

Материалы секции
ФИЗИКА
СПЛОШНЫХ СРЕД



14-19 апреля 2019
НОВОСИБИРСК

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

МНСК–2019

ФИЗИКА СПЛОШНЫХ СРЕД

Материалы

57-й Международной научной студенческой конференции

14–19 апреля 2019 г.

Новосибирск
2019

УДК 53
ББК 22.3
Ф50

Научный руководитель секции –
акад. РАН А. К. Ребров

Председатель секции – канд. физ.-мат. наук Д. Ф. Сиковский

Ответственный секретарь секции – Е. А. Рухлинская

Экспертный совет секции

д-р физ.-мат. наук С. Г. Миронов,
д-р физ.-мат. наук, проф. РАН А. А. Чернов,
д-р физ.-мат. наук, проф. РАН К. В. Лотов,
канд. физ.-мат. наук А. С. Верещагин,
канд. физ.-мат. наук В. В. Приходько,
канд. физ.-мат. наук А. А. Шошин

Ф50 Физика сплошных сред : Материалы 57-й Междунар. науч. студ. конф. МНСК-2019 / Новосиб. гос. ун-т. – Новосибирск : ИПЦ НГУ, 2019. – 84 с.

ISBN 978-5-4437-0864-5

**УДК 53
ББК 22.3**

ISBN 978-5-4437-0864-5

© СО РАН, 2019
© Новосибирский государственный
университет, 2019

NOVOSIBIRSK STATE UNIVERSITY
SIBERIAN BRANCH OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

ISSC-2017

PHYSICS OF CONTINUOUS MEDIA

Proceedings
of the 55th International Students Scientific Conference

April, 14–19, 2019

Novosibirsk
2019

УДК 53
ББК 22.3
Ф 50

Scientific Supervisor – Acad. RAS A. K. Rebrov

Section Chair – Cand.Phys.-Math.Sci., Assoc. Prof. D. Ph. Sikovsky

Secretary – E. A. Rukhlinskaya

Section scientific committee:

Dr. Phys.-Math. Sci. S. G. Mironov
Dr. Phys.-Math. Sci., Prof. RAS A. A. Chernov
Dr. Phys.-Math. Sci., Prof. RAS K. V. Lotov
Cand. Phys.-Math. Sci. A. S. Vereshagin
Cand. Phys.-Math. Sci. V. V. Prikhod'ko
Cand. Phys.-Math. Sci. A. A. Shoshin

Ф 50 Physics of continuous media : Proceedings of the 57th International Students Scientific Conference / Novosibirsk State University. – Novosibirsk, Russian Federation, 2019. – 84 pp.

ISBN 978-5-4437-0864-5

The conference is held with the significant support of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk Oblast Government, innovative companies of Russia, NSU Alumni Union.

УДК 53
ББК 22.3

ISBN 978-5-4437-0864-5

© SB RAS, 2019
© Novosibirsk State University, 2019

АЭРОФИЗИКА

УДК 533.6.071 и 532.526

Измерение корреляций возмущений потока в тракте аэродинамической трубы и пульсаций сверхзвукового пограничного слоя на плоской пластине

Л. В. Афанасьев

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

Основным вопросом исследования ламинарно-турбулентного перехода сверхзвукового пограничного слоя при естественных возмущениях является вопрос об источниках этих возмущений. Как правило, считается, что в сверхзвуковом потоке всегда присутствуют акустические возмущения. Они могут проникать в рабочую часть аэродинамической трубы из форкамеры либо излучаться турбулентным пограничным слоем на стенках рабочей части. Если уровень акустических пульсаций в рабочей части уменьшается за счет полировки поверхности стенок и сопловых вставок, то может повыситься доля акустических пульсаций, проникающих в рабочую часть из форкамеры.

Именно этот случай соответствует условиям работы АДТ-325 в настоящее время, однако до сих пор не было детальных измерений взаимосвязи пульсаций в форкамере и рабочей части АДТ-325. Поэтому цель данной работы – восполнить этот пробел в данных и установить наиболее вероятные причины возникновения неустойчивых возмущений в пограничном слое плоской пластины.

С этой целью планируется развить методику одновременных трехканальных измерений пульсаций термоанемометром постоянного сопротивления в форкамере (дозвуковой поток) и в сверхзвуковом потоке.

Эксперименты проводились в АДТ-325 ИТПМ СО РАН при числе Маха 2 с использованием в качестве модели плоской пластины с острой кромкой. Для получения пульсаций массового расхода и скорости использовалось три термоанемометра постоянного сопротивления. Датчики были установлены в форкамере, под моделью и над моделью.

В результате экспериментов получено распределение максимума корреляционной функции в профиле пограничного слоя, а также в различных сечениях над пластиной. Обнаружены нестационарные низкочастотные акустические возмущения, проходящие из форкамеры в рабочую часть.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы (проект АААА-А17-117030610125-7).

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

Неравновесная диссоциация в методе прямого статистического моделирования

А. Е. Галеев

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

Моделирование химических реакций в рамках молекулярно-кинетического подхода к описанию газовых течений является важной задачей в главную очередь для моделирования высотной аэродинамики космических аппаратов. Наиболее эффективным молекулярно-кинетическим численным методом моделирования газовых течений является метод прямого статистического моделирования (ПСМ). Идея, лежащая в основе метода ПСМ, заключается в рассмотрении потока разреженного газа как набора из 10^5 – 10^9 модельных частиц, каждая из которых представляет собой большое количество реальных частиц газа, и разбиении непрерывного процесса движения молекул и столкновений на два последовательных этапа на временном шаге. Важно отметить, что химические реакции моделируются именно на столкновительном этапе, и для их реализации необходимо знать вероятность реакции как функцию параметров сталкивающихся частиц.

Целью данной работы является сравнительный анализ, реализация в программной системе SMILE++ и валидация существующих молекулярных моделей для описания реакций диссоциации. Были реализованы и верифицированы следующие модели: модель полной столкновительной энергии (TCE [2]), модель с расширенным колебательным предпочтением (EVB [3]) и квантово-кинетическая модель (Q-K [4]). Получено совпадение скоростей реакций указанных выше моделей диссоциации с известными скоростями реакций в аррениусовской форме. В докладе представлены результаты моделирования для случая высокоэнтальпийного неравновесного сверхзвукового течения.

1. G. A. Bird, "Monte Carlo simulations in an engineering context," *Rarefied Gas Dyn.: Theory Simul., Prog. Astronaut. Aeronaut.* 74, 239–255 (1981).

2. D. C. Wadsworth and I. J. Wysong, "Vibrational favoring effect in DSMC dissociation models," *Phys. Fluids* 9, 3873–3884 (1997).

3. G. A. Bird, "New chemical reaction model for direct simulation Monte Carlo studies," *Rarefied Gas Dyn.: Theory Simul., Prog. Astronaut. Aeronaut.* 159, 185–196 (1994).

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

Моделирование течения воздуха в бронхиальном дереве человека

П. С. Гафурова

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

На сегодняшний день легочные заболевания представляют собой одну из самых больших угроз для здоровья человечества. В связи с этим появился вопрос о том, как доставлять лекарственные препараты наиболее коротким способом и при этом по минимуму воздействовать на другие органы.

Для того чтобы понять, как распространяются лекарственные препараты в бронхиальном дереве, необходимо построить трехмерную модель бронхов с бифуркацией и просчитать течения воздуха по данной модели. На скорость и точность вычислений влияет качество построенного бронхиального дерева. Наличие ребер и негладкая состыковка бифуркаций и бронхов в модели приводит к турбулизации потока воздуха в расчетах. В таком случае при прохождении воздуха через бронхиальное дерево сопротивление воздуха увеличивается, что сказывается на корректности результатов. В связи с тем, что масштаб верхних и нижних бронхов значительно отличается, точность численных расчетов падает.

Построена аналитическая модель трехмерного бронхиального дерева. Все трехмерные поверхности бифуркаций и бронхов состыковываются со вторым порядком точности.

Возмущающая функция позволяет параметрически задать любую степень сужения (патологии) бронхиального дерева с сохранением гладкости поверхности всего бронхиального дерева. Аналитическое представление позволяет построить бронхиальное дерево вплоть до альвеол. Предложенная аналитическая модель позволяет построить сетку любой сложности вплоть до самых мелких бифуркаций и бронхов. Предполагается, что течение в бронхиальном дереве человека ламинарное.

Предложена новая поэтапная методика расчета бронхиального дерева, которая позволит рассчитать каждую ветвь бронхиального дерева с последующей состыковкой с другими ветвями дерева. На основе данной модели проведены расчеты течения воздуха в бронхиальном дереве человека.

Научные руководители – акад. РАН В. М. Фомин,
д-р физ.-мат. наук А. Е. Медведев

Экспериментальное исследование сверхзвуковых кластированных струй

К. А. Дубровин

Новосибирский государственный университет

Наземное моделирование истечения струй из двигателей космических аппаратов в верхних слоях атмосферы и в открытом космосе с воспроизведением всех параметров (давление, температура, состав газовой смеси, параметры сопел двигателей, расход газа в вакууме) является сложной и крайне дорогостоящей задачей. В связи с этим производится поиск решения задач моделирования при помощи параметров подобия, позволяющих воссоздать основные условия моделируемых струй двигателей при меньших расходах, более низких температурах истечения и т.д. Данный подход позволяет резко снизить стоимость наземного моделирования и выполнять работы на компактных лабораторных экспериментальных установках.

Однако применение параметров подобия, позволяющее, в частности, снизить температуру истечения до 300 К, порождает ряд новых проблем, главной из которых является образование кластеров и конденсация модельных газов в потоке. Данное исследование посвящено изучению механизмов, влияющих на структуру потоков при наличии конденсации.

Работа выполнена на вакуумном экспериментальном газодинамическом стенде отдела прикладной физики физического факультета НГУ «ЛЭМПУС-2» в потоках аргона, диоксида углерода и азота.

В ходе работы был проведен литературный анализ по заявленной тематике, создана и отлажена оптическая система регистрации оптического излучения, возбуждённого электронным пучком на различных участках первичной струи («бочки») и «следа» [1]. Методом фотометрии была проанализирована роль конденсации на форму и структуру формируемой струи. Методом спектрометрии получены профили численной плотности в потоке, изучено проникание газа в поток со «следом», выполнены измерения времён жизни возбужденных состояний. В результате работы были выявлены возможные причины аномального свечения «следа» за пределами области возбуждения потока.

1. Зарвин А. Е., Яскин А. С., Каляда В. В., Ездин Б. С. О структуре сверхзвуковой струи в условиях развитой конденсации // ПЖТФ. 2015. Т. 41. Вып. 22. С. 74–81.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, доц. А. Е. Зарвин

Моделирование турбулентного течения при интенсификации массопереноса в поворотно-дивергентном потоке

Д. П. Езендеева^{1,2}, С. В. Какаулин¹, М. Р. Гордиенко³

¹Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный университет

³Новосибирский государственный технический университет

Фундаментальная проблема моделирования турбулентного массопереноса по-прежнему остается одной из основных научных проблем, актуальной для механики, химии и катализа. Для её решения важны как верификации моделей турбулентности, так и изучение физики сложных течений в поворотно-дивергентных потоках. Потоки реагентов в реальных установках и реакторах работают в условиях сложной неканонической геометрии с поворачивающимися и расширяющимися участками, в которых образуются пристенные струи, происходят отрывы и присоединения потока, формируются зоны возвратного течения. Подобные эффекты, как правило, увеличивают гидродинамическое сопротивление потока и ухудшают равномерность турбулентного массопереноса.

Настоящая работа посвящена расчетному исследованию границ применимости моделей турбулентности в задачах интенсификации массопереноса поворотно-дивергентным течением.

Численное моделирование движения воздушных потоков в модели газораспределительного устройства осуществлялось при помощи пакета для вычислительной гидродинамики ANSYS Fluent. При проведении расчетов задавался расход на входе в газораспределительное устройство. Для моделирования поворотно-дивергентных течений применялись полуэмпирические модели турбулентности на основе уравнений Навье–Стокса, осредненных по Рейнольдсу, такие как: модель Спаларта–Алмареса, модель $k-\varepsilon$, модель $k-w$, модель $k-w-l$ и модель переноса Рейнольдсовых напряжений.

В качестве выходных данных были получены распределения скорости на входе и после поворота газораспределительного устройства. Проведено сравнение результатов расчета и данных экспериментальных исследований, а также проведен анализ влияния способа задания граничных условий на результаты расчетов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-31-20036 и в части экспериментальных исследований при поддержке проекта ФНИ ГАН 2017-2020 проект III.22.7.3.

Научный руководитель – канд. техн. наук И. К. Кабардин

Прямое численное моделирование импульсных турбулентных струй переменной плотности

В. А. Иващенко

Новосибирский государственный университет

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

Импульсные струи с практической и фундаментальной точки зрения представляют важный класс течений, тесно связанных с динамикой вихревых колец [1]. Дополнительные факторы, такие как входная турбулентность и переменная плотность, значительно усложняют ситуацию. Мы изучаем несколько случаев инжекции полностью развитой круглой турбулентной струи в пространство, затопленное другим газом. Для дискретизации уравнений Навье–Стокса по пространству используется метод прямого численного моделирования. Решение уравнений реализовано с помощью вычислительного кода Nek5000, основанного на методе спектральных элементов [2] с порядком полиномов $N = 10$ и временной схемой третьего порядка точности. Общее количество спектральных элементов составляет 126×10^3 , что соответствует 126×10^6 точкам вычислительной сетки. Рассматривается струя воздуха, вытекающая в пространство, затопленное воздухом, гелием или углекислым газом. Переменная плотность обеспечивается смешением двух разных газов, в то время как температура считается постоянной во всей области. Число Рейнольдса $Re = 5300$ одинаково для всех трёх случаев, что позволяет проводить прямое сравнение между ними. Сравнение разных случаев поможет описать эффекты переменной плотности, приводящие к зависимости скорости распространения струи от времени. Будет предложена упрощенная аналитическая модель, объясняющая различия в каждой из рассматриваемых ситуаций.

Работа поддержана поддержана грантом РФФИ № 18-38-00717 мол_a.

1. K. Shariff, A. Leonard Vortex rings. // Annular Review of Fluid Mechanics 24:235-279, 1992.

2. M. O. Deville, P. F. Fischer, E. H. Mund High-order methods for incompressible fluid flow. // Cambridge University Press. 2002.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук Р. И. Мулляджанов

Измерение характеристик аэродинамических потоков в макете каталитического реактора дожигания летучих органических соединений

С. В. Какаулин¹, Д. П. Езендеева^{1,2}, М. Р. Гордиенко³

¹Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный университет

³Новосибирский государственный технический университет

Проблема удаления летучих органических соединений усложняется присутствием в отходящих газах промышленных предприятий различных примесей серы, хлора и кремния, а также тяжелых металлов, которые являются сильными каталитическими ядами. Использование современных компактных, энергоэффективных каталитических установок для обезвреживания газовых выбросов от вредных летучих органических соединений является весьма актуальной задачей.

Каталитический картридж нового поколения выступает ключевым компонентом таких установок. Эффективность его работы обеспечивается за счет подачи в картридж газового потока с равномерным полем скоростей.

Создан макет распределителя газовых потоков и аэродинамический измерительный стенд для его испытания. В геометрии макета используется поворотное устройство. Под действие центробежных сил, направленных от центра кривизны к внешней стенке макета, поток искривляется. Это воздействие обуславливает образование интенсивного струйного течения у внешней стенки и образование вихревой зоны, распространяющейся от поворота до каталитического картриджа. Такой характер течения сокращает сечение основного потока и существенно ослабляет эффективность работы каталитического картриджа.

Сбор данных и исследование полей скорости производился методом Лазерной доплеровской анемометрии. Методом быстрого прототипирования созданы управляющие потоком лопатки на основе 3D-печати.

Разработанные лопатки равномерно распределяют поток по всему сечению макета и снижают гидравлическое сопротивление.

Установка и распределение лопаток в сечении макета, определено экспериментально путем итерационного перебора конфигураций крыловидного профиля. Конфигурация из шести направляющих лопаток обеспечивает необходимое распределение скорости перед каталитическим картриджем, убирая зону возвратного течения и пристенную струю.

Научный руководитель – канд. техн. наук И. К. Кабардин

Разработка быстродействующих люминесцентных преобразователей давления для аэро- и газодинамических исследований

М. С. Коротков, М. Н. Рябов

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

Внедрение новых методов визуализации сложных картин отрывных течений и измерения пульсаций давления на поверхности аэродинамических моделей является важной задачей, решение которой способствует развитию экспериментальной аэродинамики. Одним из таких методов является метод люминесцентных преобразователей давления (ЛПД), позволяющий получать мгновенные картины распределения давления на поверхности. В основе метода лежит явление тушения люминесценции молекулами кислорода.

В настоящее время широко распространен метод стационарных ЛПД-измерений на основе полимерных покрытий с характерными частотами отклика порядка 10 Гц (медленно реагирующие покрытия). Необходимость измерения нестационарных быстропротекающих процессов делает актуальной разработку быстро реагирующих ЛПД-покрытий. Одним из способов реализации таких покрытий является метод анодирования.

В экспериментах исследовались образцы из сплава алюминия, являющегося распространенным конструкционным материалом в авиационной и космической промышленности. В настоящей работе исследованы зависимости интенсивности люминесценции от приложенного давления для двух типов ЛПД-покрытий: с использованием полимерной матрицы и анодно-окисированная подложка, а также их динамические характеристики. В ходе работы получены картины люминесценции на поверхности экспериментальных образцов при разных давлениях. Для изучения времени отклика образцы с быстро реагирующим покрытием помещались в ударную трубу, где скачкообразно менялось давление, когда образцы с медленно реагирующим покрытием помещались в герметичный контейнер, в котором нагнеталось давление и осуществлялся его сброс. Также в работе получены спектральные характеристики полимерных покрытий.

Таким образом, было выявлено, что характерное время отклика анодированных покрытий составляет порядка 200 мкс, тогда как время отклика полимерных покрытий увеличивается с ростом концентрации полимера в растворе и варьируется от нескольких десятков мс до нескольких секунд.

