работе применена упрощённая модель [3], не требующая результатов эксперимента. При расчёте наполнения купола (фаза 3) использовалось условие о постоянном пути наполнения [3].

Тестовые расчёты показали достоверность получаемых данных, возможность моделировать основные фазы прыжка парашютиста на двухступенчатой ПС. В работе приводятся результаты, показывающие влияние метеоусловий, скорости десантирования, времени стабилизации, массы груза на параметры его движения.

Вся работа выполнена с использованием только свободного программного обеспечения: операционной системы Debian GNU/Linux, системы для математических вычислений GNU Octave и др.

---

1. Белоцерковский С.М., Ништ М.И., Пономарев А.Т., Рысев О.В. Исследование парашютов и дельтапланов на ЭВМ. М.: Машиностроение, (1987).

2. Трямкин А. В., Скиданов С. Н. Исследование процесса наполнения парашютных систем. Труды МАИ, № 3 (2001).

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

4. Герасименко И.А. Воздушно-десантная подготовка. — М.: Военное изд-во, (1985).

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

# ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ГИПЕРЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ТОНКОЙ ПЛАСТИНЫ И ОСТРОГО КОНУСА

О. А. Долгопятова

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

Существует множество летательных аппаратов с различной формой носовой части. Одна из них ярко выражена у недавно разработанного гиперзвукового летательного аппарата Х-43, скорость которого может достигать числа Маха  $M=10$ . Его носовую часть можно представить как тонкую пластину. Носовая часть других летательных аппаратов, например, ракет, может быть приближена при моделировании как острый конус. Необходимо знать, как влияет форма носовой части летательного аппарата на неустойчивость пограничного слоя.

В данной работе производится сравнение характеристик восприимчивости пограничного слоя на тонкой пластине и остром конусе к акустическим колебаниям различных частот при обтекании их гиперзвуковым потоком идеального газа при нулевом угле атаки. Угол раствора конуса  $7^\circ$ . Вычисления проводились на программном пакете «Ansys Fluent», построение сетки выполнено с помощью программы «Gambit». Акустические колебания излучались под нулевым углом наклона к исследуемым объектам. Расчетные области представляли собой прямоугольник с длиной  $l = 0.05\text{м}$  и высотой  $h = 0.015\text{м}$ . Вводились колебания давления, числа Маха и температуры около постоянных величин  $P = 666.755\text{Па}$ ,  $T = 48.26\text{К}$ ,  $M = 5.95$ . Безразмерная амплитуда колебаний давления составляла  $\varepsilon = 5 \cdot 10^{-4}$ . На стенке задавалась постоянная температура  $T = 497\text{К}$ . Зависимость коэффициента вязкости от температуры определялась по закону Сазерленда. Расчетные сетки имели сгущение к передним кромкам пластины и конуса.

Проведены расчеты для медленных акустических волн с частотами 34кГц, 68кГц, 137кГц и 275кГц. Во всех случаях возбуждается первая мода неустойчивости собственных колебаний пограничного слоя. Показано, что безразмерные коэффициенты восприимчивости пограничного слоя на тонкой пластине и остром конусе к акустическим колебаниям близки по величине. Наблюдается зависимость амплитуды первой моды колебаний от частоты акустических волн.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН А. Н. Шиплюк

## РАЗВИТИЕ ТЕНЕВЫХ МЕТОДОВ НА ОСНОВЕ АДАПТИВНЫХ ВИЗУАЛИЗИРУЮЩИХ ТРАНСПАРАНТОВ (АВТ)

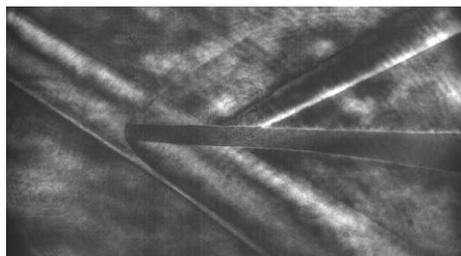
А. Д. Дрясов

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

Новосибирский государственный университет

Теневые методы являются одними из наиболее распространенных из оптических методов, применяемых для исследования газовых потоков. Однако существует ряд проблем, при их использовании на аэродинамических трубах: высокий уровень вибраций присущий работе данных установок; недостаточная чувствительность; сужение рабочего диапазона при повышении чувствительности. Для устранения данных проблем, в ИТПМ СО РАН была разработана модификация теневого метода основанная на применении в качестве визуализирующего транспаранта слоя фототропного вещества изменяющего оптические свойства под действием излучения (АВТ метод). В области фокусировки нулевых пространственных частот формируется визуализирующее пятно с отличным от изначального коэффициентом пропускания и/или коэффициента преломления. Это равносильно добавлению к исходной волне плоской волны, а изображения аналогичны интерферограммам в бесконечной полосе.

Первоначально использовались фототропные силикатные стекла.



Обтекание треугольной пластины.

$$M = 2, Re_1 = 10^7 \text{ м}^{-1}.$$

Однако малая скорость обработки подобных устройств (на уровне нескольких секунд) и относительно большая толщина слоя (2-3 мм) существенно снижали их эффективность. В настоящее время разработаны тонкие АВТ толщиной не превышающей длину перетяжки сфокусированного излучения (менее 100 мкм), со скоростью обработки на уровне нескольких микросекунд, что позволяет практически полностью снять указанные проблемы. На рисунке представлен пример визуализации сверхзвукового обтекания треугольной пластины на аэродинамической трубе Т-325, работа которой характеризуется высоким уровнем вибраций, что не позволяет эффективно использовать обычные схемы. Полученные изображения доказывают эффективность подобных АВТ.

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

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТОКА АЭРОЗОЛЯ НАНОПОРОШКА В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА

К. В. Зобов

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

В последнее время в различных производственных отраслях проявляется всё больший интерес к нанодисперсным порошкам, которые способны изменять свойства производимых материалов и веществ. Метод получения нанопорошка испарением электронным пучком [1] уже показал свою применимость для многих веществ и сейчас находится на этапе дальнейшего увеличения производительности. Особую ценность для него представляет экспресс-метод, позволяющий контролировать параметры производимого нанопорошка, такие как концентрация и размер частиц, непосредственно в ходе его получения. Он позволит управлять производственным процессом, повысить его эффективность и расширить диапазон показателей качества производимых продуктов.

В нашей работе основное внимание уделялось измерениям интенсивности рассеяния света, проходящего через аэрозоль нанопорошка и применению теории Релея [2], дающей зависимость интенсивности рассеяния от концентрации и пройденного светом расстояния, к полученным результатам. Для проведения исследований был создан специальный модуль, который позволил проводить измерения непосредственно в процессе получения нанопорошка на производственной установке. Также были установлены вспомогательные системы контроля параметров потока — такие как давление, температура, расход. В ходе экспериментов был получен ряд характерных зависимостей, позволяющих судить о параметрах аэрозоля. Полученные данные сравнивались с данными, полученными методами микроскопии и адсорбционных измерений и теоретических расчетов.

В работе предложен и апробирован оптический метод анализа потока аэрозоля нанопорошка. Впоследствии данная методика может быть применена на промышленной установке по производству нанопорошков, основанной на методе испарения электронным пучком.

---

1 Бардаханов С.П., Корчагин А.И., Куксанов Н.К., Лаврухин А.В., Салимов Р.А., Фадеев С.Н., Черепков В.В. Получение нанопорошков испарением исходных веществ на ускорителе электронов при атмосферном давлении // ДАН. 2006. Т. 409. № 3. С. 320–323.

2. Исимару А., Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах // Москва 1981

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. С. П. Бардаханов

# **О ЛИНЕЙНОМ РАЗВИТИИ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ТРЕХМЕРНОМ СВЕРХЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ**

Г. Л. Колосов

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

Работа посвящена экспериментальному исследованию развития контролируемых возмущений на тонком скользящем крыле. Интерес к процессу ламинарно-турбулентного перехода в пространственных сверхзвуковых пограничных слоях вызван большим практическим применением. Известно, что проблема ламинарно-турбулентного перехода в трехмерном случае является очень сложной, т.к. помимо неустойчивостей, присущих безградиентному пограничному слою на плоской пластине, имеется неустойчивость вторичного течения, которая играет важную роль в процессе перехода к турбулентности на скользящем крыле.

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 тлеющего 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.

Представленные в работе эксперименты выполнены в новой постановке, где движение датчика происходило непараллельно передней кромке крыла. Определены волновые характеристики контролируемых пульсаций в области их линейного развития. В работе показана возможность измерения полей контролируемых возмущений в пограничном слое скользящего крыла традиционным для плоских моделей методом. Полученные основные характеристики неустойчивых возмущений можно будет сравнить с расчетами по линейной теории гидродинамической устойчивости.

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

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА В ТАНГЕНЦИАЛЬНОМ ЗАВИХРИТЕЛЕ

И. В. Литвинов

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

В данной работе проведено систематическое экспериментальное исследование интенсивно закрученного турбулентного потока на выходе из тангенциального завихрителя. Сильная закрутка потока приводит к генерации сильной нестационарности течения в форме прецессирующего вихревого ядра (ПВЯ)[1]. Это явления повсеместно встречается в различных технических устройствах, таких как: вихревые трубы, гидроциклоны, циклонные сепараторы, горелки и циклонные топки[2].

В работе представлены детальные экспериментальные данные по характеристикам пульсационного течения с ПВЯ, включая профили средних скоростей, пульсаций на срезе сопла, поля скоростей в продольном сечении, а также частотные характеристики ПВЯ. Результаты получены для трех параметров закрутки  $S=1.4, 1.8, 2.4$  и в широком диапазоне чисел Рейнольдса. Представленные в работе экспериментальные данные могут быть полезны для построения теоретических подходов к описанию ПВЯ [3], а также для верификации численных расчетов.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009 – 2013 годы» и ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы», РФФИ (гранты №№ 11-08-01063, 10-08-01096, 10-08-01093), гранта Правительства России № 11.G34.31.0046 для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских вузах (ведущий ученый – К.Ханъялич, НГУ).

---

1. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки: Пер. с англ./– М.: Мир, 1987. – 588 с., ил.

2. Syred N. A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems. // Progress in Energy and Combustion Science, 2006, Vol. 32 (2), pp. 93–161.

3. Алексеев С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. -Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2003. -504с.

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

# ВОЗНИКНОВЕНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ СТРУКТУР В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ПОД ВЛИЯНИЕМ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЙ

М. В. Михаэлис

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

В работе изучается влияние внешних возмущений на пограничный слой на модели крыла, в том числе на отрывной пузырь и на развитие возмущений при ламинарно-турбулентном переходе. Такие исследования необходимы для разработки новых способов управления течениями жидкости или газа, где необходимо обеспечить безотрывное ламинарное движение. В данной работе изучалось влияние следа за нитями на отрыв потока на модели крыла. Турбулентный след создавался различными нитями, которые устанавливались перед моделью крыла таким образом, чтобы след за ними попадал на верхнюю поверхность модели.

Эксперименты проводились в малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324 Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН в г. Новосибирске.

Модель крыла представляет собой прямоугольник с эллиптическими законцовками на краях. Размеры модели хорда 105 мм, размах (с законцовками) 230 мм. Крыло устанавливалось под углом атаки  $\alpha=0^\circ$  на расстоянии  $L=140$  мм от среза сопла.

Данные о характере обтекания получены с помощью метода поверхностной визуализации.

Результаты экспериментов показали, что в следе за нитью отрывной пузырь на поверхности крыла существенно уменьшился. При этом при установки некоторых образцов нити на передней и центральной частях крыла образовались продольные структуры. Ранее продольные структуры на модели крыла появлялись, если в рабочей части аэродинамической трубы устанавливалась турбулизирующая сетка, обеспечивающая высокий (до 1 %) уровень возмущений потока[1]. Оказалось, что узкий след за тонкой нитью дает аналогичный результат.

---

1. Zharkova G. M., Zanin B. Yu., Kovrizhina V. N., Brylyakov A. P. Free stream turbulence effect on the flow structure over the finite span straight wing // Journal of Visualization. The Visualization Society of Japan. 2002. Vol. 5, № 2. P. 169–176.

2. Михаэлис М.В., Занин Б.Ю., Катасонов М.М. Влияние турбулентного следа на отрыв потока на модели крыла // Вестник НГУ. Серия: Физика. – 2011.- т.6, вып.1. С. 50-59.

Научный руководитель — д-р. техн. наук Б. Ю. Занин

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЛИНЫ 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  
Новосибирский государственный университет

Использование пассивного пористого покрытия на поверхности гиперзвукового ЛА может значительно увеличить длину ламинарного участка [1], и тем самым приведет к снижению тепловых потоков и уменьшению сопротивления трения.

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования влияния длины пассивного пористого покрытия на возмущения в гиперзвуковом пограничном слое. Эксперименты проведены в гиперзвуковой аэродинамической трубе кратковременного действия Транзит-М, при числе Маха  $M_\infty = 6$ . Угол атаки  $\alpha = 0 \pm 2'$ . Модель выполнена в виде острого конуса с полууглом раскрытия  $7^\circ$ , длиной  $L = 353$  мм. Пассивное пористое покрытие, изготовленное из трех слоев нейлоновой сетки со степенью пористости 44%, располагалось на половине поверхности конуса. Толщина покрытия  $h = 0.18$  мм выбрана на основании результатов предыдущих исследований [2]. Использовалось пассивное пористое покрытие длиной  $l_1 = 27$  мм,  $l_2 = 75$  мм и  $l_3 = 123$  мм. Длина покрытия увеличивалась к носику конуса, начиная с точки расположенной на расстоянии 328 мм от носика. Для измерения пульсаций давления использовались высокочастотные датчики давления, установленные на расстоянии 343 мм от носика конуса.

Исследования спектров пульсаций давления на поверхности конуса показали, что эффективность пассивного пористого покрытия нелинейно зависит от его длины. Максимальная эффективность достигается при использовании пористого покрытия длиной  $l_2$ .

---

1. Fedorov A.V., Malmuth N.D., Rasheed A., Hornung H.G. Stabilization of Hypersonic Boundary Layers by Porous Coating // AIAA Journal. – 2001. – Vol. 39. – No. 4. – pp. 605-610.

2. С.В. Лукашевич, С.О. Морозов Экспериментальное исследование влияния параметров пассивного пористого покрытия на развитие возмущений в гиперзвуковом пограничном слое // Материалы XLIX международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс» ФИЗИКА, Новосибирск, 2011 г., стр. 47.

Научный руководитель — чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук А. Н. Шиплюк

## **РАЗВИТИЕ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ-ПРЕДВЕСТНИКОВ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ПРЯМОГО КРЫЛА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯ ГРАДИЕНТА ВНЕШНЕГО ДАВЛЕНИЯ**

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

<sup>3</sup>ЦАГИ им. Н. Е. Жуковского

В последние годы пристальное внимание уделяется изучению продольных локализованных возмущений, возникающих в пограничном слое при повышенной степени турбулентности набегающего потока, так называемых полосчатых структур “streaky structures”. Это 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 условия для развития неустойчивости, связанной с образованием предвестников вблизи переднего и заднего фронта локализованного возмущения, которые далее трансформируются в турбулентные пятна (“incipient spots”) в результате течения в пограничном слое переходит из ламинарного состояния в турбулентное [1].

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 не исключает из моделирования процесса взаимодействия внешних возмущений с пограничным слоем, которое наблюдается в “естественных” условиях. 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. контракт № 14.740.11.0354.

---

1. Бойко А.В., Грек Г.Р и др. Возникновение турбулентности в пристенных течениях. Новосибирск: Наука. Сиб. Издат. Фирма, 1999.

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

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ПОТОКА СМЕСИ ГЕЛИЯ И МЕТАНА В НАНОКАНАЛАХ

Д. С. Ожгибесов

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

В настоящей работе проведено молекулярно-динамическое исследование течения смеси гелия и метана в наноканалах цилиндрической формы с заданными радиусом и длиной. С помощью метода Монте-Карло моделировалось вбрасывание атомов гелия и метана из емкости во входное сечение канала. При этом использовалась модель молекулярного потока с заданными параметрами газов в емкости. В работе исследовалось истечение газов в вакуум через выходное сечение. Температура газов во всех расчетах предполагалась равной 300 К. Исследования проводились в интервалах параметров: давление — от 1 до 3 атмосфер, длина каналов — от 500 Å до 10  $\mu\text{m}$ , радиус каналов — 110 Å т.к. это размеры каналов в мембранах, выпускаемых промышленностью в настоящее время.

Взаимодействие атомов и молекул газа между собой описывалось потенциалом Леннарда-Джонса с константами, найденными в эксперименте. Траектории атомов рассчитывались в рамках классической механики. Взаимодействие гелия и метана со стенками канала проведено как для случая 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

# ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КЛАСТЕРОВ С ГАЗОМ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

Д. В. Первов

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

Кластеры представляют собой промежуточное звено между отдельными молекулами и микроскопическими объектами размером порядка одного микрона и проявляют свойства, которые отличаются как от свойств отдельных составляющих их частиц, так и объемного вещества. Необходимость данного исследования связана с применением кластерных пучков в практических приложениях и с проблемами транспортировки нанопорошков. Основным средством управления кластерными пучками является использование несущей газовой фазы. Более того, большинство методов получения наночастиц так или иначе связаны с формированием кластеров в газовой фазе, либо их осаждением в ней.

На данный момент отсутствует адекватная модель, описывающая взаимодействие кластеров с газом, физический механизм взаимодействия до сих пор не изучен, нет и прямых экспериментов по изучению нанокластеров. Методы прямого статистического моделирования на данный момент неприменимы для изучения взаимодействия газового потока с кластером ввиду отсутствия адекватной модели рассеяния и, как следствие, информации о вероятностях рассеяния.

В данной работе в рамках метода молекулярной динамики рассматривается взаимодействие кластеров с размерами от 20 до 100Å с газовым потоком в широком диапазоне газодинамических параметров. Скорость потока варьируется от 10м/с до 0,9км/с, температура – от 100 до 900К, давление – от 1 до 10атм. В качестве газа используется аргон. В работе рассмотрены различные модели кластера. В модели реального кластера, учитывающей энергообмен, кластер моделируется кристаллом меди с ГЦК структурой, а взаимодействие атомов кластера между собой описывается потенциалом Воутера. Взаимодействие атомов аргона с атомами меди описывается потенциалом Леннарда-Джонса. В каждой модели рассмотрены случаи идеального и реального одноатомного газа, взаимодействие между атомами описывалось потенциалом Леннарда-Джонса с параметрами для аргона. Проведено сравнение результатов с моделью простой поверхности кластера с решением уравнения Больцмана для свобономолекулярного режима. Уделено внимание методологии моделирования взаимодействия наноструктур с газом.

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

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ КАПЕЛЬ В КОЛЬЦЕВОМ ГАЗОЖИДКОСТНОМ ПОТОКЕ

А. В. Рабусов

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

Дисперсно-кольцевое течение представляет собой совместное течение плёнки жидкости, турбулентного потока газа и дисперсной фазы — капель, уносимых с плёнки в ядро потока газа и осаждающихся обратно. Данный вид течения используется в широком спектре промышленных установок: в тепловых трактах АЭС, парогенераторах, очистных пленочных аппаратах, химической промышленности.

Отрыв капель жидкости с поверхности пленки и унос их в ядро газового потока оказывает существенное влияние на интегральные характеристики течения. Для замыкания существующих моделей явления уноса капель требуется прямое экспериментальное наблюдение явления отрыва, которое затруднено причинами технического плана. Целью настоящей работы является динамика капель сразу после отрыва.

Для визуализации потока использовался скоростной метод лазерно-индуцированной флюоресценции. Метод позволяет фиксировать траектории движения крупных капель в пространстве-времени, а также оценивать размер капель. Исследовано опускное дисперсно-кольцевое течение в канале с внутренним диаметром 15 мм в диапазоне скоростей газа 27-58 м/с и чисел Рейнольдса жидкости от 142 до 350 для трех рабочих жидкостей различной вязкости.

Анализ треков капель проведен в свете трех различных механизмов уноса: срыва волн ряби с волн возмущения, уноса в результате слияния волн возмущения и вторичного брызгоуноса после осаждения капли на поверхность пленки.

Измерены начальные скорости и диаметры капель на начальном этапе эволюции капель. Начальная скорость составляла  $\sim 1/3$  от скорости газа и в 3-4 раза превышала скорость волн возмущения. Сделаны обобщения характера движения капель.

Работа выполнена при поддержке гранта президента РФ МК-115.2011.8

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

# **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЛНООБРАЗОВАНИЯ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ МНОГОСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

А. Е. Розен, Е. А. Журавлев  
Пензенский государственный университет

Успешное развитие сварки взрывом в последние годы поставило задачу о волнообразовании в число наиболее актуальных проблем теории высокоскоростных косых соударений твердых тел.

Результаты экспериментального исследования размеров волн от начальных параметров сварки взрывом не позволяют установить зависимость волнообразования от основных параметров соударения.

Для исследования волнообразования на поверхностях свариваемых металлов было применено компьютерное моделирование в LS-DYNA.

Задачи решались в постановке Эйлера, то есть сетка конечных элементов остается неподвижной, а материал течет сквозь сетку взаимодействуя с другими материалами, присутствующими в модели.

В полученных результатах оценивались геометрические характеристики волн, такие как длина волны  $\lambda$ , амплитуда волны  $a$ , а также зависимости этих параметров от скорости и угла соударения.

По данным приведенным в литературных источниках, волнообразование происходит не сразу в точке соударения, а на некотором расстоянии. При этом амплитуда и длина волны постепенно возрастают, пока не достигнут стационарного процесса. Этот эффект наблюдался и при моделировании.

По результатам моделирования можно сделать вывод о возможности применения метода для анализа и прогнозирования параметров процесса волнообразования для широкой группы металлов и их сплавов.

Научный руководитель – д-р техн. наук, проф. А. Е. Розен

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННЕЙ АЭРОДИНАМИКИ МОДЕЛИ ВИХРЕВОЙ ТОПКИ

А. С. Садуакасова

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

Технологии факельного сжигания пылеугольного топлива в вихревом потоке относятся к наиболее перспективным и экологически безопасным технологиям сжигания низкокачественных углей [1]. Аэродинамика вихревой топki определяет характер процесса горения в целом. Она влияет на устойчивость распределения температуры и тепловых потоков, позволяет контролировать процессы зашлаковывания, а также уровень вредных выбросов. Необходимо научное обоснование применяемых инженерных методов расчетов вихревых топочных устройств для достаточного изучения сложной структуры закрученного газодисперсного потока.

Физическое моделирование является необходимым этапом разработки новых типов крупных энергетических установок. В условиях лабораторного моделирования бесконтактные оптические методы измерения обеспечивают исчерпывающую информацию о течении и процессах переноса в модели изучаемого аппарата, позволяют глубже понять закономерности топочных процессов.

В данной работе на основе метода лазерной доплеровской анемометрии была экспериментально исследована аэродинамика лабораторной модели вихревой топki энергетического парогенератора. Для бесконтактного измерения характеристик закрученного потока применялась лазерная доплеровская измерительная система ЛАД-05 [2]. В результате исследований была получена сложная структура течения в модели вихревой топki. Полученные результаты позволили определить основные особенности исследуемой конструкции.

---

1. Саломатов В.В. Природоохранные технологии на тепловых и атомных электростанциях. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 853 с.

2. Меледин В.Г., Аникин Ю.А., Бакакин Г.В. и др. Лазерная доплеровская измерительная система для 2D диагностики газожидкостных потоков ЛАД-05 // Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование. Т. 5 – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. – С. 343-344.

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

# НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПОПЕРЕЧНО-ПЕРИОДИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ С ОТРЫВОМ ЛАМИНАРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

А. И. Скиба

Новосибирский государственный университет

Рассматривается развитие малых колебаний в зоне отрыва ламинарного пограничного слоя за уступом поверхности продольно обтекаемой пластины. Предмет исследования – влияние стационарной периодической в поперечном потоку направлении модуляции отрывного течения на свойства его устойчивости.

Переход к турбулентности в течениях со сдвигом скорости может быть инициирован возмущениями различного вида, в числе которых т.н. «полосчатые» структуры, представляющие собой стационарные и квазистационарные деформации ламинарного течения, вытянутые вдоль потока и локализованные в поперечном к нему направлении. Возникновение полосчатых структур – эффект немодового усиления возмущений сдвигового слоя, выходящий за рамки нарастания элементарных волн, описываемого классической теорией гидродинамической устойчивости. Индуцируя локальные градиенты скорости течения, полосчатые структуры способствуют усилению его нестационарных колебаний, которые приводят к разрушению ламинарного режима обтекания тел.

