

**НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

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

**МНСК–2017**

**17–20 апреля 2017 г.**

**ФИЗИКА СПЛОШНЫХ СРЕД**

**Новосибирск  
2017**

УДК 53  
ББК 22.3я431

Материалы 55-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2017: Физика сплошных сред / Новосиб. гос. ун-т. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2017. – 110 с.

ISBN 978-5-4437-0621-4

**Научный руководитель секции –**

д-р физ.-мат. наук, проф., акад. РАН Ребров А. К.

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

Ответственный секретарь секции – Клыкова М. А.

**Экспертный совет секции**

д-р физ.-мат. наук Миронов С. Г.

д-р физ.-мат. наук Чернов А. А.

канд. физ.-мат. наук Верещагин А. С.

канд. физ.-мат. наук Приходько В. В.

канд. физ.-мат. наук Шошин А. А.

ISBN 978-5-4437-0621-4

© Новосибирский государственный  
университет, 2017

**NOVOSIBIRSK STATE UNIVERSITY  
SIBERIAN BRANCH OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES**

**PROCEEDINGS  
OF THE 55th INTERNATIONAL STUDENTS  
SCIENTIFIC CONFERENCE**

**ISSC-2017**

**April, 17–20, 2017**

**PHYSICS OF CONTINUOUS MEDIA**

**Novosibirsk, Russian Federation  
2017**

Proceedings of the 55<sup>th</sup> International Students Scientific Conference. Physics of continuous media / Novosibirsk State University. Novosibirsk, Russian Federation. 2017. 110 pp.

ISBN 978-5-4437-0621-4

**Section scientific supervisor** – Dr. Phys.-Math. Sci., Acad. RAS Rebrov A. K.

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

**Responsible secretary** – Klykova M. A.

**Section scientific committee**

Dr. Phys.-Math. Sci. Mironov S. G.

Dr. Phys.-Math. Sci. Chernov A. A.

Cand. Phys.-Math. Sci. Vereshagin A. S.

Cand. Phys.-Math. Sci. Prikhod'ko V. V.

Cand. Phys.-Math. Sci. Shoshin A. A.

# ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

УДК 533.9.072

## **Источник ионов водорода для контроля качества углеродной пленки анализатора атомов перезарядки**

Аникеева К. И.

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

В настоящее время на установках с магнитным удержанием высокотемпературной плазмы применяются ряд диагностик по измерению потоков нейтральных частиц, регистрации различных популяций частиц. В этих диагностиках используются анализаторы атомов перезарядки. Такого рода диагностики имеют ряд элементов, которые нуждаются в строгом контроле качества и соответствующей калибровке. От качества регистрирующих элементов в диагностическом оборудовании зависит интерпретация данных, полученных в экспериментах. Представленный в докладе источник ионов водорода или гелия предназначен для контроля качества углеродной пленки анализатора атомов перезарядки и является важным элементом диагностики.

В докладе приведены расчеты элементов источника ионов водорода или гелия для комплекса контроля качества обдирочной пленки анализаторов атомов перезарядки. Проанализированы варианты источника ионов с холодным катодом на основе фотоэмиссии и тлеющего разряда. Источник должен работать без доступа в течение четырех лет, поэтому значительное внимание было уделено выбору типа катода и оптимизации рабочих параметров.

В настоящее время выполняются экспериментальные испытания источника для контроля качества обдирочной пленки анализатора с током пучка до 100 мкА. В докладе представлены результаты экспериментов с обсуждениями выбора оптимальных режимов работы источника.

Научный руководитель: д-р физ.-мат. наук Давыденко В. И.

## Генерация терагерцового излучения во встречных кильватерных волнах

Волчок Е. П.

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

Терагерцовое излучение представляет большой интерес для многих областей науки и техники. Оно позволяет достичь рекордных значений чувствительности и разрешающей способности в спектроскопии, может быть полезно в медицине, системах безопасности. Несмотря на то, что на данный момент наблюдается большой прогресс в создании источников широкополосного терагерцового излучения, генерация мощных терагерцовых импульсов с узкой спектральной линией по-прежнему остаётся проблемой. Поэтому использование плазмы как нелинейной среды для получения узкополосного излучения является перспективной задачей. Плазма способна поддерживать долгоживущие колебания электрического поля с экстремально высокой амплитудой, позволяя эффективно генерировать длинные импульсы излучения на гармониках плазменной частоты и перестраивать частоту излучения за счёт изменения плотности плазмы.