Научный руководитель – О. А. Гобызов

Влияние малого изменения параметров потока на отрывную зону для сверхзвукового числа Маха

А. И. Кутепова

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

Трансзвуковые летательные аппараты следующего поколения должны обладать существенно меньшими выбросами вредных веществ в атмосферу и иметь лучшую топливную эффективность. Этого можно достичь путем улучшения двигателей, аэродинамики летательного аппарата и используя более легкие материалы. Одним из направлений способных уменьшить сопротивление летательного аппарата является создание условий для формирования ламинарного пограничного слоя на крыле и обечайке двигателя. Особенностью трансзвукового обтекания является наличие ударных волн. Неблагоприятный градиент давления, формируемый ударной волной, может приводить к отрыву пограничного слоя. Отрыв ламинарного пограничного слоя сопровождается интенсивным ростом пульсаций, что приводит к более раннему ламинарно-турбулентному переходу. Для корректного расчета аэродинамических характеристик точное предсказание положение перехода является обязательным. Целью данной работы являлось проведение стационарных расчетов и сравнение их с экспериментальными данными в конфигурации «пластина – падающая ударная волна».

Расчеты были выполнены в вычислительном гидродинамическом пакете ANSYS Fluent. Использовался RANS-подход с использованием модели перехода Ментера. Изучался пограничный слой, развиваемый на плоской пластине. Для генерации падающей ударной волны над пластиной был установлен клин.

Была изучена чувствительность течения в двумерной постановке к различным параметрам исследуемой задачи: угол установки клина, число Маха в диапазоне от 1,37 до 1,45, положение ламинарно-турбулентного перехода, параметр перемежаемости. Верификация расчетов осуществлялась на базе экспериментов, выполненных в установке Т-325 для угла установки клина $\beta = 4^\circ$. В связи с тем, что двумерные расчеты не отражают трехмерных эффектов, присутствующих в экспериментальном исследовании, были выполнены трехмерные расчеты с использованием моделей *Transition-SST* и *k- ω -SST*.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-19-00547.

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

**Прямое статистическое моделирование течений
с гетерогенными химическими реакциями
в программном комплексе SMILE++**

А. С. Литвинцев

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

При разработке спускаемых аппаратов необходимо точно предсказывать их аэродинамические характеристики на всех участках траектории спуска. Разработка тепловой защиты, которая не должна быть слишком тонкой из соображений безопасности и слишком толстой из экономических соображений, является сложной технической задачей [1]. При численном моделировании аэротермодинамики спускаемых аппаратов критически важно учитывать поверхностные химические реакции. Игнорирование поверхностных процессов в численном моделировании приводит к многократным ошибкам в расчете теплового потока на поверхности [2].

Работа посвящена развитию вычислительного инструментария изучения таких течений методом прямого статистического моделирования (программный комплекс SMILE++ [3]) с учетом неравновесных физико-химических процессов. Развитие комплекса осуществляется в части интеграции в программную платформу SALOME и в направлении усовершенствования модели физико-химических процессов на поверхности тепловой защиты [4].

1. Hammond W.E. Design Methodologies for Space Transportation Systems / W.E. Hammond. 2001.

2. V.L. Kovalev, A.F. Kolesnikov // Fluid Dynamics. 2005. P. 669.

3. A.V. Kashkovsky, Ye.A. Bondar, G.A. Zhukova, M.S. Ivanov et al. // AIP Conference Proceedings 2005. P. 583.

4. A.N. Molchanova Surface Recombination in the Direct Simulation Monte Carlo Method / A.N. Molchanova, A.V. Kashkovsky, Ye.A. Bondar. 2017.

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

**Экспериментальное исследование инициирования горения
путем инъекции поперечной детонационной волны
в кислород-водородный сверхзвуковой поток**

А. А. Литвинцева

Новосибирский государственный университет

В настоящее время в связи с развитием гиперзвуковых летательных аппаратов актуальна задача повышения энергетической эффективности гиперзвуковых прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ГПВРД), в частности, сверхзвуковой камеры сгорания. Большинство предлагаемых способов для смешения топлив и инициирования горения в ГПВРД имеют те или иные существенные недостатки, поэтому сохраняется актуальность развития систем, которые способны улучшить смешение и воспламенение топлив, а также будут удовлетворять требованиям низкой энергии и небольшого веса.

В работе приводятся результаты экспериментальных исследований воздействия на сверхзвуковой поток кислород-водородной смеси инжестируемым в него потоком, генерируемым детонационной трубкой. Целью работы является получение экспериментальных данных о перестройке сверхзвукового потока водород-кислородной смеси, которые будут использованы при разработке математической модели. В работе приводятся результаты измерений скоростей возникающих в потоке волн сжатия и перепады статического давления на фронтах волн сжатия; представлены теньевые картины течения, разнесенные по времени методом цветового деления, а также показана возможность инициирования горения поперечно направленной детонационной волной в сверхзвуковом потоке водород-кислородной смеси при концентрации водорода более 8 %.

Применявшиеся методы измерений (теньевая визуализация, измерение давлений) позволили получить достаточное количество данных для сравнения метода инициирования горения в сверхзвуковом потоке путем инъекции в него поперечно направленной детонационной волны с методом поджига потока плазменным сгустком.

Эксперименты проводились на импульсной сверхзвуковой аэродинамической установке с форкамерой постоянного объема. Число Маха потока $M = 4$, давление торможения до 1 МПа, температура торможения 293 К. В качестве рабочего тела использовались кислород-водородные смеси. В стенке сверхзвукового канала сечением 70×70 мм² устанавливалась детонационная трубка, инжестирующая в поток струю продуктов детонации нормально к стенке канала.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук Г. А. Поздняков

Расчеты развития стримера в гелиевом эллиптическом пузырьке в диффузионно-дрейфовом приближении

М. Б. Мередова

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

В изоляции высоковольтного оборудования возникают газовые полости, в которых могут формироваться электронные лавины, в которых возможно развитие частичного разряда (ЧР) в течение короткого времени ~ 10 нс. С одной стороны, развитие активности ЧР может приводить к пробое изоляции и, как следствие, выходу оборудования из строя. С другой стороны, регистрация ЧР считается одним из эффективных способов исследования состояния изоляции в высоковольтном оборудовании. Для понимания физики ЧР в диэлектрической изоляции необходимо исследование развития лавин и стримеров в газовых полостях.

В данной работе смоделировано развитие электронных лавин под действием внешнего поля в газовой полости, заполненной гелием. Форма полости взята в виде эллипса, так как под действием электрострикционных сил пузырек вытягивается вдоль линии напряженности электрического поля.

Для описания процессов развития лавины в полости использовалась диффузионно-дрейфовая модель. Для расчета электрических полей и динамики зарядов при ЧР создана компьютерная программа с применением технологии параллельного программирования CUDA.

Промежуток между плоскими электродами считался заполненным диэлектриком с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2,2$ (трансформаторное масло). Эллиптическое включение с $\epsilon = 1$, имитирующее газовую полость, помещалось на оси симметрии промежутка. Задача решалась в плоской постановке. Расчет электрического поля выполнялся с помощью уравнения Пуассона со значениями потенциала $\varphi = 0$ на нижнем электроде и $\varphi = U_0$ на верхнем электроде. Решались уравнения переноса для электронов и положительных ионов с учетом источников зарядов (ударная ионизация, рекомбинация и диффузия). Исследовались распределение концентраций заряженных частиц в пузырьке и напряженность электрического поля в разные моменты времени. Показано, что в полости достаточно большого размера ($\sim 1-2$ мм) развитие электронной лавины приводит к формированию стримера. Полученные результаты необходимы для лучшего понимания физики ЧР в диэлектрической изоляции.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Д. И. Карпов

Исследование развития искусственно вводимых возмущений в пограничном слое

Е. А. Меркулова

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

При создании гиперзвуковых летательных аппаратов одной из ключевых проблем является проблема внешней теплозащиты, для решения которой требуется достоверное предсказание ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое. Для аэродинамически гладких поверхностей появление ламинарно-турбулентного перехода связано с развитием возмущений в пограничном слое, которые вносятся внешним потоком, проходящим через головную ударную волну. Несмотря на значительные успехи в понимании процессов линейного развития возмущений, вызывающих переход, нелинейные процессы еще слабо изучены.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию устойчивости течения при гиперзвуковых скоростях, в рамках которой было изучено развитие искусственно вводимых возмущений в пограничном слое. В работе были применены основные методики для исследования пульсационных процессов в установках кратковременного действия – PIV, термоанемометрические измерения и измерения поверхностных пульсаций. Работа была выполнена на малой аэродинамической трубе Т-327б ИТПМ СО РАН. В экспериментах была использована модель конической формы с острым носиком. Для ввода искусственных возмущений был использован электрический разрядник, вмонтированный в передней части модели.

Были получены средние и пульсационные характеристики искусственных возмущений, а также влияние данных возмущений на устойчивость пограничного слоя.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 18-01-00536 А.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Ю. В. Громыко

Влияние алюминиевого порошка на температуру детонации эмульсионного взрывчатого вещества

Е. И. Микулянец

Новосибирский государственный университет

Алюминиевые порошки широко используются для увеличения энергетических характеристик взрывчатых композиций. Влияние алюминия на детонационные характеристики достаточно сложное и на данный момент не полностью изучено [1]. В данной работе изучалось влияние алюминиевого порошка на процесс детонации эмульсионного взрывчатого вещества (ЭмВВ). ЭмВВ – широко распространённое промышленное взрывчатое вещество (ВВ), однако детального изучения влияния алюминия на его детонационные характеристики не проводилось. Эти исследования могут быть важны как с точки зрения физики детонационных процессов, так и с точки зрения обработки материалов взрывом.

При изучении детонационных характеристик ВВ обычно измеряются механические величины: скорость детонации, массовая скорость продуктов детонации, давление. Одним из важных термодинамических параметров является температура. Её измерение в детонационных процессах является сложной задачей и встречается редко. В то же время измерение температуры детонации важно для выяснения роли алюминия в детонационном процессе.

В данной работе выполнено измерение детонационных характеристик алюминизированного ЭмВВ. Температура измерялась оптическим способом. Излучение детонационного фронта при помощи оптоволоконна выводилось из взрывной камеры и поступало на вход 4-канального пирометра. В качестве детекторов излучения применяли фотоумножители.

В результате получены профили температуры и давления в детонационной волне в ЭмВВ с алюминием. Анализ полученных данных позволяет предположить, что значительная часть алюминия успевает прореагировать до точки Чепмена–Жуге.

1. Вадхе П. П., Павар Р. Б., Синха Р. К., Астана С. Н., Рао А.С. Алюминизированные литьевые взрывчатые вещества (Обзор) // Физика горения и взрыва 2008. Т. 44, № 4. С. 98–115.

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

Определение динамических коэффициентов сегментально-конического тела при сверхзвуковых скоростях

Н. А. Мищенко

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

Наряду с весовыми аэродинамическими коэффициентами для обеспечения необходимой траектории и режима входа в атмосферу возвращаемого космического аппарата возникает задача нахождения динамических коэффициентов. Устойчивость аппарата на его траектории характеризуется как статическими, так и динамическими коэффициентами [1]. Эффекты демпфирования и антидемпфирования имеют принципиально нестационарную природу. В связи с этим существенно осложнено как моделирование этой задачи, так и определение коэффициентов численно и экспериментально.

Цель работы – развитие методики экспериментального определения коэффициентов аэродинамических производных, получение новых данных о демпфировании моделей.

Реализована методика определения коэффициентов аэродинамического демпфирования, основанная на работах Харитонова, Адамова, Часовникова и др. [2].

Эксперименты проводились в аэродинамической трубе Т-313 с моделью, установленной на поперечной оси с возможностью свободного вращения. Были протестированы модели сегментально-конической формы на основе конуса с углом полураствора 20° . Эксперименты проводились при числах маха $M = 1,75; 2; 2,25; 3$.

В результате экспериментов выявлены режимы динамической устойчивости моделей, получены коэффициенты демпфирования.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы (проект АААА-А17-117030610125-7).

1. Kazemba C. D., Braun R. D., Clark L. G., Schoenenberger M. Survey of Blunt Body Dynamic Stability in Supersonic Flow // AIAA-2012-4509;

2. Харитонов А. М, Часовников Е. А., Адамов Н. П. Экспериментальное исследование аэродинамических производных конуса при сверхзвуковых скоростях // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21. № 6.

Научный руководитель – канд. техн. наук Н. П. Адамов

Исследование динамики водородо-воздушного пламени при кратковременном возмущении потока

Д. П. Незавитин

Новосибирский государственный университет

Воздействие возникающих в реагирующем потоке гидродинамических возмущений на фронт пламени может быть эффективным способом управления горением. Исследования динамики факела H_2/CO_2 актуальны ещё и потому, что позволяют выявить влияние процессов переноса в системах с числом Le , не равном единице на особенности динамики течения.

Цель данной работы – отработать методику измерений двухточечной корреляций температуры для того, чтобы исследовать влияние воздействия турбулентного пятна на динамику горения смеси H_2/CO_2 в воздушном струйном течении.

Для реализации поставленной цели было изготовлено экспериментальное горелочное устройство, представляющее собой две соосных трубки, которые могли свободно перемещаться вдоль геометрической оси на заданное расстояние. Подача топливной смеси регулировалась с помощью цифровых регуляторов расхода. Для сопоставления были использованы две системы C_3H_8/CO_2 и H_2/CO_2 . Измерения значений температуры осуществлялись с помощью программно-управляемого 24-разрядного аналогово-цифрового преобразователя. Источником гидродинамических возмущений являлся управляемый клапан (время срабатывания 10 мс).

Построены пространственно-временные корреляции температуры, получена визуализация водородо-воздушного пламени. С помощью PIV-измерений были построены средние поля скорости, из которых следует, что возмущение начинает развиваться по пламени, что может привести к деформации и отрыву пламени.

1. F. Thiesset, G. Maurice, F. Halter, N. Mazellier, C. Chauveau, I. Gökalp. Flame-vortex interaction: Effect of residence time and formulation of a new efficiency function. Elsevier, 2016.

2. N.A.K. Doan, N. Swaminathan, N. Chakraborty. Multiscale analysis of turbulence-flame interaction in premixed flames. Elsevier, 2016.

3. Бояршинов Б. Ф., Федоров С. Ю., Волков А.А. Измерение корреляционных характеристик затопленной струи по комбинационному рассеянию света // Приборы и техника эксперимента. 1994. № 5. С. 110–116.

Научный руководитель – канд. техн. наук В. В. Лукашов

Изучение влияния продольных вихрей на ламинарно-турбулентный переход в сверхзвуковом пограничном слое плоской пластины

М. В. Питеримова

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

Недавно в ИТПМ СО РАН начали проводить экспериментальные исследования по воздействию пары слабых ударных волн на переход к турбулентности в сверхзвуковом пограничном слое. В [1] приведены результаты изучения генерации возмущений с помощью внешних слабых ударных волн в ламинарном пограничном слое. Получено, что порождаемые возмущения в свободном потоке перед моделью имели вид N волн. При этом внутри пограничного слоя происходила генерация стационарных продольных возмущений.

В настоящей работе изучается влияние стационарных продольных вихрей на ламинарно-турбулентный переход в пограничном слое плоской затупленной пластины при числе Маха $M=2$. Измерения проводились с помощью термоанемометра постоянного сопротивления. Пара слабых ударных волн генерировалась двумерной наклейкой шириной 2,5 мм и толщиной 120 мкм, расположенной на боковой стенке рабочей части сверхзвуковой малощумной аэродинамической трубы Т-325. В свободном потоке неровностью генерируется возмущение в виде N -волны, что согласуется с [1]. При этом в пограничном слое модели обнаружено зарождение стационарных продольных вихрей.

Проведенный спектральный и статистический анализ показал, что при наличии неровности переход к турбулентности начинается раньше.

1. Ваганов А. В., Ермолаев Ю. Г., Колосов Г. Л. и др. К воздействию падающей волны Маха на сверхзвуковой пограничный слой // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23. № 1.

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

**Экспериментальное исследование возмущений
в пограничном слое плоской пластины, генерируемых
вибрациями локализованного участка поверхности**

И. А. Садовский

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

В работе проводится экспериментальное исследование возникновения и развития возмущений, генерируемых воздействием низкочастотных колебаний ограниченного участка поверхности на пограничный слой плоской пластины при различных числах Рейнольдса. Для выполнения задачи проводилось два эксперимента: на установке МТ-324 и Т-324. Измерения производились при скоростях набегающего потока 8 м/с, 20 м/с в первом случае и 21,5 м/с во втором. В качестве модели в экспериментах использовалась плоская пластина с мембраной круглой формы. Для закрепления мембраны в пластине использовался специально разработанный и распечатанный на 3D-принтере источник ввода возмущений модульного типа. Важной особенностью этого источника является то, что мембрана, закрепленная с его помощью, не выступает над поверхностью модели и, как следствие, не вносит неконтролируемых возмущений в пограничный слой, что позволяет проводить измерения при более высоких скоростях набегающего потока.

Обнаружено, что при возбуждении импульсными колебаниями мембраны в пограничном слое Блазиуса происходит образование возмущений двух типов: продольных локализованных структур и волновых пакетов вблизи их фронтов. Амплитуда продольной структуры во всех исследованных случаях затухает вниз по потоку. Показано, что амплитуда волновых пакетов при скорости набегающего потока 20 м/с нарастает вниз по потоку, а при 8 м/с снижается. Пространственное развитие колебаний на центральной частоте волновых пакетов согласуется с линейной теорией гидродинамической устойчивости. Исследование позволило выявить, что волновые пакеты, генерируемые в данном случае, состоят из прямых и наклонных волн. Характер их развития согласуется с предыдущими исследованиями (генерация возмущений точечным источником). Результаты, полученные на разных установках (Т-324 и МТ-324), физически согласуются, что подтверждает их достоверность. Планируется продолжить исследования с использованием мембран квадратной и прямоугольной формы.

Работа поддержана грантом РФФ 16-19-10330.

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

**Режимы с формированием нестационарных вихревых явлений
в модели отсасывающей трубы гидротурбины**

Д. А. Суслов

Новосибирский государственный университет

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

Перед современной гидроэнергетикой стоит задача расширения диапазона стабильной и надежной эксплуатации ГЭС, поскольку не все режимы работы гидротурбин являются оптимальными. При неоптимальном режиме за рабочим колесом может возникать гидродинамическая неустойчивость, а именно распад вихря в виде прецессии вихревого ядра (ПВЯ).