Дестабилизация течения с отрывом ламинарного пограничного слоя полосчатыми структурами – тема данного доклада. Интерес к этому явлению связан с построением уточненных моделей переходных областей отрыва потока и поиском перспективных методов управления отрывными течениями, интегральные характеристики которых в условиях гидродинамической неустойчивости могут быть чувствительны к слабым внешним воздействиям. Зафиксированный в экспериментах [1, 2] эффект дестабилизации подробнее изучен в настоящей работе.

---

1. Boiko A.V., Dovgal A.V., Hein S. Control of a laminar separating boundary layer by induced stationary perturbations // Eur. J. Mech. B/Fluids. 2008. Vol. 27, No. 4. P. 466–476.

2. Бойко А.В., Довгаль А.В., Сорокин А.М. Немодовое нарастание стационарных возмущений ламинарного течения в зоне отрыва пограничного слоя // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18, № 1. С. 109–115.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, код проекта 10-08-00276-а.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук А. В. Бойко

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕЧЕНИЯ В МОДЕЛИ ОТСАСЫВАЮЩЕЙ ТРУБЫ ГИДРОТУРБИНЫ

С. Г. Скрипкин

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

Отсасывающая труба (ОТ) является неотъемлемой частью ГЭС. При эксплуатации ОТ в неоптимальных режимах работы, что регулярно происходит на ГЭС, возникает гидродинамическая неустойчивость в виде прецессии вихревого ядра (ПВЯ), которая создает пульсации давления в канале [1]. В настоящее время при проектировании проточных частей ГЭС применяется компьютерное моделирование, но перенесение результатов на натурные установки, требует предварительной верификации на моделях. Также необходимо накопление экспериментальных данных о структуре потока для дальнейшего использования при разработке новых гидроагрегатов.

На базе ИТ СО РАН был создан замкнутый напорный контур с рабочим участком, выполненным по геометрии Т-99. Стенки рабочего участка были выполнены из оргстекла, что дало возможность оптического доступа ко всем внутренним частям. На входе в рабочий участок находится стационарный лопаточный завихритель.

Отметим, что по геометрии Т-99 имеется большое количество расчетных работ [2], однако экспериментальные данные ограничены характеристиками потока, полученными в отдельных измерительных сечениях.

В ходе работы были получены данные по визуализации потока в различных сечениях отсасывающей трубы, а также получены поля скоростей измеренные PIV методом. Была произведена модификация поворотной части рабочего участка и измерены перепады давления.

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. Губин М. Ф. Отсасывающие трубы гидроэлектростанций. – М.: Энергия, 1970, – 270 С.

2. Cervantes M. J., Engström T. F., Gustavsson L. H., Proceedings of the third IAHR/ERCOFTAC Workshop on draft tube flows. Turbine-99 III // LuleaUniversityofTechnology, 2005.

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

## ТУРБУЛЕНТНАЯ СТРУКТУРА КАВИТИРУЮЩЕГО ПОТОКА ВБЛИЗИ КАСКАДА ГИДРОПРОФИЛЕЙ

М. В. Тимошевский

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

Важнейшими условиями безопасной и эффективной работы гидроэнергетических систем, как вновь создаваемых, так и уже эксплуатирующихся, являются надежность и долговечность используемого оборудования. Как правило, работа реальных энергетических агрегатов, таких как гидротурбины, и гидротехнических сооружений сопровождается наличием нестационарного турбулентного течения сложной геометрии, зачастую являющегося двухфазным. Наиболее существенную роль, в течениях такого типа играют крупномасштабные вихревые структуры (КВС) и кавитация. Исследование динамики кавитационных каверн и 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 систем гидрокрыльев, которые необходимы для их совершенствования и верификации. Данная работа посвящена экспериментальному изучению нестационарного кавитационного обтекания каскада гидропрофилей.

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 каскада профилей NASA0015. 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  $3^\circ$ . В ходе экспериментов число кавитации изменялось от 1,3 до 1,8.

В работе проведено качественное сравнение кавитационного обтекания каскада и одиночного профиля. Показано сходство картин течения и распределений турбулентных характеристик. При переходе к облачному типу кавитационного обтекания в обоих случаях уровень турбулентных пульсаций возрастает примерно на порядок. Однако количественные значения как средних, так и пульсационных характеристик существенно отличаются. Показано, что инкремент роста пульсаций скорости при понижении числа кавитации для одиночного профиля выше и достигает максимума в следе выше по течению, чем для среднего крыла каскада.

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

# ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ПЕРЕДНЕЙ КРОМКЕ СКОльзяЩЕГО КРЫЛА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ТЕРМОГРАФИИ

С. Н. Толкачев, В. Н. Горев

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

Новосибирский государственный университет

В настоящее время остро стоит вопрос снижения сопротивления летательных аппаратов, что вызывает повышенный интерес к изучению ламинарно-турбулентного перехода. Большинство современных самолетов использует 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), которая проявляется в виде продольных вихрей [1]. 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 длиной 4000 мм. и поперечным сечением 1000×1000 мм. на модели скользящего крыла, имеющей цилиндрическую переднюю кромку и угол скольжения  $45^{\circ}$ . Для стабилизации линии растекания и предотвращения отрыва потока на участках максимального утолщения крыла были использованы турбулизаторы. Стационарное возмущение возбуждалось одиночной шероховатостью, установленной вблизи линии растекания. Для исследования возможности турбулизации передней кромки, на ней была закреплена полоса крупнозернистой наждачной бумаги. Скорость потока составляла от 2.8 м/с до 24 м/с.

Методом жидкокристаллической термографии с подогревом рабочей поверхности были получены визуализации исследуемых возмущений.

Как показал эксперимент, в исследованном диапазоне скоростей турбулизации течения вдоль передней кромки не происходило.

За шероховатостью формируется пара продольных вихрей, хорошо различимых на картинах визуализации. Увеличение размера шероховатости приводит к увеличению геометрических размеров и амплитуды возмущения. Увеличение скорости набегающего потока приводит к повышению чувствительности пограничного слоя к размеру шероховатости.

---

1. Reed H.L., Saric W.S., Stability of three-dimensional boundary layers, Ann. Rev. Fluid Mech. – 1989. – Vol. 21. – P. 235 – 284.

# ЭНЕРГЕТИКА МОРСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Е. А. Шава, В. А. Шава

Сибирский государственный университет путей сообщения,  
г. Новосибирск

В характеристике параметров землетрясений на первом месте стоит сейсмическая энергия как главная характеристика очага землетрясения.

Следует учитывать, что любая математическая формула описывает некую идеализированную модель физического процесса. Основное правило при таком подходе заключается в том, чтобы полученное математическое решение соответствовало начальным условиям.

Оценим энергию в зоне морских землетрясений. Во время землетрясения над очагом формируется начальное смещение поверхности океана. Будем считать, что вся энергия в этот момент представлена в виде потенциальной энергии поднятия столба жидкости над очагом. Исходя из физических соображений, предположим, что высота залегания очага землетрясения над уровнем моря связана с энергией землетрясений, ускорением свободного падения и плотности воды, т. е. существует зависимость вида  $H = E^\alpha \cdot \rho^\varphi \cdot g^\gamma$ .

В рамках теории размерностей физических величин получим в итоге уравнение  $H = \sqrt[4]{\frac{E}{\rho \cdot g}} \Rightarrow E = \rho \cdot g \cdot H^4$  (1).

В табл. 1 приведены экспериментально наблюдаемые данные по энергии землетрясений и рассчитанные по формуле (1).

Таблица 1

Название	Дата	Магни-туда	Глубина очага, м	Высота волны, м	Энергия землетрясений формула (1) Дж	Экспери-мент Дж
Северо-Курильск	05.11.1952	9	25000	18	$5,30926 \cdot 10^{21}$	$10^{21}$
Аляска	09.03.1957	9,1	24000	8-15	$3,65684 \cdot 10^{21}$	$10^{21}$
Аляска	28.03.1964	9,2	21000	10	$2,14337 \cdot 10^{21}$	$10^{21}$
Юго-восточная Азия	26.12.2006	9,3	10000	15	$1,10661 \cdot 10^{20}$	$10^{20}$
Индонезия	09.01.2005	6,8	22000	52,4	$7,16776 \cdot 10^{18}$	$10^{18}$
Юго-восточная Азия	28.03.2005	8,7	30000	3	$8,91356 \cdot 10^{21}$	$10^{21}$
Соломоновы острова	02.04.2007	8	10000	5	$1,1022 \cdot 10^{20}$	$10^{20}$
Чили	27.02.2010	8,8	35000	3	$1,65125 \cdot 10^{22}$	$10^{22}$
Япония	11.03.2011	9	32000	10	$1,15488 \cdot 10^{22}$	$10^{22}$

Таким образом, расчет энергии землетрясений по формуле (1) дает неплохое совпадение данных с реально наблюдаемыми.

Научный руководитель – д-р пед. наук, проф. В. Ф. Глушков

## ВЛИЯНИЕ ГАЗА НА СТЕНКИ ВИБРИРУЮЩЕЙ ПОЛОСТИ

А. В. Яковенко

Тюменский филиал

Института теоретической и прикладной механики

им. С. А. Христиановича СО РАН

По мере развития техники человек всё больше и больше соприкасается с вибрационными явлениями, практически все машины в той или иной степени подвержены механическим колебаниям. Даже при свободном полёте космического корабля ощущается вибрация от работающей аппаратуры [1]. Вибрация машин может оказаться причиной ненормального функционирования техники и даже привести к серьёзным авариям. В материале, образующем механизмы, часто встречаются трещины, поры или пустоты, заполненные воздухом. Поэтому очень важно изучить влияние газа, заключённого внутри некоторой полости на окружающий материал. В работе исследуется влияние вибрационного воздействия с постоянной частотой на прямоугольную полость, заполненную совершенным вязким газом. Вследствие сжимаемости среды происходит формирование акустических волн, интенсифицирующих процесс теплообмена. Наблюдаются две доминирующие частоты колебания: заданная частота внешнего вибрационного воздействия и собственная частота системы, вызванная движением акустических волн [2]. При интенсивном воздействии происходит образование ударных волн. Важной задачей является выявление интенсивности воздействия таких волн на границы области для предотвращения возможного разрушения изделия. Используя полученные данные (максимальное давление и температура вблизи границы области) можно легко высчитать максимально допустимую частоту вибрации для заданных остальных характеристик. Задача решалась численно при помощи алгоритма численного расчёта сжимаемых сред, краткое описание которого приведено в [2], использовался метод контрольного объёма и второй порядок аппроксимации граничных условий [3].

---

1. К. В. Фролов. Вибрация – друг или враг? М.: Наука, 1984, 144 с.

2. A. V. Yakovenko, P. T. Zubkov, L. V. Abdubakova. Computation of vibrations in the area with perfect viscous gas // Proc. of XXXIX Summer School — Conference "Advanced Problems in Mechanics" (July 1-5, 2011, St. Petersburg (Repino), Russia). — Санкт Петербург: Политехнический университет, 2011. – с. 532-542.

3. С. В. Патанкар. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах. М.: МЭИ, 2003. 312 с.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. П. Т. Зубков

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

А. А. Яцких

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

Экспериментальные исследования механизмов возникновения турбулентности в сдвиговых течениях проводятся как в естественных, так и в контролируемых условиях. Дозвуковой эксперимент имеет в наличии широкий набор разнообразных способов введения контролируемых возмущений. В последнее время, используя методику введения в пограничный слой локализованных как по пространству, так и по времени возмущений, наметился значительный прогресс в экспериментальном описании поздних стадий ламинарно-турбулентного перехода при дозвуковых скоростях набегающего потока [1]. При сверхзвуковых скоростях эксперимент сильно ограничен в выборе способов генерации искусственных возмущений в пограничном слое. Сейчас общепризнан и широко используется высокочастотный электроискровой разряд.

Данная работа посвящена описанию нашей первой попытке введения в сверхзвуковой пограничный слой локализованных по времени и пространству возмущений. Целью работы была разработка и апробация метода импульсных контролируемых возмущений для сверхзвукового пограничного слоя плоской пластины.

Эксперименты выполнены в сверхзвуковой малотурбулентной аэродинамической трубе Т-325 ИТПМ СО РАН при числе Маха  $M=2$ . В качестве экспериментальной модели использовалась плоская стальная пластина с острой передней кромкой, установленная под нулевым углом атаки. Контролируемые возмущения в пограничный слой вводились с помощью импульсного «точечного» электрического разряда. В работе показано, что метод введения импульсных возмущений электрическим разрядом действенен и может позволить изучение развития возмущений в сверхзвуковом пограничном слое.

---

1. Грек Г.Р., Катасонов М.М., Козлов В.В. Моделирование возникновения турбулентного пятна и полосчатые структуры в пограничном слое крыла при повышенной степени турбулентности набегающего потока // Теплофизика и аэромеханика. – 2008. – Т. 15. – № 4. – С. 585-598.

Научные руководители – д-р физ.-мат. наук А. Д. Косинов

# ТЕПЛОФИЗИКА

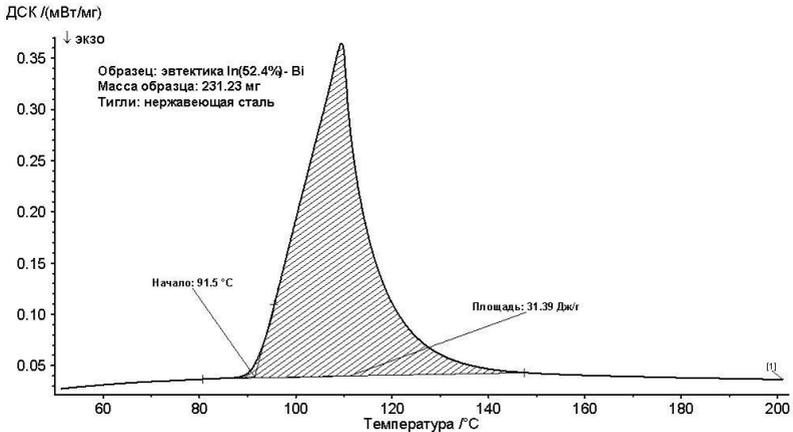
## ЭНТАЛЬПИЯ ПЛАВЛЕНИЯ ЛЕГКОПЛАВКИХ ЭВТЕКТИЧЕСКИХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ In, Bi

В. В. Бекк, А. Ш. Агажанов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН

Методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) [1] определены температура и энтальпия плавления двухкомпонентных эвтектических сплавов на основе In и Bi. Исследовались сплавы индий – висмут (64,4 мас. % Bi) и индий–висмут (47,6 мас. % In). Измерения проводились в режиме нагрева со скоростью 10 К/мин на тиглях из нержавеющей стали.

На ДСК кривой процесс плавления сплава характеризуется образованием пика (см. рисунок). Температура плавления соответствует температуре начала пика, а энтальпия плавления образца определяется площадью под пиком.



Эксперименты показали хорошую воспроизводимость результатов. Установлено, что для исследованных сплавов экспериментальные данные по энтальпии плавления ( $\Delta H_f$ ) существенно отличаются от  $\Delta H_f$ , рассчитанной по правилу аддитивности.

1. Емелина А.Л. Дифференциальная сканирующая калориметрия // Лаборатория химического факультета МГУ. – 2009.

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

## ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОЕ СПЕКАНИЕ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

М. С. Болдин, Н. В. Сахаров, С. В. Шотин, А. В. Нохрин, В. Н. Чувильдеев  
Научно-исследовательский физико-технический институт  
Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского

В работе описаны результаты исследований влияния режимов электроимпульсного плазменного спекания (ЭИПС) (температуры спекания, скорости нагрева и охлаждения, времени изотермической выдержки, величины приложенной нагрузки) на физико-механические свойства керамики на основе  $Al_2O_3$ .

В качестве объекта исследования в работе использовался чистый (99.98%) порошок  $\alpha-Al_2O_3$  дисперсностью 0.85-1.0 мкм. ЭИПС порошка проводилось на установке «Dr. Sinter SPS-625». Скорость нагрева варьировалась от 5 до 2500 °С/мин, время выдержки не превышало 30 минут, давление изменялось от 25 до 100 МПа. Спекание проводилось в вакууме (5 Па).

Исследование кинетики спекания показало, что консолидация порошка  $\alpha-Al_2O_3$  проходит в интервале температур 1260 — 1440 °С, что существенно ниже характерных температур получения  $Al_2O_3$ -керамики методом горячего прессования ( $T \sim 1600-1700$  °С).

Исследование влияния скорости ЭИПС на параметры структуры и физико-механические свойства оксида алюминия показывает, что нагрев со скоростью  $V_{н} = 2500$  °С/мин позволяет в керамике  $Al_2O_3$  сформировать однородную мелкозернистую структуру ( $d = 1.5$  мкм) и получить материал с высокой прочностью ( $H_V = 20$  ГПа,  $K_{IC} = 3.6$  МПа·м<sup>1/2</sup>).

Проведены исследования влияния режимов ТО на структуру и физико-механические свойства керамики  $Al_2O_3$ , полученной по различным режимам ЭИПС. Показано, что увеличение степени неравновесности структуры спеченной керамики, обусловленное увеличением скорости нагрева при консолидации, приводит к повышению интенсивности разупрочнения (снижение твердости) при последующей ТО. Снижение твердости в результате выдержки ( $T = 1450$  °С,  $t = 3$  ч) образца полученного со скоростью нагрева  $V_{н} = 2500$  °С/мин составляет  $\Delta H_V = 6.2$  ГПа, в то время как для образца полученного при  $V_{н} = 100$  °С/мин величина  $\Delta H_V$  не превышает 0.4 ГПа.

Показано, что разупрочнение керамики связано с протеканием процессов рекристаллизации и коалесценции.

Для объяснения полученных результатов предложена качественная модель эволюции структуры чистых керамик при высокоскоростном ЭИПС.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. В. Н. Чувильдеев

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТАРЕНИЯ НА ЗАРОЖДЕНИЕ ТРЕЩИН КОРРОЗИОННОЙ УСТАЛОСТИ В ТРУБНЫХ СТАЛЯХ

Е. Н. Бутусова, А. В. Нохрин, В. Н. Чувильдеев

Научно-исследовательский физико-технический институт  
Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского

В работе описаны результаты экспериментальных и теоретических исследований влияния параметров структуры малоуглеродистых состаренных сталей на зарождение трещин коррозионной усталости.

Объектами исследования выступали трубные стали различного химического и фазового состава, полученные методами горячей прокатки, нормализации, контролируемой прокатки и имеющие различный срок эксплуатации. Исследовались стали с малой объемной долей выделившихся карбидов (состояние до эксплуатации –  $S_1$ ) и стали с интенсивным выделением карбидной фазы по границам зерен феррита (состояние после длительной эксплуатации –  $S_2$ ). Максимальная объемная доля выделившихся частиц не превышала 1%.

Исследования проводились с использованием автоматизированного комплекса для испытаний по схеме «консольный изгиб». Испытывались образцы  $5 \times 10 \times 60$  мм с U-образным надрезом глубиной 0.5 мм с радиусом закругления 0.25 мм в 3%-ном водном растворе NaCl при частоте нагружения 50 Гц. Напряжение в вершине концентратора ( $\sigma_a$ ) варьировалось от предела макроупругости до предела прочности. В ходе испытаний определялось число циклов нагружения до зарождения трещины ( $N_0$ ) при заданной начальной амплитуде напряжения.

Установлено, что величина  $N_0$  в состаренных сталях ( $S_2$ ) в зависимости от структурного состояния стали и величины прикладываемого напряжения оказывается в 2-5 раз ниже, чем в сталях в состоянии  $S_1$ . Отмечено, что зависимость  $N_0(\sigma_a)$  в полулогарифмических координатах представляет собой прямую линию, угол наклона которой зависит от уровня старения и объемной доли выделившихся карбидов.

В работе предложена модель зарождения трещины. В ее основе лежит предположение о том, что необходимым условием для зарождения трещины является накопление на границе зерна феррита критической степени микропластической деформации. Показано, что старение стали приводит к снижению энергии активации и увеличению скорости микропластической деформации, что обуславливает снижение величины  $N_0$ . Результаты расчетов сопоставлены с экспериментальными данными.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы» и ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007-2013 годы».

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. В. Н. Чувильдеев

## **ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЛОЁВ ЧЕРЕЗ ТЕПЛОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СВЕТОДИОДОВ**

М. В. Воропаев, Д. Д. Каримбаев

Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов  
Томский государственный университет

В настоящее время наметилась тенденция перехода на энергосберегающие источники освещения. Уже с начала 2011 года перестали выпускаться лампы накаливания 100 Вт и выше. На смену лампам накаливания приходят галогенные лампы, люминесцентные лампы, ртутные лампы высокого давления, светоизлучающие диоды (СИД) и т.д.

Особый интерес представляют работы по созданию светоизлучающих матриц видимого диапазона. Выбор конструкции матрицы светодиодов во многом определяется оптимизацией отвода тепла от чипа. В работе рассматриваются конструкции на основе печатных плат с металлической основой. Конструкция представляет собой металлическую основу (дюралюминий, медь) на которую, наносится тонкий диэлектрический слой, поверх которого приклеивается медная фольга. Очевидно, что тепловое сопротивление излучающего элемента на такой конструкции будет определяться, в первую очередь, теплопроводностью диэлектрического слоя.

В работе проведены модельные расчёты статического типа (без временной зависимости) с использованием программы ANSYS, рассматриваются образцы СИД с различной теплопроводностью, различными толщинами слоя диэлектрика и различными толщинами слоя металлизации. Приведены результаты измерения теплового сопротивления СИД кристаллов на печатной плате в зависимости от типа диэлектрика и площади металлизации.

По результатам расчётов была разработана модель определения теплопроводности диэлектрических слоёв печатных плат с металлическим основанием и предложен метод определения теплопроводности диэлектрического слоя в печатных платах для светодиодных матриц.

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

## КИНЕТИКА ГАЗОГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ В ВОДОНЕФТЯНЫХ ЭМУЛЬСИЯХ

С. С. Гашева, Д. И. Помялов

Институт математики, естественных наук и информационных технологий  
Тюменский государственный университет

В последнее время значительно возрос интерес к исследованию свойств газогидратов, что обусловлено рядом причин [1]. Тем не менее, газогидратообразование в водонефтяных эмульсиях исследовано недостаточно, хотя примерно 80% всей нефти в РФ добывается в обводненном состоянии [2]. Применение газогидратных технологий на водонефтяной эмульсии — одно из перспективных технологических решений проблемы утилизации нефтяного газа. Однако низкая скорость образования газогидрата препятствует использованию этих технологий.

На установке по методике, представленной в [3], были проведены экспериментальные исследования средней скорости роста газогидрата  $v_p$  в водонефтяных эмульсиях, полученных на основе тяжелой и легкой нефтей. Их основные физико-химические свойства и результаты исследований представлены в таблице.

*Табл. Основные физико-химические свойства нефтей и результаты кинетических исследований*

Название месторождения нефти	Плотность при 20°C, (кг/м <sup>3</sup> )	Кинематическая вязкость при 20°C, (сСт)	$v_p$ , (МПа/час)
Усть-Тегусское	884	41,60	0,012
Урненское	825	4,12	0,042

Как видно из таблицы, средняя скорость роста газогидрата зависит от класса нефти: для тяжелой, с высокой плотностью и вязкостью, она более чем в 3 раза меньше, по сравнению с легкой.

1. Соловьёв В. А. Природные газовые гидраты как потенциальное полезное ископаемое. // Российский химический журнал, т. 48, №3, 2003, с. 59-69.

2. Е. О. Антонова, Г. В. Крылов, А. Д. Прохоров, О. А. Степано. Основы нефтегазового дела. М.: НЕДРА, 2003.

3. А. Б. Шабаров, А. В. Ширшова, М. Ю. Данько и др. Экспериментальное исследование газогидратообразования пропан-бутановой смеси. Вестник ТюмГУ. №6. 2009, с.73-82.