Данная работа посвящена теоретическому изучению возможности генерации мощного узкополосного терагерцового излучения за счёт нелинейного взаимодействия встречных кильватерных волн, возбуждаемых в плазме короткими лазерными импульсами. Две встречные потенциальные волны, колеблющиеся с одинаковой частотой, при слиянии порождают сверхсветовой сателлит тока, который в ограниченной плазме может стать источником косоугольного излучения на удвоенной частоте. Если эти волны возбуждаются лазерными драйверами, продольное волновое число результирующей волны оказывается равным нулю, и излучение должно быть направлено строго поперёк плазменного канала. Однако генерация излучения в такой схеме возможна лишь в случае несовпадения поперечной структуры взаимодействующих волн.

В настоящей работе построена аналитическая теория данного явления и исследованы наиболее эффективные способы перекрытия встречных кильватерных волн, оставляемых в плазме дифрагирующими лазерными драйверами. Показано, что с помощью предложенного механизма можно генерировать излучение с напряжённостью электрического поля до 10 МВ/см и мощностью 1 ГВт с эффективностью выше  $10^{-4}$ .

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

**Анализатор атомов перезарядки для диагностики плазмы**

Герман М. О.

Новосибирский государственный университет

Эффективность установок, предназначенных для нагрева и удержания горячей плазмы, во многом характеризуется функцией распределения быстрых ионов, а также ионной температурой. С целью измерения данных параметров проводится анализ спектра энергий атомов перезарядки.

Целью работы является разработка анализатора нейтралов перезарядки для регистрации энергетического спектра быстрых ионов водорода и дейтерия в диапазоне до 40 кэВ. В разрабатываемом анализаторе выходящие из плазмы нейтралы перезарядки обдираются на твердотельной углеродной фольге, разделяются по энергиям в магнитном поле, создаваемом постоянным магнитом, и регистрируются набором вторично-эмиссионных умножителей.

Использование углеродной фольги для обдирки позволяет уменьшить создаваемую анализатором газовую нагрузку и проводить измерения низкоэнергетической части спектра с помощью подачи напряжения смещения на мишень. В то же время при этом при прохождении через обдирочную фольгу ионы приобретают энергетический и угловой разброс, который необходимо учитывать при разработке анализатора и определении его энергетического разрешения.

В результате работы смоделирована конструкция анализатора, произведен расчет электромагнитных полей и траекторий движения частиц для заданного диапазона энергий. Полученные данные использованы для подбора оптимальной конфигурации полей и расположения рабочих элементов анализатора и определения технических характеристик анализатора: пространственной дисперсии и энергетического разрешения. Предварительные данные свидетельствуют о недостаточно эффективной вертикальной фокусировке частиц, в связи с чем ведется работа по подбору оптимальной конфигурации полей электростатической линзы анализатора.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, Полосаткин С. В.

**Исследование возбуждения плазменной кильватерной волны большой амплитуды последовательностью коротких электронных сгустков**

Горн А. А.

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

В Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера планируется проведение эксперимента, посвященного тематике кильватерного ускорения – одного из наиболее активно изучаемых в настоящее время методов ускорения заряженных частиц. В рамках проекта будет исследовано возбуждение плазменной кильватерной волны большой амплитуды эквидистантной последовательностью коротких электронных сгустков. Этот режим взаимодействия сейчас является одним из самых актуальных для плазменных методов ускорения, поскольку масштабируется на будущие плазменные ускорители с протонными драйверами высокой энергии. Предлагаемый эксперимент выбивается из общего строя работ в данной области. Общемировая тенденция состоит в стремлении работать с плазмой высокой плотности,  $10^{15} \text{ см}^{-3}$  и выше, поскольку достижимые в плазме поля растут с увеличением ее плотности. Платой за высокие поля оказывается сложность экспериментальной диагностики, поскольку с увеличением плотности плазмы пространственные масштабы исследуемых процессов сокращаются до десятков микрон, а временные – до десятков фемтосекунд. В предлагаемом эксперименте плотность плазмы будет низкой,  $10^{11} \text{ см}^{-3}$ . Соответственно, возбуждаемые поля будут далеко не рекордными. Зато относительно низкая частота процессов (3 ГГц) и большая длина плазменной волны (10 см) позволят детально исследовать процесс возбуждения волны в самой интересной области безразмерных параметров системы, соответствующей кильватерному ускорению с протонными драйверами. Будет изучено нарастание плазменной волны в разных поперечных сечениях, что невозможно в плазме высокой плотности.