В настоящей работе исследуются пульсации давления, вызванные прецессирующим вихревым ядром в конусе воздушной отсасывающей трубы (ОТ) гидротурбины, как в условиях стационарной нагрузки, так и при моделировании переходных режимов (старт/стоп турбины, переменная нагрузка).

Исследования проводились в модельных условиях на аэродинамическом стенде. С помощью комбинации лопаточных завихрителей, один из которых неподвижен, а другой вынуждено вращается, меняя частоту вращения завихрителя n , об/мин или расход продуваемого воздуха Q , м³/ч, имитируются различные распределения скорости на входе в ОТ, варьируя таким образом режимы работы гидротурбины.

В каждом режиме лазерным доплеровским анемометром измерялись профили скорости аксиальной и тангенциальной компоненты, проведен анализ влияния частоты вращения ротора на параметр крутки потока и максимальную амплитуду в спектре пульсаций тангенциальной скорости в центре ОТ. Были использованы акустические датчики для измерения пульсаций давления.

Зависимость параметра крутки от режимных параметров стенда согласуется с аналитической оценкой из работы [1] до значения интегрального параметра крутки 0,5. Дальнейшее увеличение скорости вращения не приводит к линейному росту параметра крутки, происходит вырождение эффекта ПВЯ. Такие режимы соответствуют режимам сильной неполной нагрузки на реальных ГЭС.

1. Favrel, A. T., Gomes Pereira Junior, J., Landry, C., Müller, A., Nicolet, C., & Avellan, F. (Accepted/In press). New insight in Francis turbine cavitation vortex rope: role of the runner outlet flow swirl number // Journal of Hydraulic Research, 1-13.

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

Управление процессами смешения в импульсной струе

А. С. Тамбовцев

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

В современных высокоэнергетических установках и агрегатах в некоторых узлах требуется передача мощных тепловых потоков от газа к поверхности. Одним из эффективных способов организации теплообмена между газом и твердыми телами является применение импульсных струй, ориентированных по нормали к поверхностям. Этим вызвано широкое применение струй в самых разнообразных технологических процессах для охлаждения, нагрева, интенсивной сушки поверхности.

В рамках работы была поставлена задача экспериментального исследования различных режимов горения в круглой импульсной микроструе водорода, а также термоанемометрического исследования импульсной микроструи в пристенной области. Особое внимание было уделено установлению взаимосвязи между расходом топлива, поддержанием горения и температурой пластины.

В эксперименте использовалось сопло с прямым каналом диаметром $d = 400$ мкм, длина сопла составляла 90 калибров, струя по нормали наткала на кварцевое стекло, расположенное на расстоянии 4,5 см от среза сопла. Для получения теневых картин в процессе эксперимента применялся прибор ИАБ-451, изображение записывалось на видеокамеру. Расход водорода контролировался электронным расходомером. Температура кварцевого стекла измерялась пирометром DT-8835.

В результате проведенных экспериментов были получены теневые картины для различных режимов горения импульсной микроструи водорода с присоединенным и поднятым факелом при различных значениях расхода.

Термоанемометрическое исследование импульсной микроструи водорода позволили определить основные параметры течения в пристенной области. В эксперименте использовался термоанемометр с одноточечным датчиком. Датчик термоанемометра поворачивался на 90° для сбора данных о нормальной и поперечной компонентах скорости. Полученные результаты позволяют глубже понять особенности микроструйного импульсного течения водорода.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Ю. А. Литвиненко

**Коэффициент расширения плавучего вихревого кольца,
движущегося по направлению действия выталкивающей силы**

Е. А. Чашников

Новосибирский государственный университет

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

Существующие модели движения вихревого кольца либо не полностью согласуются с экспериментами или друг с другом (есть модели отдельно для однородной и отдельно для неоднородной жидкости), либо еще не получили достаточного экспериментального подтверждения. В настоящей работе использовалась модель движения вихревого кольца, охватывающая однородную и неоднородную жидкость. Для всплывающих вихрей и вихрей, движущихся против направления действия выталкивающей силы, модель хорошо согласуется с экспериментом. Однако движение вихревого кольца по направлению действия выталкивающей силы с наличием начального импульса исследовано не было.

Целью данной работы служит экспериментальное исследование движения комбинированных плавучих вихревых колец, то есть плавучих вихрей с наличием начального импульса, при движении по действию выталкивающей силы, а также сравнение коэффициентов расширения плавучих вихревых колец, полученных экспериментально, с коэффициентами расширения, полученными из расчетов аналитической модели, что позволяет количественно и качественно проверить некоторые предположения, введенные впервые и используемые в модели.

Исследование проводилось с помощью высокоскоростной съемки комбинированного вихря по методу теневого изображения с последующим измерением на полученных изображениях параметров вихря. Вихрь запускали в кювете с водой с помощью ударного механизма и поршневой системы. В ядро вихря помещались пузырьки воздуха таким образом, чтобы не нарушать структуру вихря. С помощью используемого метода можно контролировать выталкивающую силу, а также она остается постоянной по мере движения вихря, что позволило сопоставить теоретический и экспериментальный коэффициент расширения вихря. В подобной постановке эксперименты проводятся впервые.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук В. В. Никулин

**Экспериментальное исследование развития возмущений
в пограничном слое на скользящем крыле
при $M = 2$ для малых углов атаки**

С. А. Шипуль

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

Данная работа посвящена исследованию влияния малых углов атаки на развитие возмущений в пограничном слое скользящего крыла при сверхзвуковых скоростях. Работа является продолжением исследования [1], где проводилось изучение влияния угла атаки скользящего крыла на положение ламинарно-турбулентного перехода. В [1] показан монотонный рост положения перехода от угла атаки, также получено хорошее согласование числа Рейнольдса перехода с расчетами по линейной теории устойчивости. Однако оценки инкрементов нарастания возмущений поперечного течения значительно отличаются от теоретических значений. Поэтому основной целью работы является объяснение возникшего противоречия между результатами расчета и эксперимента.

Эксперименты были выполнены в сверхзвуковой малотурбулентной аэродинамической трубе Т-325 ИТПМ СО РАН при числе Маха $M = 2$. Использовалась модель крыла с углом стреловидности $\chi = 45^\circ$. В экспериментах угол атаки крыла варьировался в диапазоне $\alpha = \pm 1^\circ$. Исследование развития возмущений проводилось при фиксированном положении датчика термоанемометра относительно передней кромки модели. Также в работе изучалось влияние угла атаки на возникновение турбулентности в пограничном слое скользящего крыла.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, номер гранта 19-08-00772 А.

1. Ермолаев Ю. Г., Косинов А. Д., Косорыгин В.С. и др. Влияние малых углов атаки на ламинарно-турбулентный переход на скользящем крыле при числе Маха $M = 2$ // Сиб. физ. журн. 2017. Т. 12. № 3. С. 35–40.

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

**Создание модуля для расчета переноса излучения
при решении задач обтекания возвращаемых космических аппаратов**

Т. Ю. Шкрёдов

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

При возвращении в атмосферу земли капсула спускаемого космического аппарата испытывает тепловые нагрузки со стороны высокотемпературного ударного слоя. Проектирование капсулы спускаемого аппарата включает разработку тепловой защиты. Разработка защиты требует оценки нагрева поверхности капсулы, который происходит за счет конвективного и радиационного переноса. Обычно основной вклад вносит конвективный поток тепла. Однако при достаточно высоких скоростях или достаточно больших размерах аппарата значительный вклад в общий поток тепла может вносить и поток теплового излучения. Также радиационный перенос может влиять и на величину конвективного теплового потока, вызывая охлаждение газа.

Целью работы является разработка методики решения задачи о переносе излучения в газе около аппарата и создание модуля для решения сопряженной задачи течения с излучением для использования в CFD-пакетах.

Расчет излучательной способности газовой смеси в ударном слое требует знания спектральных характеристики ее составляющих. Для определения спектральных характеристик различных компонентов газовой смеси в настоящей работе была использована база данных, созданная с помощью программы Spsair (Laux С.О., 2002).

Созданная база позволяет определить величины спектрального коэффициента поглощения и спектральной излучательной способности газовой смеси состоящей из пяти компонентов (N, O, N₂, NO, N₂₊) в диапазоне температур 1000–20000° К.

Создан модуль для расчета радиационного члена в уравнении энергии газовой динамики. Библиотека может быть использована в коммерческих и авторских CFD-программах. Модуль сопрягается с пакетом путем обмена данными о температуре и составе газа. Реализованная методика пока что применима для переноса излучения без учета поглощения в газе.

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

**Экспериментальное исследование течения жидкости
в микромиксере Т-типа при различном соотношении
чисел Рейнольдса входных потоков**

П. Е. Янко

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

Микромиксер – это компактное смешивающее устройство, широко используемое в биологической, химической и медицинской промышленности. Такие устройства позволяют значительно снизить массовую долю веществ, необходимых для проведения химических реакций. Интенсивность перемешивания компонентов смеси является определяющей характеристикой работы микромиксера. Поэтому исследование зависимости интенсивности перемешивания от различных параметров является актуальной задачей.

В данной работе экспериментальное исследование потока жидкости проведено методом лазер-индуцированной флуоресценции. Длительность импульса лазерного излучения составляла 5 нс, что позволило получить поле концентрации потока, осредненное только по глубине микромиксера. Отсутствие осреднения поля концентрации по времени позволило детально рассмотреть структуру течения. Интенсивность входных потоков жидкости характеризовалась числом Рейнольдса Re_1 , Re_2 , так что при $Re_1 = Re_2$ течение оставалось стационарным. Показано, что при соотношении $1,39 < Re_1 / Re_2 < 2,24$ нарушается стационарность течения и в зоне смешения микромиксера образуется периодическая вихревая структура. Для $Re_1 / Re_2 > 2,24$ стационарность потока восстанавливается.

Для всех серий экспериментов, рассчитана интенсивность смешения жидкостей I_M на расстоянии $6D_h = 960$ мкм от входа в канал смешения (D_h – гидравлический диаметр). Показано значительное снижение величины I_M от 80% до 38,5% с ростом соотношения Re_1 / Re_2 от 1,3 до 10,7. Для оценки вклада диффузионного переноса в смешение жидкостей предложена величина $I_D = D \cdot \langle (\partial n / \partial x)^2 \rangle$, где D – коэффициент диффузии, $\langle (\partial n / \partial x)^2 \rangle$ – среднеквадратичная производная концентрации в поперечном сечении выхода Т-микромиксера. При $Re_1 / Re_2 = 1,5$, $Re_1 / Re_2 = 3,8$ обнаружена немонотонная динамика величин I_D и I_M вниз по потоку на расстояниях до $4,5 D_h$ от входа в канал смешения.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук А. Ю. Кравцова

Идентификация и исследование конденсационных следов самолётов поляризационным лидаром НИ ТГУ

И. Д. Брюханов, О. Ю. Локтюшин

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Облака верхнего яруса (ОВЯ) являются климатообразующим фактором, существенно влияя на радиационный баланс атмосферы [1]. Частным случаем таких облаков, образованных антропогенно, являются конденсационные следы самолётов. Как и естественные облака, они препятствуют распространению уходящего от Земли излучения, возвращая его назад к поверхности и тем самым усиливают парниковый эффект. Кроме того, самолётные следы не только сами влияют на пропускание солнечной радиации, но и инициируют образование перистой облачности.

В Томском государственном университете с 2009 г. ведутся регулярные эксперименты на уникальном высотном поляризационном лидаре [2]. С его помощью определяются высоты верхней и нижней границ ОВЯ, их оптическая толща, отношение рассеяния и матрица обратного рассеяния света. Эта характеристика содержит информацию о микроструктуре рассеивающего объёма, в том числе, об ориентации частиц в нём. Методика работы лидара включает получение временной динамики интенсивности лидарного сигнала с временным разрешением 2 с.

В радиусе 100 км от Томска расположены трассы регулярного авиасообщения. Определённые метеосостояния позволяют изучать следы самолётов, пролетающих по ним, лидаром НИ ТГУ [3]. Для этого выполняется совместный анализ траекторий самолётов, метеорологических условий на высотах их полётов (включая направление и скорость ветра) и лидарных данных. Таким образом, устанавливаются связи между экспериментально определяемыми оптическими параметрами конденсационных следов самолётов, параметрами их микроструктуры и соответствующими метеорологическими условиями. Накопление статистически значимого массива таких данных позволит учесть влияние следов самолётов на пропускание оптического излучения атмосферой в существующих микрофизических моделях.

1. Sassen K., Benson S. // J. Atmos. Sci. 2001. V. 58, No. 5. P. 2103–2112.

2. Самохвалов И.В., Кауль Б.В., Насонов С.В. и др. // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25, № 5. С. 403–411.

3. Samokhvalov I.V., Bryukhanov I.D., Park S., et al. // Proc. SPIE. 2018. Vol. 10833, 108335J (6 pp.).

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

Трассировки излучения и трансформации состояния поляризации излучения в оптическом тракте лидара

Р. Е. Эбель

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Облака покрывают обширную часть поверхности Земли и оказывают существенное влияние на распространение излучения в атмосфере. Диагностика и мониторинг аэрозольных образований естественного и антропогенного происхождения успешно осуществляется методами дистанционного лазерного зондирования. Использование поляризованного излучения повышает информативность таких методов.

Но трансформация характеристик излучения происходит не только в атмосфере, но и в приборах, реализующих методы исследования с использованием лазерного излучения – лидарах. Для корректного проведения экспериментов необходимо учитывать эти изменения.

Расчитать эту трансформацию возможно в специальных программах, например, Opal-PC; Oslo; Zemax, которые позволяют провести моделирование трансформации излучения в оптических элементах и системах, состоящих из них. Однако у данных программ есть недостаток – в них сложно задать излучение с неоднородным распределением энергетических и поляризационных характеристик по сечению пучка.

Для проведения расчётов с учетом этого распределения необходимо соответствующие программное обеспечение. При создании подобных программ нужно применять математический аппарат для описания характеристик излучения и их изменения, а также метод трассировки излучения.

Существуют множество различных методов трассировки излучения. Например, метод бросания лучей, метод быстрой трассировки, метод обратной трассировки, метод эйконала, метод Федерера. Наиболее перспективным из них в рамках данной задачи является метод Федерера, так как он позволяет учитывать не только отражение, но и преломление излучения. К тому же позволяет задать множество лучей с различными характеристиками, в отличии от метода быстрой трассировки и метода бросания лучей. А также более прост в реализации, чем метод эйконала.

Доклад посвящён численному моделированию трассировки излучения с неравномерным распределением энергетических и поляризационных характеристик по сечению пучка в оптическом канале приемной системы лидара.

Научный руководитель – старший преподаватель А. А. Дорошкевич

ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 536.24

О влиянии теплофизических свойств рабочей жидкости на характеристики пассивной системы охлаждения

М. С. Астанина

Томский государственный университет

Задачи охлаждения различных источников энергии с учетом осложняющих факторов становятся все более востребованными в связи с развитием промышленности и приборостроения. Теоретические расчёты в этой области позволяют предсказывать поведение систем с тепловыделяющими источниками энергии на всех этапах работы и продлевать срок их эксплуатации. Особую роль в данной области играют постановки, в которых в качестве рабочих жидкостей рассматриваются среды с переменными теплофизическими свойствами. Такой подход позволяет учесть влияние параметров окружающей среды на весь процесс.

В настоящей работе проводится математическое моделирование пассивной системы охлаждения тепловыделяющего теплопроводного источника энергии при наличии пористой вставки. Полость заполнена ньютоновской теплопроводной жидкостью, удовлетворяющей приближению Буссинеска. Вязкость рабочей среды зависит от температуры по экспоненциальному закону с параметром изменения C .

Управляющие уравнения, описывающие рассматриваемый процесс, формулируются с использованием безразмерных переменных «функция тока – завихренность – температура» на основе нестационарных уравнений для случая переменной вязкости.

Полученная краевая задача вместе с соответствующими граничными условиями четвертого рода решается численно методом конечных разностей на равномерной сетке. Разработанная вычислительная модель сначала была протестирована на ряде тестовых задач, а также на множестве разностных сеток. Было изучено влияние температурно-зависимой вязкости рабочей среды на теплоперенос в полости и эффективность работы пассивной системы охлаждения тепловыделяющего источника. Анализ результатов проводился по изолиниям функции тока и температуры, а также по распределениям интегральных параметров: числа Нуссельта на источнике, интенсивности расхода жидкости в полости и средней температуре в источнике.

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (задание № 13.9724.2017/8.9).

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, доц. М. А. Шеремет

**Кипение недогретой воды в миниканале
при интенсивном локальном нагреве**

В. В. Белослудцев

Новосибирский государственный университет

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

Можно выделить четыре основных способа отвода сверхвысоких тепловых потоков от локализованных источников тепла: кипение жидкости в мини и микроканалах [1], спрейное охлаждение, микроструйное охлаждение и охлаждение посредством испарения тонкой пленки жидкости [2]. Кипение жидкости в мини- и микроканалах является перспективным способом охлаждения электронного и микроэлектронного оборудования. Средний тепловой поток в высокопроизводительных микропроцессорах может достигать 150 Вт/см^2 . При этом локальный тепловой поток в отдельных областях размером порядка $100\text{--}2000 \text{ мкм}$, может превышать значение 1000 Вт/см^2 . Неравномерность теплового потока может приводить к локальному вскипанию охлаждающей жидкости в канале и зацеплению пузыря между двумя стенками канала, что препятствует омыванию жидкостью зоны локального перегрева и вызывает локальный кризис теплообмена. Кипение в каналах при равномерном нагреве широко исследовано в литературе, однако систематические исследования кипения в каналах при локальном нагреве практически отсутствуют. Основной целью данной работы является изучение кипения недогретой воды при ее вынужденном течении в миниканале при интенсивном локальном нагреве со стороны стенки. Исследование динамики паровых пузырей на микромасштабе производилось с использованием высокоскоростной камеры FASTCAM SA1.1 со скоростью до 675 000 кадров в секунду. Камера оборудована оптической системой высокого пространственного разрешения (до 500 нм на 1 пиксель сенсора камеры).

1. Zaitsev D.V., Tkachenko E.M., Belosludtsev V.V., Kreta A.S., Kabov O.A. Subcooled flow boiling in a flat mini-channel under local heating // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Volume 1105, Issue 1, Article number 012142.