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

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ВЫТЭСНЕНИЯ ВОДЫ ИЗ ВОДОНЕФТЯНОЙ ЭМУЛЬСИИ В ПРОЦЕССЕ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ

С. С. Гашева, Д. И. Помялов

Институт математики, естественных наук и информационных технологий  
Тюменский государственный университет

В настоящее время актуальной остается проблема утилизации попутного газа. Одной из перспективных технологий решения является перевод попутного газа в газогидратную форму для его дальнейшего хранения и транспортировки в твердом состоянии. Учитывая высокую степень обводненности добываемой в России нефти, целесообразно было бы применение данной технологии на водонефтяных эмульсиях. Однако, исследований процессов такого рода крайне недостаточно

При проведении экспериментов по кинетике роста и разложения газовых гидратов из водонефтяной эмульсии по методике [1], нами был обнаружен эффект вытеснения воды из эмульсии в газогидратной форме. Это наблюдалось на легкой нефти Салымского месторождения после нескольких циклов подкачки давления при постоянной температуре,



равной 2 °С, а затем, после снижения температуры в реакторе до -10°С при давлении 4 атмосферы. Фотография на рисунке иллюстрирует этот эффект: хорошо видна белая «шапка» выделившегося из эмульсии газогидрата. После отделения газогидрата определялось объемное содержание оставшейся воды в нефти, которое составляло менее 5% (при начальном содержанием воды — 75%). Механизм обнаруженного нами явления изучается.

Таким образом, эффект вытеснения воды можно рассматривать как элемент новой «двойной» газогидратной технологии, позволяющей провести предварительную деэмульгацию нефти и одновременно утилизировать попутный нефтяной газ.

---

1. А.Б. Шабаров, А.В. Ширшова, М.Ю. Данько и др. Экспериментальное исследование газогидратообразования пропан-бутановой смеси. Вестник ТюмГУ. №6. 2009, с.73-82.

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

# МНОГОСТУПЕНЧАТАЯ АБСОРБЦИЯ ОТРАЖЕННОГО СВЕТА В УГОЛКОВЫХ КРЕМНИЕВЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЯЧЕЙКАХ

П. С. Гётте, Д. В. Гладких

Сибирский государственный университет путей сообщения,  
г. Новосибирск

В настоящее время в мире идут интенсивные поиски альтернативных источников преобразования энергии, в том числе преобразующих солнечную энергию в электрическую. Наиболее эффективными являются полупроводниковые фотоэлектрические преобразователи на основе моно- и поликристаллического кремния.

Существуют различные технологические способы повышения коэффициента полезного действия таких преобразователей. В работе предложен способ повышения эффективности преобразующих солнечных ячеек на основе кремния, который был назван уголковым. Проведено исследование зависимости плотности тока от угла наклона двух рядом расположенных ячеек.

В опыте использовались две фотовольтаические пластины размерами  $h=4\text{см}$  и  $b=2,5\text{см}$ , общей площадью  $S=10\text{см}^2$ . С использованием импульсного имитатора солнечного света сняты показания тока от угла наклона ячеек (табл. 1).

Таблица 1

1	2	3	4
$\varphi = 0^0$	$\varphi = 45^0$	$\varphi = 60^0$	$\varphi = 80^0$
$S_{\text{пр}} = 10 \text{ см}^2$	$S_{\text{пр}} = 7,071 \text{ см}^2$	$S_{\text{пр}} = 5 \text{ см}^2$	$S_{\text{пр}} = 2,588 \text{ см}^2$
$I_{\text{к.з.}} = 148 \text{ mA}$	$I_{\text{к.з.}} = 154 \text{ mA}$	$I_{\text{к.з.}} = 161 \text{ mA}$	$I_{\text{к.з.}} = 168 \text{ mA}$
$j_{\text{к.з.}} = 14,8$ $\text{mA}/\text{см}^2$	$j_{\text{к.з.}} = 21,7$ $\text{mA}/\text{см}^2$	$j_{\text{к.з.}} = 32,2$ $\text{mA}/\text{см}^2$	$j_{\text{к.з.}} = 64,9$ $\text{mA}/\text{см}^2$

Сделан вывод, что, не увеличивая площадь, а, только изменяя угол раскрытия ячеек, можно за счет многократного отражения света существенно повысить коэффициент полезного действия преобразования солнечной энергии в электрическую.

Проведенные исследования показывают, что предложенный метод открывает новые перспективы для эффективного и экономически выгодного использования альтернативных источников преобразования солнечной энергии.

Научный руководитель – д-р пед. наук, проф. В. Ф. Глушков

## ОДНОФАЗНАЯ ЗАДАЧА СТЕФАНА В ПОЛУПРОЗРАЧНОЙ СРЕДЕ С УЧЕТОМ ИЗОТРОПНОГО РАССЕЯНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ

М. А. Гришин, С. Д. Слепцов  
Институт теплофизики СО РАН  
Новосибирский государственный университет

Однофазная задача Стефана является частным случаем двухфазной задачи, в которой одна из фаз является изотермической, находящейся при температуре фазового перехода. Задача в слое полупрозрачной среды моделирует сложные процессы нестационарного радиационно-кондуктивного теплообмена в полупрозрачных футеровках стекловаренных печей и теплозащитных полупрозрачных для теплового излучения покрытиях технических устройств в процессе их оплавления (кристаллизации) и последующего уноса (подвода) при взаимодействии с окружающей средой (абляция – конденсация).

В классическом решении однофазной задачи Стефана предполагается, что тепловой поток со стороны фазы с постоянной температурой равен нулю [1]. В практических задачах граничные условия задачи совпадают с условием Стефана, содержащим результирующий поток тепловой энергии (радиационный, кондуктивный и конвективный) отличный от нуля и меняющийся в процессе перемещения границы фаз. При этом указанная граница предполагается бесконечно тонкой и высокотеплопроводной [2].

В работе проведено численное исследование формирования температурных полей и радиационных потоков в процессе плавления полупрозрачной серой среды с черными непрозрачными границами при разных значениях альбеда изотропного рассеяния. Рассмотрены эволюция роста температуры на левой границе и динамика движения фронта фазового перехода при различных значениях коэффициентов отражения границ слоя.

---

1. Мейрманов А.М. Задача Стефана. – Новосибирск: Наука, 1986. – 239 с.

2. Рубцов Н.А. К решению однофазной задачи Стефана в слое полупрозрачного материала // Теплофизика и Аэромеханика, 2005, т. 12, №3, с. 471-482

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук С. Д. Слепцов

## ДЕЗИНФЕКЦИЯ БИОСУБСТРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОЗОНА

Е. А. Денисенко, А. А. Шевченко, К. А. Очкась  
Кубанский государственный аграрный университет, г. Краснодар

В настоящее время увеличивается процент использования биопрепаратов при выращивании сельскохозяйственного поголовья. Биологически активные вещества способствуют снижению заболеваний животных, укреплению иммунитета и активизации пищеварительных процессов, что приводит к ускорению наращивания живой массы.

Сырьем для производства биопрепаратов являются субстраты (лузга семян подсолнечника, шрот, комбикорм и др.), которые являются отходами перерабатывающей промышленности и поступают на биофабрики от сельхозтоваропроизводителей.

На перерабатывающих предприятиях не уделяется надлежащего внимания хранению субстратов, поэтому на них начинает развиваться патогенная микрофлора. Поэтому перед высевом полезной микрофлоры необходимо проводить дезинфекцию субстратов, что позволяет снизить влияние патогенов на полезные бактерии наносимые на субстраты.

В настоящее время традиционной обработкой субстратов является термическая обработка, но она имеет ряд недостатков (многочасовая обработка, высокая энергоемкость, загрязнение окружающей среды, образование жиросодержащих сточных вод).

Для того, чтобы уменьшить количество различных плесневых грибов и микроорганизмов в субстратах нами предлагается использовать озоноздушную обработку. Для этого в лаборатории КубГАУ совместно с кафедрой «Биохимии, биофизики и биотехнологии» был поставлен ряд экспериментов по выявлению влияния озоноздушной смеси на зараженность субстрата лузги семян подсолнечника плесневыми грибами и микроорганизмами. Среднестатистические данные эксперимента приведены в таблице 1:

Таблица 1 — Результаты обработки озонем субстрата лузги семян подсолнечника

вариант	бактериальное загрязнение кл/г	плесневое загрязнение кл/г
контрольный образец	$5 \times 10^3$	$5 \times 10^3$
обработанный образец	$2 \times 10^2$	нет

Исходя из вышесказанного и данных эксперимента, можно сделать вывод, что дезинфекция субстратов с помощью озона является актуальным способом дезинфекции субстратов.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНИЦИИРОВАНИЯ ТЭНА ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ В ОБЛАСТИ ПРОЗРАЧНОСТИ ОБРАЗЦА

В. А. Долгачев

Кемеровский государственный университет

В [1] изучалось инициирование флегматизированного ТЭНа с открытой поверхности лазерным импульсом длительностью 3 нс и  $\lambda = 1.06$  мкм. Коэффициент поглощения  $\alpha$  в данной области спектра мал. В нашей работе решено, численно уравнение теплопроводности в цилиндрической системе координат с учетом плавления, экзотермической реакцией и многократным отражением светового потока от противоположных сторон образца. Распределение интенсивности по сечению пучка задано в форме гаусса. Некоторые из результатов расчетов приведены на рис. 1 и рис. 2.

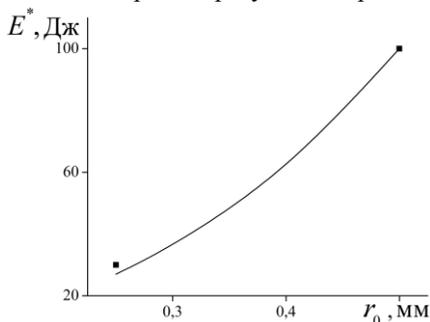


Рис. 1.

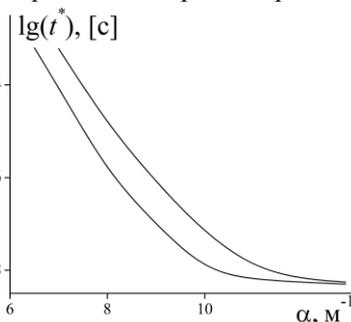


Рис. 2.

Рис. 1. Зависимость пороговой энергии инициирования ТЭНа от радиуса светового пучка: 1 – расчет, ■ – эксперимент [1].

Рис. 2. Зависимость времени задержки зажигания ТЭНа  $t^*$  от  $\alpha$  при плотности энергии  $W = 1.4 \cdot 10^8$  (1),  $W = 1.27 \cdot 10^8$  Дж/см<sup>2</sup> (2).

Как видно из рис. 1, результаты расчетов достаточно хорошо согласуются с экспериментом при  $\alpha = 6.5$   $\text{м}^{-1}$ . Расчеты показали, что при  $\alpha = 8.8$   $\text{м}^{-1}$  время задержки составляет порядка 2 мкс.

---

1. А. И. Быхало, Е. В. Жужукало, Н. Г. Ковальский, А. Н. Коломийский, В. В. Коробов, А. Д. Рожков, А. И. Юдин Инициирование ТЭНа мощным лазерным излучением // ФГВ. Т. 21, №4, 110 (1985).

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

## МЕХАНОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМЕ СВИНЕЦ-МЕДЬ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

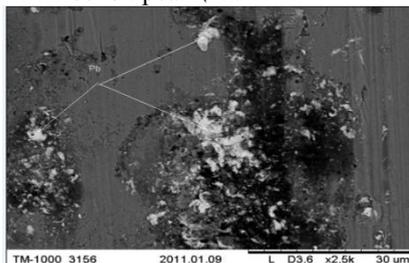
Г. М. Дюсупова, Г. Б. Мухаметхан, А. С. Батырханов  
Восточно-Казахстанский государственный университет  
им. С. Аманжолова, г. Усть-Каменогорск

Исследование физико-химических процессов, происходящих в зоне контакта свинец – медь при интенсивных динамических нагрузках представляет существенный интерес.

Целью данной работы было исследование продуктов реакций структурообразования в зоне контакта образцов меди и свинца при различных условиях динамических нагрузок.

Вырезанные в виде пластинок образцы меди и свинца размерами 0,1мм×10мм×20мм совмещали друг с другом и с помощью установки наковален Бриджмена и сдавливали их в течение 20 мин после предварительного нагрева при температуре 400 °С. Образцы прочно соединялись в результате твердофазной реакции, инициированной механической нагрузкой и температурой. Для исследования продуктов твердофазных реакций в системе Cu-Pb были использованы методы электронной микроскопии и микроанализа.

На рисунке 1 приведена картина, полученная в сканирующем электронном микроскопе от пластинки меди, отделенной от свинца после прохождения механохимической реакции.



*Рис.1. Пластина меди после отделение его от свинца.*

Обнаружено, что при взаимодействии твердофазных образцов свинца и меди, подвергнутых совместной осадке, могут формироваться продукты механохимических реакций, имеющих структуру, отличную от структуры исходных компонентов. Формирование новых фаз в зоне контакта подтверждает модель аномально быстрой диффузии в пластически деформированных металлах, основанная на теории сдвиговой деформации.

Научные руководители – канд. физ.-мат. наук, доцент Р. Б. Абылкалыкова, канд. филос. наук, доцент Г. С. Бектасова

# РАСЧЕТ ТЕПЛОТВОДЯЩЕГО И НЕСУЩЕГО ПОКРЫТИЯ МОЩНОГО СВЕТОДИОДА

Ю. С. Жидик

Томский университет систем управления и радиоэлектроники

При повышении мощности излучения светодиодов вследствие разницы их температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) возникают высокие механические напряжения гетероструктура–подложка.

Для согласования ТКЛР медной подложки и гетероструктуры и, следовательно, для уменьшения возникающих механических напряжений между ними, необходимо введение дополнительного слоя – сплава инвара.

Задачей данных исследований является оценка оптимальной толщины слоя инвара. Расчёты производились в моделирующем комплексе ANSYS.

Для созданной геометрической модели чипа были заданы граничные условия приближающие модель к реальным условиям работы светодиода. Задавая различную толщину инвара (от 0,2 до 15 мкм), а так-же повторив расчеты при замене слоя инвара дополнительным слоем меди такой-же толщины, были получены следующие величины, рассчитанные на один конечный элемент модельной сетки: вектора теплового потока ( $Tstr$ ), механических напряжённостей ( $Q$ ), вектор суммарных перемещений узлов сетки ( $\Delta$ ) и вектор их перемещений узлов только по оси Z.

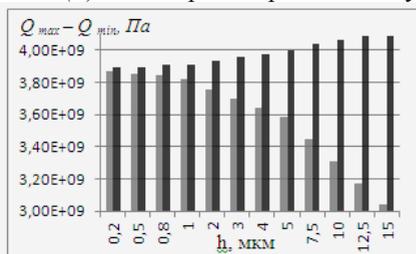


Рис.1. Гистограмма распределения приращения  $Q_{max} - Q_{min}$

Серые столбцы соответствуют рассчитанным данным образцов содержащих инвар; черные – слой инвара заменен медным слоем.

На гистограмме распределения  $Q_{max} - Q_{min}$  хорошо видно, что с увеличением толщины слоя инвара диапазон возникающих

механических напряженностей существенно уменьшается. Приращение вектора

перемещений с возрастанием толщины слоя инвара так-же уменьшается быстрее, чем при замене слоя сплава слоем меди. Наиболее оптимально будет использовать слой инвара толщиной от 5 мкм до 10 мкм, т. к. при увеличении толщины слоя свыше 10 мкм возрастает его тепловое и электрическое сопротивление, что нежелательно.

Работа выполнена при финансовой поддержке министерства образования и науки по договору 73/10 в рамках 218-го постановления правительства РФ.

Научный руководитель – д-р техн. наук, проф. П. Е. Троян

## ВЛИЯНИЕ ДОЛИ НАНОЧАСТИЦ НА ТЕПЛОВОЙ ВЗРЫВ В СИСТЕМЕ NI-AL

А. С. Кадирова, А. Г. Князева  
Институт физики высоких технологий  
Томский политехнический университет

Для целенаправленного выбора технологических режимов получения новых материалов необходимо теоретическое и экспериментальное исследование закономерностей формирования структуры, фазового состава и физико-механических свойств продуктов в зависимости от условий синтеза. В настоящее время известны многочисленные математические модели спекания порошковых смесей и синтеза в твердой фазе [1], основанные на совместном описании тепловых и кинетических явлений. Однако, корректные математические модели процессов управляемого синтеза, в которых исследуются химические превращения с учетом добавок наночастиц металлов в исходной смеси, практически отсутствуют. Наночастицы в составе реагентов изменяют как кинетику процесса синтеза, так и влияют особым образом на физические и механические свойства реагентов и продуктов, что приводит к появлению дополнительных особенностей в математических моделях.

В первом приближении нанодисперсные частицы в составе реагентов рассматриваются как отдельная фаза, обладающая особыми свойствами. Каждый из реагентов может плавиться при температуре, зависящей от содержания нанодисперсной фазы. Потери тепла на плавление учтены через изменение теплоемкости. В кинетической зависимости скорости реакции учитывается содержание нанодисперсной фазы (дополнительно к учету торможения реакции слоем продукта), поскольку ее увеличение неизбежно связано с увеличением площади поверхности реагентов, с увеличением доли активных мест для начала реакции, с торможением реакции слоем накопившегося продукта. Реагенты берутся в стехиометрическом соотношении. Все принятые в модели зависимости эффективных свойств от доли нанодисперсной фазы, обосновываются на основе термодинамики. В результате мы приходим к нелинейной задаче синтеза в условиях регулируемого нагрева, которая решается численно.

Критические условия, разделяющие разные режимы синтеза, аналогично классической тепловой теории, зависят от всех параметров, входящих в модель.

Работа выполнена в рамках ГК № 11.519.11.3004 по ФЦП (шифр 2011-1.9-519-001-020)

1. А.Г. Мержанов, А.С. Мукасян, Твердопламенное горение, Москва: Торус Пресс, 2007, 336 с.

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

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СОРБЦИИ И ДЕСОРБЦИИ ГЕЛИЯ КОМПОЗИТНЫМ СОРБЕНТОМ НА ОСНОВЕ МИКРОСФЕР**

И. В. Казанин\*, \*\*, А. Ю. Пак\*

\*Институт теоретической и прикладной механики  
им. С. А. Христиановича СО РАН,

\*\*Новосибирский государственный университет

В настоящее время гелий производится в промышленном масштабе, в основном, с помощью криогенного разделения природного газа с содержанием He 0,1-2 %. Выделение небольших объемов инертных составляющих требует сжижения основного объема углеводородов, что делает низкотемпературные технологии разделения компонент газовой смеси весьма капиталоемкими и энергоемкими. Поэтому актуальным представляется разработка новых некриогенных способов выделения гелия, которые представляются более выгодными с точки зрения снижения стоимости и повышения эффективности процесса.

Одним из таких способов, может служить мембранный способ разделения газовых смесей, при этом наиболее подходящим материалом для мембран при извлечении гелия из природного является кварцевое стекло, которое является проницаемым для гелия и практически абсолютно непроницаемым для других компонент природного газа. Если в качестве мембран использовать полые сферические микрочастицы, то можно значительно увеличить площадь поверхности, через которую происходит процесс разделения компонент газовой смеси.

Проведенные ранее параметрические исследования сорбции и десорбции гелия полыми стеклянными микросферами МС-1Л, а так же ценосфер НМ-R-5А, продемонстрировали их проницаемость для гелия и непроницаемость для воздуха. Дальнейшим шагом было изготовление сорбента на базе исследованных материалов, пригодного для практического применения.

Для этого был изготовлен композитный сорбент, в качестве гелиепроницаемого компонента которого использовались синтетические стеклянные микросферы МСВ-1Л, а связующим материалом служил оксид алюминия. Исследование проводится на примере воздушно-гелиевой смеси. Были выполнены эксперименты по сорбции и десорбции гелия сорбентом при различных значениях начального давления смеси. Экспериментальные данные показали, что коэффициент проницаемости микросфер прошедших процедуру гранулирования увеличился практически на два порядка по сравнению с исходным материалом микросфер.

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

## СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

Н. А. Калюжный

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

Металлические наночастицы широко используются в практике. Одной из перспективных областей их применения являются каталитические технологии. Это связано с тем, что малые частицы обладают чрезвычайно развитой поверхностью, что увеличивает эффективность их использования.

Оксид алюминия является одним из наиболее перспективных керамических материалов для широкого спектра конструкционных применений с энергонапряженными условиями эксплуатации благодаря сочетанию высокой твердости, термостойкости, химической инертности, с одной стороны, и доступности – с другой.

Данная работа посвящена описанию технологии совместного синтеза металлических наночастиц и углеродной наноструктурированной основы в газовой фазе при конденсации пара металла и углерода в среде буферного газа. Для получения пара углерода и металла используется анодное распыление в электрической дуге низкого давления. Углеродный конденсат, синтезированный при электродном распылении, представляет собой «рыхлую» структуру с очень большим числом свободных связей, так что удельная площадь матрицы-носителя может достигать предельно возможных значений. Кроме того, большое число разорванных связей позволяет надежно удерживать наночастицы металла, предотвращая их коагуляцию. Для получения оксида алюминия применяется отжиг синтезированного материала в кислородной атмосфере. В результате было обнаружено образование полых оболочек из оксида алюминия; предложены возможные механизмы образования.

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

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА СТенок МИКРОКАНАЛА С ЖИДКОСТЬЮ

С. В. Кириловский  
Институт теоретической и прикладной механики  
им. С. А. Христиановича СО РАН  
Новосибирский государственный университет

Необходимость более глубокого понимания процессов, сопровождающих движение жидкости с наночастицами в микроканалах, вызвана растущим спектром областей их применения [1]. Главный вопрос, возникающий при проектировании микрофлюидных устройств, заключается в оценке возможности использования знаний о поведении жидкости при макромасштабных течениях для предсказания поведения жидкости при переходе на микроуровень.

Моделирование теплообмена стенок микроканала с протекающей в нём жидкостью осуществлялось с помощью пакета ANSYS Fluent 12.1. В качестве рабочих жидкостей выступали: вода, этиловый спирт и этиленгликоль. Расчёты выполнены в осесимметричном случае в рамках нестационарных уравнений Навье-Стокса и теплопроводности. Длина микроканала 32 мм, внутренний диаметр 0,5 мм, внешний 0,8 мм. Нагрев стенок микроканала осуществлялся в промежутке от 6 мм до 26 мм от переднего конца микроканала.

При нагревании стенок микроканала в течение от 2 до 3,3 секунд, достаточных для выхода температуры поверхности на стационарное значение, рассматривалась скорость нагрева и остывание поверхности микроканала на расстоянии 12 мм от сечения входа жидкости в микротрубку. Сравнение максимальных температур нагревания стенки в сечении 12 мм для трёх различных жидкостей показал, что при постоянном расходе, коэффициент теплоотдачи зависит только от теплопроводности жидкости. Также исследовалась зависимость разности начальных и конечных температур  $\Delta T = T_{\max} - T_0$  поверхности микротрубки от расхода. Сравнение расчётных данных с экспериментальными данными, полученными с использованием медицинской иглы с эквивалентными параметрами, дало хорошее качественное и количественное совпадение.

---

1. Терехов В.И., Калинина С.В., Леманов В.В. Механика теплопереноса в наножидкостях: современное состояние проблемы (обзор). Часть 2. Конвективный теплообмен // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17, №2. С. 173-188.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук. Т. В. Поплавская

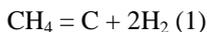
# МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАЗЛОЖЕНИЯ МЕТАНА В БЕСКИСЛОРОДНОЙ АТМОСФЕРЕ ЭЛЕКТРОДУГОВЫМ МЕТОДОМ

М. П. Коверзнев, А. О. Замчий.

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

В данной работе конверсия метана проводилась в дуговом разряде переменного тока между двумя графитовыми электродами в проточном режиме. Подача газа осуществлялась через силовой графитовый электрод непосредственно в горячую область разряда для достижения наибольшей степени конверсии метана.

На основании масс-спектрометрического анализа выхлопных газов было выявлено два канала разложения метана:



С увеличением давления процесс разложения метана в большей степени протекает согласно каналу (1). С увеличением расхода газа происходит смещение процесса разложения метана в сторону канала (2).

Отсутствие влияния величины давления в реакторе на степень конверсии свидетельствует о том, что все процессы разложения метана преимущественно происходят в потоке газа во внутреэлектродном пространстве, а также в высокотемпературной зоне разряда. Отсутствие зависимости концентрации ацетилена от скорости протока метана и сильная зависимость от давления в камере свидетельствует о том, что лимитирующим фактором процесса является скорость охлаждения газов после выхода из высокотемпературной зоны. Большее время пребывания в горячей зоне реализуется для большего давления в камере и процессы синтеза ацетилена из водорода и атомарного углерода протекают более эффективно.