Данная работа посвящена теоретическому исследованию резонансного возбуждения кильватерной волны в условиях эксперимента, а именно моделированию задачи с помощью программы LCODE, поиску оптимальной конфигурации как диагностических элементов для измерения полей в плазме, так и плазменной секции в целом, а также изучению влияния неоднородностей плотности плазмы на резонансное возбуждение плазменной волны.

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

**Изучение влияния мишенной плазмы  
на фокусировку электронного пучка на ЛИУ**

Данилов В. В.

Новосибирский государственный университет

Данная работа посвящена исследованию зарядовой нейтрализации электронного пучка линейного индукционного ускорителя (ЛИУ) мишенной плазмой. В работе произведено теоретическое исследование эффекта нейтрализации и перефокусировки электронного пучка при одноимпульсном режиме работы. Проведено численное моделирование PIC-кодом KARAT процесса распространения лёгких ( $H^+$ ) и тяжёлых ( $Ta^{+3}$ ) ионов мишенной плазмы навстречу электронам пучка и динамики дефокусировки пучка. Моделирование показало, что размер пучка на мишени достигает своих максимальных значений 10-12 мм за время 20 нс при эмиссии лёгких ионов и 90 нс при эмиссии тяжёлых ионов.

В работе представлен и обоснован проект диагностики размеров пучка на мишени по тормозному излучению с мишени. На основании результатов численного моделирования к диагностике предъявлены следующие требования: максимальный размер наблюдаемого рентгеновского источника – 15 мм, пространственное разрешение – не более нескольких миллиметров, временное разрешение < 20 нс. Предлагаемая диагностика состоит из рентгеновской камеры-обскура и сегментированного сцинтилляторного детектора. При помощи численного моделирования средствами GEANT4 произведена оптимизация параметров элементов диагностики. Приведены результаты экспериментов на ЛИУ с использованием макета диагностики. В экспериментах зарегистрирована динамическая дефокусировка пучка ЛИУ.

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

## **Электронно-лучевая спектрометрия кластированных сверхзвуковых струй Аргона**

Дубровин К. А.

Новосибирский государственный университет

В процессе изучения сверхзвуковых струй аргона за сверхзвуковыми соплами при истечении в разреженное пространство в условиях развитой конденсации была обнаружена область вторичного потока нетрадиционной формы, которую авторы назвали «следом» [1]. Было показано, что причиной такого течения является формирование кластеров аргона большого размера. Однако механизмы, вызывающие свечение «следа» при возбуждении нейтральной газовой струи высоковольтным электронным пучком, требуют специальных исследований. В данной работе поставлена задача отладки и проведения спектральных измерений в сверхзвуковых струях газов с целью подтверждения кластерного механизма формирования такого «следа» в других конденсирующихся газах, а также определения процессов возбуждения его свечения.

Работа выполнена на вакуумных экспериментальных газодинамических стендах отдела прикладной физики физического факультета НГУ «ЛЭМПУС-2» и «Плазмохимический модуль» в потоках аргона, диоксида углерода, азота, при варьировании состава фонового газа (Ar, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>).

В ходе работы отлажена система регистрации излучения, возбуждённого электронным пучком с энергией свыше 15 кэВ, на различных участках первичной струи («бочки») и «следа», выполнена серия измерений в видимом и УФ-диапазоне с помощью спектрометра Ocean Optics HR4000. Проведён сравнительный анализ спектров излучения струй при различных условиях истечения, а также в различных сочетаниях газа, истекающего из сопла, и разреженного фонового газа в окружающей струю и «след» пространстве. Установлено влияние состава фонового газа на интенсивность и спектральный состав излучения. Обнаружено, что присутствие кислорода в фоновом газе практически полностью гасит излучение следа. Предложена эмпирическая модель процессов энергообмена, инициирующего свечение «следа».