2. Kabov O.A., Zaitsev D.V., Cheverda V.V., Bar-Cohen A. Evaporation and flow dynamics of thin, shear-driven liquid films in microgap channels // Experimental Thermal and Fluid Science. 2011. Vol. 35, Issue 5, pp. 825-831.

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

**Численное исследование влияния течения реки
на тепломассообмен в атмосфере
в условиях устойчивой стратификации**

М. С. Бобров, Н. Н. Козюлин, К. И. Борыняк
Институт теплофизики С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Известно, что в условиях слабого ветра и ясного неба в ночном атмосферном пограничном слое возникает устойчивая температурная стратификация из-за быстрого радиационного охлаждения поверхности земли. Такие условия существенно влияют на структуру турбулентности пограничного слоя. Поток становится анизотропным, с появлением гравитационных волн и горизонтальных струй на больших высотах. Вертикальная скорость подавляется отрицательной плавучестью в слое инверсии. Этот эффект может приводить к изменению структуры турбулентности, может наблюдаться чередование ламинарных и турбулентных пятен. Описанные эффекты (перемежаемости и внутренних волн) играют роль в переносе атмосферных аэрозолей и влажности, что приводит к кластеризации концентрации аэрозолей и их неравномерному осаждению.

Наличие природных водоемов может оказывать существенное влияние на атмосферный пограничный слой в условиях устойчивой стратификации. Реки и озера из-за высокой теплоемкости могут выполнять роль источника плавучести и влаги в ночных условиях, потому что охлаждение окружающей земли происходит намного быстрее, что приводит к разнице между температурой земли и поверхности воды.

В описных условиях слабый сдвиг, создаваемый движением поверхности воды в воздухе, может модулировать динамику конвективных восходящих потоков, создаваемых плавучестью над «нагретой» поверхностью воды (которая может быть на несколько градусов горячее, чем окружающая земля ночью).

В данной работе исследовался эффект влияния идеализированной прямой реки на ночной атмосферный пограничный слой в условиях устойчивой стратификации. Чтобы проверить влияние потока реки на получившийся конвективный рисунок, было рассмотрено два случая: один со стационарной горячей рекой, а другой – с движущейся.

Было обнаружено, что учет движения реки приводит к существенному ускорению размывания слоя инверсии за счет появления турбулентных вихрей, образующихся при взаимодействии восходящего течения со средним сдвигом.

**Численное исследование турбулентной диффузии
в закрученных струях методом крупных вихрей**

К. И. Борьяняк, М. С. Бобров, Н. Н. Козюлин
Институт теплофизики С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

В данной работе методом крупных вихрей были проведены расчеты свободной струи с различными степенями закрутки в диапазоне $S = 0-0,6$. Число Рейнольдса составляло 10 000. Объектом исследования являлась закрученная струя с турбулентными входными условиями, вытекающая в затопленное пространство. Для задания начальных условий в струе были выполнены дополнительные расчеты течения внутри вращающегося сопла, содержащего участок трубы с ханикомбом. Расчет был проведен с использованием динамической сетки с постоянной угловой скоростью, при этом во входное сечение трубы подавалась незакрученная жидкость.

Степень закрутки рассчитывалась по формуле:

$$S = \frac{2K_{\theta}}{M_y d} = \frac{\omega R}{2V_x}$$

Закрутка была организована вращением сопла. Для математического моделирования был использован развиваемый в ИТ СО РАН LES-солвер с динамической моделью Смагоринского, основанный на библиотеке OpenFoam.

На основе полученных в данной работе распределений распространения пассивной примеси были сделаны выводы о влиянии закрутки на турбулентную диффузию, а также на распад вихревого ядра.

В случае сильной закрутки струи ($S = 0,6$), характеризующейся распадом вихревого ядра и образованием центральной зоны рециркуляции вблизи сопла, наблюдаются спиральные вихри, проходящие в слое смешения, существенно интенсифицирующие турбулентную диффузию примеси. В сильно закрученной струе возникают нестационарные пульсации скорости, вследствие прецессии вихревого ядра, которое способствует перемешиванию жидкостью/газа в зоне рециркуляции и струей, поступающей из сопла.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук М. Ю. Хребтов

Экспериментальное исследование эффективности теплообмена при кипении на модифицированных поверхностях

В. Ю. Владимиров

Новосибирский государственный университет
Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе, Новосибирск

В современных микроэлектронных системах возникает необходимость отводить значительные тепловые потоки с небольших поверхностей микрочипов. С этой целью можно использовать фазовые переходы «жидкость – газ», которые являются эффективным способом охлаждения.

Особенности теплообмена при фазовых переходах зависят от морфологии и других свойств отдающей тепло поверхности. В частности, используя модификацию можно добиться более высоких коэффициентов теплоотвода или более высоких значений критического теплового потока по сравнению с гладкими поверхностями.

В данной работе проведена серия экспериментов по исследованию влияния нанопокрывтий на теплообмен при кипении дистиллированной, деионизированной и дегазированной воды в большом объеме на локальном нагревателе.

На поверхности с наноструктурами SiO_2 в виде микроканалов и микрококонов достигнута значительная интенсификация теплообмена в процессе кипения. Интенсивное кипение приводило к разрушению микроканалов из нанопроволок оксида кремния. Микрококоны показали лучшую адгезию с поверхностью, покрытой вольфрамом, чем микроканалы.

Наибольшая интенсификация теплообмена в процессе кипения получена на поверхности вольфрама с выращенными микрококонами, покрытыми слоем фторполимера. Показано, что после десятимесячной эксплуатации на поверхности сохранились области с относительно незначительным изменением наноструктуры.

Продемонстрирована применимость данной технологии создания наномодифицированных поверхностей для интенсификации теплообмена в процессе кипения.

Также проводились эксперименты по кипению на оребренных поверхностях с различным шагом оребрения.

На поверхности с редким оребрением (16 ребер) и дополнительным покрытием фторполимером достигнута значительная интенсификация теплообмена.

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

**Исследование динамики струйного осциллятора
при помощи метода крупных вихрей**

Е. И. Дауэнгауэр

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

Струйный осциллятор генерирует осциллирующее течение, которое может быть использовано в широком спектре промышленных приложений. Аналогичные устройства исследуются уже достаточно долгое время, однако только недавно это устройство стало объектом интенсивных исследований в качестве управляющего элемента, что позволило влиять на такие свойства потока, как сопротивление и динамика отрывной зоны, а также на интенсификацию процессов перемешивания [1]. И хотя об актуаторах подобного типа уже известно достаточно много, интенсивное развитие и текущее состояние вычислительной техники позволят детально исследовать выбранный объект.

Мы численно исследуем течение, создаваемое струйным осциллятором в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 3000 - 30000$. Все расчеты проводятся при помощи вычислительного кода Nek5000, основанного на методе спектральных элементов. С целью снижения затрат на вычислительные ресурсы используется метод моделирования крупных вихрей. В данной работе для замыкания уравнений Навье–Стокса мы используем динамическую модель Смагоринского, основанную на гипотезе турбулентной вязкости. За основу (геометрия, параметры течения) в данном проекте выбрана конфигурация, которая была недавно детально измерена [2], что позволило провести тщательную верификацию. Целью данной работы является детальный анализ гидродинамических характеристик данного устройства. Эти результаты могут быть использованы для оценки эффективности струйного осциллятора как метода управления другими характеристиками потоков (при внесении генерируемого периодического возмущения).

Работа поддержана грантом РФФИ № 18-38-0071-mol_a.

1. Cattafesta L. N., Sheplak M. Actuators for active flow control // Annual Review of Fluid Mechanics, 43, 2011. P. 247–272.

2. Ostermann F., Wozidlo R., Nayeri C.N., Paschereit C.O. Properties of a sweeping jet emitted from a fluidic oscillator // Journal of Fluid Mechanics, 857, 2018. P. 216–238.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук Р. И. Мулладжанов

**Исследование характеристик двухфазного течения
в щелевых микроканалах**

Ю. А. Дементьев, Ф. В. Роньшин

Новосибирский государственный университет

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

В настоящее время в различных областях техники происходит глобальная миниатюризация оборудования. Разрабатываются новые микроэлектромеханические системы (МЭМС), микроустройства, основные элементы которых имеют характерные размеры миллиметры или микроны. Мини- и микроканальные теплообменные системы получают широкое распространение в микроэлектронике, в аэрокосмической индустрии, транспорте и энергетике (топливные элементы). В таких системах крайне важным является снижение мощности, затрачиваемой на прокачку хладагентов. В первую очередь она определяется значением перепада давления в микроканалах, который существенно зависит от режима течения.

В данной работе исследованы характеристики двухфазного течения в щелевых микроканалах в диапазоне высот от 50 до 164 мкм и с шириной 10 мм. Рассмотрены модели по предсказанию перепада давления на трение. Показаны наилучшие корреляции по перепаду давления на трение, описывающие экспериментальные точки. Для рассмотренных моделей разработаны собственные корреляции, описывающие перепад давления в щелевых микроканалах со средним абсолютным отклонением менее 10 %.

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

Возможность повышения эффективности газотурбинной установки применением двигателя Стирлинга

Т. А. Душанбаев

Уфимский государственный нефтяной технический университет

Газотурбинные установки (ГТУ) получили широкое распространение в различных отраслях промышленности, в том числе в нефтегазовой. Они могут работать на органическом топливе различного вида, что позволяет использовать их как в стационарном, так и в транспортном варианте. На компрессорных станциях магистральных газопроводов ГТУ является основными двигателями для привода газоперекачивающих агрегатов (ГПА). Количество ГПА с газотурбинным приводом по суммарной мощности достигло 80 % от общей установленной мощности приводов на газоконпрессорных станциях.

Существенным недостатком использования газотурбинных установок является неизбежность потерь энергии, наблюдаемых при отводе выхлопных газов, обладающих достаточно высокой температурой. Применение рекуператоров помогает существенно улучшить ситуацию. В рамках данной работы была рассмотрена возможность дополнительного повышения эффективности установки путем использования двигателя Стирлинга для превращения теплоты отработавших газов в механическую работу.

Был рассмотрен ГТУ-4ПГ АО «ОДК-Пермские моторы», используемый для привода центробежных нагнетателей природного газа в газоперекачивающих агрегатах ГПА-4ПГ. Паспортный эффективный к.п.д. данной установки составляет 25,45 %.

В результате произведенного расчета была подтверждена возможность незначительного повышения к.п.д. исследуемой установки, при этом мощность, продуцируемая двигателем Стирлинга, может отводиться как на отдельный генератор электроэнергии, так и технологическим потребителям (например, масляным, водяным насосам).

Однако применимость данного метода оказалась ограниченной, поскольку существенным фактором является создание сопротивления потоку (местного сопротивления) и увеличение объема теплопроводности. Также стоит отметить невозможность одновременного достижения пиковых эффективностей работы как ГТУ, так и состыкованного двигателя Стирлинга.

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент А. Р. Гимаева

Использование микрогазотурбинных установок как альтернативный способ местной генерации электроэнергии

И. П. Кизько

Уфимский государственный нефтяной технический университет

Газотурбинные установки повсеместно используются в современной промышленности, отраслях транспорта и генерации электроэнергии. Современные технологии позволяют создавать газотурбинные установки в малых масштабах. Оборудование такого типа уже сейчас может рассматриваться как альтернатива традиционным поршневым генераторам.

В рамках настоящей работы было сопоставлено промышленное использование микрогазотурбинных установок с газопоршневыми и дизельными с целью генерации электроэнергии и тепла.

Для более корректного исследования были выбраны установки электрической мощностью 100 кВт. Было установлено, что микрогазотурбинные установки обладают схожими габаритными размерами и массой. Они имеют более длительный межсервисный интервал (порядка 4000 часов против 200) и не требуют жидкостного охлаждения. Данные машины могут одновременно использоваться с целью генерации электроэнергии и отопления зданий. В то же время они обладают более высокой температурой выхлопных газов (порядка 350 °С вместо 100–150 °С), что позволяет дополнительно повышать их к.п.д. путем применения технологий извлечения энергии низкопотенциальной теплоты (к примеру, двигателя Стирлинга). Установлено, что они являются более экологичными, поскольку обладают большей полнотой сгорания топлива.

Несмотря на сложность технического обслуживания, экономический расчет продемонстрировал, что микрогазотурбинные установки могут быть эффективными, а стоимость их эксплуатации зачастую ниже таковой для поршневых машин на 20–30 %. Также предложены методы по повышению эффективности эксплуатации микрогазотурбинных установок. Показано, что потенциально данные установки можно успешно применять и на бытовом уровне, однако на текущий момент стоимость данного оборудования является чрезмерно высокой.

Научный руководитель – канд. техн. наук, доц. А. Р. Гимаева

Численное исследование непрерывной спиновой детонации смеси кислород/водород в коаксиальной камере сгорания

Н. Н. Козюлин, М. С. Бобров, К. И. Борыняк
Институт теплофизики С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

В авиастроении при создании двигателей нового поколения ведутся работы по созданию новых камер сгорания, которые будут работать в форсажном режиме более продолжительное время и обладать высокими значениями удельной тяги. В настоящее время широко распространены двигатели, использующие дефлаграционное горение. Известно, что цикл, использующий детонацию, более эффективен, нежели цикл, использующий простое горение смеси топливо/окислитель. Известно, что продукты детонации могут совершать бóльшую механическую работу, чем продукты сгорания в постоянном объеме. Кроме того, двигатели, использующие принцип непрерывной спиновой детонации, более просты в проектировке и менее требовательны к смесям топлива и окислителя. Тем не менее, прототипов двигателей, работающих длительный период времени в близких к эксплуатационным режимах, на данный момент не существует. В основном это связано с проблемами отвода тепла от стенок камеры сгорания, требующими изучения и новых инженерных решений систем охлаждения.

В данной работе путем численного моделирования был исследован процесс непрерывной спиновой детонации в коаксиальной камере сгорания. В качестве окислителя и горючего была выбрана смесь водород/кислород в соотношении $1/2$ при атмосферном давлении. С помощью открытого пакета программ OpenFOAM разрешались уравнения на прогресс реакции. Реакции протекали по механизму O'Sconaige. Энергетический эффект реакций был определен с помощью пакета Chemkin. В рассмотренной конфигурации была получена распространяющаяся непрерывная спиновая детонация. Распространяющийся фронт детонационной волны качественно совпадает с картинками, полученными в эксперименте. Можно сделать вывод, что используемый модифицированный пакет программ пригоден для отработки разного типа топлив и различных режимов работы двигателей: импульсный проточный, инжектирующий и др.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук М. Ю. Хребтов

**Исследование динамики термокапиллярного разрыва
горизонтального слоя жидкости с помощью конфокального датчика**

Д. Ю. Кочкин

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

Пленки жидкости широко используются в промышленности, однако пленки подвержены разрыву, что может снижать эффективность аппаратов. В [1] показано, что пороговый тепловой поток для разрыва горизонтальных слоев жидкости на порядок выше, чем для гравитационно стекающих пленок, этим объясняется актуальность нашей работы. В [2] исследовалось влияние вязкости на пороговый тепловой поток.

Эксперименты проводились на рабочем участке, представляющем собой текстолитовое основание, в центре которого впрессован медный нагреватель круглой формы диаметром 12,7 мм. Горизонтальная пленка жидкости (вода, силиконовые масла) формировалась на поверхности рабочего участка, после чего включался нагреватель, на котором спустя некоторое время образовывалось сухое пятно. В эксперименте использовались скоростная камера с оптической шпирен-системой, позволяющая визуализировать деформации и разрушение пленки, а также конфокальный сенсор Micro-Epsilon, позволяющий с высокой точностью измерять толщину слоя жидкости. Было выявлено, что процесс разрыва пленки происходит с образованием плоского остаточного слоя на нагревателе. Установлено, что толщина остаточного слоя жидкости не зависит от начальной толщины слоя, однако увеличивается с увеличением вязкости жидкости и с увеличением скорости нагрева.

1. Зайцев Д.В., Кириченко Д.П., Кабов О.А. Влияние смачиваемости подложки на разрыв локально нагреваемой пленки жидкости // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. № 11. С. 79–85.

2. Зайцев Д.В., Семенов А.А., Кабов О.А. Влияние вязкости на термокапиллярный разрыв стекающей пленки жидкости // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23. № 4. С. 649–652.

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

Исследование витания струй при течении нагреваемой пленки жидкости

Ю. А. Кротченко

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

Течения тонких пленок жидкости реализуются во многих технологических процессах и установках разного назначения. Спектр практических приложений пленочных течений непрерывно расширяется, что стимулирует постановку и проведение новых экспериментальных и теоретических исследований этого класса течений. Пленки определяют режим теплопередачи в оросительных градирнях, абсорберах, скрубберах, ректификационных колоннах, испарителях, конденсаторах, аппаратах химической технологии, при движении парожидкостных смесей в трубах.

При течении тонкого слоя жидкости по нагреваемой поверхности кроме гидродинамической неустойчивости, приводящей к развитию волн [1], имеет место также термокапиллярный механизм неустойчивости, которой приводит к образованию на поверхности нагреваемой пленки регулярных термокапиллярных ривулетных структур. Впервые термокапиллярные структуры наблюдались на плоских нагревателях малого размера [1, 2].

Целью данной работы являлось исследование влияния взаимодействия трёхмерных волн с термокапиллярными структурами на характеристики плёночного течения при числе Рейнольдса 33 и начальной температуре жидкости 23 °С.

В ходе работы был создан и отработан алгоритм измерения волновых характеристик течения. Показано, что в условии высокого градиента температуры на передней кромке нагревателя течение плёнки меняет характер при достижении пороговой плотности теплового потока. Показано, что вследствие взаимодействия волн с термокапиллярными структурами на передней кромке нагревателя гребень волны формирует струю, которая постоянно смещается от среднего значения (возникает «витание»). Изменены пространственные характеристики движения струй.

1. Алексеенко С.В., Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г. Волновое течение пленок жидкости. М.: Наука, 1992.

2. Kabov O.A. Heat Transfer from a small heater to a falling liquid film // Heat Transfer Research. 1996. T. 27, № 1. С. 221–226.

3. Kabov O.A., Chinnov E.A. Heat transfer from a local heat source to a subcooled falling liquid film evaporating in a vapor-gas medium // Russ. J. Eng. Thermophys. 1997. T. 7, № 1/2. С. 1–34.