В результате конверсии метана электродуговым методом, синтезируются высокоупорядоченные углеродные частицы. Несмотря на их формирование из газовой фазы, высокая температура в области синтеза позволяет устранить все дефекты кристаллической структуры.

Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации (ГК П510)

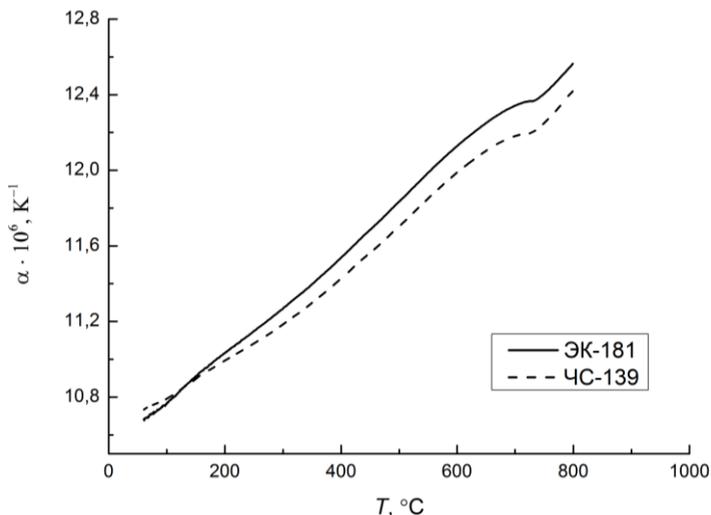
Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Д. В. Смовж

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОвого РАСШИРЕНИЯ СТАЛЕЙ ЭК-181, ЧС-139

Ю. М. Козловский, О. С. Яцук

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН

Дилатометрическим методом измерен средний линейный коэффициент теплового расширения ( $\alpha$ ) сталей ферритно-мартенситного класса марок ЭК-181 и ЧС-139 в интервале температур 25 – 800°C (рисунок). Измерения проводились в атмосфере аргона (99,992%). Непосредственно перед экспериментом дилатометр калибровался по платиновому образцу чистотой 99,93%. Погрешность экспериментальных данных оценивается величиной не более 3 %.



Методом наименьших квадратов получена аппроксимационная зависимость среднего линейного коэффициента теплового расширения в интервале температур 20-700°C. Отклонения экспериментальных данных от аппроксимирующей зависимости не превышают 0,5%.

Аномальное изменение  $\alpha$  при температуре  $\sim 720^\circ\text{C}$  связано со структурными изменениями в образцах[1].

---

1. Б. Чалмерс. Физическое металловедение. М., Гос. научн.-техн. изд-во лит-ры по черной и цветной металлургии, 1963, 366.

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

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ СПЛАВОВ ПРИ КАНАЛЬНОМ ПРЕССОВАНИИ

В. А. Красновеikin, А. А. Козулин, Н. В. Скрипняк, В.А. Скрипняк  
Томский государственный университет

В работе представлена численная модель и результаты моделирования динамики канального прессования титана ВТ1-0 и магниевого сплава Ма-2, рассмотрены закономерности развития ИПД для двух схем прессования – равноканального углового прессования и схемы прессования с использованием канала переменной формы.

Прессование моделируется с помощью метода частиц (SPH). Механическое поведение материала описывается в лагранжевой постановке системой уравнений, включающей уравнения законов сохранения, нелинейное определяющее уравнение, эволюционные уравнения для параметров модели, учитывающих структуру и возникновение пор и микротрещин.

Определяющее уравнение используется в виде соотношений для давления и девиатора тензора напряжений. Повреждение материала описывается в рамках подхода механики сред с повреждениями. При определении степени поврежденности учитывается предельная эквивалентная пластическая деформация в условиях растяжения до макроскопического разрушения, а также величина пластической деформации, при которой начинается зарождение повреждений при отсутствии давления. Поверхность течения среды с повреждениями определена в предположении о кинематическом упрочнении вследствие возрастания внутренних ориентированных напряжений и изотропного разупрочнения, обусловленного ростом поврежденности.

Зависимость напряжения течения от среднего размера субзерна, скорости деформации, степени пластической деформации, температуры описывается моделью, учитывающей температуру деформации, средний размер зерна, скорость эквивалентной пластической деформации.

Проведены параметрические исследования закономерностей процессов деформации, возможного разрушения и упрочнения сплавов в процессе канального прессования, а также определены критические скорости прессования, не приводящие к повреждению материала и оптимальные параметры режимов прессования для достижения требуемых физико-механических характеристик материалов и размеров зерен.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минобрнауки ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 г. № П666 от 19 мая 2010 г., № П1247 от 07 июня 2010 г. и гранта Президента Российской Федерации МК-3066.2012.8.

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

## ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ МЕТОДОМ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ТЕРМОГРАФИИ

В. И. Кривенко

Мурманский государственный технический университет

Задачей работы является разработка дистанционного метода определения температуры обмоток статора и ротора синхронной машины по температуре поверхности станины генератора на основе данных количественной термографической диагностики.

В качестве объекта исследования выбрана синхронная машина БМЗ-4,5/4-М1 (генераторный режим, ток номинальный). Термографические исследования проводились после установления постоянной температуры поверхности станины генератора. В результате эксперимента получены графики зависимости температуры лобовых обмоток и поверхности от времени, а также термограммы поверхности генератора, позволяющие обособить особенности нагрева поверхности генератора.

В номинальном режиме работы генератора температура обмоток статора составила 39,7 °С. Тепловой расчет оценки температуры обмоток статора, выполненный аналогично [1], подтвердил данные проведенного эксперимента. Согласно расчету, температура статорной обмотки в режиме номинальной нагрузки составляет 37,3 °С.

Моделирование в пакете EWB512 тепловой схемы замещения, построенной по данным теплового расчета по методу [2], подтверждает данные, полученные экспериментально.

Пользуясь тепловой моделью можно рассчитать температуру составных частей генератора по температуре поверхности его станины.

Исходя из результатов опыта, теплового расчета, моделирования тепловой модели и результатов термографической диагностики нами полагается, что термографическая диагностика [3] может быть использована для экспресс-оценки температур роторных и статорных обмоток в процессе эксплуатации синхронной машины.

---

1. О. Д. Гольдберг, Я. С. Гурин, И. С. Свириденко, Проектирование электрических машин. –М.: Высшая школа, 2001. –428 с.

2. Г. А. Сипайлов, Д. И. Санников, В. А. Жадан, Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах. – М.: Высшая школа., 1989. – 239 с.

3. А. Б. Власов, Модели и методы термографической диагностики теплового состояния электрооборудования. –Berlin: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. -216 с.

Научный руководитель – д-р техн. наук, проф. А. Б. Власов

# ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЯЖЕЛЫХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ ПРИ АКУСТИЧЕСКОМ И УДАРНОВОЛНОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

А. И. Крикунова

Московский физико-технический институт  
(Государственный университет)

По данным на 2011 год Венесуэла заняла первое место в мире по доказанным запасам нефти. Это стало возможным после того, как огромные запасы тяжелой и сверхтяжелой нефти пояса Ориноко были признаны доступными для разработки. Канада и Российская Федерация также занимают ведущие места по разведанным запасам высоковязкой нефти. Но новые запасы трудно извлекаемы, и их разработка требует колоссальных инвестиций. В соответствии с этим проблема упрощения добычи и транспортировки такого вида сырья становится важной задачей.

Авторами работы в 2010 году была создана, а в 2011 усовершенствована установка для обработки высоковязких нефтепродуктов с целью уменьшения вязкости. В процессе работы нефтепродукты подвергаются обработке ударными и акустическими волнами – кавитация, также смешиваются с водой.

Основной частью экспериментальной установки является кавитатор – устройство для обработки нефтепродуктов ударными и акустическими волнами. Вследствие, такой обработки энергия, выделяющаяся при схлопывании кавитационных пузырьков, используется для разрыва химических связей между атомами больших молекул углеводородных соединений. Это способствует уменьшению вязкости. В зависимости от длительности обработки нефтепродуктов получали различные изменения вязкости. При помощи ротационного вискозиметра измерялась зависимость сдвиговой скорости от сдвигового напряжения. Из этих графиков определялась вязкость. Посчитана энергетическая эффективность от применения данного метода.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, доцент  
В. Ю. Великодный

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ

Д. Б. Крюков, М. С. Гуськов  
Пензенский государственный университет

Научно-технический прогресс в различных отраслях промышленности связан с применением композиционных материалов, полученных сваркой взрывом, сочетающих в себе ряд уникальных свойств. В связи с тем, что знания в данной предметной области являются слабоформализованными а, большая часть этих работ может быть выполнена только специалистами, то разработка САПР с элементами искусственного интеллекта, является актуальной задачей.

С начала 80-х годов по настоящее время был создан большой рынок программного обеспечения по различным направлениям САПР. Однако, несмотря на разработки, требуется создание новых и модификация существующих компьютерных моделей, а также уточнение содержащихся в автоматизированных базах знаний данных.

На кафедре «Сварочное, литейное производство и материаловедение» Пензенского государственного университета разработан пакет прикладных программ (ППП), моделирующих процесс ударно-волнового нагружения и позволяющих рассчитывать основные параметры сварки материалов взрывом. В ППП реализованы все известные виды технологических схем ударно-волнового нагружения материала.

В основу разработанного математического аппарата ППП по расчету параметров сварки материалов взрывом была положена приведенная система уравнений Баума-Станюковича-Шехтера. Работа ППП, выполненного на языке объектного программирования Visual Basic версии 6.0, реализуется на IBM-совместимых ПЭВМ в операционной среде Windows XP.

Программа состоит из двух автономных частей: исследовательской (расчетной) и конструкторской (оптимизационной). Ввод исходных данных осуществляется из автоматизированной базы данных (АБД).

Автоматизированная база данных (АБД) содержит данные по технологическим режимам сварки взрывом и сведения о свойствах получаемых слоистых композиционных материалов.

Созданный ППП позволяет выполнять конструкторские и технологические расчеты по определению параметров соединения и упрочнения материалов взрывом. Он может быть также использован для проведения исследовательских расчетов при подготовке экспериментов, связанных с изучением влияния ударно-волновой обработки на структуру и свойства материалов при их сварке и плакировании.

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент Д. Б. Крюков

# ИНТЕРФЕРОМЕТР МАХА-ЦАНДЕРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В НЕЛИНЕЙНЫХ КРИСТАЛЛАХ

К. П. Мельник, П. В. Шатохин, Д. В. Кулаков  
Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

В настоящее время исследованию нелинейно-оптических монокристаллических материалов уделяется большое внимание. ТУСУР тесно сотрудничает с компанией ООО «Кристалл-Т», которая выращивает нелинейно-оптические кристаллы и изготавливает из этих кристаллов оптические элементы. На их базе разрабатываются устройства, широко используемые при построении лазерных систем для медицины, оборонной техники, телекоммуникаций, метрологии и научных исследований. Устройства на базе нелинейно-оптических кристаллов способны модулировать лазерное излучение, преобразовывать его частоту (длину волны), менять направление распространения [1].

Экспериментальное изучение электрооптических эффектов состоит в измерении отношения оптических свойств изучаемой системы в присутствии и в отсутствие воздействия ориентирующего электрического поля. Различают визуальный (интерференционный) и фотоэлектрический (поляризационный) методы наблюдения электрооптических эффектов. Принципиальное отличие визуального метода от фотоэлектрического заключается в том, что в первом случае сравниваются яркости полей зрения, во втором – регистрируется интенсивность света на выходе оптической системы: источник света – монохроматор – измерительная ячейка – анализатор [2].

В работе рассматривается установка на базе интерферометра Маха-Цандера для измерения электрооптического коэффициента в оптических кристаллах. С ее помощью экспериментально определены электрооптические коэффициенты как у кристаллов КТР, так и оптических элементов. Данные величины находятся в хорошем соответствии в пределах экспериментальной погрешности с данными из справочника. На данной установке можно измерять электрооптические коэффициенты у любых оптических кристаллов.

- 
1. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Наука, 1976.
  2. А.А. Блисанов «Кристаллы квантовой и нелинейной оптики» Учебное пособие для вузов. – М.:МИСИС, 2000. – 432с.

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

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ЖАМЕНА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НЕЛИНЕЙНЫХ КРИСТАЛЛОВ**

К. П. Мельник, Д. С. Кожанов.

Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники

В настоящее время нелинейные оптические кристаллы, выращенные компанией ООО «Кристал-Т» используются в различных оптических устройствах (лазерах, модуляторов оптического излучения), в частности для генерации второй гармоники. В подобного рода устройствах предъявляются очень высокие требования по качеству поверхностей кристаллов, а также к отсутствию внутренних оптических неоднородностей.

Для проведения оптического контроля качества используются различные интерферометрические методы. В работе приведено описание экспериментальной установке на базе интерферометра Жамена, обладающего в данном случае рядом преимуществ, среди которых: устойчивая интерференционная картина, высокая чувствительность. [1][2]

При наличии образца с дефектами в установке, на экране наблюдается интерференционная картина, вид которой определяется конкретным дефектом. В частности, наличие интерференционных полос равной толщины, говорит о том, что в кристалле присутствует дефект в виде скоса одной из поверхностей (клин).

Созданная установка позволяет обнаружить оптические дефекты оптических нелинейных кристаллов, а методика расчёта оценить масштаб этих дефектов, таким образом, мы имеем возможность отбраковать образцы либо передать на повторную шлифовку с указанием расположения дефекта и его точных размеров.

- 
1. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Наука, 1976.
  2. Захарьевский А.Н. Интерферометры. – М.: Оборонгиз, 1952А. Блистанов «Кристаллы квантовой и нелинейной оптики» Учебное пособие для вузов. – М.:МИСИС, 2000. – 432с.

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

# **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ, ФОРМИРУЮЩИХСЯ МОЩНЫМ АКУСТИЧЕСКИМ ИЗЛУЧАТЕЛЕМ В КАНАЛАХ НЕФТЯНОГО ПЛАСТА**

В. А. Меньшиков

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

Растущие потребности промышленности в энергоносителях, требуют извлечения максимального количества углеводородов при минимальных затратах. Современные методы разработки нефтяных месторождений, при всей их экономической эффективности обладают существенным недостатком. Степень выработки пласта даже при самых благоприятных условиях не превышает 50% геологических запасов, а на месторождениях с трудноизвлекаемыми запасами колеблется от 2 до 10%.

Было обнаружено, что при многократных периодических ударных воздействия в недрах скважины, дебит нефти значительно и надолго (несколько месяцев) увеличивается. Целью данной работы являлось объяснение этого явления, проведение детального анализа и предоставление практических рекомендаций на основе разработанной модели.

В представленной модели мощный локализованный акустический источник создает вынужденные периодические колебания в окружающей среде со значительной амплитудой. В среде формируется пузырьковый слой переменным газосодержанием, вследствие того, что средние размеры пузырьков, зависящие от амплитуды возмущения, в этом слое уменьшаются с расстоянием от акустического источника. Именно наличие пузырькового слоя в жидкости и является причиной «эффекта памяти», то есть нелинейного усиления волн.

В ходе выполнения работы была разработана и численно реализована модель роста пузырьков в двухфазных средах при внешнем динамическом воздействии. Модель учитывает влияние инерции, вязкости жидкости, а также процесса диффузии растворенного в жидкости газа. Было установлено, что при одинаковой форме положительного и отрицательного импульсов давления происходит монотонный рост среднего радиуса пузырьков. Это приводит к увеличению объемного газосодержания среды и к нелинейному усилению волн. Выполнено моделирование эволюции волн давления в пузырьковой среде с учетом роста среднего радиуса пузырьков в ней и как следствие образования пузырькового слоя.

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

# ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ НЕОДНОРОДНЫХ БАЛОК ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ ДЕЙСТВИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

И. Ю. Мерзляков

Филиал Военного учебно-научного центра Сухопутных войск  
«Общевойсковая академия Вооруженных Сил Российской Федерации»,  
г. Новосибирск

В связи с появлением новых конструкционных материалов повышенной прочности и жесткости, а также с развитием технологий соединения различных фаз появилась возможность создания конструкций с многослойной структурой, в том числе – элементов стержневого типа. Такие конструкции в сочетании с профилированием отдельных слоев позволяют получать значительную экономию материалов.

Задача о динамическом воздействии ударной (взрывной) волны на многослойную балку переменного сечения моделируется линейным дифференциальным уравнением в частных производных относительно искомой функции поперечных перемещений  $v(z,t)$ , имеющим четвертый порядок по координате  $z$  и второй — по времени  $t$ . Переменные коэффициенты, зависящие от жесткостных и массовых характеристик многослойного сечения, представлены послойными суммами соответствующих величин, известных для однородных балок.

В интервале действия первых двух фаз взрывную нагрузку представим синусоидой, что позволяет выполнить разделение переменных и получить обыкновенное дифференциальное уравнение для функции формы поперечных перемещений балки. Далее для построения универсального приближенного решения, пригодного для балок с любым произвольным законом переменности сечения, выполняется аппроксимация перемещений при помощи некоторой, удовлетворяющей граничным условиям, заданной координатной функции с искомой амплитудой. Амплитуда может быть найдена из условия интегрального удовлетворения дифференциального уравнения в пределах длины балки.

Выполнив такие действия для динамической и статической задачи, получаем простые формулы для динамического коэффициента балки, как отношение динамической и статической амплитуд перемещения. Формулы содержат интегралы от дробно-рациональных и тригонометрических функций, описывающих изменения жесткостных и массовых характеристик, координатной функции формы. На их основе получены таблицы и графики, полезные при выполнении практических расчетов типовых схем многослойных балок различной геометрии. Как частный случай из них вытекают известные в литературе формулы для однородных призматических балок.

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

## МАССООБМЕН И ТРЕНИЕ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ НА СЕЛЕКТИВНО-ПРОНИЦАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В. С. Наумкин

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН

Селективно-проницаемые мембраны широко распространены во многих отраслях промышленности: пищевая, химическая и т.д. Однако в настоящее время имеется крайне мало работ, посвященных мембранному разделению газов с учетом внешнедиффузионного сопротивления [1]. С появлением новых ассиметричных мембран внешнедиффузионное сопротивление стало соизмеримо с сопротивлением массообмену внутри мембраны. Поэтому необходимо рассматривать эти две задачи совместно.

В данной работе рассматривается влияние селективного отсоса одного из компонентов смеси на трение и массообмен в пограничном слое. Получено распределение концентраций компонентов по длине и толщине пограничного слоя. Выяснено, что при постоянной интенсивности отсоса концентрация легкого компонента смеси на стенке уменьшается медленнее, чем концентрация тяжелого. При больших интенсивностях отсоса из турбулентного пограничного слоя на некоторой длине пластины концентрация отсасываемого компонента стремится к нулю, происходит «запирание» пластины, и дальнейший отвод газа с постоянной интенсивностью становится невозможным. При малых интенсивностях отсоса, в обтекающем пластину потоке происходит ламинарно-турбулентный переход, вследствие чего происходит резкий скачок концентрации отсасываемого компонента на стенке, вызванный увеличением подвода газа к стенке за счет турбулентного перемешивания [2]. Подтверждены данные работы [3] о том, что при «квазиоднородном» отсосе режим «асимптотического отсоса» возможен только при концентрации отсасываемого компонента в ядре потока близкой к единице. В смеси, состоящей из сильно различающихся по массе компонентов, режим «асимптотического отсоса» наблюдается при отсосе легкого компонента с его концентрацией в ядре потока свыше 70%.

---

1. В.И. Байков, И.Ю. Костарева, Н.В. Примак. Теория мембранного разделения бинарных газовых смесей. ИФЖ. 2004. Т 77, №5, с. 113-117.

2. В.С. Наумкин, М.С. Макаров. Исследование влияния селективного отсоса компонента бинарной газовой смеси на трение и массообмен в пограничном слое. Тепловые процессы в технике, №7, т3, 2011, с 290-297.

3. Э.П. Волчков, В.И. Терехов. Пограничный слой с селективным отсосом. ИФЖ. 1983. — Т. XLIV. — №2. — с. 181-188.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доцент М. С. Макаров

## ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИЕ ПОСТРОЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ СКОРОСТИ НУКЛЕАЦИИ

О. О. Петрова-Богданова, Е. Г. Фоминых  
Конструкторско-технологический институт  
научного приборостроения СО РАН

Новосибирский государственный технический университет

Классическая теория нуклеации сформулирована в 40-х годах прошлого столетия, но она нуждается в развитии, т.к. теоретические и экспериментальные данные имеют значительные расхождения. Природа таких расхождений до конца не изучена, что подталкивает к созданию новых подходов. Один из них основан на полуэмпирическом построении поверхностей скорости нуклеации над  $p$ - $T$  диаграммами фазовых равновесий, где  $p$  — давление, а  $T$  — температура [1]. С учетом опубликованных ранее статей [2 и др.] можно сформулировать следующие аксиоматические утверждения для построения таких поверхностей:

1. Линии фазовых равновесий могут быть продолжены в область существования другой (устойчивой) фазы. Эти линии представляют неустойчивое (метастабильное) равновесие фаз в области существования третьей (стабильной) фазы.
2. Линии фазовых равновесий соответствуют линиям нулевых скоростей зародышеобразования.
3. В первом приближении принимается, что самые высокие значения скоростей нуклеации при постоянном давлении или при постоянной температуре реализуются в условиях спинодального распада.
4. Спинодальные условия для различных фазовых переходов, например пар-жидкость и пар – кристалл, не совпадают.
5. Для равновесия пар-кристалл допускается возможность существования метастабильной критической точки [3].

Работа поддержана, грантом РФФИ № 11-03-00049-а.

---

1. Анисимов М.П. Нуклеация: теория и эксперимент. // Успехи химии. 2003. Т. 72(7), С. 664-705.

2. Анисимов М.П., Хопке Ф.К., Бузник В.М. Элементы топологии поверхностей скорости зародышеобразования в окрестности тройной точки. // ДАН, 2007. Т. 417(2), с. 209-212.

3. М.П. Анисимов, Е.Г. Фоминых и др. Элементы топологии области существования метастабильных состояний двухкомпонентного пара. Журнал физической химии, 84(3), 71-77 (2010).

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

## **МНОГОЛИСТНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ СКОРОСТИ ЗАРОДЫШЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ С МОНОТРОПНЫМИ ФАЗОВЫМИ ПЕРЕХОДАМИ**

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

В классической теории нуклеации скорость зародышеобразования обычно описывается в одноканальном приближении. Использование классической теории, или её вариантов, для описания многоканальных систем представляется некорректным. Многолистная (многоканальная) поверхность скоростей нуклеации реализуется, например, в системах с монотропными фазовыми переходами.

Монотропным превращениям соответствуют поля сосуществующих метастабильных состояний различных полиморфных модификаций. Продолжение моновариантных линий из тройной метастабильной точки обычно характеризуется как метастабильное состояние в метастабильном. Наиболее стабильная фаза в этом случае имеет более высокую температуру фазового перехода при фиксированном давлении, а при постоянной температуре – наименьшее давление пара.

Примером диаграммы с монотропным превращением может быть диаграмма состояния, фосфора. Следует отметить, что здесь между метастабильными фазами фосфора, возможны энантиатропные переходы. В наших построениях используется идея, опубликованная в статье [1]. Для создания алгоритма построений был модифицирован комплекс аксиоматических утверждений и введено допущение о существовании метастабильных критических точек для равновесий пар-кристалл, продолженных за тройные точки.

Из построений следует, что для систем с монотропными переходами фаз существуют серии поверхностей зародышеобразования, что требует применения приближения теории многоканальной нуклеации.

Работа поддержана, грантом РФФИ № 11-03-00049-а.

---

1. Anisimov M.P., Hopke J.A., Rasmussen D.H., Shandakov S.D., Pinaev V.A. Relationship of phase diagrams and surfaces of new phase nucleation rates // J. Chem. Phys.- 1998.-V.109, №. 4.-P.1435-1444.