---

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, доцент Зарвин А. Е.

## **Исследование плазменной струи установки СМОЛА методами пассивной спектроскопии**

Инжеваткина А. А.

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

Для экспериментальной проверки концепции винтового удержания [1] в ИЯФ СО РАН создаётся установка СМОЛА, основной задачей которой является управление течением плазменной струи в винтовом магнитном поле [2]. Для исследования плазменного столба предполагается использовать спектральную диагностику с пространственным разрешением. Благодаря такому методу по интенсивности, форме, уширению или сдвигу спектральных линий можно определить скорости частиц, находящихся в плазме, электрические и магнитные поля, форму плазмы, основываясь на эффектах Доплера, Штарка, Зеемана и др.

В ходе данной работы создан спектрометр с пространственным разрешением, позволяющий получать сведения о различии спектров, излучаемых разными областями плазмы, что необходимо для определения локализации и пространственного распределения изучаемых параметров. Характерная ширина диагностируемой плазменной струи составляет ~10 см, расчетная дистанция съёмки ~80 см. Поскольку диагностика предназначена для исследования нестационарных плазменных процессов, в качестве регистрирующей системы использована высокоскоростная ПЗС-камера.

Параметры оптической системы спектрометра были подобраны таким образом, чтобы при заданном фокусном расстоянии объектива и расстоянии от него до источника излучения линза фокусировала изображение на ПЗС-матрице. В итоге были достигнуты оптимальные параметры такой системы: дисперсия, пространственное разрешение и разрешение изображения.

Также разработан математический аппарат для обработки изображений плазменной струи и восстановления профиля свечения плазмы.

Предполагается, что в дальнейшем такой метод будет использован для определения радиального распределения интенсивности свечения спектральной линии однократно ионизированного кислорода и других примесей в плазме.

- 
1. Beklemishev A. D., Fusion Sci. Technol, 63 (No. 1T), 355 (2013).
  2. Postupae V. V. et al., Fusion Eng. Design, 106, 29 (May 2016).

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

**Изучение влияния пространственного заряда на параметры пучка отрицательных ионов водорода, инжектируемого в ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией**

Колесников Я. А.

Новосибирский государственный университет

Для развития методики бор-нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей в Институте ядерной физики СО РАН создан источник эпителиловых нейтронов на основе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией и литиевой мишени. В ускорителе получают стационарный протонный пучок с энергией 2 МэВ и током до 5 мА. При сбросе протонов на литиевую мишень осуществляют генерацию нейтронов и проводят *in vitro* и *in vivo* исследования.

Для изучения инжекции пучка отрицательных ионов водорода в ускоритель на входе в ускоритель дополнительно установлен проволочный сканер OWS-30 (D-Pace, Канада), позволяющий измерять полный ток, положение и профиль пучка ионов. Для подавления вторичной эмиссии электронов с целью корректного измерения тока перед и после сканера вдоль оси транспортировки пучка установлены металлические кольца под отрицательным потенциалом 300 В. В результате проведенных измерений впервые установлено, что профиль ионного пучка заметно отличается от гауссова распределения, предполагаемого при проведении расчетов. Также впервые обнаружено и изучено действие пространственного заряда на транспортировку пучка отрицательных ионов водорода при изменении вакуумных условий в канале транспортировки. В работе представлены и обсуждены результаты экспериментальных исследований, приведены оценки по влиянию действия пространственного заряда на параметры пучка и даны рекомендации по выбору режима работы для увеличения тока протонного пучка в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией.

Научный руководитель – канд. тех. наук Сорокин И. Н.

**Измерение параметров плазменной струи в установке ГОЛ  
с помощью высокоразрешающего спектрометра**

Константинов С. Е.

Новосибирский государственный университет

В работе проводится измерение концентрации электронов и температуры ионов в низкотемпературной плазме на установке ГОЛ методом спектроскопии линии  $H_\alpha$ .