Моделирование коэффициента диффузии наночастиц в разреженных газах

Д. Н. Любимов

Новосибирский государственный
архитектурно-строительный университет

Молекулярное моделирование процессов переноса является важным методом получения информации о коэффициентах переноса. Однако моделирование диффузии наночастиц в газовой среде методом молекулярной динамики фактически принципиально невозможно из-за необходимости использования огромного числа молекул. Актуальна поэтому разработка альтернативного метода [1, 2]. В работах [1, 2] был развит стохастический алгоритм моделирования процессов переноса в разреженных газах. В данной работе этот алгоритм обобщается для моделирования разреженных наногазовых сред. Его тестирование осуществлено на примере моделирования коэффициента диффузии наночастиц Cu_2O в азоте.

Поскольку рассматривается газовая среда при нормальных условиях, то длина свободного пробега молекул несущего газа много больше размера дисперсных наночастиц. Это, в частности, означает, что коэффициенты переноса будут зависеть только от скоростей. Взаимодействие молекул между собой описывается потенциалом Леннарда–Джонса, а взаимодействие наночастицы с молекулами несущего газа – потенциалом Краснолуцкого–Рудяка [3].

Результатом расчета является полный набор скоростей всех молекул и наночастицы моделируемой системы в последовательные моменты времени. Используя эту информацию, можно рассчитать практически все наблюдаемые характеристики газа, включая коэффициент диффузии. В последнем случае применяются флуктуационно-диссипационные соотношения. Результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными.

1. Рудяк В. Я., Лежнев Е. В. Стохастический метод моделирования коэффициентов переноса разреженного газа // Матем. моделирование. 2017. Т. 29. № 3. С. 113–122.

2. Rudyak V. Ya., Lezhnev E. V. Stochastic algorithm for simulating gas transport coefficients // J. of Computational Physics. 2018. Vol. 355. P. 95–103.

3. Рудяк В. Я., Краснолуцкий С. Л. Диффузия наночастиц в разреженном газе // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 7. С. 13–20.

Исследование локальных и интегральных характеристик теплообмена при кипении жидкости при субатмосферных давлениях

И. П. Малахов^{1,2}, В. С. Сердюков^{1,2}

¹Новосибирский государственный университет

²Институт теплофизики С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

Давление является ключевым режимным параметром пузырькового кипения. Однако сегодня в литературе практически отсутствуют опытные данные по локальным характеристикам теплообмена при кипении в области низких давлений. При этом знание данных характеристик крайне важно для понимания физики процесса кипения и основных механизмов теплопередачи, так как существует взаимосвязь между локальными характеристиками и интегральным теплообменом. В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования особенностей кипения воды в широком диапазоне изменения давления (от 0.05 до 1 атм) и тепловых потоков. Использование в работе специальной конструкции прозрачного нагревателя на основе сапфировой подложки позволило изучить с помощью высокоскоростной видеосъемки влияние давления на динамику паровых пузырей, области микрослоя и контактной линии. Для исследования нестационарного поля температур нагревательной поверхности в работе была использована высокоскоростная термографическая съемка. В результате проведенных экспериментов в работе были получены новые опытные данные по интенсивности теплоотдачи при кипении, динамике роста и отрыва паровых пузырей, эволюции области микрослоя при различных давлениях. В частности, анализ полученных результатов показал, что уменьшение давления приводит к существенному увеличению скорости роста и отрывного диаметра паровых пузырей. Также в работе были проведены оценки скорости роста сухих пятен, образующихся под паровыми пузырями, при варьировании давления. Показано, что радиус контактной линии линейно растёт во времени, при этом скорость роста сухих пятен для различных давлений и заданной плотности теплового потока практически не меняется.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-00078).

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

Идентификация параметров математической модели при расчете теплового режима здания

А. А. Махин

Новокузнецкий филиал (институт) Кемеровского
государственного университета, Новокузнецк

При проектировании новых зданий, а также эксплуатации уже построенных очень часто возникает проблема теплового снабжения. В новых домах ключевым вопросом является грамотное проектирование системы отопления для обеспечения теплом всего помещения с минимальными затратами. В старых домах при длительной эксплуатации происходит износ конвекторов и стояков, а также стен здания, что ведет к понижению температуры в помещениях. При малом бюджете на модернизацию систем теплоснабжения очень остро встает вопрос о выявлении приоритетных направлений, требующих решения.

В связи с актуальностью этих проблем была построена математическая модель для расчета теплового режима здания. Исследование проводилось методом конечных элементов. При сравнении реальных результатов и модельных были получены отклонения, связанные с отсутствием возможности определения реальных значений параметров в модели. Такими параметрами, например, являлся тепловой расход по каждому стояку, значение коэффициента теплопередачи и т. д. В рамках данной работы были проведены измерения значений реальных температур конвекторов и стояков с помощью тепловизора, проведена идентификация параметров математической модели на основе полученных данных.

В результате выполненной научно-исследовательской работы была проведена настройка математической модели, что позволило максимально точно прогнозировать температуру в каждом отдельном помещении здания при различных внутренних и внешних воздействиях.

Научный руководитель – канд. техн. наук Е. С. Вячкин

Моделирование двухфазных электрогидродинамических течений

А. А. Немыкина

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

Электрогидродинамические течения имеют широкое применение, их изучение открывает большие перспективы для развития техники. Однако в силу сложности самих явлений и нелинейности уравнений существуют проблемы, связанные с интерпретацией электрогидродинамических эффектов. В связи с этим численное моделирование является наиболее эффективным способом исследования подобных явлений.

В данной работе для исследования многофазных течений применялся метод решеточных уравнений Больцмана, основанный на решении кинетического уравнения для ансамбля «псевдочастиц». В качестве переменных в методе используются функции $N_k(\mathbf{x}, t)$. Уравнение эволюции имеет вид:

$$N_k(\mathbf{x} + \mathbf{c}_k \Delta t, t + \Delta t) = N_k(\mathbf{x}, t) + \Omega_k(\mathbf{x}, t) + \Delta N_k(\mathbf{x}, t),$$

где $\Omega_k(\mathbf{x}, t)$ – оператор столкновений.

Электрический потенциал рассчитывался согласно уравнению Лапласа. Объемная сила, действующая на заряженную диэлектрическую жидкость в электрическом поле, выражается формулой (сила Гельмгольца)

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} - \frac{E^2}{8\pi}\nabla\varepsilon + \frac{1}{8\pi}\nabla\left[E^2\rho\left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial\rho}\right)_T\right].$$

При помощи данного метода исследовалась динамика парового и газового пузырька, изначально существующих в диэлектрической жидкости, помещенной в электрическое поле. Были реализованы различные постановки задачи: как в периодических граничных условиях, так и между жестких стенок, при различной длине электродов.

Таким образом, удалось применить метод решеточных уравнений Больцмана для описания течений с фазовыми переходами в электрическом поле. Этот метод имеет широкое применение для моделирования множества процессов.

1. Куперштох А. Л. Моделирование течений с границами раздела фаз жидкость-пар методом решеточных уравнений Больцмана // Вестник НГУ: Сер. Математика, механика и информатика. 2005. Т. 5, № 3. С. 29–42.

2. Куперштох А. Л., Медведев Д. А., Грибанов И. И. Моделирование теплопереноса в среде с фазовыми переходами методом решеточных уравнений Больцмана // Вычислительные методы и программирование. 2014. Т. 15. С. 317–328.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Д. А. Медведев

Экспериментальное исследование щелевой кавитации в торцевом зазоре двухмерного гидрокрыла

М. Ю. Ничик

¹Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный университет

Одной из самых распространенных и агрессивных форм кавитации в гидравлическом оборудовании является так называемая щелевая кавитация, возникающая в зазорах между кромками лопастей ротора и корпусом статора или торцевыми поверхностями поворотных лопаток и стенками камеры направляющего аппарата. Наиболее разрушительное воздействие данного типа кавитации наблюдается в тех местах, где поток, протекающий через узкий канал, выходит на сторону разрежения гидрокрыла.

Настоящая работа направлена на экспериментальное исследование щелевой кавитации в щелевом зазоре между торцевой поверхностью уменьшенной модели направляющей лопатки (НЛ) гидротурбины и стенкой рабочего канала. Лопатка имела стандартизованный профиль NACA0022-34 с длиной хорды 100 мм. Эксперименты были проведены на кавитационной гидродинамической трубе ИТ СО РАН, подробное описание которой наряду с основными параметрами течений и методами измерений дано в работе [1]. Исследования были выполнены при малом ($\alpha = 3^\circ$) и большом ($\alpha = 9^\circ$) углах атаки для щелевых зазоров толщиной $h = 0,8$ и $1,75$ мм.

В работе показано, что увеличение размера щелевого канала приводит к возникновению кавитации в зазоре при более высоких числах кавитации или, другими словами, чем шире зазор, тем раньше возникает щелевая кавитация. Также было обнаружено, что при двукратном увеличении толщины зазора (до $h = 1,75$ мм) происходит интенсификация вихревых структур в щели, которые также начинают кавитировать. Распределения скорости в зазоре состоят из пяти основных зон, где направление и скорость потока заметно изменяются. Однако они практически не зависят от режима основного потока.

1. Kravtsova A.Yu., Markovich D.M., Pervunin K.S., et al. High-speed visualization and PIV measurements of cavitating flows around a semi-circular leading-edge flat plate and NACA0015 hydrofoil // International Journal of Multiphase Flow. 2014. Vol. 60. P. 119–134.

Научные руководители – канд. физ.-мат. наук Д. Ф. Сиковский,
К. С. Первунин

Численное моделирование процесса теплообмена пристенной струи во встречном потоке

А. И. Очередыко

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

Тепловая защита стенки от воздействия более горячего потока с помощью пристенных газовых завес является актуальной и важной задачей при разработке различных машин и установок. Цель данной работы – провести численное исследование структуры течения и теплообмена при подаче пристенного охладителя навстречу более горячему потоку через плоскую щель при вариации основных параметров основного и вторичного потоков.

Для численного моделирования использовался пакет программ OpenFOAM. Для описания динамики и теплопереноса в однофазном воздушном потоке используется система двумерных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса.

В данной работе изучен процесс теплового смешения встречной пристенной струи с газовым потоком, определена эффективность тепловой защиты адиабатной стенки в направлении движения струи. Выполнено моделирование влияния основных термогазодинамических характеристик пристенной газовой струи на величину тепловой эффективности в плоском канале. По мере приближения к области встречного вдува профиль продольной скорости газа становится менее заполненным. Затем приходит область, где скорость вторичного течения у стенки меняет свое направление и начинает двигаться вместе с основным потоком нагретого газа. Происходит локальное увеличение продольной скорости потока за счет процесса смешения основного и вторичного течений.

Пристенная струя довольно быстро тормозится из-за интенсивного процесса смешения с основным встречным потоком. Взаимодействие пристенной струи со встречным потоком, ее поворот и формирование зоны циркуляции является результатом значительной турбулентности потока. При этом рост теплообмена может регулироваться интенсивностью противоточной струи. В плоском канале противоточная пристенная струя может увеличить теплообмен между стенкой канала и потоком газа в 2-3 раза вдоль всей поверхности за местом введения. Проведено сопоставление с данными измерений и получено удовлетворительное согласие как по осредненной структуре течения, так и по теплообмену.

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

Исследование локального турбулентного теплопереноса в закрученной импактной струе методом ПЛИФ

С. К. Протасов

Новосибирский государственный университет

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

Проблема организации эффективного тепломассопереноса в струях, натекающих на преграду (импактных струях), является актуальной для многих технических приложений, в том числе для задач охлаждения бытовой электроники, лопаток турбин. Целью данной работы являлось исследование особенностей конвективного теплопереноса в импактной струе с закруткой с использованием бесконтактных методов измерения, а именно: плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции (ПЛИФ) и анемометрии по изображениям частиц. Объектом измерения являлась закрученная затопленная струя, перпендикулярно натекающая на равномерно нагреваемую плоскую поверхность. Поток при числе Рейнольдса 5000 формировался соплом с установленным внутри лопастным завихрителем.

В жидкость был добавлен краситель Родамин Б, интенсивность флуоресценции которого значительно зависит от температуры. Для возбуждения флуоресценции использовался импульсный Nd:YAG лазер с длиной волны излучения 532 нм. Для регистрации сигнала флуоресценции использовалась цифровая камера с объективом и оптическим фильтром, пропускающим излучение с длиной волны более 560 нм. Частота импульсов лазера и съемки кадров соответствовала 3,5 кГц.

В ходе работы был реализован алгоритм обработки данных, с помощью которого получены мгновенные поля температуры. Проведена работа по удалению шумов с помощью двумерного Фурье-анализа данных. Обработанные данные сравнивались с полями скоростей, что позволило визуализировать и проанализировать различные вихревые структуры в сдвиговом слое между струей и внешней жидкостью, а также вихревое ядро, которое примыкает к импактной поверхности.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук В. М. Дулин

**Влияние фонового кислорода на состав пленок,
осажденных методом импульсной лазерной абляции кремния**

А. А. Родионов

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

Импульсная лазерная абляция – один из перспективных методов осаждения тонких пленок. Инвариантность по отношению к выбору материала мишени, составу фонового окружения, а также высокая чистота пленок являются ключевыми преимуществами метода. Несмотря на длительное использования ИЛА для синтеза материалов сложной стехиометрии, полного понимания всех механизмов роста пленок пока не достигнуто. Так, дискуссионным остается вопрос о характере взаимодействия продуктов абляции с химически активным фоновым окружением, что препятствует оптимизации методики для осаждения пленок с равномерным химическим составом.

В ходе работы был исследован состав тонких пленок, полученных в ходе импульсной лазерной абляции кремния в кислородсодержащем фоновом газе. В экспериментах варьировалось парциальное давление кислорода, при сохранении общего давления фонового газа, что обеспечивало схожесть разлета лазерного факела и идентичность массы, осаждаемой на подложках. Для определения локальной степени окисления пленок проведено экспериментальное исследование с применением СЭМ, ЭДС и FTIR-анализа.

Установлено, что полученные пленки имеют схожую морфологию, за исключением увеличения пористости с ростом парциального давления фонового кислорода. Анализ пленок показал, что на их поверхности присутствует большое количество микрокапель, состоящих из чистого кремния. Показано, что число микрокапель может быть существенно уменьшено путем увеличения плотности энергии лазера. С помощью различных методик проанализирована зависимость стехиометрического коэффициента пленок от парциального давления кислорода. На основании полученных данных предложена гипотеза о неравномерном окислении лазерного факела, согласно которой фоновый газ не проникает в ядро лазерного факела, а окисление продуктов абляции происходит только на его периферии. В результате на подложке образуются области, обогащенные кислородом, и области с низким содержанием кислорода.

Работа выполнена благодаря Гранту Президента РФ МК-2404.2019.8

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

Численное моделирование двухфазного течения с испарением в канале

Н. Е. Сибиряков

Новосибирский государственный университет

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

Микроканальные системы охлаждения весьма перспективны для охлаждения микроэлектронных устройств. Жидкостные или газожидкостные системы отводят намного большие потоки тепла при меньших затратах энергии, чем просто газовые системы. Если же жидкость испаряется в канале, то поток тепла резко возрастает [1]. Этот эффект усиливается, если добавить спутный поток газа, который сносит образовавшийся пар.

В данной работе рассматривается стационарное течение жидкости и газа в микроканале в форме угла. Подобная постановка задачи моделирует течение в угле канала треугольного или прямоугольного сечения, а также течение в канале оребренного канала.

По мере продвижения жидкости по каналу она испаряется. Следовательно, уменьшается её глубина и радиус кривизны поверхности, давление в жидкости, по закону Лапласа, также уменьшается, и жидкость начинает втягиваться дальше в канал.

Из закона сохранения массы, импульса и энергии мы выводим уравнения на зависимость осреднённой скорости и на глубину жидкости в канале от координаты, параллельной ребру канала. Полученная система уравнений нелинейная. Поэтому мы используем метод Рунге–Кутты и решаем её численно.

Вязкость жидкости ограничивает максимальную скорость жидкости в канале и является причиной образования сухих пятен. Эффективный тепловой поток, отводимый от стенок, достигает 40 кВт/м^2 при начальной скорости жидкости 2 м/с. Это показывает, что оребренные каналы или каналы треугольного и прямоугольного сечения перспективны для создания микросистем охлаждения.

1. I. Tiselj, G. Hetsroni, B. Mavko, A. Mosyak, E. Pogrebnyak, Z. Segal, «Effect of axial conduction on the heat transfer in micro-channels», International Journal of Heat and Mass Transfer 47 (2004).

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

**Экспериментальное исследование теплообмена
при пленочном течении бинарных смесей хладонов
на микроструктурированных поверхностях**

К. А. Степанов

Новосибирский государственный университет

С целью интенсификации процесса теплообмена при пленочных течениях жидкости для более эффективного охлаждения тепловыделяющих элементов зачастую применяется структурирование теплообменной поверхности. Такие поверхности могут способствовать росту критического теплового потока и значительному увеличению коэффициента теплоотдачи, особенно в режиме кипения, за счет увеличения плотности готовых центров парообразования. В связи с этим множество работ посвящено исследованию данной тематики и поиску оптимальных структур для интенсификации теплообмена в стекающих пленках жидкости при различных режимах парообразования.

Целью данной работы являлось изучение интенсификации теплообмена в стекающих пленках смеси хладонов R114/R21 на тепловыделяющих участках с микроструктурированными наружными поверхностями. Течение пленки осуществлялось по наружной поверхности вертикальных цилиндров в ламинарно-волновом режиме. Плотность теплового потока изменялась от нуля до критических значений. В работе исследовались три поверхности с микрооребрением с полузакрытыми подповерхностными порами, полученными за счет накатки роликом, сплюсшивающим вершины ребер. В экспериментальных сериях производилось варьирование шага и высоты микроребер, что позволило оценить влияние геометрических параметров микроструктуры на развитие кипения и кризисных явлений [1]. Используя термодинамический метод измерений, были получены значения локальных температур теплоотдающей поверхности, по которым затем были рассчитаны локальные и средний коэффициенты теплоотдачи.

В результате исследований было показано, что для микроструктурированных поверхностей с полузакрытыми полостями кипение начинается при меньших температурных напорах, коэффициент теплоотдачи до четырех раз превышает значения для гладкой поверхности, а значения критического теплового потока – более чем в два раза.