2. Anisimov M.P. (1990) Metastable vapor states diagram. // J.Aerosol Sci., V.21, suppl.1, P.23-25.

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

## ПРИМЕРЫ МНОГОКАНАЛЬНОЙ НУКЛЕАЦИИ ДЛЯ СИСТЕМ С ЭНАНТИОТРОПНЫМИ ФАЗОВЫМИ ПЕРЕХОДАМИ

О. О. Петрова-Богданова, Е. Г. Фоминых  
Конструкторско-технологический институт  
научного приборостроения СО РАН

Новосибирский государственный технический университет

В данной работе рассматриваются примеры построения топологий поверхностей скорости зародышеобразования для систем с энантиотропными переходами и применение идеи полуэмпирического построения поверхностей скорости нуклеации над диаграммами фазовых равновесий [1]. Энантиотропные переходы — частный случай полиморфных превращений. Обычно полиморфная модификация имеет на  $p$ - $T$  диаграмме поле как стабильных, так и метастабильных состояний. Здесь  $p$  – давление, а  $T$  – температура. Для энантиотропных переходов в области устойчивости одной из полиморфных модификаций могут оказаться несколько других полиморфных форм в метастабильном состоянии.

Алгоритм построения предполагает использование фрагмента модельной  $p$ - $T$  диаграммы с изображением линий фазового равновесия пар-жидкость, пар-кристалл I и пар-кристалл II. Рассматривается упрощенный случай существования трех тройных точек. Линии равновесия фаз продолжают в область существования третьей (стабильной) фазы, как это реализуется, для метастабильных равновесий паров воды над переохлажденной водой, находящейся в жидком состоянии. Нами постулируется наличие критических точек для равновесий пар-кристалл в дополнение к общепринятым критическим точкам для равновесия пар-жидкость. Общеизвестно, что в  $p$ - $T$  координатах паровые спинодали представляют собой экспоненциальные функции, исходящие из критических точек. Мы полагаем, что это справедливо для критических точек пар-кристалл.

Полученные в данной работе топологии свидетельствуют о наличии многоканальной нуклеации пара, приводящей к возникновению нескольких модификаций конденсированной фазы и нескольких независимых поверхностей скорости нуклеации.

Работа поддержана, грантом РФФИ № 11-03-00049-а.

---

1. Анисимов М.П. Нуклеация: теория и эксперимент. // Успехи химии. 2003. Т. 72(7), С. 664-705.

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

## **ЗАРОЖДЕНИЕ КАВИТАЦИИ В ВЫСОКОВЯЗКОМ ГАЗОНАСЫЩЕННОМ РАСПЛАВЕ ПРИ БЫСТРОЙ ДЕКОМПРЕССИИ**

А. А. Пильник

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

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 летучего компонента в расплаве при новом давлении становится ниже его текущей концентрации и газ стремится покинуть расплав. Зарождение пузырьков в пересыщенном расплаве происходит флуктуационным образом. При этом частота зарождения газовых пузырьков сильно зависит от величины пересыщения. В случае сильно насыщенного расплава эволюция пузырей может привести к разрушению (фрагментации) жидкости.

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 пограничного слоя, зарождения новых пузырьков в котором существенно подавлено.

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

## **ЗАЩИТА БРОНЕОБЪЕКТОВ. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ**

Б. Б. Ринчинов

Филиал военного учебно-научного центра сухопутных войск  
«Общевойсковая академия вооруженных сил Российской Федерации»,  
г. Новосибирск

В связи с развитием поражающих средств актуальны исследования в области защиты бронеектов от перспективных боеприпасов. В настоящее время в российской армии имеются комплексы активной защиты (КАЗ) «Дрозд» и «Арена» способные защитить от противотанковых ракет и гранат. Для защиты от снарядов используется гомогенная сталь.

Использование новых технологий играет важнейшую роль в бою. Во время Великой отечественной войны, 70% потерь бронеектов при взятии Берлина, было результатом использования противником фаустпатронов. Дальнейшее развитие средств поражения привело к появлению противотанковых управляемых ракет (ПТУР) и бронеектов оперенных снарядов (БОПС). Для защиты от ПТУР используется динамическая защита и КАЗ, последнее уничтожает ракету при подлете и увеличивает живучесть на 0,8-1,7. Кинетическая энергия БОПС поглощается сталью, либо отражается попав на нее под углом. На сегодняшний день имеются разработки в области электродинамической и электротермической защиты, а так же с использованием непосредственной электризации и метанием пластины.

В работе описываются состав и принципы действия современных и перспективных средств защиты бронеектов. А так же предлагается решение проблемы источника питания для электрической защиты. Для обеспечения энергией элементов защиты необходимо использовать конденсаторы, однако занимаемое ими пространство внутри бронеекта слишком велико и ставит под вопрос само использование таких средств. Изучив современную многослойную броню, и современные конденсаторы, вижу решение в использовании керамического слоя в многослойной броне танка в качестве диэлектрика в конденсаторе. Такое сочетание позволит значительно уменьшить: вес, объем занимаемого пространства, так же такой подход более экономичен.

Научный руководитель – доцент А. П. Перистый

## НОВЫЙ СПОСОБ УПРОЧНЕНИЯ ЦИРКОНИЯ И СПЛАВОВ НА ЕГО ОСНОВЕ

А. Е. Розен, М. Ю. Панин  
Пензенский государственный университет

Трагические события на АЭС "Фукусима-1" с особой остротой подняли вопрос ядерной безопасности и необходимости новых подходов в решении вопроса о создании материалов надёжно работающих в условиях радиационного воздействия. В этой связи разработка нового способа упрочнения циркония и его сплавов является чрезвычайно актуальной задачей.

Установлено, что стабильность выделения вторых фаз во многом определяет сопротивление радиационному набуханию в сталях благодаря увеличению мощности стоков точечных дефектов и их рекомбинации в границах "матрица-выделение".

В этой связи было предложено новое техническое решение армирования циркониевого сплава Э 125 железистыми и высоколегированными стальными волокнами с последующим их переводом в интерметаллиды.

Данная задача была решена применением сварки взрывом двух листов, установленных с зазором 2 мм, и расположенных между ними продольных проволок сечением 1,2 мм. В качестве взрывчатого вещества, был выбран материал со скоростью детонации 2600 м/сек. Инициирование заряда осуществляли электродетонатором.

Было получено схватывание между армирующим элементом и элементами матрицы, обеспечена целостность волокон при наименьшем количестве зон не проваров и отсутствии значительного расплавления металла.

Полученные образцы подвергали термической обработке в диапазоне температур от 700 до 950 °С с шагом в 50 градусов и временем выдержки от 2-х до 90 минут.

Установлена возможность получения интерметаллидного слоя на границе раздела цирконий-железо толщиной до 300 мкм. В настоящее время проводятся механические испытания полученного композиционного материала.

Научный руководитель – д-р техн. наук, проф. А. Е. Розен

# ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ГИДРАТА В ВЕРТИКАЛЬНОМ КАНАЛЕ

А. А. Русинов, А.С. Чиглинцева

Бирская государственная социально-педагогическая академия

**20 апреля 2010 года** в Мексиканском заливе произошел взрыв нефтяной платформы. Последовавший после аварии разлив нефти, превратил ее в одну из крупнейших техногенных катастроф в США. Через повреждения скважины на глубине 1500 метров в Мексиканский залив за 152 дня вылилось около 5 миллионов баррелей нефти [1]. Для устранения утечки нефти различными нефтяными компаниями и ведущими учеными был предложен ни один десяток идей, многие из которых по тем или иным причинам не принесли желаемого результата.

Поэтому на сегодняшний день остро стоит проблема разработки технологии, с помощью которой можно было бы эффективно и быстро устранить аварию такого рода.

Известно, что температура воды около морского дна составляет в среднем  $4^{\circ}\text{C}$  [2]. При этом давление на глубине, где произошла авария в Мексиканском заливе, составляет порядка 15 МПа. На рис. 1 представлена фазовая диаграмма, соответствующая условиям образования и разложения гидрата.

Видно, что термобарические условия в районе аварии Мексиканского залива способствуют образованию гидрата.

В данной работе предложена технологическая схема и описана соответствующая математическая модель, которая описывает физико-химические процессы образования гидрата в вертикальной скважине.

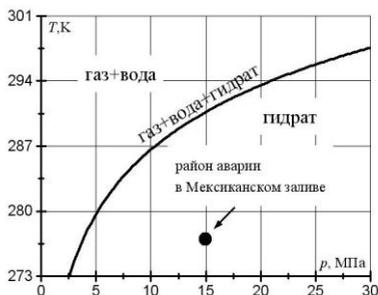


Рис. 1 Фазовая диаграмма.

1. John Mc Quaid, The Gulf of Mexico Oil Spill: An Accident Waiting to Happen, Washington Post. 12, 8-9 (2010).

2. Дмитриевский А.Н., Баланюк И.Е. Газогидраты морей и океанов – источник углеводородов будущего.– М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2009, 416 с.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. В. Ш. Шагапов

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СВИНЦА В ТВЕРДОМ СОСТОЯНИИ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ВСПЫШКИ

Д. А. Самошкин, И. В. Савченко, А. Ш. Агажанов  
Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН

Разработана новая методика измерения теплопроводности высокопластичных металлов вблизи температуры плавления. Методом лазерной вспышки [1] определены коэффициенты температуропроводности и теплопроводности свинца высокой чистоты (99,992%) в твердом состоянии на экспериментальной установке LFA-427 немецкой фирмы NETZSCH. Образцы металла предварительно обезгаживались в вакууме  $1 \times 10^{-5}$  Торр при температуре 900°C в течение 1-2 часов.

Получены новые экспериментальные данные по коэффициентам теплопроводности и температуропроводности твердого свинца в интервале температур от комнатной до температуры плавления, которые в пределах оцениваемых погрешностей согласуются с наиболее надежными литературными данными.

На основании экспериментальных данных проведен расчет скачка теплопроводности свинца при температуре плавления и его сопоставление со значением, рассчитанным по формуле, предложенной Пао [2]

$$\frac{\lambda_s}{\lambda_l} = \exp\left(\frac{2\Delta H_f}{3RT_f}\right),$$

которая устанавливает связь между изменением теплопроводности твердых ( $\lambda_s$ ) и жидких ( $\lambda_l$ ) металлов при температуре плавления ( $T_f$ ) и скачком энтальпии ( $\Delta H_f$ ),  $R$  – универсальная газовая постоянная. Отличие составило около 5%, что находится в пределах оцениваемых погрешностей теплопроводностей твердых и жидких фаз.

---

1. Parker W.J., Jenkins R.J., Butler C.P., Abbott G.L. Flash method for determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity // J. Appl. Phys. – 1961. – Vol. 32, №9. – P. 1679 – 1684.

2. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций. – Москва: Мир, 1968. – 464 с.

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

## **УДАРНО-ВОЛНОВАЯ АКТИВАЦИЯ ОТХОДОВ АЛЮМОХРОМОВОГО КАТАЛИЗАТОРА ИМ 2201**

С. В. Скиба

Пензенский государственный университет

Целью работы являлось установление возможности ударно-волновой активации отработанного алюмохромового катализатора (АХК) марки ИМ 2201. АХК представляет по химическому составу ценное сырье для синтеза высокотемпературного термостойкого алюмохромфосфатного связующего (АХФС).

В задачи исследования входили:

- (а) разработка схемы ударно-волновой активации;
- (б) расчет параметров заряда взрывчатых веществ (ВВ);
- (в) физико-химические исследования исходных материалов и продуктов активации.

В полигонных условиях были проведены эксперименты по активации отработанного АХК марки ИМ2201 при различных параметрах заряда ВВ. Ударно-волновая обработка материала с целью его активации не ставит задачи обеспечения точных геометрических размеров, формы и целостности заготовки. В связи с этим схема взрывного нагружения значительно упрощается по сравнению со схемами применяемыми для ударно-волнового компактирования материалов. Взрывное нагружение осуществлялось накладным зарядом ВВ в скользящей ударной волне.

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент Ч. Г. Пак

# ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ ГОРЕНИЯ В НЕЛИНЕЙНОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ ПРИ СВ-СИНТЕЗЕ

Е. С. Соснина

Алтайский государственный университет, г. Барнаул

Самораспространяющийся высокотемпературный синтез представляет собой режим протекания сильной экзотермической реакции горения с послойной теплопередачей в порошковой смеси металлов и описывается в одномерном нестационарном случае и плоской геометрии уравнением в частных производных параболического типа (первая краевая задача)

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\kappa_0 T^n \frac{\partial T}{\partial t}) + B_0 \exp(-E/RT) - \alpha(T - T_0),$$

где:  $c$ ,  $\rho$  — удельные теплоёмкость и плотность СВС-смеси;  $t$  — время;  $x$  — координата;  $B_0 \exp(-E/RT)$  — функция тепловыделения (закон Аррениуса) в процессе горения смеси;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи во внешнюю среду;  $\kappa_0 T^n$  — нелинейный коэффициент теплопроводности, зависящий от температуры горения  $T$ . Пористость среды учитывалась в виде квазипериодичности поведения коэффициента  $k_0 = A_0 \sin[\omega_0(x - d/4)] + B_0$ , где  $A_0$  — амплитуда;  $\omega_0 = 2\pi/d$ , параметр  $B_0$  соизмерим с периодом  $d$  и дисперсностью порошка.

В программном модуле реализована однородная консервативная разностная схема в комбинации с устойчивым методом прогонки. В результате моделирования волновой динамики горения в процессе СВ-синтеза целевого продукта были получены профили температуры  $T(x, t)$ .

Анализируя скорость роста температуры и скорость распространения волны горения с помощью последовательности температурных профилей, обнаруживается эффект локализации тепловыделения и последовательная смена режимов горения «с обострением» [1]. В начальной стадии возникает LS-режим, который через кратковременную стадию S-режима переходит в HS-режим. После завершения HS-режима возникают новые «резонансные» структуры, синхронизированные неоднородностями коэффициента теплопроводности пористой среды.

---

1. Курдюмов С. П. Собственные функции горения нелинейной среды и конструктивные законы построения ее организации. - В кн.: Современные проблемы математической физики и вычислительной математики. - М.: Наука, 1982, С. 217-243.

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

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТРУБОПРОВОДА С ДЕФЕКТАМИ

Р. Ю. Чумарев

Санкт-Петербургский государственный горный университет

Задачей моделирования являлось получение графиков магнитного поля сборок из постоянных магнитов, имитирующих металлический трубопровод. При численном моделировании магнитных полей трубопроводов использовался лицензионный пакет ANSYS 13. В результате численного моделирования на первом этапе работы получены графики магнитного поля от цилиндров конечной длины, имитирующих секцию трубопровода.

Последовательность расчетов: задание свойств материала, создание геометрии модели трубы, генерация расчетной сетки, задание граничных условий модели, запуск модели на расчет, получить решение, рассмотреть результаты.

Использованные параметры: длина трубопровода – 10 м, наружный диаметр – 1000 мм, коэрцитивная сила трубы – 1000 А/м, остаточная намагниченность – 1,18 Тл, диэлектрическая проницаемость окружающей среды – 5 [1-2].

Предварительные результаты расчетов свидетельствуют о возможности и целесообразности математического моделирования, магнитных полей трубопроводов с дефектами.

В дальнейшем планируется рассчитать:

1. Поле напряженных состояний трубопровода на основе связи между коэрцитивной силой и намагниченностью трубопровода.
2. Магнитное поле поперечного и продольного сварного шва.
3. Магнитное поле при различном расположении точки измерений относительно трубопровода.

---

1. Боровик, Е.С. Лекции по магнетизму [Текст] / Е.С. Боровик, В.И. Еременко, А.С. Мильнер. — 3-е изд. М.: ФИЗМАТГИЗ, 2005. — 512 с.

2. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Магнитные цепи, поля и программа FEMM: Учебное пособие. М.: Изд. Академия, 2005. — 336 с.

Научный руководитель – д-р геол.-минерал. наук, проф. Е. И. Крапивский

# МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВЯЗКОСТИ РАСПЛАВА ТЕЛЛУРИТНОГО СТЕКЛА В ТЕМПЕРАТУРНОМ ДИАПАЗОНЕ 770 – 830 К

Л. В. Шабарова

Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского

В настоящее время в волоконной и нелинейной оптике большие перспективы отдаются расплавам на основе теллуридных стекол. С точки зрения технологий получения световодов практический интерес по теплофизическим свойствам расплавов системы представляет температурный диапазон 770–830 К. Данные по вязкостным характеристикам теллуридных стёкол в исследуемом диапазоне температур в литературе отсутствуют.

Для определения вязкости расплавов разработана расчетно-экспериментальная методика, позволяющая определять вязкости расплавов в широком диапазоне изменения величин вязкости без внесения изменений в экспериментальную установку. При всех достоинствах классических методик, их применение для определения вязкости расплавов стекол в широком диапазоне температур проблематично.

Суть разработанной методики заключается в проведении относительно простых, мало затратных по стоимости и времени физических экспериментов в сочетании с реализацией математических экспериментов с применением современных технологий вычислительной гидродинамики, в которых с максимальной полнотой моделируются условия и ход физического эксперимента. Далее, задача заключается в подборе (идентификации) в вычислительном эксперименте вязкости расплава, значение которой позволят получить при моделировании тот же результат, который зарегистрирован в физическом эксперименте.

Проведена валидация методики на расплавах стекол  $As_{37,7}S_{62,3}$ . С использованием разработанной методики определена вязкость расплавов теллуридного стекла  $(TeO_2)_{0,70}(WO_3)_{0,22}(La_2O_3)_{0,08}$  в диапазоне температур 770-830 К. В диапазоне температур 770-805 К значения вязкости удовлетворяют уравнению типа Аррениуса

Разработанная методика может быть применена для определения расплавов халькогенидных и теллуридных стекол различного состава. Определенные вязкостные свойства расплавов стекла в рабочем диапазоне температур будут использованы при совершенствовании технологии волоконных световодов.

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

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА БИНАРНОЙ ДИФFUЗИИ ОЗОНА В ВОЗДУХ

А. А. Шевченко

Кубанский государственный аграрный университет, г. Краснодар

Бинарный коэффициент диффузии один из основных показателей распределительного закона Адольфа Фика, выведенного в 1855 г. Этот физический параметр, имеет смысл коэффициента пропорциональности при градиенте концентрации определённого компонента смеси в уравнении, устанавливающем зависимость плотности диффузионного потока массы данного компонента от градиентов концентрации всех компонентов смеси.

Определение бинарного коэффициента диффузии позволит теоретически устанавливать параметры генераторов озона используемых для озонирования различных сельскохозяйственных и промышленных объектов. Для вычисления бинарного коэффициента диффузии можно использовать формулу выведенную учеными Нинг Шин Ченом и Отмером, которая имеет вид:

$$D_{12} = 0,43 \frac{0,43 \left(\frac{T}{100}\right)^{1,81} \cdot \left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2}\right)^{0,5}}{P \cdot \left(\frac{T_{c,1} \cdot T_{c,2}}{10000}\right)^{0,1406} \cdot \left[\left(\frac{V_{c,1}}{100}\right)^{0,4} + \left(\frac{V_{c,2}}{100}\right)^{0,4}\right]^2} \quad (1)$$

где  $T_{c,1}$ ,  $T_{c,2}$  – критическая температура взаимодействующих веществ, К;  $V_{c,1}$ ,  $V_{c,2}$  – критический объем взаимодействующих веществ, см<sup>3</sup>/моль;  $M_1$ ,  $M_2$  – молярные массы смешиваемых веществ, г/моль;  $P$  – давление, Па

Используя данные полученные в ходе расчета формулы 1 позволили сделать вывод, что на величину коэффициента бинарной диффузии наибольшее влияние оказывает величина температуры окружающей среды. Так при одинаковом атмосферном давлении изменение температуры на 10 °С приводит к изменению коэффициента бинарной диффузии на 0,15 см<sup>3</sup>/моль и более. В свою очередь при одной и той же температуре и изменении атмосферного давления на 10 миллиметров ртутного столба изменение коэффициента бинарной диффузии составляет примерно 0,03 см<sup>3</sup>/моль, что имеет незначительное влияние на распределение озона в воздушной среде. Таким образом, для того чтобы добиться равномерного распределения озона в воздушной среде обрабатываемого помещения необходимо поддерживать постоянство температуры. Это позволит добиваться равномерности воздействия озонозодушной смеси на обрабатываемые объекты, что является немаловажной задачей при обработке сельскохозяйственных и промышленных объектов.

# МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО ПЕРЕНОСА ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЁНОК

М. В. Шугаев

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

Лазерно-индуцированный перенос вещества от мишени к подложке по ходу лазерного луча (LIFT) привлекает к себе большое внимание как альтернатива литографическим методам. Данный подход при правильно подобранных параметрах облучения может быть использован для различных классов материалов (металлов, диэлектриков, полупроводников, полимеров, биологических тканей). Для оптимизации технологии LIFT необходимо глубокое понимание взаимосвязи процессов, происходящих в материале при его облучении и на стадии его переноса к подложке. Задача усложняется тем, что даже для материалов одного класса при аналогичных условиях облучения, как показано в работе [1], перенос вещества на подложку осуществляется существенно различным образом (в виде нанокристаллитов в расплаве для золота, в виде нанодисперсных жидких капель для цинка и в виде единой микроразмерной капли для хрома).

В рамках данной работы построена модель, основанная на методе молекулярной динамики, для изучения процесса LIFT металлических пленок. Лазерно-индуцированный нагрев материала излучением фемтосекундной длительности описывается двухтемпературной моделью. Этот комбинированный ММД-ДТМ подход [2] реализован для экспериментальных условий, описанных в работе [1]. Выполнено численное моделирование нагрева, плавления и начальной стадии переноса пленок золота, хрома и цинка толщиной 40 нм при условиях облучения, типичных для процесса LIFT [1]. Результаты анализируются в сравнении с данными, полученными в рамках континуумной модели [3].

---

1. Klini A., Loukakos P.A., Gray D., et al. Laser Induced Forward Transfer of metals by temporally shaped femtosecond laser pulses // *Optics Express*. 2008. Vol. 16. P.11300–11309.

2. Ivanov D.S., Zhigilei L.V. Combined atomistic-continuum modeling of short pulse laser melting and disintegration of metal films // *Phys. Rev. B*. – 2003. – Vol. 68. – Paper 064114.

3. Shugaev M.V., Bulgakova N.M. Thermodynamic and stress analysis of laser-induced forward transfer of metals // *Appl. Phys. A*. 2010. Vol. 101. P. 103–109.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук Н. М. Булгакова,  
д-р физ.-мат. наук А. В. Булгаков

# ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

## ЭЛЕКТРОННЫЕ ЦИКЛОТРОННЫЕ КОЛЕБАНИЯ ВБЛИЗИ ОСИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ЛОВУШКИ

Д. С. Багулов

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

В ИЯФ СО РАН на установке газодинамическая ловушка (ГДЛ) планируется проведение эксперимента по высокочастотному нагреву плазмы методом электронного циклотронного резонанса, основами которого будут служить результаты численного моделирования [1].

В данной работе проведен анализ лучевых траекторий в ГДЛ на основе аналитической теории плазменных электронных циклотронных колебаний вблизи оси открытой ловушки [2].

Теория распространения электромагнитных волн в плазме с одномерной неоднородностью детально разработана (см., например, [2]). В случае двумерной неоднородности определить положение резонансной поверхности сложнее. Согласно работе [3], это можно сделать, анализируя траектории волновых пакетов (лучевые траектории). Волновые пакеты замедляют движение вдоль неоднородности при приближении к плоскости пространственного резонанса. Это приводит к накоплению волновой энергии в окрестности резонансной точки и появлению особенности в распределении электромагнитных полей.

Исследование показало, что лучевая траектория, идущая вдоль оси ГДЛ со стороны сильного магнитного поля, доходит до резонансной поверхности, что соответствует нагреву плазмы. Однако эта траектория является репеллером, то есть близкие к ней лучевые траектории удаляются от неё и могут не достигать резонансной поверхности.

В работе детально исследуется поведение лучевых траекторий необыкновенной волны электромагнитных колебаний в неоднородном магнитном поле вблизи оси газодинамической ловушки в приближении геометрической оптики.

---

1. А. В. Аржанников и др., Итоговый отчет «Компьютерное моделирование нагрева плазмы в открытой магнитной ловушке ГДЛ потоком миллиметрового излучения, генерируемого гиротронным комплексом» (2011).

2. А. В. Тимофеев, Резонансные явления в колебаниях плазмы. ФИЗМАТЛИТ (2009).

3. А. Д. Пилия, ВЧ-нагрев плазмы. ИПФ АН СССР (1983).