Для проведения измерений используется спектрометр ДФС-24 для выделения линии  $H_\alpha$  из спектра излучения плазмы. Освещение входной щели спектрометра выбрано таким образом, чтобы получить радиальное распределение интенсивности, которое фиксируется на выходе спектрометра ПЗС-матрицей. По спектральному распределению интенсивности линии рассчитываются искомые параметры.

С целью автоматизации процесса обработки данных написана программа, позволяющая по фотографии спектральной линии определить её экспериментальный профиль с учетом уширительного влияния эффекта Доплера и эффекта Штарка и сопоставить его теоретическому профилю с известными параметрами, тем самым получив параметры плазмы.

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

**Исследование осцилляций плазмы в режимах с ЭЦР нагревом в ГДЛ**

Коншин З. Э.

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

Одним из типов установок для удержания и нагрева плазмы является пробкотрон. Пробкотрон – это магнитная ловушка, в которой плазма удерживается в центральной области со слабым и почти однородным магнитным полем, заключенной между областями с сильным магнитным полем – «пробками». Примером пробкотрона является Газодинамическая ловушка (ГДЛ) в ИЯФ СО РАН. В ГДЛ удерживается двухкомпонентная плазма. Одна из компонент – это мишенная плазма с максвелловским распределением. Мишенная плазма удерживается в газодинамическом режиме – длина свободного пробега частиц мишенной плазмы много меньше длины установки, а продольные потери через пробки аналогичны истечению газа из сосуда с малым отверстием. Вторая компонента – это быстрые ионы, возникающие в результате ионизации инжектируемых в установку нейтральных атомов. Инжекция атомов происходит для нагрева мишенной компоненты. Быстрые ионы удерживаются за счет сохранения магнитного момента в классическом пробкотроне. Дополнительный нагрев осуществляется СВЧ излучением на частоте электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР).

Вдоль магнитного поля плазма ограничивается плазмодриемниками, расположенными за пробками. Плазмодриемник представляет собой набор концентрических дисков. Для поиска наилучших параметров плазмы, на ГДЛ была проведена серия экспериментов с разными вариантами приложения потенциала на эти диски. В данной работе с помощью магнитной диагностики ГДЛ были изучены колебания магнитного поля, возникавшие в этих экспериментах. Оптимальный режим достигался при запитывании трех внутренних дисков потенциалом не менее 500 В. Для меньших потенциалов наблюдалось быстрое разрушение плазмы. Было обнаружено, что плазма во время разрушения шнура движется в одном и том же направлении, что говорит о несимметричности установки. При больших потенциалах амплитуды колебаний во время СВЧ нагрева были малы, а распад плазмы после отключения нагрева происходил медленнее.

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

**Увеличение плотности плазмы геликонного источника**

Кузьмин Е. И.

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

Исследования по взаимодействию плазмы с различными материалами, которые могут быть использованы в качестве стенок термоядерных реакторов, представляет большой интерес. Для этих экспериментов необходимы плазменные источники с достаточно высокой плотностью потока плазмы.

Одной из наиболее перспективных установок, отвечающих данным требованиям, является высокочастотный (ВЧ) геликонный источник. К достоинствам установок такого типа относятся: высокая эффективность разряда, что делает возможным создание плазмы высокой плотности, возможность выхода на стационарный режим. В геликонном разряде генерация плазмы происходит в околоосевой области плазменной камеры, что значительно снижает потери плазмы и тепловые нагрузки на стенки камеры.

Геликонные установки являются безэлектродными источниками, в которых ионизация газа происходит за счет подачи на антенну ВЧ-мощности. В ряде работ подробно изучено влияние ВЧ-мощности на плазму в диапазоне 1÷5 кВт, в частности показан рост плотности плазмы при увеличении подводимой ВЧ-мощности. Однако большой интерес представляет поведение геликонной плазмы при более высоких мощностях. В данной работе изучено влияние подводимой ВЧ-мощности на характеристики плазмы геликонного источника в диапазоне 5÷25 кВт, а также приведены результаты измерения радиального распределения плотности и электронной температуры плазмы, генерируемой геликонным разрядом.