1. Володин О. А., Печеркин Н. И., Павленко А. Н. и др. Влияние типа микроструктурирования стенки на теплообмен при кипении в стекающих пленках маловязкой жидкости // Тепловые процессы в технике. 2019. Т. 11. № 1. С. 16–23.

**Экспериментальное исследование динамики
мелкомасштабных сухих пятен в локально нагреваемой пленке
жидкости, движущейся под действием потока газа в миниканале**

Е. М. Ткаченко

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

В работах [1, 2] показана возможность отведения тепловых потоков плотностью до 1200 Вт/см^2 при помощи тонкой пленки жидкости, движущейся под действием потока газа в канале. Для изучения процесса образования сухих пятен экспериментальный стенд был оснащен системой высокоскоростной визуализации, для этого использовалась высокоскоростная камера FASTCAM SA1.1 (5400 кадров/секунду с разрешением 1024×1024 пикселей и до 675000 кадров/секунду при более низком разрешении). Максимальная интенсивность теплоотода достигается в предкризисном режиме: непрерывность потока пленки жидкости нарушается, нагреватель покрыт мелкомасштабными сухими пятнами (размер порядка 100 мкм). Было проанализировано 158 последовательных сухих пятен из одного видео. Обнаружено, что около 50 % из них имеют время жизни менее 0,5 мс.

В ходе эксперимента общая площадь сухих пятен увеличивается с увеличением теплового потока и температуры нагревателя, но, когда поверхность нагревателя достигает определенной температуры ($\approx 100 \text{ }^\circ\text{C}$), общая площадь начинает уменьшаться и принимает минимальное значение в предкризисном режиме. Несмотря на то что суммарная площадь сухих пятен перед кризисом уменьшается, суммарная длина контактной линии продолжает увеличиваться и перед кризисом достигает максимального значения. Как известно, вблизи контактной линии существует регион сверхинтенсивного испарения [3]. В наших экспериментах за счет достижения максимальной длины контактной линии в предкризисном режиме (до 30 см) обеспечивается достижение сверхвысоких тепловых потоков.

1. Zaitsev D., Tkachenko E., Orlik E., Kabov O. // MATEC Web of Conferences, 2016, Vol. 92, Article number 01037.

2. Zaitsev D., Tkachenko E. and Kabov O. // EPJ Web of Conferences, 2017, Vol. 159, Article number 0054.

3. Kabov O.A., Zaitsev D.V., Kirichenko D.P., Ajaev V.S. // Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering. 2017. Vol. 21, Issue 2. P. 60-69.

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

Получение наночастиц кремния и карбида кремния с использованием реактора циклического сжатия

В. В. Туманов

Новосибирский государственный университет

Возможность использования наноразмерных порошков различных материалов в производстве новых функциональных материалов с заданными свойствами, а также модификация уже существующих материалов с целью повышения их эксплуатационных характеристик обуславливает огромный интерес к изучению свойств нанопорошков и способам их получения. Несмотря на большое количество работ, посвященных данной тематике, проблема разработки недорогих и высокопроизводительных методов получения наноразмерных порошков кремния и карбида кремния, удовлетворяющих требованиям чистоты и монодисперсности получаемых продуктов, остается актуальной.

В настоящей работе для получения кремния использован метод термического разложения моносилана, а для получения карбида кремния – реакция моносилана с легкими углеводородами. Обе реакции проходили при нагревании исходных реагентов в процессе адиабатического циклического сжатия в объеме реактора. Данный метод обеспечил однородность условий протекания реакции во всем реакторном объеме, что привело к высокой степени монодисперсности получаемых нанопорошков. Разработанный метод является одноступенчатым и циклическим, простым для масштабирования и автоматизации, при относительно низкой стоимости производства продукта.

Продукты реакции исследованы методами рентгеновской дифрактометрии и просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения. Установлено, что в режимах термического разложения моносилана образуются наноразмерные порошки кремния (5-10 нм), тогда как при сжатии смесей моносилана с легкими углеводородами - карбида кремния (20-30 нм). Полученные нанопорошки готовы к применению в технологиях и задачах материаловедения без дальнейшей обработки.

В работе исследован цикл работы реактора, изучено влияние количественного состава смеси реагентов, температуры и давления в реакторе на протекание химических реакций. На основе полученных данных выбраны условия подачи сырья и отбора продуктов, обеспечивающие оптимальные режимы синтеза продуктов. Показано, что понижение давления в реакторе приводит к заметному увеличению размеров наночастиц кремния. В то же время не было замечено изменений размеров наночастиц карбида кремния при варьировании давления.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Б. С. Ездин

Конвертирование авиационных газотурбинных двигателей в ГТУ наземного применения

А. А. Шаймуратов

Уфимский государственный авиационный технический университет

В настоящее время газотурбинные двигатели (ГТД) находят обширное применение в качестве наземных установок (ГТУ). Авиационные ГТД повсеместно используются в промышленности в качестве тепло- и электрогенераторов, в качестве привода газоперекачивающих агрегатов. Широко применяются авиационные ГТД после отработки своего летного ресурса. Такие ГТД имеют относительно малую стоимость, малые габариты, высокий к.п.д. и малый удельный вес и могут оказаться наиболее выгодными в экономическом плане.

В рамках настоящей работы рассмотрен вопрос экономической эффективности использования списанных авиационных ГТД в качестве ГТУ.

Процесс подготовки авиационного ГТД к наземным условиям называют конвертированием. В процессе конвертирования проводят расчеты параметров при новых рабочих условиях. Претерпевает изменение топливная система. В качестве топлива применяют природный газ или альтернативные источники энергии. Кроме того, проектируют дополнительный элемент конструкции – свободную турбину, если базовый двигатель не имел такого конструктивного элемента.

Для рассмотрения была выбрана газотурбинная энергетическая установка ГТЭ-18 с приводом АЛ-31СТЭ. Установка имеет тепловую мощность 24 МВт, работает на природном газе и имеет назначенный ресурс в 100 тыс. часов с межремонтным ресурсом 3 тыс. часов и капитальным ремонтом через 25 тыс. часов. Установка сконструирована на базе авиационного ГТД АЛ-31Ф с назначенным ресурсом 1000 часов. Была рассмотрена целесообразность данных преобразований, проанализирована эффективность создания новой установки.

Несмотря на сложность технической реализации конвертирования авиационного ГТД в наземную ГТУ, оказалось возможным снижение экономических затрат до 10–20 %. В результате данная процедура была сочтена допустимой.

Научный руководитель – канд. техн. наук А. Е. Михайлов

**Экспериментальное исследование монослоя
из левитирующих микрокапель
над поверхностью нагретой жидкости**

А. И. Шатекова

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

Левитирующие микрокапли жидкости можно использовать в качестве трассеров для исследования парогазовых потоков в непосредственной близости от межфазной поверхности жидкость – пар/газ, где затруднительно или невозможно применять традиционные методы PIV [1]. В работах [2, 3] была разработана теоретическая модель, предсказывающая зависимость высоты левитации от размера капель, которая хорошо согласуется с экспериментальными данными. Таким образом, механизм левитации микрокапель над поверхностью жидкости выяснен, но до сих пор неизвестен механизм взаимодействия капель друг с другом. В связи с этим целью настоящей работы является исследование динамики образования и эволюции монослоя из левитирующих микрокапель над поверхностью горизонтального слоя жидкости при нагреве со стороны подложки. Рабочий участок представляет собой цилиндр из капролона, в центре которого встроено медный стержень диаметром 3 мм, служащий нагревательным элементом. В качестве рабочей жидкости используется сверхчистая дегазированная вода Milli-Q с начальной температурой 25°C. Толщина слоя рабочей жидкости и температура подложки являются основными варьируемыми параметрами в эксперименте, при этом они остаются постоянными в течение каждой серии эксперимента.

1. Kabov O.A., Zaitsev D.V., Kirichenko D.P., Ajaev V.S. Interaction of Levitating Microdroplets with Moist Air Flow in the Contact Line Region // *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering*. 2017. Vol. 21, Issue 2. P. 60–69.

2. Zaitsev D., Kirichenko D., Ajaev V., Kabov O. Levitation and self-organization of liquid microdroplets over dry heated substrate // *Physical Review Letters*. 2017. Vol. 119. Issue 9. Article number 094503.

3. Zaitsev D., Kirichenko D., Shatekova A., Ajaev V., Kabov O. Experimental and theoretical studies of ordered arrays of microdroplets levitating over liquid and solid surfaces // *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*. 2018. Vol. 6. P. 219–230.

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

**Тепловизионный метод измерения тепловых потоков
в аэродинамических трубах кратковременного действия**

М. А. Шиплюк

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

При гиперзвуковых скоростях полета летательного аппарата тепловые потоки к поверхности могут привести к перегреву и поломке аппарата. Поэтому при проектировании гиперзвуковых летательных аппаратов (ГЛА) необходимо рассчитывать тепловые потоки от газа к ГЛА.

В эксперименте одним из методов определения тепловых потоков является измерение изменения температуры поверхности модели по времени.

В настоящее время поля температуры в аэродинамическом эксперименте могут измеряться с помощью контактных датчиков, термоиндикаторов плавления, люминесцентных преобразователей температуры и тепловизоров. Тепловизор на фоне остальных способов является наиболее привлекательным для аэродинамического эксперимента, так как не требует специальной подготовки модели, позволяет получать двумерное распределение температуры и его не обязательно располагать в рабочей части аэродинамической трубы (АДТ).

Современная тепловизионная техника позволяет определять распределение температуры поверхности исследуемого объекта с очень высокой точностью (до 20 мК) и достаточно высокой частотой кадров (до 100 Гц). Однако специфика теплового эксперимента в АДТ обуславливает множество проблем, связанных с тепловизионными измерениями. При малых временах эксперимента (~10 мс) возникают проблемы, когда начинает проявляться частичная прозрачность материалов исследуемых образцов в инфракрасном диапазоне, что приводит к ошибкам в полученных температурных полях и, в свою очередь, приводит к существенным неточностям в определении тепловых потоков.

Целью работы является разработка и реализация методики коррекции получаемых экспериментально полей температуры и последующее вычисление тепловых потоков на поверхности модели ГЛА.

В результате работы разработан и реализован в программной среде MATLAB алгоритм учета частичной прозрачности материала модели, проведена экспериментальная валидация, проведены эксперименты по улучшению точности определяемой температуры поверхности модели.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Д. А. Бунтин

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

УДК 533.9.07

Источник плазменной струи с большим давлением

Н. Р. Асмедьянов

Новосибирский государственный университет

Переход к большим временам удержания в открытых ловушках (аналогичных ГДЛ) требует поддержания материального баланса плазмы. Продольная инжекция частиц ухудшает продольное удержание горячей плазмы в ловушке. Одним из вариантов поддержания материального баланса плазмы является инжекция плазмы вдоль радиуса ловушки поперёк силовых линий магнитного поля. Цель данной работы – создать источник плазменной струи с давлением, достаточно большим, чтобы преодолевать выталкивание магнитным полем, которое удерживает плазму в ловушке. Оно должно быть сравнимо с давлением магнитного поля.

Источник струи представляет собой плазменную пушку со следующим принципом действия: на коаксиальные электроды подается напряжение (~5 кВ); происходит пробой газа, находящегося между этими электродами; через образовавшуюся плазму течет радиальный ток. Ток, замыкаясь через центральный электрод пушки, создает азимутальное магнитное поле. Взаимодействие радиального тока и азимутального магнитного поля приводит к возникновению силы Лоренца, которая выталкивает плазму из пушки.

Для проведения контролируемых экспериментов на ГДЛ важно знать параметры вылетающей струи и системы питания пушки. Для их измерения на данный момент используется следующий ряд диагностик. *Цифровая камера* нужна для измерения углового разброса струи. *Пояс Роговского* предназначен для измерения тока в контуре питания плазменной пушки. *Два зонда Ленгмюра* и *оптическая времяпролетная диагностика* позволяют измерить фронтальную скорость струи.

Эксперименты показали, что при больших скоростях плазмы (>100 км/с) время ускорения плазмы составляет ~ 3 мкс. Таким образом, критически важным является достижение максимальной величины тока в первые микросекунды выстрела. Для этого была снижена добротность контура питания. В одном из экспериментов с пониженной добротностью контура и током ~ 70 кА давление вылетевшей плазменной струи составило 3,8 атм., а давление магнитного поля, которое струя должна преодолеть, составляет ~ 4 атм. Также выяснено, что угловой разброс струи составляет $10 \pm 2^\circ$. Это позволяет инжектировать большую часть плазмы точно в рабочую область.

С повышением тока в контуре питания достигается максимум давления струи, выше которого оно не поднимается, это вызвано эффектом Холла в пушке при больших токах. Положение максимума определяется газовыми условиями и геометрией пушки.

Научные руководители – науч. сотр. Е. Ю. Колесников,
д-р физ.-мат. наук П. А. Багрянский

Измерение характеристик диагностического пучка с быстрой модуляцией

С. С. Астамиров

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

Ведётся разработка и изготовление диагностического инжектора для исследования свойств плазмы на установке C-2W (компания TAE, США). Особенностью данного ионного источника является высокая частота модуляции пучка быстрых атомов, до 10 кГц при полной энергии нейтралов 40 кэВ и плотности тока нейтралов в фокусе 0,3 экв. А/см².

Для выбора оптимальной схемы быстрой модуляции пучка запланирована серия экспериментов. В качестве источника плазмы в инжекторе используется генератор на основе дугового разряда с периферийным магнитным полем.

Испытываются три схемы модуляции пучка.

В первой схеме модулируется поток плазмы с помощью дополнительной сетки, расположенной перед плазменным электродом.

Во второй схеме модулируется напряжение на вытягивающей сетке, которое формируется резистивным делителем, что позволяет вывести расходимость пучка из оптимума и снизить его плотность тока.

В третьей схеме получение модулированного пучка связано с переключением режима горения разряда на анод источника плазмы либо на анод и камеру экспандерного объема.

Целью работы является выбор наиболее эффективной схемы модуляции пучка, при которой достигается достаточная глубина модуляции пучка не менее 50 % в области фокусировки, и устойчивость к высоковольтным пробоям. Для измерения характеристик пучка будет использован массив вторично-эмиссионных детекторов в виде креста, установленный в области фокусировки пучка. Также будут контролироваться токи и напряжения в ионно-оптической системе инжектора.

Научный руководитель – Н. В. Ступишин

Активационная методика для бор-нейтронозахватной терапии

М. И. Бикчурина

Новосибирский государственный университет

Ускорительный источник эпитепловых нейтронов, предложенный и созданный в ИЯФ СО РАН, обеспечивает генерацию и формирование потока нейтронов, пригодного для отработки методики бор-нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей (БНЗТ). В работе представлены и обсуждаются результаты четырёх исследований с применением активационных методик. Активационными фольгами из набора SWX-1552 (Shieldwerx, США) восстановлена низкоэнергетичная часть спектра формируемого потока нейтронов. Золотыми фольгами обеспечен контроль поглощенной дозы при облучении клеточных культур и лабораторных животных. Для отработки нового метода измерения пространственного распределения поглощенной дозы при проведении БНЗТ, защищенного патентом РФ № 2606337 от 10.01.2017, проведено облучение клеточных культур и лабораторных животных с применением специально синтезированных препаратов бор-золото. Спектрометром γ -излучения на основе полупроводникового детектора, выполненного из особо чистого германия, зарегистрировано излучение γ -квантов с энергией 411 кэВ, обусловленное активацией золота, что позволило восстановить значение поглощенной дозы. Предложен новый способ измерения нелокализованной дозы, получаемой здоровыми клетками, суть которого заключается в измерении активации марганца, натрия и калия, содержащихся в организме и активируемых нейтронным потоком. Разработан автоматический комплекс сканирования образцов и проведены исследования, показавшие возможность измерения пространственного распределения дозы. Для защиты изобретения подана заявка на получение патента. В заключение описаны планы дальнейшего развития применения активационных методик при проведении БНЗТ.

Научный руководитель – Д. А. Касатов

Измерение локальных параметров плазмы в установке СМОЛА

В. В. Глинский

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

На сегодняшний день наиболее простыми в инженерном плане установками для удержания горячей плазмы являются магнитные ловушки открытого типа. Главный недостаток данных ловушек в том, что плазма вытекает с торцов установки. Считается, что одно из частичных решений этой проблемы – подавление потока плазмы с торцов установки винтовым магнитным полем. Чтобы доказать это, была создана установка СМОЛА. Для проверки эффективности удержания плазмы в данной установке необходимо измерять параметры плазмы во время эксперимента. Такие параметры плазмы, как температура, плотность, потенциал можно измерить, используя эмиссионный и тройной зонды.

Тройной зонд представляет собой три помещенные в плазму проволоки, на две из которых подается напряжение. Данный зонд позволяет измерить температуру и плотность плазмы. Эмиссионный зонд – это помещенная в плазму нить накала. В экспериментах использовалась нить из торированного вольфрама, которая нагревалась до температуры порядка 1800 К. Оказывается, потенциал такого зонда почти равен потенциалу плазмы.

Целью данной работы является определение радиального профиля температуры, плотности и потенциала плазмы с помощью эмиссионного и тройного зондов. Для этого был построен комплекс эмиссионного и тройного зондов с соответствующей электрической схемой их включения.

В работе представлены распределение температуры, потенциала и плотности плазмы вдоль ее диаметра.

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

**Исследование керамики карбида бора
методом энергодисперсионной спектроскопии
и методом нейтронно-активационного анализа
для выявления легко активируемых примесей**

Н. В. Давыдов

Новосибирский государственный университет

Дейтерий-тритиевая реакция термоядерного синтеза, предложенная для использования в энергетике, сопровождается выделением нейтронов высокой энергии, которые представляют значительную опасность для живых людей и электронных устройств. При конструировании ИТЕР возникла проблема с экранированием потока нейтронов в диагностических портах в силу того, что стандартное использование большого количества воды для замедления нейтронов противоречит жестким требованиям французского приказа об оборудовании под давлением в ядерных установках, а экранирование железом приводит к значительному увеличению массы порта, вплоть до превышения конструкционных возможностей. Возможным решением является использование керамики карбида бора, так как сечение захвата нейтронов у бора превосходит таковое у многих других элементов. Однако этот материал никогда ранее не применялся в вакууме для решения данной задачи, вследствие этого необходимо исследовать его на соответствие стандартам, введенным для ИТЕР.