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

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИДАРНОГО СИГНАЛА ДВУКРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ОТ ГИДРОЗОЛЕЙ

С. Б. Банзарон

Томский государственный университет

Лазерные методы исследования окружающей среды обладают рядом преимуществ, в числе которых следует выделить дистанционность, высокое пространственное разрешение и оперативность. При лазерном зондировании гидросферы, как правило, на приемную систему лидара поступают фотоны, претерпевшие не только однократное, но и многократное рассеяние, т.е. лидарный сигнал представляет собой сумму интенсивностей всех кратностей рассеяния. Причем вклад многократно рассеяния в лидарный сигнал часто сравним или даже превышает мощность однократного рассеяния. Как показано в [1], при определенных значениях угла поля зрения приемной системы лидара, дальности зондирования и коэффициента ослабления лидарный сигнал может быть достаточно точно описан в приближении двукратного рассеяния, предложенном в [2].

Нами был рассчитан вклад двукратного рассеяния в лидарный сигнал от гидрозолей с использованием трех моделей морской воды – чистой воды («*clear ocean*»), «промежуточного» типа вод («*coastal ocean*») и мутной воды («*turbid harbor*») [3] при различных значениях угла поля зрения лидара  $\theta_0=0.1, 0.2, \dots, 1.0$  мрад. В докладе приводится анализ зависимости вклада двукратного рассеяния в лидарный сигнал от глубины проникновения зондирующего импульса в воду при разных значениях  $\theta_0$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ: ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы» (ГК № 16.518.11.7048), ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (ГК № 14.740.11.1145).

- 
1. Креков Г.М., Кавкянов С.И., Крекова М.М. Интерпретация сигналов оптического зондирования атмосферы. Н.: Наука, 1987. – 173 с.
  2. Зуев В.Е., Кауль Б.В., Самохвалов И.В. и др. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей. – Н.: Наука, 1986, 188 с.
  3. Копилевич Ю.Н., Кононенко М.Е., Задорожная Е.И. Влияние индикатрисы рассеяния вперед на характеристики светового пучка в морской воде. // Оптический журнал. Т. 77. 2010. №10. С. 10–14.

Научный руководитель – В. В. Брюханова

# ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДА АЗОТИРОВАНИЯ СТАЛИ В БЕЗВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ ДУГОВОГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

И. И. Богданюк

Институт физики высоких технологий  
Томский политехнический университет

Одной из важных и актуальных задач современного машиностроения является поиск эффективных методов химико-термической обработки поверхностей с целью повышения эксплуатационных характеристик конструкционных материалов, из которых изготавливаются детали машин.

В настоящее время одним из перспективных методов является ионно-плазменное азотирование в вакууме, который оценивается как высокопроизводительный, высокоэффективный, энергосберегающий, экологически чистый способ ХТО. Для оптимизации диффузионных явлений в известных к настоящему моменту процессах главная роль уделяется подходам, направленным на сокращение времени обработки и отказ от водорода в насыщающих газовых средах [1].

На основании литературных данных показано, что ионное азотирование в дуговых разрядах низкого давления в безводородной плазме проходит более эффективно по сравнению с тлеющим разрядом. Этот эффект объясняется более энергетичным потоком газовых частиц, вызывающих существенное распыление поверхности, что приводит, порой, к нежелательному изменению микрорельефа поверхности. Поэтому, для ответственных применений требуется тщательный подбор диапазона параметров процесса.

В работе рассматриваются явления, протекающие в процессе азотирования стали 40Х в дуговом разряде низкого давления в зависимости от величины и частоты отрицательного импульсного смещения, подаваемого на обрабатываемые детали: обнаружен диапазон величины указанных выше параметров, позволяющий целенаправленно управлять интенсивностью процессов катодного распыления и регулированием фазового состава зоны внутреннего азотирования. Показано, что частотно-импульсное азотирование в дуговом разряде азота без водорода, протекает в 5 раз быстрее, чем в условиях тлеющего разряда в среде диссоциированного аммиака.

---

1. П. М. Щанин, Н. Н. Коваль, И. М. Гончаренко, С. В. Григорьев  
Азотирование конструкционных сталей в газовых разрядах низкого давления, ФХОМ, №3, 16-19 (2001).

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент И. М. Гончаренко

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРИСТЫХ ОБЛАКОВ С АНОМАЛЬНЫМ ОБРАТНЫМ РАССЕЯНИЕМ

И. Д. Брюханов

Томский государственный университет

Перистые облака формируются на высотах 8–12 км, оптически прозрачны (имеют малую оптическую толщину), имеют большую горизонтальную протяженность. Такие облака состоят из кристаллических частиц с различными размерами и формами. На пропускание и рассеяние солнечной радиации в атмосфере оказывает существенное влияние пространственная ориентация кристаллов в облаках, поэтому перистые облака являются важным климатообразующим фактором. Часто кристаллы в перистых облаках имеют строго горизонтальную ориентированность. Такие облака называют зеркальными.

В апреле–июне 2011 г в экспериментах по исследованию оптических характеристик облаков верхнего яруса с использованием поляризационного лидара Томского государственного университета имело место пять случаев, когда наблюдались на высотах 9–11 км тонкие слои облаков с аномально высоким отношением рассеяния. Эти слои имели вертикальную протяжённость несколько сотен метров. Состояние поляризации отражённого излучения мало отличалось от поляризации зондирующего излучения, что характерно при зеркальном отражении электромагнитной волны от плоской поверхности диэлектрика при нормальном падении.

В настоящем сообщении приводятся результаты оценки по экспериментальным данным оптической толщины и среднего коэффициента ослабления перистых облаков, содержащих горизонтально ориентированные кристаллы, для зондирующего излучения с разной поляризацией. Методика оценки оптической толщины облака базируется на использовании уравнения лазерного зондирования [1].

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ: ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы» (ГК № 16.518.11.7048) и РФФИ (грант № 11-05-01200).

---

1. 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

# ТЕРМОДЕСОРБЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА НА ПОВЕРХНОСТИ МИШЕНЕЙ, ОБЛУЧЕННЫХ ПОТОКАМИ ПЛАЗМЫ.

А. А. Васильев

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

Данная работа посвящена исследованию свойств материалов, подвергшихся воздействию мощных потоков водородной плазмы. Основное внимание уделено процессам захвата, удержания и последующего выделения изотопов водорода в вольфраме и углероде. Эти исследования важны для оптимального выбора материалов диверторной зоны конструируемого в настоящее время экспериментального термоядерного реактора токамака ИТЭР.

Облучение мишеней производилось в выходном узле установки ГОЛ-3 (ИЯФ СО РАН). Образцы представляли собой пластинки из вольфрама и углерода 12x12 мм и толщиной 5 мм. Облучение происходило с плотностью потока энергии на поверхность мишени 0,5 МДж/м<sup>2</sup> в одном выстреле, до 10 выстрелов по одной мишени.

Исследование накопления изотопов водорода в материалах производилось при помощи методов термодесорбционного анализа на вакуумном стенде. Была сконструирована и собрана камера для ТДА. Была разработана методика проведения эксперимента для определения различных параметров десорбируемых газов. Линейный рост температуры мишеней производился при помощи программируемого источника питания с обратной связью по термодатчикам и графлексного нагревателя. Получаемые продукты десорбции регистрировались при помощи квадрупольного масс-спектрометра Pfeiffer QMG220 и соответствующего ему программного обеспечения Quadera.

Целью работы является измерение термодесорбционных спектров облученных материалов, из которых можно получить десорбционные характеристики, такие как порядок десорбционной кинетики  $n$ , энергия активации десорбции  $E$ , энтропийный множитель  $S$ , а также количество накопленного водорода на мишени.

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

# СРАВНЕНИЕ ПОТОКОВ, ИНДУЦИРОВАННЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ БАРЬЕРНЫМ РАЗРЯДОМ И СКОЛЬЗЯЩИМ РАЗРЯДОМ

О. И. Вишняков

Институт теоретической и прикладной механики

им. С. А. Христиановича СО РАН

Новосибирский государственный технический университет

Электрические разряды давно известны человечеству и широко применяются в различных областях, медицине, промышленности, в электронике. В последние десятилетия появилась идея использования электрических разрядов для управления течениями. В первых работах воздействие на поток осуществлялось коронным разрядом. Недостатком этого метода является опасность перехода разряда в дуговую фазу при изменении окружающего давления или при увеличении разности потенциалов между электродами. Для устранения этого явления было предложено использовать поверхностный диэлектрический барьерный разряд (ДБР) и скользящий разряд (СР), у которых электроды отделены друг от друга слоем диэлектрика. На настоящий момент существует множество работ, в которых исследуется возможность управления течения при помощи электроразрядных активаторов различной конструкции [обзор 1]. В работе [2], проведено исследование динамики течения создаваемого ДБР в течение периода колебаний напряжения. СР отличается от ДБР наличием дополнительного электрода, что позволяет увеличивать плазменную область (в которой и происходит разгон газа) по сравнению с ДБР. В связи с чем, интересно проследить изменение динамики течения при наличии дополнительного электрического поля со стороны третьего электрода СР в сравнении с ДБР.

Настоящее экспериментальное исследование посвящено сравнению динамики течения, генерируемого диэлектрическим барьерным разрядом и скользящим разрядом. Получены мгновенные и интегральные параметры разгона газа, определена эффективность активаторов, измерены электродинамические характеристики.

---

1. Eric Moreau. Airflow control by non-thermal plasma actuators, J. Phys. D: Appl. Phys. 40 (2007) p.605–636

2. П.А. Поливанов, О.И. Вишняков, А.А. Сидоренко, А.А. Маслов, Журнал техниче-ской физики, 2012, том 82, вып. 4 стр.31-41

Научный руководители – канд. физ.-мат. наук А. А. Сидоренко,  
П. А. Поливанов

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ШИРИНЫ ЛАЗЕРНЫХ ЛИНИЙ ПО ОСЛАБЛЕНИЮ ИЗЛУЧЕНИЯ В КАЛИБРОВАННЫХ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМАХ

Д. В. Волков

Томский государственный университет

Диагностика газовых сред посредством дистанционного лазерного зондирования базируется на измерении ослабления лазерного излучения при прохождении его через исследуемый газовый объем. Широко используемый метод дифференциального поглощения предполагает высокую точность измерений функции пропускания на линиях поглощения зондируемых газов. Однако вопрос о спектральной ширине линии излучения лазера традиционно не рассматривается, в то время как измеряемый коэффициент поглощения зависит от этой характеристики пучка и пренебрежение этого параметра вносит дополнительные ошибки.

Спектральная ширина лазерной линии является характеристикой зависящей от многих параметров. Ее определение требует сложного и дорогостоящего оборудования. В данной работе предлагается альтернативная методика определения ширины лазерной линии по ослаблению излучения методом абсорбционной спектроскопии, используя кюветы с известным газовым составом при фиксированных термодинамических условиях. Для применения данного метода необходимо знать центр линии излучения лазера с точностью волнового числа вплоть до четвертого знака после запятой, а также стабильность генерации по частоте. Так же требования налагаются и на газ контроллер, центр его линий должен быть известен с точностью до  $0,0001 \text{ см}^{-1}$ , а также используемый газ должен обладать относительно простым спектром, то есть иметь минимальное перекрытие линий и удобным в эксперименте, недорогим и не взаимодействующим с материалом кюветы.

С помощью теоретических расчетов и вычислительных процедур строится зависимость функции пропускания газа от ширины лазерной линии для конкретного лазерного перехода и по номограмме по экспериментальному значению функции пропускания находится ширина лазерной линии.

Конкретное рассмотрение проводится для излучения лазером монооксида углерода, поглощаемого водяным паром.

Научный руководитель д-р физ.-мат. наук, проф. О. К. Войцеховская

# **ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ НА ЛОКАЛЬНО-НЕРАВНОВЕСНЫЙ МАССОПЕРЕНОС В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ**

В. А. Волков

Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского

Воздействие высокоэнергетическими пучками частиц на твердые тела является в настоящее время одним из эффективных методов модификации свойств металлических материалов. Помимо технологического аспекта существует значительный интерес и с физической точки зрения, так как взаимодействие интенсивных пучков частиц с твердым телом сопровождается рядом сложных физических явлений, происходящих в приповерхностном слое, полного понимания которых пока еще нет. Быстрый ввод энергии индуцирует в образце такие явления как фазовые переходы, формирование упруго-пластичных и ударных волн, дефектообразование, эрозию вещества, значительные температурные поля, интенсивный массоперенос. Существенной особенностью этих процессов является высокая скорость их протекания с характерными временами порядка  $10^{-8}$ – $10^{-5}$  с, что указывает на их локально-неравновесный характер. Чтобы изучить особенности массопереноса в локально-неравновесных условиях, в данной работе рассматривается достаточно простая модель, мотивированная условиями эксперимента. Имеется двухкомпонентная система, состоящая из однородного металлического образца с тонким поверхностным слоем другого элементного состава, имитирующего пленку на поверхности металла. Процесс облучения учитывается заданием теплового источника, локализованного вблизи поверхности и предполагается отсутствие в системе фазовых превращений. Несмотря на относительно простую формулировку, такая постановка дает возможность воспроизвести некоторые особенности экспериментальных концентрационных кривых и сделать определенные предположения о протекании процесса в реальных условиях. Продемонстрировано, что на малых временах, порядка времени релаксации системы к локальному равновесию, массоперенос осуществляется не за счет обычного диффузионного механизма, а преобладает волновой механизм переноса, возникающей при релаксации системы к состоянию локального равновесия.

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

# **КОМПАКТНЫЙ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ХИМИЧЕСКИЙ СЕНСОР НА ОСНОВЕ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ЛЕТУЧИХ БИОМАРКЕРОВ И ГАЗОВОГО РАЗРЯДА**

Н. А. Данилина

Институт автоматизации и электротехники СО РАН  
Новосибирский государственный технический университет

Создание малогабаритного и чувствительного химического сенсора является актуальной задачей для различных областей деятельности и особенно медицины. Существует потенциальная возможность использования летучих биомаркеров в выдохе, образующихся в ходе метаболизма, для диагностики различных патологических состояний. Такой метод диагностики является неинвазивным, 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 химический сенсор на основе спектрального анализа газового разряда в кювете, содержащей биомаркеры. Интенсивности характерных спектральных линий биомаркеров увеличивается при фотодесорбции примесных молекул, которые накапливаются на развитой поверхности концентратора, прокачиваемого воздухом в течение достаточно долгого времени и практически мгновенно десорбируются посредством короткого импульса света лампы-вспышки. В результате, чувствительность данного метода возрастает на несколько порядков и может достигать уровня 1 ppm.

Анализ спектра газового разряда с помощью библиотеки спектров отдельных биомаркеров позволяет определять метаболические профили при различных болезнях. Реализация недорогого, компактного, с высокой чувствительностью и селективностью устройства для контроля выдоха может быть полезна для использования в повседневной врачебной практике. Следует отметить, что определение метаболического профиля с помощью данного сенсора не требует постоянной его калибровки, а возможность передачи данных с использованием сотовой связи или интернета позволяет реализовать концепцию мобильных технологий здравоохранения.

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

# ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВРЕМЕННОЙ АСИММЕТРИИ ИМПУЛЬСА НА ФЕМТОСЕКУНДНУЮ МОДИФИКАЦИЮ ПЛАВЛЕННОГО КВАРЦА

А. В. Достовалов, А. А. Вольф  
Институт автоматики и электрометрии СО РАН  
Новосибирский государственный университет

Фемтосекундная обработка материалов — стремительно развивающаяся область в современной оптике, позволяющая создавать 3-х мерные волноводные структуры внутри прозрачных материалов (преимущественно плавленый кварц). При фемтосекундной модификации в области фокусировки наблюдаются различные нелинейные процессы: многофотонное поглощение, лавинообразная ионизация, плазменное поглощение и др., по этой причине параметры области модификации (размер, форма, изменение показателя преломления) во многом определяются характеристиками излучения [1]. В работе [2] представлены экспериментальные результаты по абляции фемтосекундным импульсом плавленого кварца с асимметричной формой по времени. Показано, что при определенных значениях TOD (third-order dispersion) возможно получать размеры модификации меньше дифракционного предела, чем при воздействии симметричного импульса. Также воздействие зависит и от знака TOD: при положительном значении (когда сначала приходит основной импульс) требуется меньше энергии импульса для формирования такой же области, чем при отрицательном значении TOD. Однако исследований по модификации импульсами с  $TOD \neq 0$  сфокусированными вглубь материала не проводилось.

В данной работе представлены результаты численных расчетов распространения сфокусированных вглубь материала (плавленый кварц) фемтосекундных импульсов с различными значениями параметра TOD:  $0 \text{ фс}^3$ ,  $\pm 3 \cdot 10^5 \text{ фс}^3$ ,  $\pm 6 \cdot 10^5 \text{ фс}^3$ ,  $\pm 1 \cdot 10^6 \text{ фс}^3$ , энергией в диапазоне от 100 до 500 нДж, длительностью 50 фс. Получены зависимости поглощенной энергии от начальной энергии импульса, зависимости распределения плотности плазмы в области фокусировки.

- 
- A. V. Dostovalov, S. A. Babin et al. Comparative numerical study of energy deposition in femtosecond laser microfabrication with fundamental and second harmonics of Yb-doped laser, *Laser physics*, 5 (2012)
- L. Englert, M. Wollenhaupt et al. Material processing of dielectrics with temporally asymmetric shaped femtosecond laser pulses on the nanometer scale, *Appl Phys A*, 92, 749–753 (2008)

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН С. А. Бабин

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА COMSOL ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ЛАНДАУ-ГИНЗБУРГА

А. В. Дядова  
Томский политехнический университет

Моделирование поведения *возбуждаемых сред* на сегодняшний день представляется для ученых достаточно актуальной задачей. В их основе лежат простые физические или физико-химические процессы.

*Возбуждаемые среды* — довольно общее понятие, которое полезно для моделирования многих различных явлений, включая распространение нервных импульсов, лесных пожаров, электрических сигналов в сердечной ткани и определенные типы химических реакций.

Большинство систем реального мира отвечает на возбуждение предсказуемым образом. Интересно, когда увеличение амплитуды возбуждения превышает критический уровень, устойчивый отклик системы внезапно изменяется в простое периодическое колебание. С дальнейшим же возбуждением системы, увеличиваются амплитуды и частоты колебаний; форма волны становится более сложной, наконец, превращаясь в непериодические хаотические движения.

Механизмы, вызывающие такие колебания, являются сугубо нелинейными и определенными для каждого явления. Таким образом, моделирование должно принять эти специфические особенности во внимание. Однако можно учитывать некоторые аспекты начала колебаний и хаоса с помощью достаточно простых дифференциальных уравнений, таких как *уравнение Ландау-Гинзбурга*. Уравнение для функции от одной пространственной переменной для отрезка длины  $L$ :

$$u_t - (1 + ib)u_{xx} = u - (1 + i \cdot c) \cdot u \cdot |u|^2 \quad \text{для области} \quad \Omega = \left[ -\frac{L}{2}; \frac{L}{2} \right]$$

с периодическим граничным условием:

$$u \cdot \left( -\frac{L}{2}, t \right) = u \cdot \left( \frac{L}{2}, t \right).$$

Программный пакет COMSOL Multiphysics, в свою очередь, позволяет моделировать любые физические процессы, описание которых возможно в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных.

В результате проделанной работы было визуализировано решение уравнения Ландау-Гинзбурга в пакете мультифизического моделирования COMSOL. Проведен анализ изменения решения в пространстве и во времени в зависимости от изменений начальных условий. Данная модель может использоваться в дальнейшем с целью проведения экспериментов и анализа решений для более сложных процессов.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доцент  
А. С. Огородников

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РОСТА НАНОПЛЁНОК НА ТВЁРДЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ ПРИ ИХ ОБДУВЕ ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНЫМ ПОТОКОМ ПЛАЗМЫ

А. В. Жданов

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

**Цель работы:** Исследование процессов конденсации наноплёнок из сверхзвукового потока неравновесной плазмы.

## **Поставленные задачи:**

1. Адаптировать существующую установку – дисковый МГД-ускоритель для нанесения наноплёнок различной химической природы – углеродной и нитридов металлов
2. Создать и отладить адекватную задаче диагностическую систему
3. Провести синтез различных наноплёнок при разнообразных условиях
4. Изучить физические и механические свойства полученных плёнок
5. Произвести сравнительный анализ результатов и сделать выводы о возможных областях применения получаемых предлагаемым способом наноплёнок
6. Проведение численного эксперимента для исследования процессов в канале

Свойства получающихся наноплёнок сильно зависят от технологии их получения. Поэтому каждый новый способ должен приводить к наноплёнкам с новыми свойствами. Исследуемый в данной работе способ интересен тем, что его ещё никто не применял.

Данный метод можно отнести к методу плазмохимического осаждения с тем принципиальным отличием, что наноплёнки получаются из сверхзвукового потока ионизованного газа, тогда как в других методах сверхзвуковые потоки не используются.

Основой устройства дискового МГД-ускорителя служит сверхзвуковой дисковый канал, образованный двумя диэлектрическими дисковыми стенками диаметром 200 мм. В центре канала находится источник газа, состыкованный с одним из дисков. Газ из источника поступает в центр канала. На входе в канал формируется дисковая струя воздуха. В канале установлены электроды – катод и 24 анода – по окружности вблизи выходного сечения канала. Канал помещен в магнитное поле с индукцией ***B***, нормальное к его стенкам. На выходе из ускоряющей зоны мы имеем сверхзвуковой поток, из которого и формируется плёнка на подложке.

Соответственно стоит задача исследовать процесс формирования покрытия. Он зависит от многих параметров (свойств потока).

При планировании и проведении экспериментов необходимо иметь априорные представления о процессах, происходящих в канале экспериментальной установки, и параметрах потока. Для этих целей используется математическое моделирование. Разрабатываемые для этих целей математические модели должны быть с одной стороны максимально просты, а с другой стороны должны учитывать имеющие место основные физические процессы.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Г. А. Поздняков

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПЛАЗМЫ В УПРАВЛЯЕМОМ ТЕРМОЯДЕРНОМ СИНТЕЗЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭНЕРГИИ БУДУЩЕГО

А. С. Жумабеков

Семипалатинский государственный педагогический институт

Одной из глобальных научно-технических проблем, стоящей перед человечеством является проблема обеспечения населения Земли энергией. Возможности термоядерной энергетики — колоссальны.

Помимо получения и производства мирной энергии, существуют и другие применения термоядерной энергетики: производство водорода; обессоливание воды; гибридные термоядерные реакторы для производства топлива; объёмный нейтронный источник для облучения материалов; генерация тепла для промышленности и теплоснабжения.

**Управляемый термоядерный синтез** (УТС) использует ядерную энергию, выделяющуюся при слиянии лёгких ядер, таких как ядра водорода или его изотопов — дейтерия и трития. УТС в отличие от взрывного термоядерного синтеза (используемого в термоядерном оружии), носит управляемый характер. Начиная с 1950-х годов, в нашей стране и параллельно во многих других странах проводятся исследования по созданию управляемого термоядерного реактора.

**Токамак** — тороидальная установка для магнитного удержания плазмы. В настоящее время токамак считается наиболее перспективным устройством для осуществления УТС. **Плазма** удерживается специально создаваемым магнитным полем. Одной из важных проблем токамака является обеспечение чистоты плазмы, так как попадающие в плазму примеси прекращают реакцию.

В системах с плазменными шнурами определяющую роль в удержании плазмы играет самостягивание плазмы магнитным полем, протекающего по ней тока. Этот эффект носит название **пинч-эффект** (эффект сжатия). Характерной особенностью пинч-эффекта является *неустойчивость плазменного шнура*. Эта неустойчивость проявляется в образовании перетяжек и утолщений, придающих плазменному шнуру характерную структуру. Другой формой неустойчивости является стремление шнура к изгибанию.

В научном проекте смоделировано движение плазмы в термоядерном реакторе, визуализированы различные неустойчивости плазменного шнура, движение отдельной заряженной частицы в магнитном поле и спирали движения электрона и частицы.

Научные руководители — д-р пед. наук, проф. С. С. Маусымбаев, канд. физ.-мат. наук, доцент Г. У. Нурабаева

# МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЯГИ МОДЕЛИ АБЛЯЦИОННОГО ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

А. С. Завьялов

Институт лазерной физики СО РАН  
Новосибирский государственный университет

Особенностью лазерной тяги является то, что механизмы, ответственные за ее формирование, “включаются” в результате воздействия внешнего (т.е. расположенного на расстоянии) источника лазерной энергии. К таким механизмам относятся:

- лазерная абляция,
- вынос рабочей массы газа лазерной детонационной волной (или ударной волной),
- высвобождение энергии химических связей молекул рабочего вещества.