Для определения состава были проведены исследования четырех образцов керамики карбида бора. Измерение содержания различных элементов проводилось двумя методами: при помощи электронного сканирующего микроскопа и методом нейтронно-активационного анализа (для выявления легко активируемых примесей). Измерения на электронном микроскопе обнаружили в образцах железо, алюминий, кислород и некоторые другие элементы, слабо влияющие на свойства керамики, однако после активационного анализа обнаружились следы марганца. Марганец является легко активируемым элементом и даже при незначительном содержании в образце может заметно отражаться на величине наведенной радиоактивности. Следовательно, для определения пригодности материала для использования его в ИТЕР необходимо оценить содержание в нем марганца.

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

Исследование параметров распространения лазерной плазмы методами оптической спектроскопии

М. А. Ефимов

Новосибирский государственный технический университет
Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск

Одним из важных параметров лазерной плазмы является скорость распространения различных ионных составляющих. Одним из методов измерения скорости методами оптической спектроскопии является доплеровское уширение и сдвиг спектральных линий. В частности, это позволяет измерить поперечную составляющую скорости и угол распространения плазменного факела относительно нормали мишени. Применяемые (C_2H_4) мишени при абляции дают ионы водорода и углерода разного заряда, которые имеют разный конус расширения. Измерение этого эффекта возможно спектральными методами с использованием ПЗС-линейки для регистрации профиля спектральной линии.

На установке КИ-1 моделировались процессы распространения лазерной плазмы в магнитном поле порядка $B = 300$ Гс и без него. Плазменное излучение фокусировалось системой зеркал и линз на входной щели монохроматора. После чего дифрагированное изображение фокусировалось на ПЗС-линейке, а изображение отправлялось на компьютер. Проанализировав зарегистрированные спектральные линии, было рассчитано уширение отдельных спектральных линий по формуле Доплера, а также определены скорости распространения ионов от нормали мишени из формулы $\Delta\lambda/\lambda = \Delta V/c$.

Полученные спектральными методами данные распространения были сопоставлены с изображением плазменного факела, полученного с помощью фотокамеры (PCO AG hsfc pro).

Таким образом, собранные данные позволяют лучше понимать динамику распространения лазерной плазмы в рамках проводимых экспериментов и на стенде КИ-1 в частности.

Настоящая работа была выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-32-00029 и № 18-42-543019.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук И. Ф. Шайхисламов

Измерение динамики дифракции синхротронного излучения на мозаичном монокристалле вольфрама при импульсном нагреве и восстановление динамики распределения деформаций в образце

С. Р. Казанцев

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

В термоядерном реакторе ожидается, что вольфрамовая стенка дивертора будет испытывать импульсные тепловые нагрузки, что приведет к возникновению в ней механических напряжений, упругих и пластических деформаций. Для исследования механизма образования данных деформаций, нужно уметь измерять их динамику во время импульсной тепловой нагрузки. В настоящий момент в ИЯФ СО РАН разработана динамическая диагностика таких деформаций на основе быстрой дифрактометрии. Метод быстрой дифрактометрии заключается в измерении дифракционной картины синхротронного излучения (СИ), рассеянного на образце, и восстановлении деформации образца по форме дифракционного пика. При импульсном нагреве происходит расширение образца и искривление кристаллических плоскостей, что ведет к изменению угла рассеяния СИ. Однако того же эффекта можно добиться с помощью вращения образца. В результате можно получить набор дифракционных пиков, соответствующих, различным углам рассеяния недеформированного образца, по которым можно восстановить динамику угла рассеяния при нагреве, а соответственно и распределения напряжений в образце. Работа проводилась в режиме дифракции на просвет, в качестве образца использовался мозаичный монокристалл вольфрама. По измеренной динамике дифракционного пика получено распределение напряжений в образце, проведено сравнение с численными расчетами.

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

**Диагностика высокочастотных возмущений
азимутального магнитного поля в установке СМОЛА**

К. А. Ломов

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

Для экспериментальной проверки концепции винтового удержания плазмы [1] в конце 2017 года в ИЯФ СО РАН была запущена установка СМОЛА. В ходе первой серии экспериментов некоторые подсистемы установки отсутствовали или работали в промежуточной конфигурации. Тем не менее, были подтверждены основные предположения концепции [2]. К концу 2018 года установка была дооборудована, и началась вторая серия экспериментов.

В данной работе представлена диагностика высокочастотных возмущений магнитного поля, индуцируемых флуктуациями тока в плазме установки. Измерительная катушка, используемая в диагностике, должна была удовлетворять следующим требованиям: малые геометрические размеры (радиус плазмы в установке ≈ 5 см, ларморовский радиус ионов $\approx 0,5$ см [3]), низкая индуктивность и изоляция катушки от прямого воздействия плазмы, что позволяет проводить измерения внутри плазменного шнура.

В ходе работы был произведён теоретический расчёт чувствительности катушки в зависимости от её параметров [4], изготовлена 50-витковая катушка из медной проволоки (внешний диаметр 0,1 мм) с керамическим сердечником радиуса 1 мм и внешним кварцевым кожухом, сконструировано крепление катушки в центральной секции установки с возможностью дистанционно регулировать расстояние до оси установки. Для калибровки измерительной катушки использовалось импульсное магнитное поле, создаваемое катушками Гельмгольца.

В докладе представлены результаты измерения азимутальной компоненты магнитного поля в различных режимах работы установки и их анализ. Результаты работы будут использованы для создания многоканальной высокочастотной магнитной диагностики, позволяющей исследовать пространственную конфигурацию токов в плазме установки.

-
1. A. D. Beklemishev, Fusion Sci. Technol. 63 (1T) (2013) 355–357.
 2. A. V. Sudnikov et al., Plasma and Fusion Res. 14, 2402023 (2019).
 3. A. V. Sudnikov et al., Fusion Engineering and Design. 122, 85 (2017).
 4. M. J. Hole et al., Rev. Sci. Instrum. 80, 123507 (2009).

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

Модификация поверхности литиевой мишени при воздействии протонного пучка с энергией 2 МэВ

А. М. Михайлов

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

Для успешной практической реализации бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ) злокачественных опухолей необходим стабильный поток нейтронов. В ИЯФ СО РАН разработан ускорительный источник нейтронов для БНЗТ. Нейтроны генерируются в результате ядерной реакции протонов с литиевой мишенью. Ввиду необходимости учета многих, порой противоречивых факторов, выбор оптимальной конструкции мишени представляется неоднозначным, потому рассматривается множество различных вариантов. В данной работе исследовали литиевую мишень, представляющую собой тонкий слой лития, напылённый на медную, интенсивно охлаждаемую подложку.

Исследование поверхности мишени проведено в реальном времени с использованием дистанционного микроскопа и ССD-камеры. В процессе облучения мишени измеряли и контролировали выход нейтронов. Имплантация протонов в медную подложку литиевой мишени приводит к образованию блистеров, появление которых, как считается, ограничивает срок эксплуатации мишени. Флюенс протонов, набранный за две недели облучения мишени, значительно превысил порог образования блистеров, но деградации выхода нейтронов, препятствующей использованию мишени, не обнаружено. Обращено внимание на то, что в области максимальной плотности тока пучка протонов на поверхности медной подложки мишени блистеры отсутствовали, в то время как на периферии присутствовали. Вероятно, причиной этого является образование буферного слоя CuLi , который препятствует дальнейшему появлению блистеров.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук А. Н. Макаров

Исследование устройства формирования низкотемпературной плазмы на основе высоковольтного газового разряда

А. В. Николаев, А. К. Афанасьев
Самарский государственный университет

В современных процессах обработки поверхности подложек в микро- и нанoeлектронике существует острая необходимость в устройствах формирования широкоформатных потоков низкотемпературной плазмы. Наиболее подходящими для этих целей является генератор низкотемпературной плазмы, формирующий поток заряженных частиц во вне электродном пространстве. В основе работы данного генератора лежит высоковольтный газовый разряд. Условие возникновения данного разряда $\gamma Q \geq 1$, где γ – число электронов, выбиваемых одним ионом из катода (γ -процесс), Q – количество положительных ионов, образованных электроном на траектории своего движения за счет ударной ионизации атомов и молекул рабочего газа (α -процесс). К достоинствам данного генератора можно отнести: отсутствие эффекта загрузки и независимость параметров разряда от свойств материала обрабатываемой подложки. Однако в процессе работы газоразрядного устройства было обнаружено, что при рабочих напряжениях U в системе «катод – изолятор катода – фторопластовая прокладка – анод – сетка» возникают условия поверхностного пробоя, переходящего при напряжении 3 кВ в дуговой разряд. В результате происходит выгорание элементов катодной изоляции с образованием на поверхности пробоя углеродной пленки, что приводит к короткому замыканию системы анод-катод, и прибор необратимо выходит из строя.

Повышение диэлектрических свойств изоляции катода осуществлено путем выполнения в изоляторе катода п-образной проточки, заполняемой вакуумным маслом, с последующей ее герметизацией фторопластовой прокладкой в виде кольца и прокладками из вакуумной резины марки ИРП-1015.

Это позволяет значительно улучшить, стабилизировать диэлектрические свойства изолятора катода и обеспечить его работоспособность даже в случае пробоя.

Научный руководитель – канд. техн. наук С. В. Кричевский

**Зависимость тока разряда от потенциала мишени
для магнетронно-распылительной системы (МРС)
при различных давлениях в вакуумной камере**

А. Е. Остапченко

Новосибирский государственный университет

Нанесение углеродного покрытия на материалы с помощью МРС связано с особенностями процесса распыления аргоном графитовой мишени, транспортом частиц углерода от мишени к подложке и осаждением углерода на поверхности. Одна из основных проблем – исследование зависимости тока разряда МРС от напряжения на мишени при различных давлениях атмосферы в вакуумном пространстве.

Цель работы – исследование магнетронного разряда путем измерения вольтамперных характеристик при пониженном давлении.

Между графитовой мишенью диаметром 90 мм и металлической подложкой (Д16-Т) изменялся электрический потенциал от 490 до 660 В. Давление в камере изменялось от $2,6 \times 10^{-1}$ Па до 5,4 Па. Данные снимались при повышении и понижении электрического напряжения с целью обнаружения гистерезиса.

Установлены значения напряжения, при которых разряд возникал и исчезал. При малых токах в диапазоне от 0,18 А до 0,80 А зависимость от давления не наблюдается. От 0,80 А видны различия между показаниями при низких и высоких давлениях. При низких давлениях ток разряда намного меньше, но при высоких давлениях происходит скачок, возможно дугообразование, потому что ток растет быстро, а напряжение меняется медленно. Таким образом, для стабильной работы лучше выбирать низкое давление, оптимальный ток разряда в промежутке от 1 до 2,2 А.

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

Исследование факторов, влияющих на развитие частичного разряда в газовом пузырьке в трансформаторном масле

А. В. Ридель

Новосибирский государственный технический университет

Известно, что частичные разряды в трансформаторном масле являются одной из причин постепенного разрушения бумажно-масляной изоляции. Механизмы развития и протекания частичных разрядов в газовых включениях твердой изоляции ранее исследовались многими научными группами, в то время как механизмы протекания частичных разрядов (ЧР) в газовых полостях до сих пор малоизучены. Поэтому целью данной работы является исследование поведения газовых пузырьков в трансформаторном масле под действием переменного напряжения.

Для проведения исследований по данной тематике была разработана экспериментальная установка, состоящая из полностью экранированной комнаты, заземленной на собственный контур, высоковольтного трансформатора ТВО до 140 кВ, конденсатора связи СМАИВ 110/ $\sqrt{3}$, систем высокоскоростной оптической регистрации, электрической регистрации, оптикоэлектронной регистрации. На этой установке были исследованы:

1. деформация пузырька под действием электрического поля;
2. картина возникновения частичного разряда в свободно плавающем пузырьке;
3. измерен кажущийся заряд частичного разряда в пузырьке;
4. разрыв пузырька после развития частичного разряда в нем;
5. повторный частичный разряд между один из заряженных пузырьков и одним из электродов;
6. стримеры, развивающиеся с концов пузырька, при напряженностях поля, много меньше пороговых значений для пробоя трансформаторного масла;
7. частичные разряды в рядом всплывающих пузырьках;
8. влияние внешних источников ионизации на условия развития частичного разряда в свободно плавающем пузырьке.

В результате анализа полученных данных появилась концепция диагностики высоковольтного электрооборудования с использованием внешних источников ионизации. Это связано с низкой вероятностью развития частичного разряда в свободно плавающем пузырьке.

Научные руководители – д-р физ.-мат. наук, проф. С. М. Коробейников,
д-р техн. наук, проф. А. Г. Овсянников

Изучение состава примесей в плазме установки ГОЛ- NB

В. А. Силютина

Новосибирский государственный университет

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

На установке ГОЛ-NB в ИЯФ СО РАН ведутся работы по изучению физики многопробочного удержания плазмы. Стартовая конфигурация установки представляет собой открытую ловушку, состоящую из соленоида длиной 3,5 м, создающего магнитное поле, и двух расширителей. Низкотемпературная мишенная плазма создается при помощи коаксиального дугового источника. Одна из задач для диагностики – это изучение состава примесей в плазме установки ГОЛ-NB. Наличие примесей влияет на частоту столкновения и коэффициенты переноса, увеличиваются потери энергии на ионизацию и возбуждение ионов примесей и излучение.

Для определения состава примесей использовались спектрометр Thorlabs для измерения оптического спектра плазмы в видимом диапазоне и масс-спектрометр MKS113 -A0410008 для измерения массового состава в диапазоне масс от 1 до 100 а.е.м.

В докладе представлены спектр излучения в видимом диапазоне и масс-спектр плазмы установки ГОЛ-NB. Обсуждается эволюция спектра излучения во время плазменного разряда, а также влияние условий эксперимента на полученные оптический спектр и масс-спектр плазмы.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук В. В. Поступаев

Изучение генерации плазмы в мультипольной магнитной ловушке с помощью генератора плазмы с дуговым дифрагированным каналом

Ю. В. Таксанов

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

Для нагрева плазмы в крупных плазменных установках в настоящий момент используют инжекторы нейтральных атомов водорода. Требуемые энергии инъекции на подобных установках составляют порядка 1 МэВ. Известно, что при энергиях пучка свыше 100 кэВ эффективность инжекторов, использующих ускоренные положительные ионы, значительно снижается. Для получения пучков атомов с большими энергиями применяются инжекторы на основе отрицательных ионов водорода. В настоящий момент для перезарядки отрицательных ионов в атомы применяют газовые мишени. Использование плазменной перезарядной мишени позволит существенно повысить коэффициент нейтрализации пучка отрицательных ионов, что позволит значительно увеличить эффективность инжектора.

На стенде «плазменная мишень» в лаборатории 9-0 ИЯФ СО РАН проводятся работы по созданию плазменной перезарядной мишени на основе мультипольной магнитной ловушки. Ранее плазма в ловушке генерировалась при помощи дугового разряда с нагретыми катодами.

В данной работе плазма в мультипольной магнитной ловушке создавалась генератором плазмы с дуговым дифрагированным каналом. На основе известного генератора плазмы с дуговым дифрагированным каналом была разработана и изготовлена система генерации плазмы в ловушке. Система генерации плазмы была установлена и запущена на стенде. В ловушке получена плазма, проведены предварительные измерения параметров плазмы.

Научный руководитель – И. С. Емелев

**Исследование распределения ионов по продольным энергиям
в винтовой открытой ловушке СМОЛА**

М. С. Толкачев

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

Продольные потери частиц и энергии являются основной проблемой в магнитных ловушках открытого типа. Для её решения было предложено использовать метод винтового удержания, основанный на движении магнитных пробок в системе отчета плазмы, вращающейся в скрещенных винтовом магнитном и радиальном электрическом полях. Для экспериментальной проверки данного метода в ИЯФ СО РАН была создана установка СМОЛА. При изменении направления вращения линий магнитного поля данная установка может также работать в режиме ускорения потока плазмы. Условием многопробочного удержания является равенство длины свободного пробега иона и длины отдельной ячейки гофрировки. Для условий открытых термоядерных ловушек следующего поколения это условие требует поддержания аномально высокой столкновительности, что может быть получено за счёт раскачки в плазме двухпотоковой неустойчивости при встречной инжекции ускоренного потока ионов.

Эффективность ускорения можно оценить исходя из изменений функции распределения. Для определения распределения был создан сеточный ионный анализатор: проведена оценка параметров анализатора, оптимальных для данной задачи, проведено моделирование распределения потенциала внутри анализатора, созданы необходимые для его питания электросхемы, создан чертеж и проведена сборка готового изделия.

В докладе также будут представлены первые результаты эксперимента и их физическая интерпретация.

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

Формирование плазменной струи в установке СМОЛА с помощью магнитоизолированного разряда с горячим катодом

В. О. Устюжанин

Новосибирский государственный университет

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

Ключевой проблемой удержания плазмы в открытых ловушках является подавление потерь частиц и энергии с торцов. Для решения данной задачи была предложена концепция винтового удержания плазмы [1] с помощью создания движущихся в системе отсчёта плазмы магнитных пробок, движение которых относительно плазмы создаётся её вращением в скрещенных электрическом и винтовом магнитном полях. Для экспериментальной проверки данной концепции удержания в ИЯФ СО РАН создана установка СМОЛА (спиральная магнитная открытая ловушка).

Представленная работа посвящена исследованию процесса формирования плазменной струи в установке СМОЛА. Плазма в установке создаётся магнитоизолированным разрядом в осесимметричной плазменной пушке с горячим катодом из LaB_6 [2]. С помощью инфракрасного нагревателя катод нагревается до $T \sim 2000$ К, и испускаемые катодом электроны осуществляют ионизацию и генерацию плазмы с плотностью $n \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и $T \sim 5$ эВ на расстоянии 0,4 м от анода пушки. Для оптимизации транспортировки и удержания плазмы в ловушке важно контролировать и регулировать параметры плазменной струи. Для этого создан диагностический комплекс, включающий в себя измерители электрических параметров разряда, вакуума, а также управление системами питания всех мощных цепей.

В проделанной работе представлены зависимости параметров плазменной струи от начальных условий эксперимента и дана оценка влияния нагрева катода, количества подаваемого газа, амплитуды катодного напряжения и т.д. на свойства плазмы.

1. A. D. Beklemishev // Fusion Sci. Technol. 2013. V. 63. №1. P. 355.

2. T. Akhmetov et al. // Rev. Sci. Instr. 2016. V. 87. P. 106.

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

**Исследование характеристик пучка
ВЧ-источника отрицательных ионов с большой площадью эмиссии
при различных цезиевых условиях**

В. О. Ушмоткин

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

В настоящее время на установках для исследования термоядерного синтеза необходима инжекция высокоэнергетичных нейтралов с энергией более 0,5 МэВ. Основным способом получения нейтралов является перезарядка ускоренных ионов в атомы на газовой или плазменной мишени. При энергиях более 100 кэВ эффективность нейтрализации пучка положительных ионов стремится к нулю, поэтому выгоднее получать нейтралы из пучков отрицательных ионов вследствие низкой энергии сродства электрона к атому водорода. Для эффективного получения отрицательных ионов водорода используют поверхностно-плазменный механизм. Для его усиления на поверхность плазменного электрода, на котором образуются отрицательные ионы, подается цезий.

В данной работе описывается процедура ввода цезия в источник и методы его контроля, изучаются свойства пучка и эмиссионные характеристики источника. Также была изучена эволюция тока пучка источника при деградации цезиевого покрытия, после однократной подачи цезия в источник.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук О. З. Сотников

**Спектральный метод решения уравнения Больцмана
и его применение для описания взаимодействия газа и плазмы
в расширителе**

Э. А. Федоренков

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

Характерной особенностью ловушек открытого типа является расширитель, который снижает электронный транспорт тепла. Однако наличие в нём нейтрального газа может приводить к остыванию плазмы за счёт образования холодных электронов в результате ионизации. Нынешние модели плазмы в расширителе не могут описывать взаимодействие газа и плазмы. Для более точного описания необходимо учитывать различные элементарные процессы, такие как диссоциация молекулярного водорода и ионизация, а также упругие столкновения газа и плазмы.

В данной работе мы ограничимся описанием только упругих столкновений газа. Для этого решалось уравнение Больцмана методом расщепления по физическим процессам. Один шаг по времени для бесстолкновительного транспорта газа и второй шаг, описывающий столкновения газа. Для решения столкновительного шага был реализован спектральный метод Галёркина. Данный метод был проверен на тесте по эволюции к равновесной максвелловской функции распределения. Проверено выполнение законов сохранения полного числа частиц, импульса и энергии.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, доц. А. Д. Беклемишев

Диссипация кильватерной волны в радиально-ограниченной плазме

В. К. Худяков

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

В современных экспериментах по плазменному кильватерному ускорению нелинейные кильватерные волны, возбуждаемые релятивистскими электронными пучками (или лазерными импульсами), достигают плотности энергии электрического поля, сравнимой с плотностью энергии покоя электронов. Опрокидывание подобной волны в радиально-ограниченной плазме сопровождается преобразованием её начальной энергии в тепловую энергию электронов, кинетическую энергию радиального движения ионов и приводит к ионизации окружающего газа. Механизмы этих процессов и их временные масштабы определяют долю энергии начальной волны, передаваемую плазме, и временные ограничения на восстановление работы ускорителя.

На установке FACET ускорительной лаборатории SLAC проводились эксперименты по возбуждению сильно нелинейных кильватерных волн в однократно ионизованной литиевой плазме релятивистским электронным пучком. В экспериментах наблюдалась динамика радиального профиля плазмы на временах масштаба 1 нс после опрокидывания волны.

Целью данной работы являлось выявление наиболее существенных процессов, определяющих передачу энергии исходной волны в плазму, и количественное сравнение эволюции плазменной границы в численном и реальном эксперименте. Для этого производилось моделирование динамики плазмы программой LCODE с дополнительным учётом элементарных процессов, таких как парные кулоновские столкновения, ионизация нейтральных атомов ионным ударом и многоступенчатая ионизация электронным ударом.

Результаты моделирования показали хорошее согласие с экспериментальными данными и существенное влияние ионизационных процессов на динамику плазменной границы.

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

**Динамика деформации вольфрамовой пластинки,
подвергающейся импульсному тепловому воздействию**

Д. Е. Черепанов

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

Эрозия вольфрамовых диверторных пластин токамака ИТЕР, вызванная значительными импульсными тепловыми нагрузками, является одной из ключевых проблем для этого международного проекта. Быстрый нагрев пластины провоцирует появление в поверхностном слое металла напряжений, которые вызывают деформацию и растрескивание поверхности во время охлаждения. При экспериментальном моделировании воздействия импульсных тепловых нагрузок на вольфрамовые образцы на установке БЕТА был обнаружен остаточный изгиб, который коррелирует с ожидаемыми остаточными напряжениями. Для характеристики напряжений была разработана бесконтактная, неразрушающая система диагностики, позволяющая наблюдать за динамикой деформаций исследуемой вольфрамовой пластинки.

Принцип работы системы основан на наблюдении за изменением положения фокуса лазерного луча, отраженного от полированной поверхности вольфрамовой пластинки, тыльной по отношению к нагреваемой. В качестве параметра, характеризующего деформацию, рассматривается радиус кривизны поверхности исследуемой пластинки. Лицевая сторона пластины нагревается электронным пучком с длительностью 0,3–0,8 мс, имеющим гауссов профиль с характерным диаметром 20 мм и создающим поток тепла $10\text{--}40 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-0,5}$. При нагреве изменяется положение фокусировки лазерного луча, однозначно связанное с кривизной поверхности.

Результаты экспериментов показывают, что остаточная кривизна поверхности вольфрамовой пластины после воздействия на нее электронным пучком увеличивается после каждого акта облучения, что говорит о росте остаточных напряжений. В настоящее время проводятся эксперименты с целью исследования роли типа вольфрама, толщины образцов, предварительной обработки облучаемой поверхности и интенсивности теплового воздействия на изменение кривизны поверхности.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, доц. Л. Н. Вячеславов

**Электронно-пучковая диагностика
ван-дер-ваальсовых газовых кластеров**

С. Т. Чиненов

Новосибирский государственный университет

Высоковольтный электронный пучок (ВЭП) с энергией порядка десятков кэВ широко используется для анализа сверхзвуковых потоков разреженных газов. В то же время в традиционной масс-спектрометрии (МС) используются электронные пучки с энергией порядка десятков эВ. Отбор проб из сверхзвуковых струй в МС производится с помощью молекулярно-пучковой системы. В кластированных потоках возникают новые проблемы использования традиционной МС [1, 2], обусловленные деструкцией кластеров. С другой стороны, необходимо знать, какие соединения возможны и какие из них наиболее устойчивы. Целью настоящей работы являлось исследование возможности объединения ВЭП и МС для изучения кластированных газовых потоков.

Работа выполнена на экспериментальной установке ЛЭМПУС-2 ОПФ НГУ. Ассоциаты образовывались при расширении сверхзвуковой газовой струи в вакуум. Использованы два метода масс-спектрометрического анализа: с ионизацией частиц в традиционной конфигурации МС, и при ионизации струи с помощью ВЭП с транспортом ионов через молекулярно-пучковую систему до детектора масс-спектрометра. Для этого разработан и создан специальный рабочий участок

Проведены эксперименты по оптимизации и проверке условий транспортировки ионов от ВЭП до детектора масс-спектрометра. Создана новая методика визуализации сверхзвуковых потоков в условиях вакуума. Изучены масс-спектры в потоках ряда газов при формировании как больших, так и малых кластеров. Сопоставлены результаты, получаемые двумя принципиально разными способами ионизации исследуемых потоков. Показано, что при использовании ВЭП регистрируется более широкий диапазон масс частиц. Изучено влияния ВЭП на протекание реакций в газовых смесях. Сформулированы выводы по применимости электронно-пучковой диагностики при масс-спектрометрии кластеров.

1. Almazov V.B., Andreeva A.D., Gaal L.N., Pomosov T.V. // Scientific instrument making. 2012. V. 22. № 1. P. 107-112.

2. Bonhommeau D., Halberstadt N., Viel A. // The Journal of Chemical Physics. May 2006, V. 124. Issue 18. P. 184-188.

Научный руководитель – канд. техн. наук А. С. Яскин

**Диагностика для измерения турбулентных полей в плазме
во время протекания РЭП на установке ГОЛ-3Т**

Е. А. Шишкин

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

Вопросы, связанные с генерацией электромагнитного излучения в плазме, нашли применение в таких областях, как астрофизика и термоядерный синтез. С целью изучения вопросов, связанных с генерацией терагерцового излучения из плазмы, в ИЯФ СО РАН была создана установка ГОЛ-3Т. В ней в результате инжекции релятивистского электронного пучка в плазму возбуждаются турбулентные электрические поля, которые преобразуются в плазме в терагерцовое излучение.

Целью данной работы является измерение усредненной амплитуды напряженности электрического поля в плазменной турбулентности с максимально возможным пространственным и временным разрешением. Поставленную задачу можно выполнить, привлекая методы спектроскопии. В нашем случае наиболее интенсивным излучением из плазмы является линия серии Бальмера H_α (соответствует переходу электрона в атоме водорода с главным квантовым числом $n = 3$ на $n = 2$), поэтому в данной работе используется именно эта спектральная линия. Оценка усредненной амплитуды электрического поля производится с учетом линейного эффекта Штарка, который влияет на ширину линии.

Излучение из плазмы, направляемое с помощью светосильного объектива на входную щель спектрометра ДФС-24, разлагается по спектру спектрометром и направляется с помощью многоканального световодного коллектора на ФЭУ, который передает усиленный сигнал на АЦП.

В данной работе была собрана и налажена система регистрации излучения из плазмы, позволяющая с высоким временным разрешением, ~ 100 нс, измерять профиль спектральной линии H_α , а также написан модельный численный код, позволяющий по наблюдаемым профилям линии H_α оценить усредненное значение амплитуды электрических полей вдоль хорды наблюдения плазменного шнура.

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

Электрокинетические характеристики гелиевого пучкового разряда в неустойчивом режиме горения

Е. В. Штода

Санкт-Петербургский горный университет

Прогресс в создании нового поколения плазменных приборов будет определяться успехами в исследованиях анизотропной плазмы с нелокальной природой функции распределения электронов по скоростям (ФРЭС) [1]. В такой плазме удастся независимо управлять группами электронов разных энергий, ответственных за различные плазменные процессы [2].

Примером плазмы с нелокальной ФРЭС служит короткий (по отношению к длине энергетической релаксации ФРЭС) низковольтный пучковый разряд (НПР). Известно, что НПР неустойчив к возбуждению различного типа колебаний [3], что негативно сказывается на работе приборов, использующих пучковую плазму.

В предлагаемой работе исследован неустойчивый режим горения гелиевого НПР в рабочих условиях плазменного стабилизатора тока и напряжения. Измерено пространственное распределение параметров, восстановлена полная ФРЭС, построены полярные диаграммы направленного движения электронов разных энергий, исследованы длины релаксации импульса и энергии электронов в плазме.

Показано, что ограничение плазменного канала экраном в форме конуса, с углом при основании, обеспечивающим свободную радиальную диффузию быстрых электронов, позволяет в четыре раза увеличить длину энергетической релаксации ФРЭС и в два раза увеличить плотность рабочего тока стабилизатора.

Разработан и реализован универсальный метод подавления плазменных неустойчивостей, регистрируемых в диапазоне давлений 1-10 тор, обеспечивающий высокий уровень стабильности рабочих параметров плазменных стабилизаторов тока и напряжения вплоть до плотности разрядного тока 5 А/см^2 .

1. V.I. Demidov, C. A. DeJoseph, Jr., and A. A. Kudryavtsev, Phys. Rev. Lett. 95, 215002 (2005).

2. Мустафаев А. С., Грабовский А. Ю. Труды XXXIX Международной конференции по физике плазмы и УТС. Звенигород, 6-10 февраля 2012 г. Т. 1. С. 150.

3. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1992. 536 с.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук А. Ю. Грабовский

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Асмедьянов Н. Р.....	58	Мередова М. Б.....	16
Астамиров С. С.....	59	Меркулова Е. А.....	17
Астанина М. С.....	31	Микулянец Е. И.....	18
Афанасьев А. К.....	67	Михайлов А. М.....	66
Афанасьев Л. В.....	5	Мищенко Н. А.....	19
Белослудцев В. В.....	32	Незавитин Д. П.....	20
Бикчурина М. И.....	60	Немыкина А. А.....	46
Бобров М. С.....	33, 34, 40	Николаев А. В.....	67
Борыняк К. И.....	33	Ничик М. Ю.....	47
Борыняк К. И.....	34	Остапченко А. Е.....	68
Борыняк К. И.....	40	Очередыко А. И.....	48
Брюханов И. Д.....	29	Питеримова М. В.....	21
Владимиров В. Ю.....	35	Протасов С. К.....	49
Галеев А. Е.....	6	Ридель А. В.....	69
Гафурова П. С.....	7	Родионов А. А.....	50
Глинский В. В.....	61	Роньшин Ф. В.....	37
Гордиенко М. Р.....	9, 11	Рябов М. Н.....	12
Давыдов Н. В.....	62	Садовский И. А.....	22
Дауэнгауэр Е. И.....	36	Сердюков В. С.....	44
Дементьев Ю. А.....	37	Сибиряков Н. Е.....	51
Дубровин К. А.....	8	Силютина В. А.....	70
Душанбаев Т. А.....	38	Степанов К. А.....	52
Езендеева Д. П.....	9, 11	Суслов Д. А.....	23
Ефимов М. А.....	63	Таксанов Ю. В.....	71
Ивашенко В. А.....	10	Тамбовцев А. С.....	24
Казанцев С. Р.....	64	Ткаченко Е. М.....	53
Какаулин С. В.....	9, 11	Толкачев М. С.....	72
Кизько И. П.....	39	Туманов В. В.....	54
Козюлин Н. Н.....	33	Устюжанин В. О.....	73
Козюлин Н. Н.....	34	Ушмоткин В. О.....	74
Козюлин Н. Н.....	40	Федоренков Э. А.....	75
Коротков М. С.....	12	Худяков В. К.....	76
Кочкин Д. Ю.....	41	Чашников Е. А.....	25
Кротченко Ю. А.....	42	Черепанов Д. Е.....	77
Кутепова А. И.....	13	Чиненов С. Т.....	78
Литвинцев А. С.....	14	Шаймуратов А. А.....	55
Литвинцева А. А.....	15	Шатекова А. И.....	56
Локтюшин О. Ю.....	29	Шишкин Е. А.....	79
Ломов К. А.....	65	Шкредов Т. Ю.....	27
Любимов Д. Н.....	43	Штода Е. В.....	80
Малахов И. П.....	44	Эбель Р. Е.....	30
Махин А. А.....	45	Янко П. Е.....	28

СОДЕРЖАНИЕ

АЭРОФИЗИКА	5
Афанасьев Л. В.	5
Галеев А. Е.	6
Гафурова П. С.	7
Дубровин К. А.	8
Езендеева Д. П., Какаулин С. В., Гордиенко М. Р.	9
Ивашенко В. А.	10
Какаулин С. В., Езендеева Д. П., Гордиенко М. Р.	11
Коротков М. С., Рябов М. Н.	12
Кутепова А. И.	13
Литвинцев А. С.	14
Литвинцева А. А.	15
Мередова М. Б.	16
Меркулова Е. А.	17
Микулянец Е. И.	18
Мищенко Н. А.	19
Незавитин Д. П.	20
Питеримова М. В.	21
Садовский И. А.	22
Суслов Д. А.	23
Тамбовцев А. С.	24
Чашников Е. А.	25
Шипуль С. А.	26
Шкредов Т. Ю.	27
Янко П. Е.	28
Брюханов И. Д., Локтюшин О. Ю.	29
Эбель Р. Е.	30
ТЕПЛОФИЗИКА	31
Астанина М. С.	31
Белослудцев В. В.	32
Бобров М. С., Козюлин Н. Н., Борыняк К. И.	33
Борыняк К. И., Бобров М. С., Козюлин Н. Н.	34
Владимиров В. Ю.	35
Дауэнгауэр Е. И.	36
Дементьев Ю. А., Роньшин Ф. В.	37
Душанбаев Т. А.	38
Кизько И. П.	39
Козюлин Н. Н., Бобров М. С., Борыняк К. И.	40
Кочкин Д. Ю.	41
Кротченко Ю. А.	42

Любимов Д. Н.	43
Малахов И. П., Сердюков В. С.	44
Махин А. А.	45
Немыкина А. А.	46
Ничик М. Ю.	47
Очередько А. И.	48
Протасов С. К.	49
Родионов А. А.	50
Сибиряков Н. Е.	51
Степанов К. А.	52
Ткаченко Е. М.	53
Туманов В. В.	54
Шаймуратов А. А.	55
Шатекова А. И.	56
Шиплюк М. А.	57
ФИЗИКА ПЛАЗМЫ	58
Асмедьянов Н. Р.	58
Астамиров С. С.	59
Бикчурина М. И.	60
Глинский В. В.	61
Давыдов Н. В.	62
Ефимов М. А.	63
Казанцев С. Р.	64
Ломов К. А.	65
Михайлов А. М.	66
Николаев А. В., Афанасьев А. К.	67
Остапченко А. Е.	68
Ридель А. В.	69
Силютин В. А.	70
Таксанов Ю. В.	71
Толкачев М. С.	72
Устюжанин В. О.	73
Ушмоткин В. О.	74
Федоренков Э. А.	75
Худяков В. К.	76
Черепанов Д. Е.	77
Чиненов С. Т.	78
Шишкин Е. А.	79
Штода Е. В.	80

Научное издание

МНСК–2019

Материалы
57-й Международной научной студенческой конференции

ФИЗИКА СПЛОШНЫХ СРЕД

Материалы
57-й Международной научной студенческой конференции

14–19 апреля 2019 г.

Корректор *С. В. Исакова*
Верстка *О. А.Тенекеджи*
Обложка *Е. В. Неклюдовой*

Подписано в печать 2.04.2019 г.
Формат 60x84/16. Уч.-изд. л. 5,25 . Усл. печ. л. 4,9.
Тираж 59 экз. Заказ № 36.
Издательско-полиграфический центр НГУ.
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2.

Секция
ФИЗИКА
СПЛОШНЫХ СРЕД

ISBN 978-5-4437-0864-5



N* Новосибирский
государственный
университет
***НАСТОЯЩАЯ НАУКА**