В настоящей работе рассматривается модель лазерно-плазменного реактивного двигателя, основной вклад в тягу которого дает лазерная абляция, осуществляемая приповерхностной лазерной плазмой.

В докладе оценивается теоретический предел удельной тяги лазерно-плазменного двигателя при использовании различных материалов. Для титана этот показатель составил 0,146 Н на 1кВт вложенной мощности, для алюминия 0,13 Н, для графита 0,05 Н.

Для проверки данного теоретического предела была построена модель абляционного лазерно-плазменного реактивного двигателя. В экспериментах использовалась вакуумная камера. Луч лазера заводился в камеру через длиннофокусную линзу, после чего поворотным зеркалом направлялся на мишень. В результате активного испарения вещества (рис. 1) образовывалось избыточное давление на подложку мишени, которое снималось весами с точностью 0,01 г.

В первичных экспериментах была зафиксирована удельная тяга, которая для титана превысила 0,01 Н на 1кВт вложенной мощности.

Научный руководитель – Г. Н. Грачев

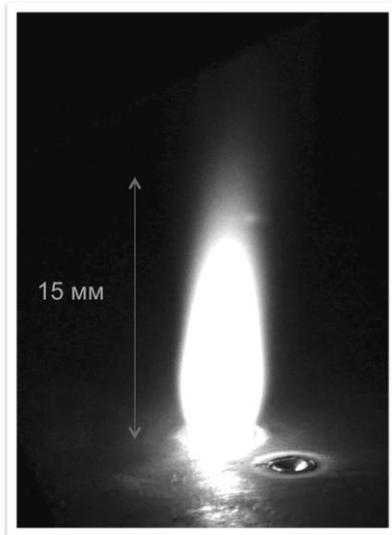


Рис.1 Плазма на поверхности титана.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОПОРОШКОВ НА ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ МЕТОДОМ ИСПАРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

А. П. Завьялов

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

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН

Нанопорошки различных веществ могут использоваться во многих областях современной промышленности для улучшения качества выпускаемой продукции. На базе ИТПМ и ИЯФ СО РАН действует полупромышленная установка для получения нанопорошков [1]. Метод заключается в испарении исходных материалов электронным пучком и последующей конденсации паров в виде наночастиц. Промышленное производство предполагает получение нанопорошков с заданными характеристиками, для чего необходима правильная физическая модель. Для решения этой задачи автором с коллегами была создана установка по получению нанопорошков в малых масштабах\* для исследования влияния условий получения на характеристики производимого продукта. Её особенностью является возможность управлять режимами процесса.

С момента создания установки проведены различные исследования процессов формирования нанопорошков. Наибольшее количество данных было получено в экспериментах с диоксидом кремния. И ключевыми здесь стали исследования по влиянию на удельную поверхность получаемых нанопорошков таких параметров, как расход воздуха через систему, ток пучка электронов и расстояние, пройденное электронным пучком в атмосфере. Дополнительными параметрами для исследований явились химическая чистота первоначального материала и конечного продукта и наличие паров различных веществ (тетраэтоксисилана и воды) в системе.

В данной работе представлен обзор данных полученных в экспериментах на описанной установке в период с 2010 года. Представлено обобщение данных для диоксида кремния по описанным выше ключевым параметрам. Обобщение сделано на основе разработанной простой модели формирования нанопорошков.

1. Бардаханов С.П., Корчагин А.И., Куксанов Н.К., Лаврухин А.В., Салимов Р.А., Фадеев С.Н., Черепков В.В. Получение нанопорошков испарением исходных веществ на ускорителе электронов при атмосферном давлении // ДАН. 2006. Т. 409. № 3. С. 320–323

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. С. П. Бардаханов

\*Для диоксида кремния – до 50 г/ч по сравнению с 7 кг/ч при промышленном производстве.

# ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ И ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И СКОРОСТИ РОСТА ПЛЕНОК a – Si:H

А. О. Замчий

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

В настоящее время аморфный гидрогенизированный кремний (a – Si:H) является важным материалом в электронике и солнечной энергетике. Тонкие пленки a-Si:H используются для изготовления тонкопленочных транзисторов, ЖК-экранов с активной матрицей, солнечных элементов [1, 2]. Толщина и оптические параметры пленок являются важными характеристиками и существенно влияют на функционирование таких устройств.

В данной работе была исследована зависимость показателя преломления, коэффициента поглощения, ширины запрещенной зоны, а также скорости роста пленок a – Si:H, полученных методом газоструйного плазмохимического осаждения с активацией электронно-пучковой плазмой, GJ-EVP-CVD (Gas-Jet Electron Beam Plasma Chemical Vapor Deposition) [3], от температуры синтеза. Были найдены спектральные характеристики показателя преломления и коэффициента поглощения. Рабочим газом являлась 5% смесь моносилана с аргоном, в качестве подложек для осаждения пленок кремния использовались стеклянные пластинки. В процессе синтеза температура подложек могла варьироваться в интервале 20 – 300 °С. Оптические параметры и толщина пленок были определены из экстремумов интерференционных полос спектра пропускания в интервале 550 – 1000 нм, используя метод огибающих кривых, предложенный в работе [4].

Полученные результаты количественно и качественно согласуются с литературными данными.

---

1. S. Halindintwali et al, Optical characterisation of a-Si:H and nc-Si:H thin films using the transmission spectrum alone, *J. Mater Sci: Mater Electron* (2007).

2. S. Kasap and P. Capper, *Springer handbook of electronic and photonic materials* (Springer Science + Business Media Inc, USA, 2006).

3. R.G. Sharafutdinov, S.Ya. Khmel, V.G. Shchukin et al., *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2005, vol. 89, p. 99.

4. R. Swanepoel, Determination of the thickness and optical constants of amorphous silicon, *J. Phys. E: Sci. Instrum.* Vol. 16, 1983.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук. С. Я. Хмель

## ЛИНЕРИЗОВАННАЯ ИЗОТЕРМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ПРОЦЕССА ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

Е. С. Ильина, В. Н. Демидов, А. Г. Князева  
Институт физики высоких технологий  
Томский политехнический университет

Обработка поверхности твердых тел ионными или плазменными потоками вызывает изменение макроскопических свойств, которое зависит от различных химических и физических факторов, взаимодействующих между собой. Использование высокоэнергетических источников при поверхностной обработке вызывает появление поверхностных напряжений, активацию диффузии, изменение структуры, фазового и компонентного состава. Разные физико-химические процессы характеризуются различными пространственными и временными масштабами, что использовано в известных к настоящему времени моделях для раздельного описания физических явлений: нагрева и охлаждения, химических реакций и фазовых переходов и т.п.

При построении математических моделей авторы уделяют внимание различным сторонам процесса поверхностной обработки, как правило, не уделяя внимания совместному протеканию разных явлений.

Для описания явлений неравновесной диффузии и сопутствующих явлений в условиях воздействия потоками частиц требуется формулировка связанных моделей, в которых учитывались бы разномасштабные процессы, которым отвечают в расширенной термодинамике быстрые и медленные переменные. Следует заметить, что влияние механических напряжений на диффузию в условиях воздействия потоками частиц имеет много общего с аномальной диффузией, наблюдаемой в иных условиях.

Цель настоящей работы заключается в исследовании начальной стадии процесса ионной имплантации в рамках изотермического приближения.

Простейшая математическая модель при условии малости деформаций включает уравнение движения, уравнение переноса компонента, связанное с напряжениями, и определяющие соотношения. В общем случае задача – нелинейная. Но линеаризация коэффициентов позволяет использовать аналитические методы. Точное аналитическое решение задачи построено в пространстве изображений по Лапласу. Обратное преобразование осуществляется численно. В результате получены примеры распределения концентрации и напряжений в разные моменты времени.

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

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ $^{11}\text{B}(p,3\alpha)$ РЕАКЦИИ

М. А. Камкин

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

Реакция  $^{11}\text{B}(p,3\alpha)$ , происходящая с выделением около 8,7 МэВ энергии и не приводящая к появлению нейтронов является одним из привлекательных путей практического освоения безопасного термоядерного синтеза.

Реакция  $^{11}\text{B}(p,3\alpha)$  происходит в широком диапазоне энергий протонов и имеет резонанс выхода при энергии протонов 0,675 МэВ ( $\Gamma = 300$  кэВ). При такой энергии, рождающиеся  $\alpha$  частицы имеют широкий спектр с наиболее вероятной энергией  $\sim 4$  МэВ. Рассматриваются модели, предсказывающие различные пути реакции  $p+^{11}\text{B} \rightarrow ^{12}\text{C}^* \rightarrow 3\alpha$ : как одновременный распад  $^{12}\text{C}^*$  на  $3\alpha$  частицы, как двух стадийный или трёх стадийный процессы рождения  $\alpha$  частиц с различным распределением энергии между ними.

Точное знание сечения реакции, а так же спектра  $\alpha$  частиц в зависимости от энергии протонного пучка и направления вылета  $\alpha$  частицы, являются определяющими при проектировании возможного термоядерного реактора.

Для точного измерения этих параметров предлагается использовать электростатический протонный ускоритель «Тандем-БНЗТ», обладающий высокой стабильностью энергии пучка и рассчитанный для работы с током пучка до 10 мА и энергией до 2,5 МэВ. [1]

Для первого этапа исследований предложена одноканальная схема регистрации  $\alpha$  частиц, проведены предварительные эксперименты по определению шумовой загрузки и калибровки детектора.

---

1. А.С. Кузнецов, Г.Н. Малышкин, А.Н. Макаров и др. Первые эксперименты по регистрации нейтронов на ускорительном источнике для бор-нейтронозахватной терапии. Письма в ЖТФ, 2009, том 35, выпуск 8, стр. 1-6.

Научный руководитель – А. С. Кузнецов

## ФОРМИРОВАНИЕ ДВОЙНОГО СЛОЯ В ДИОДАХ С ПЛАЗМЕННЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

И. Е. Карпов

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

В настоящее время результаты по использованию мощных электронных пучков для нагрева плазмы в многопробочной ловушке показали перспективность этого направления для создания термоядерного реактора открытого типа [1]. В связи с этим ведется разработка источника электронного пучка большой длительности на основе диода с плазменным катодом [2]. Предполагается, что источник размещается в выходном узле ловушки (в области слабого магнитного поля) и находится под воздействием налетающего потока плазмы, который формирует плазменный анод. В таком случае характеристики электронного пучка, генерируемого в диоде в магнитном поле, могут существенно определяться параметрами катодной и анодной плазмы.

В докладе приводится аналитический вывод распределения потенциала в двойном слое, рассчитываемом в одномерном случае с использованием модельных функций распределений электронной и ионной компонент плазмы. Для катодной плазмы она позволяет приближенно описывать плазму дугового разряда в газе, а для анодной – учитывает динамику ускорения ионов плазмы, выходящей из ловушки в расширяющемся магнитном поле.

Работа проведена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, гранта № 11.G34.31.0033 Правительства РФ для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования от 24 ноября 2010 г, гранта РФФИ 10-08-00707, АБЦП "Развитие научного потенциала ВШ" 2.1.1/3983.

---

1. A.V. Burdakov, A.V. Arzhannikov, V.T. Astrelin, et al. Concept of Fusion Reactor Based on Multi-Mirror Trap. // Fusion Science and Technology, V.59, No 1T, 2011, p.9-16.

2. I.V. Kandaurov, et al. Study of Intensive Long-Pulse Electron Beam Generation in a Source with Arc Plasma Emitter Operated in a External Magnetic Field. // Proceedings of 15th International Symposium on High Current Electronics: Tomsk, 2008, p.121-124.

Научный руководитель – канд. техн. наук В. Т. Астрелин

# ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОСТРАНСТВЕННО НЕОДНОРОДНЫХ ГАЗОВО-АЭРОЗОЛЬНЫХ СРЕД

Д. Е. Каширский

Томский государственный университет

Разнообразные задачи оптики газовой-аэрозольных сред требуют расчета характеристик излучения нагретого газового облака, анализа переноса этого излучения в атмосфере с одновременным учетом эффектов молекулярного поглощения и рассеяния на аэрозольных частицах. Для этого разрабатываются вычислительные системы, осуществляющие информационную спектроскопическую поддержку и решение уравнения переноса излучения в термодинамически неоднородных средах, включая атмосферу Земли.

В настоящее время существует ряд такого рода систем, например, «LOWTRAN», «MODTRAN», «NITRAN-PC» и другие. Однако имеющиеся пакеты программ в основном направлены на решение конкретных задач, а также в них отсутствует возможность широких расчетов спектральных характеристик газов при высоких температурах ( $> 1000$  К).

В сообщении описываются созданные программные комплексы «TRAVA» и «GAS RADIATION», ориентированные на решение прямых задач оптики газовых сред и предоставляющие возможность осуществлять моделирование процессов взаимодействия излучения с термодинамически неоднородными газовой-аэрозольными средами. Для расчета спектральных характеристик газовых сред (коэффициентов поглощения, функции пропускания, излучательной способности) в данных системах используется точный line-by-line метод. Предусмотрен анализ распространения как квазимонохроматического, так и широкополосного излучения.

Преимуществами данных комплексов являются возможность учета динамики термодинамических условий среды в широком диапазоне температур (300 – 3000 К) и концентраций газов ( $10^{-6}$  – 1 атм), моделирование распространения излучения в атмосфере для различных геометрий трасс (включая касательные) и расчет излучения нагретого объема газа, прошедшего через газовой-аэрозольную смесь с пространственными градиентами параметров среды.

Еще одной особенностью вычислительных систем является генерация базы данных по параметрам колебательно-вращательных линий углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ), водяного пара ( $\text{H}_2\text{O}$ ), оксида азота (NO) и угарного газа (CO) на основе оригинальных методик.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. О. К. Войцеховская

# ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ФИЗИЧЕСКОЙ И ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЛИНТА

А. В. Коношонкин, А. Г. Боровой  
Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН  
Томский государственный университет

В отраженном от поверхности свете наряду с диффузной частью можно выделить и зеркальное отражение, которое в случае однократного взаимодействия падающего излучения с отражающей поверхностью образует резкие пики интенсивности, называемые глинтом.

С одной стороны глинты ухудшают спутниковые фотографии поверхностей океанов [1], с другой – позволяют восстанавливать некоторые параметры атмосферы [2], в силу высокого уровня интенсивности. Оба этих факта делают глинт актуальным объектом исследования.

В настоящее время теория глинтов строится в рамках геометрической оптики [3], в виду того, что размеры кристалликов льда в облаке и снежном покрове зачастую много больше длины волны света, не говоря уже о размерах волн на поверхности океана. Изображение глинта может быть получено из плотности распределения углов наклона граней посредством уравнений геометрической и физической оптики. Классические измерения функции плотности вероятностей для углов наклона волн в океане были проделаны Коксом и Манком [4].

В работе проводится сравнение геометрической и физической оптик для построения математической модели, адекватно описывающей явление глинта. Показано, что глинты от перистых облаков, снежного покрова и взволнованной поверхности могут быть описаны на основе похожих простых аналитических уравнений. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 09-05-00051.

---

1. H. Zhang, M. Wang. Evaluation of sun glint models using MODIS measurements // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2010. V.111, P. 492-506.

2. H. Chepfer, G. Brogniez, P. Goloub, F. M. Breon, P. H. Flamant. Observation of horizontally oriented ice crystals in cirrus clouds with POLDER-1/ADEOS-1 // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 1999. V.63, P.521-543.

3. A. Konoshonkin, A. Borovoi. Glints from cirrus clouds, snow blankets, and sea surfaces// Atti della Accademia Peloritana dei Pericolanti. 2011. V.89, C1V89S1P052.

4. C. Cox and W. Munk. Measurement of the Roughness of the Sea Surface from Photographs of Sun's Glitter // J. Opt. Soc. Amer. 1999. V.63, P.521-543

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

# РАСЧЕТ ОСЛАБЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ СО-ЛАЗЕРА РАЗЛИЧНЫМИ ГАЗАМИ ДЛЯ АНАЛИЗА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ ПОСТОЯННЫХ МОЛЕКУЛЫ СО

В. С. Корчиков  
Томский государственный университет

Дистанционное зондирование высокотемпературных газовых сред лазерным излучением перспективно для диагностики и контроля различных технологических и экологических процессов. Для этих целей широко используются лазеры ИК диапазона, в частности СО — лазер.

Был определен новый набор значений спектроскопических постоянных для молекулы угарного газа (СО) и рассчитаны энергии высоких колебательно-вращательных состояний с последующим определением центров линий генерации СО- лазера. Особенность подхода заключается в использовании рассчитанных по традиционной полиномиальной формуле значений энергии колебательно-вращательных уровней как исходных данных для процедуры определения коэффициентов Данхема. Для высоковозбужденных колебательно-вращательных состояний значения последних значительно отличаются от известных из литературы.

Поэтому заново рассчитаны центры линии генерации СО- лазера с новыми эффективными КВ константами при которых достигается необходимая точность с экспериментом. Центры линий излучения лазера должны быть определены с достаточно высокой точностью, не ниже  $0.0001 \text{ см}^{-1}$ . Вместе с тем, если энергии КВ уровней для колебательных состояний с  $v \leq 3$  определены с точностью, отвечающей требуемой, то для переходов, соответствующих линиям генерации СО-лазера с  $v \geq 7$  требуются дополнительные исследования.

В качестве критерия достоверности констант выбраны результаты экспериментов по измерению ослабления излучения СО-лазера различными газами и проведено сравнение с расчетами коэффициентов поглощения для всех вариантов длин волн генерации. И отмечены центры линиидающие наилучшее согласие с экспериментом.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. О. К. Войцеховская

## **ФОРМИРОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ВАКУУМНО-ДУГОВЫМ МЕТОДОМ**

М. В. Крипакова, А. Г. Князева, И. М. Гончаренко  
Институт физики высоких технологий  
Томский политехнический университет

Ионно-плазменная обработка материалов связана с преобразованием различных видов энергии в тепловую и разнообразными сопутствующими явлениями, которые приводят к изменению состава и свойств обрабатываемой поверхности. Процессом диффузии при данной обработке материала в значительной степени определяется реальное распределение элементов, химических соединений и фаз, обеспечивающих то или иное распределение физических свойств материала.

В данной работе проводилось сравнительное исследование влияния типа материала подложки на формирование физико-химических характеристик, тонких износостойких пленок разного состава при одинаковых условиях процесса осаждения в плазме вакуумно-дугового разряда.

В соответствии с условиями эксперимента [1], была построена математическая модель роста покрытия, которая позволяет установить корреляцию между параметрами процесса напыления и возникающими макронапряжениями, влияющими в свою очередь на твердость и адгезионные свойства готовых покрытий. Математическая постановка включает в себя три уравнения диффузии и кинетические уравнения, на основе которых можно получить информацию о концентрациях фаз, образующихся в течение процесса. В общем случае имеем систему, состоящую из четырех элементов Fe, Ti, Al, N и трех химических соединений TiN, TiAl<sub>3</sub>, 2AlN. Параллельно в модели оцениваются механические напряжения.

Задача решается численно.

---

1. М. В. Крипакова, И. М. Гончаренко, Изучение физико-механических свойств сверхтвердых нанокompозитных покрытий, полученных вакуумно-дуговым методом. //Высокие технологии и фундаментальные исследования. Сборник трудов Десятой международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». 09-11.12.2010, Санкт-Петербург, Россия/ под. ред. А.П. Кудинова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. — Т.3, с. 288-291.

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

## ФЕМТОСЕКУНДНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ИМПУЛЬСЫ В ЗАДАЧАХ АТМОСФЕРНОЙ ОПТИКИ

О. И. Кучинская, Е. Е. Быкова  
Томский государственный университет  
Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН

Высокая интенсивность лазерных импульсов фемтосекундной длительности позволяет реализовать в атмосфере широкий набор нелинейных эффектов, что значительно расширяет возможности многокомпонентного зондирования атмосферы. Помимо этого, используя электрические свойства канала, созданного фемтосекундным лазером, появляется возможность обеспечить стимулированный разряд грозового облака [1].

В работе представлены результаты экспериментов по филаментации сфокусированных в воздухе световых импульсов Ti:Sa-лазера гигаваттной мощности на основной и второй гармониках (800 нм и 400 нм). Изучалась динамика изменения пространственных и спектральных характеристик плазменной колонки, формирующейся при фотоионизации молекул среды в области фокальной перетяжки пучка в результате его самофокусировки и филаментации, при варьировании мощности в лазерном импульсе. Для обеих гармоник с увеличением мощности наблюдается сокращение дистанции самофокусировки, причем область филаментации не распространяется за геометрический фокус. Получены количественные зависимости длины и толщины филамента, длины нелинейной фокусировки от мощности импульса. Показано, что рассеянный аэрозолем в обратном направлении оптический сигнал от филаментированного участка трассы распространения фемтосекундного лазерного импульса содержит широкополосный сигнал суперконтинуального свечения филамента [2].

---

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.

2. О.И. Кучинская, Е.Е. Быкова, Филаментация сфокусированных импульсов Ti:Sa лазера, XVII Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» СТТ- 2011. Томский политехнический университет, 18–22 апреля. Томск. С. 75.

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

## ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЦЕЗИРОВАНИЯ ДЛЯ МОЩНОГО ИНЖЕКТОРА ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ

Д. В. Мишенин

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

Данное исследование является частью работы по созданию мощного инжектора отрицательных ионов и посвящено стендовым испытаниям системы цезирования. Этот инжектор, в свою очередь, станет основой для инжектора нейтралов. Нагрев пучками нейтральных частиц в настоящий момент используется на многих плазменных установках из-за его высокой эффективности. Получать нейтральные пучки можно и на основе положительных пучков, которые легче сгенерировать, чем отрицательные, но эффективность нейтрализации положительных ионов на энергиях больше 100 кэВ очень низкая, поэтому возникает необходимость создавать инжекторы отрицательных ионов.

Отрицательные ионы получают путем перезарядки положительных ионов на поверхности с низкой работой выхода и затем вытягиваются через отверстия в этой поверхности, называемой плазменной решеткой. Для уменьшения работы выхода на плазменную решетку напыляется цезий, имеющий очень низкую работу выхода, равную всего 1,6 эВ.

Для длительной непрерывной работы источника необходимо постоянное напыление цезия, во-первых, из-за того, что цезиевый слой постепенно разрушается под воздействием различных процессов, а во-вторых, потому что работа выхода поверхностного слоя увеличивается из-за потери электронов. К тому же напыление на решетку, имеющую форму круглого диска, должно быть равномерным по всей площади для достижения наилучшей однородности в поперечном сечении вытягиваемого пучка отрицательных ионов.

Проведенные стендовые работы, направлены на разрешение вопросов, возникших по ходу проектирования инжектора. Необходимо было создать надежную систему, позволяющую вводить пары цезия в вакуумную камеру со стороны атмосферы. Стояла задача сконструировать удобную систему, включающую в себя цезиевый испаритель, паропровод на воздухе и в вакууме, элементы концентрации паров в вакууме, позволяющие добиться равномерного распределения цезия по всей поверхности плазменной решетки.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук С. Г. Константинов

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СХЕМ ВОЗБУЖДЕНИЯ СПЕКТРОВ СКР ГАЗОВ

Д. В. Петров<sup>1</sup>, А. С. Сеченов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН

<sup>2</sup>Томский государственный университет

Спонтанное комбинационное рассеяние света (СКР) является одним из наиболее быстро развивающихся направлений молекулярной спектроскопии, которое активно внедряется в самые различные области науки и техники [1]. Благодаря своим преимуществам, среди которых, в первую очередь, возможность одновременного детектирования всех молекулярных компонентов газовой среды с помощью одного лазера с фиксированной длиной волны, данный метод особенно перспективен для определения качественного и количественного состава газовых сред сложного молекулярного состава. В частности, газоанализ методом СКР-спектроскопии является единственным оптическим методом диагностики газовых сред, качественный состав которых заранее неизвестен.

Основной трудностью при создании такого газоанализатора является крайне малая интенсивность сигнала СКР. Самым простым способом увеличения уровня полезного сигнала является увеличение мощности возбуждающего излучения, т.е. использование более мощного лазера. Однако данный подход влечет за собой значительное увеличение себестоимости разрабатываемого устройства. Потенциально наиболее перспективным подходом является многократное пропускание лазерного луча через одну точку, вследствие чего в данной точке интенсивность сигнала СКР будет увеличиваться пропорционально количеству проходов лазерного луча.

В докладе представлены результаты исследования различных оптических систем возбуждения спектров СКР газов базирующиеся на компьютерном моделировании с помощью программного пакета ZEMAX и эксперименте проведенном на разрабатываемом в ИМКЭС СО РАН стендовом СКР-газоанализаторе.

---

1. Булдаков М.А., Матросов И.И., Тихомиров А.А. Современное состояние и тенденции развития газоаналитического приборостроения для контроля промышленных выбросов в атмосферу // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22. №1. С. 52-57.

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

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО СПЕКТРА ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА В ГЕЛИИ

В. А. Пинаев, И. М. Уланов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН

Наложение продольного магнитного поля приводит к изменению электрических параметров тлеющего разряда. Как показали предыдущие эксперименты [1] с ростом напряжённости магнитного поля происходит сжатие разряда и уменьшение его напряжения. Концентрация и температура электронов увеличивается. Возрастает излучение линейчатого и непрерывного спектра в видимой области спектра. В работе выполнено измерение абсолютной интенсивности излучения разряда. Предварительно оптическая система была проградуирована с помощью эталонного источника света – ленточной вольфрамовой лампы.

Изучение процессов приводящих к излучению непрерывного спектра катодных областей тлеющего разряда показало, что из-за малой степени ионизации ( $\delta \sim 10^{-7}$ - $10^{-5}$ ) при типичных значениях температуры  $T_e$  (0.1-10 эВ) и плотности  $n_e$  ( $10^9$ - $10^{11}$ ) электронов основным процессом является тормозное излучение  $J_{\lambda, \text{brems}}$ , возникающее вследствие упругого рассеяния электронов на атомах. По результатам зондовых измерений выполнен расчёт интенсивности  $J_{\lambda, \text{brems}}$  считая, что основная группа электронов имеет максвелловское распределение [2]. Измерение  $n_e$  и  $T_e$  осуществлялось по двухзондовой методике, применение которой позволяет выполнять измерения в присутствии магнитного поля [3].

Обнаружено, что измеренная интенсивность непрерывного спектра превосходит расчётную величину тормозного излучения  $J_{\lambda, \text{brems}}$ , причём в зависимости от магнитного поля разность между измеренной и расчётной величиной интенсивности непрерывного спектра составляет 15-100 раз.

---

1. И. М. Уланов, А. Ю. Литвинцев, 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. Г. С. Солнцев, А. И. Орлов, В. А. Довженко, О механизме установления функции распределения электронов по энергиям в плазме отрицательного свечения тлеющего разряда, РиЭ. Т.9. С.1980. (1970).

3. О. В. Козлов, Электрический зонд в плазме. М.: Атомиздат, 1969.

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

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ИОНОВ В ПЛАЗМЕ МАЛОМОЩНОГО ИОННОГО ИСТОЧНИКА**

И. А. Прохоров

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

В ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН ведется разработка ряда компактных малоомощных ионных источников для различных технических и научных приложений. Низкий уровень вкладываемой в разряд мощности не позволяет получить плазму с высоким содержанием полностью ионизованных частиц – в плазме велика концентрация молекулярных ионов.

Температура ионов в плазме ионного источника является важным параметром, влияющим на угловую расходимость пучка. Для приложений, где предъявляются требования к массовому составу, возможно использование магнитных фильтров, пропускающих только ионы определенного сорта. Эффективность работы таких фильтров так же зависит от температуры ионов и энергетического спектра ионов разных сортов.

В представленной работе был измерен энергетический спектр ионов плазмы ионного источника с накаливаемым катодом, ионизация в котором идет за счет электронного удара. Конструкция данного источника исключает ускорение ионов в электрическом поле, что позволяет определить пороговую энергию рождающихся ионов.

Измерения производились с помощью магнитного масс-анализатора, установленного на расстоянии 500 мм от выходной апертуры источника. Одноапертурная щелевая двухэлектродная ионно-оптическая система формировала пучок с энергией  $\sim 4$ кэВ и током 10 мкА, угловая расходимость такого пучка вдоль выходной щели определяется только температурой ионов. Анализатор двигался перпендикулярно оси распространения пучка вдоль направления, в котором угловая расходимость пучка зависит только от температуры. Измеряя ток ионов разных сортов на различных расстояниях от оси, определяется угловая расходимость, и восстанавливается энергетический спектр пучка.

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

# **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНО-УСКОРЕННОЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ НА ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПЕРЕХОД В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ**

И. А. Соколов

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

Аэродинамические характеристики летательных аппаратов ключевым образом зависят от структуры и параметров пограничного слоя. Поскольку именно профиль скорости потока и градиенты давления в этой области определяют характер течения и степень его турбулентности, то очень большое внимание уделяется вопросу управления пограничным слоем.

Среди множества способов управления, отдельного внимания заслуживает МГД-метод, суть которого заключается в том, что ионизованный газ, помещённый во внешнее магнитное поле, начинает испытывать ускорение вследствие силы Лоренца. Образующиеся ионы оказывают столкновительное воздействие на молекулы газа, меняя его кинематические и тепловые характеристики. Варьируя величину магнитной индукции и напряжённости электрического поля, можно контролировать степень магнитоплазменного влияния на поток.

В работе плазменный сгусток создавался посредством реализации электрического пробоя на поверхности пластины. Число Маха в потоке равно 6, положение ламинарно-турбулентного перехода оценивалось по спектру пульсаций давления в пограничном слое. Эксперимент проводился на импульсной гиперзвуковой аэродинамической трубе Транзит-М.

Помимо экспериментальной части, в работе выполнена теоретическая оценка газоразрядных параметров потока, на основе которых оценивался инкремент скорости нейтральных частиц газа из-за кинематических столкновений с ионами плазмы.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН  
А. Н. Шиплюк

## ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИСТОЧНИКА ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ВОДОРОДА

О. З. Сотников

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

Отрицательные ионы водорода обладают низкой энергией сродства электрона ( $0,75$  эВ), что позволяет применять их в перезарядных технологиях. При энергии более  $100$  кэВ/нуклон отрицательные ионы изотопов водорода преобразуются в быстрые атомы со значительно большей эффективностью, чем положительные ионы. Современным циклотронам и тандемным ускорителям необходимы стационарные источники отрицательных ионов [1].

В ИЯФ им. Будкера разрабатывается интенсивный поверхностно-плазменный стационарный источник ионов  $H^-$  для тандемного ускорителя [2], для которого требуется пучок отрицательных ионов с током не менее  $10$  мА. Настоящая работа посвящена исследованию параметров подобного источника. В работе рассматривалось влияние геометрии ионно-оптической системы источника на характеристики пучка. Проведена теоретическая оптимизация геометрии вытягивающего электрода ионно-оптической системы с целью получения пучка с минимальным эмиттансом в режиме стабильной работы источника.

При использовании ионно-оптической системы, оптимизированной на основе моделирования с помощью коммерческого кода RBGUNS была получена стабильная работа источника отрицательных ионов водорода с током пучка до  $22$  мА. В работе приведены данные по распределению плотности тока по сечению пучка, и характеристикам локального углового разброса ионов в пучке. Применена цифровая методика обработки данных. Построены фазовые диаграммы пучка, определены нормализованный и среднеквадратичный эмиттансы пучка в  $XX'$ - и  $YY'$ -плоскостях, перпендикулярных направлению распространения пучка.

---

1. Г.И. Димов, Ю.И. Бельченко, Г.С. Крайнов, Р.А. Салимов, Н.К. Куксанов, Г.И. Сильвестров, И.Н. Сорокин, С.Ю. Таскаев, М.А. Тиунов, «Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией для борнейтронозахватной терапии и обнаружения взрывчатых веществ методом резонансного поглощения  $\gamma$ -излучения» // Атомная энергия, 94, 2 (2003), 155-159.

2. Yu. Belchenko, I. Gusev, A. Khilchenko, A. Kvashnin, V. Rashchenko, A. Sanin, V. Savkin, and P. Zubarev, «Advanced direct current negative-ion source for accelerator use» // RSI 77, 1 (2006), 03A527.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук А. Л. Санин

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ СЕРЕБРА И ЗОЛОТА В РЕЖИМАХ СИНТЕЗА НАНОСТРУКТУР

С. В. Старинский, А. Б. Евтушенко, Ю. Г. Шухов, А. В. Булгаков  
Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН  
Новосибирский государственный университет

Наночастицы и наноструктурные пленки на основе серебра и золота благодаря своим замечательным свойствам (каталитическим, оптическим, бактерицидными т.д.) являются перспективными материалами для решения многих прикладных задач в науке и технологии. Импульсная лазерная абляция (ИЛА) зарекомендовала себя как эффективный инструмент для синтеза наноструктурных материалов. Хотя этот метод широко используется для получения наноструктур благородных металлов, механизмы их формирования в условиях ИЛА до конца не ясны. Между тем, это информация важна для оптимизации уже существующих технологий и выявления новых возможностей их применения.

Данная работа посвящена исследованию ИЛА серебра и золота в режимах, характерных для формирования наноструктур. Методом масс-спектрометрии получена информация о составе и динамике разлета продуктов абляции Ag и Au. С помощью прямых измерений удаленной массы выявлена зависимость глубин абляции от плотности энергии падающего излучения. Теоретический анализ процесса абляции выполнен с использованием тепловой модели испарения, основанной на решении уравнения теплопроводности с учетом поглощения излучения лазера плазмой, образованной продуктами испарения.[1]

Произведено напыление наноструктурных пленок серебра. Детальный анализ полученных образцов методами электронной микроскопии показал, что в состав пленок, напыленных при низких интенсивностях излучения (менее  $5 \text{ Дж/см}^2$ ), входят, наряду с наночастицами ( $\sim 5 \text{ нм}$ ), частицы с характерным размером  $\sim 1 \text{ мкм}$ . Обнаружено также, что изначально полированная поверхность металла после облучения всегда имеет структуру в виде капиллярных волн. Это свидетельствует о развитии гидродинамической неустойчивости поверхности расплавленного металла, приводящей к эмиссии микрокапель [2]. Установлено, что с ростом интенсивности излучения скорость развития неустойчивости уменьшается.

---

1. Булгаков А.В., Булгакова Н.М. // Квантовая электроника. – 1999. – Т. 27, № 2. – С. 154–158.

2. Brailovsky A.B., Gaponov S.V., Luchin V.I. // Applied Physics A. – 1995 – Vol. 61. — С. 81-86.

# ФОРМИРОВАНИЕ УПОРЯДОЧЕННЫХ СТРУКТУР РЕЗОНАНСНЫМИ ЧАСТИЦАМИ В ПОЛЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А. С. Ципотан

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

В настоящее время становится все более очевидным, что в ближайшие десятилетия одно из основных направлений фундаментальных и прикладных исследований будет связано с разработкой наноразмерных систем, изучением свойств и различных применений сверхминиатюрных устройств на их основе. Поэтому, представляется перспективным использование физических воздействий и, в частности, лазерного излучения для управляемой самоорганизации нанообъектов в кластеры, свойства которых можно задавать в процессе их конструирования. Так в работе [1] в дипольном приближении электродинамического взаимодействия была показана возможность формирования структур с заданной геометрией из резонансных наночастиц металлов, обладающих плазмонным резонансом.

Наибольший интерес представляет возможность формирования наноструктур из наночастиц материалов, характерных для электроники: диэлектрики, полупроводники и металлы. При этом полупроводниковые и металлические наночастицы имеют резонанс, связанный с размерными эффектами [2,3], а оптический резонанс диэлектрических частиц обусловлен их допированием ионами переходной группы [4].

В работе показана возможность формирования структуры из комбинации трех частиц (металлические и полупроводниковые) в поле лазерного излучения с заданной конфигурацией. Отмечено, что при соответствующем подборе частоты и поляризации поля к образовавшейся тройке частиц может быть присоединена четвертая и последующие, в заранее заданном положении.

---

1. Слабко В. В., Хачатрян Г. Г., Александровский А. С., Письма в ЖЭТФ, 84, вып.6, стр 360-365, (2006).

2. Semiconductor Nanocrystal Quantum Dots, ed. Andrey.L. Rogach, SpringerWienNewYork, 2008.

3. Карпов С. В., Слабко В. В., Оптические и фотофизические свойства фрактально-структурированных золей металлов, Новосибирск: Издательство СО РАН, 2003, 265с.

4. Лямкина Н. Э., Чиганова Г. А., Слабко В. В., Воротынов А. М., Таранова М. А., Неорганические материалы, 2005, 41, №7, с. 1–7.

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

# ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЛНЫ С КИРАЛЬНЫМ МУЛЬТИСЛОЕМ

П. В. Шестаков

Томский государственный университет

Электромагнитные метаматериалы представляют в настоящее время большой интерес как для теории, так и для различных приложений в радиофизике и оптике (миниатюризация антенно-фидерных устройств, маскировка объектов и другие эффекты трансформационной оптики) [1]. Киральные метаматериалы, рассматриваемые как биизотропные среды, характеризуются в дополнение к диэлектрической и магнитной проницаемостям параметром киральности, вследствие чего поддерживают электромагнитные волны левой и правой круговой поляризации (волновые поля Бельтрами). Все три материальных параметра таких сред могут изменяться в очень широких пределах, порождая четыре режима распространения прямых и/или обратных нормальных волн.

Плоскостойкий киральный мультислой, образованный соединением парциальных слоёв, характеризуемых различными сочетаниями значений материальных и геометрических параметров, моделирует одномерный фотонный кристалл. Такая структура может не только изменять отражающую способность с изменением параметра киральности, но и способна создать эффект неискажённого переноса изображения объекта наподобие некиральной плоской линзы Веселаго – Пендри. Для расчёта коэффициентов отражения и прохождение монохроматической плоской электромагнитной волны как результата её интерференционного взаимодействия с мультислоем применяется метод матрицы передачи. Благодаря специальному подбору значений материальных параметров сред, образующих идеальный мультислой, удаётся устранить конверсию мод на поверхностях раздела и рассмотреть несвязанное распространение волн Бельтрами, пользуясь матрицами второго порядка [2].

В работе аналитически и численно рассматриваются различные варианты простых структур, образованных несколькими слоями сопряжённых и комплементарных сред и ограниченных киральными полупространствами. В мультислоях с чередованием отрицательных и положительных значений показателя преломления выявлены условия безотражательного эффекта плоской линзы.

---

1. А. В. Кильдишев, В. М. Шалаев, Трансформационная оптика и метаматериалы, Успехи физических наук. 181, 59 (2011).

2. В. В. Фисанов, Плоскостойкие структуры сопряжённых киральных метаматериалов, Доклады ТУСУРа. № 2 (22), Часть 2, 200 (2010).

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

## **ДИФфуЗИОННОЕ НАСЫЩЕНИЕ СТАЛИ АЗОТОМ В ПЛАЗМЕ ДУГОВОГО РАЗРЯДА ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ НИЗКОГО ОТПУСКА**

Р. А. Шушаков

Институт физики высоких технологий  
Томский политехнический университет

Одним из методов химико-термической обработки, широко применяемым в промышленности с целью повышения коррозионной стойкости и твердости поверхностных слоев изделия, является азотирование. Традиционно данный процесс осуществляется при повышенных температурах (~500-520 °С), что часто бывает неприемлемо при работе со структурно неустойчивыми материалами (твердыми растворами, наноструктурными металлами и сплавами, закаленными сталями и т.п.). Использование высокоэнергетических методов при поверхностной обработке твердых тел ионными или плазменными потоками позволяет активировать диффузию при существенно низких температурах обрабатываемых материалов. Исследования физико-химических процессов, вызываемых в материале в условиях воздействия потоками частиц, является важной и актуальной задачей.

В настоящей работе проводилось экспериментальное обоснование возможности низкотемпературного (при температуре ~200 °С) азотирования закаленной стали в дуговом газовом разряде безводородных сред низкого давления и выявление закономерностей эволюции структуры и фазового состава диффузионно насыщенного слоя. В первой части работы в качестве материала исследования использована предварительно закаленная сталь. Состояние кристаллической решетки мартенсита весьма далеко от равновесия, что делает данный материал высокочувствительным к температурному режиму обработки. Во второй части работы анализируются результаты структурно-фазового исследования слоя диффузионного насыщения феррито-перлитной стали, характеризующейся квазистабильным состоянием элементов субструктуры.

Показано, что процесс образования нитридных и карбонитридных фаз во многом определяется дефектной субструктурой материала. Обнаружено образование на поверхности образца нанокристаллической структуры, содержащей частицы окисной фазы. Выявлено многослойное строение модифицированного слоя, отражающее последовательную перестройку структурно-фазового состояния стали в процессе низкотемпературного азотирования.

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент И. М. Гончаренко

## АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНДИКАТРИСЫ РАССЕЯНИЯ ОБЛАКОВ

Э. Ж. Эрдыниева

Томский государственный университет

В настоящее время лидарные исследования аэрозолей проводятся во многих развитых странах. Обычно интерпретация данных осуществляется на основе уравнения лазерного зондирования, справедливого для образований малой оптической плотности (слабые дымки, например). При зондировании облаков и туманов необходимо учитывать многократное рассеяние. Во многих практически значимых случаях лидарный сигнал может быть достаточно точно описан в приближении двукратного рассеяния. В этом случае лидарный сигнал определяется полной угловой зависимостью рассеяния (от 0 до 180°). В силу сложности аналитического описания реального углового распределения рассеянной интенсивности широко используемые на данный момент аналитические модели индикатрис рассеяния, как правило, близки к реальной угловой зависимости лишь в области малых углов, т.е. в целом, не соответствуют реальному угловому распределению рассеянной аэрозольными частицами интенсивности. В [1] предпринята попытка адекватного описания угловой зависимости рассеянного излучения не только в передней, но и в задней полусфере. Нами получено аналитическое выражение для мощности лидарного сигнала двукратного рассеяния от однородного облака с использованием данной модели индикатрисы рассеяния. Показано, что мощность лидарного сигнала двукратного рассеяния от оптически плотных аэрозольных образований определяется коэффициентами предложенной аппроксимации, которые, в свою очередь, зависят от распределения частиц облака по размерам.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ: ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы» (ГК № 16.518.11.7048), ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (ГК № 14.740.11.1145) и РФФИ (грант № 11-05-01200).

---

1. Брюханова В.В., Самохвалов И.В., Кожевникова К.Л. Аппроксимация индикатрисы для аналитического представления лидарного сигнала с учетом двукратного рассеяния // II Международный симпозиум "Контроль и реабилитация окружающей среды". Материалы симпозиума. Томск, 2000, с. 88–90

Научный руководитель – В. В. Брюханова

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>АЭРОФИЗИКА И ГАЗОВАЯ ДИНАМИКА.....</b>	<b>5</b>
С. С. Абдуракипов .....	5
М. В. Алексеенко .....	6
Е. С. Анохина .....	7
Т. А. Борисова, А. А. Филиппов .....	8
А. П. Винокуров .....	9
Н. Е. Голованов, А. А. Лобанов .....	10
И. В. Деннер .....	11
О. А. Долгопятова .....	12
А. Д. Дрясов .....	13
К. В. Зобов .....	14
Г. Л. Колосов .....	15
И. В. Литвинов .....	16
М. В. Михаэлис .....	17
С. О. Морозов, С. В. Лукашевич.....	18
П. А. Мотырев, М. М. Катасонов, Д. С. Сбоев .....	19
Д. С. Ожгибесов .....	20
Д. В. Первов.....	21
А. В. Рабусов .....	22
А. Е. Розен, Е. А. Журавлев.....	23
А. С. Садуакасова.....	24
А. И. Скиба .....	25
С. Г. Скрипкин.....	26
М. В. Тимошевский.....	27
С. Н. Толкачев, В. Н. Горев .....	28
Е. А. Шава, В. А. Шава .....	29
А. В. Яковенко.....	30
А. А. Яцких .....	31
<b>ТЕПЛОФИЗИКА.....</b>	<b>32</b>
В. В. Бекк, А. Ш. Агажанов.....	32
М. С. Болдин, Н. В. Сахаров, С. В. Шотин, А. В. Нохрин, В. Н. Чувильдеев.....	33
Е. Н. Бутусова, А. В. Нохрин, В. Н. Чувильдеев .....	34
М. В. Воропаев, Д. Д. Каримбаев .....	35
С. С. Гашева, Д. И. Помялов .....	36
С. С. Гашева, Д. И. Помялов .....	37
П. С. Гётте, Д. В. Гладких .....	38
М. А. Гришин, С. Д. Слепцов.....	39
Е. А. Денисенко, А. А. Шевченко, К. А. Очкась .....	40
В. А. Долгачев .....	41

Г. М. Дюсупова, Г. Б. Мухаметхан, А. С. Батырханов .....	42
Ю. С. Жидик .....	43
А. С. Кадилова, А. Г. Князева .....	44
И. В. Казанин, А. Ю. Пак .....	45
Н. А. Калюжный .....	46
С. В. Кириловский .....	47
М. П. Коверзнев, А. О. Замчий .....	48
Ю. М. Козловский, О. С. Яцук .....	49
В. А. Красношейкин, А. А. Козулин, Н. В. Скрипняк, В. А. Скрипняк .....	50
В. И. Кривенко .....	51
А. И. Крикунова .....	52
Д. Б. Крюков, М. С. Гуськов .....	53
К. П. Мельник, П. В. Шатохин, Д. В. Кулаков .....	54
К. П. Мельник, Д. С. Кожанов .....	55
В. А. Меньшиков .....	56
И. Ю. Мерзляков .....	57
В. С. Наумкин .....	58
О. О. Петрова-Богданова, Е. Г. Фоминых .....	59
О. О. Петрова-Богданова, Е. Г. Фоминых .....	60
О. О. Петрова-Богданова, Е. Г. Фоминых .....	61
А. А. Пильник .....	62
Б. Б. Ринчинов .....	63
А. Е. Розен, М. Ю. Панин .....	64
А. А. Русинов, А. С. Чиглинцева .....	65
Д. А. Самошкин, И. В. Савченко, А. Ш. Агажанов .....	66
С. В. Скиба .....	67
Е. С. Соснина .....	68
Р. Ю. Чумарев .....	69
Л. В. Шабарова .....	70
А. А. Шевченко .....	71
М. В. Шугаев .....	72
<b>ФИЗИКА ПЛАЗМЫ .....</b>	<b>73</b>
Д. С. Багулов .....	73
С. Б. Банзарон .....	74
И. И. Богданюк .....	75
И. Д. Брюханов .....	76
А. А. Васильев .....	77
О. И. Вишняков .....	78
Д. В. Волков .....	79
В. А. Волков .....	80
Н. А. Данилина .....	81
А. В. Достовалов, А. А. Вольф .....	82

А. В. Дядова.....	83
А. В. Жданов.....	84
А. С. Жумабеков.....	86
А. С. Завьялов.....	87
А. П. Завьялов.....	88
А. О. Замчий.....	89
Е. С. Ильина, В. Н. Демидов, А. Г. Князева.....	90
М. А. Камкин.....	91
И. Е. Карпов.....	92
Д. Е. Каширский.....	93
А. В. Коношонкин, А. Г. Боровой.....	94
В. С. Корчиков.....	95
М. В. Крипакова, А. Г. Князева, И. М. Гончаренко.....	96
О. И. Кучинская, Е. Е. Быкова.....	97
Д. В. Мишенин.....	98
Д. В. Петров, А. С. Сеченов.....	99
В. А. Пинаев, И. М. Уланов.....	100
И. А. Прохоров.....	101
И. А. Соколов.....	102
О. З. Сотников.....	103
С. В. Старинский, А. Б. Евтушенко, Ю. Г. Шухов, А. В. Булгаков.....	104
А. С. Ципотан.....	105
П. В. Шестаков.....	106
Р. А. Шушаков.....	107
Э. Ж. Эрдynieва.....	108

МАТЕРИАЛЫ  
50-Й ЮБИЛЕЙНОЙ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ  
СТУДЕНЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

«Студент и научно-технический прогресс»

ФИЗИКА НЕРАВНОВЕСНЫХ ПРОЦЕССОВ

*Материалы конференции публикуются в авторской редакции*

*Дизайн обложки – Студия дизайна Вадима Гончарова  
(<http://vadimdesign.ru>)*

---

Подписано в печать 04.04.2012 г.

Офсетная печать

Заказ № \_\_\_\_\_

Формат 60x84/16

Уч.-изд. л. 5,5. Усл. печ. л. 7,0.

Тираж 160 экз.

---

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