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

**Множественная филаментация излучения в воздухе.  
Узкие и широкие пучки**

Мельникова А. И., Минина О. В., Кучинская О. И.

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Филаментация является ярким проявлением самофокусировки мощного лазерного излучения при его распространении в среде с оптической нелинейностью кубического типа. В результате самовоздействия происходит пространственный распад поперечного профиля пучка на локализованные области с высокой интенсивностью – филаменты [1].

Исследование процесса филаментации мощных ультракоротких лазерных импульсов привлекает внимание перспективами использования данного явления в атмосферной оптике для создания протяженных ионизированных каналов в атмосфере, широкополосного зондирования атмосферы или передачи световой энергии.

Изучение филаментации узких и широких пучков, показало, что для пучков с меньшим начальным радиусом в режиме множественной филаментации характерна конкурентная борьба филаментов за энергетический резервуар, в результате которой «выживает» один или несколько филаментов. При этом с уменьшением радиуса пучка уменьшается также и количество филаментов. При множественной филаментации широких лазерных пучков наблюдается явление формирования протяженных узконаправленных бездифракционных пучков с высокой интенсивностью, которые являются пространственными продолжениями филаментов. Данные структуры также называют постфиламентационными каналами.

Расходимость отдельных постфиламентационных каналов в десятки раз меньше расходимости всего лазерного пучка. Это обеспечивается за счет формирования общей кольцевой структуры, которая окружает «пакет» постфиламентационных каналов и препятствует увеличению их расходимости.

---

1. Гейнц Ю. Э., Голик С. С., Землянов А. А., и др. Микроструктура области множественной филаментации фемтосекундного лазерного излучения в твердом диэлектрике. // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 12. С. 1073–1084.

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

## **Влияние размеров и расположения газовой полости на амплитуду частичных разрядов в твердых диэлектриках**

Мередова М. Б.

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

Регистрация частичных разрядов (ЧР) в диэлектриках является хорошим инструментом для диагностики текущего состояния изоляции высоковольтного оборудования. В твердых диэлектриках ЧР происходят в газовых полостях и трещинах, в которых электрическая прочность заметно ниже, чем прочность конденсированного вещества. Поэтому исследование электрических характеристик ЧР в одиночном пузырьке является актуальной задачей. В настоящей работе исследовано влияние положения и размеров газовой полости на амплитуду и форму импульса тока при ЧР, распределение электрического поля в разрядном промежутке вследствие релаксации зарядов при ЧР.

Промежуток между плоскими электродами считался заполненным твердым диэлектриком с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon > 2$ . Круглое включение с  $\varepsilon = 1$ , имитировавшее газовую полость, помещалось на оси симметрии промежутка, на разных расстояниях от электродов. Расчет электрического поля выполнялся с помощью уравнения Пуассона со значениями потенциала  $\varphi = 0$  на нижнем электроде и  $\varphi = U_0$  на верхнем электроде. На границах области задавалось линейное изменение потенциала. Для расчета электрических токов при ЧР в пузырьке использовалось уравнение неразрывности совместно с законом Ома. Проводимость плазмы в пузырьке во время ЧР считалась постоянной. Разряд в пузырьке начинался при условии, что локальная напряженность поля в одном из узлов пузырька превышала некоторое критическое значение  $E_c$ . При выполнении этого условия считалось, что весь пузырек становится проводящим. Когда напряжённость поля в пузырьке падала ниже второго критического значения  $E_s$ , проводимость пузырька становилась равной нулю.

Исследовались форма импульсов тока, заряд, прошедший во внешней цепи, и заряд на стенках пузырька, образовавшийся при ЧР. Выполнено сравнение этих характеристик для пузырька внутри промежутка и пузырька на поверхности одного из электродов.

Работа поддержана грантом РФФИ № 16-19-10229.

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

## **Характеризация угловой расходимости диагностического пучка для установки ГОЛ-NB**

Никишин А. В.

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

Установка ГОЛ-NB представляет собой открытую плазменную ловушку, в которой реализована идея удержания плазмы с помощью гофрированного магнитного поля. Сама идея заключается в создании искусственной диффузии посредством множества последовательно стоящих пробкотронов – небольших открытых линейных плазменных ловушек. Плазма в установке создается с помощью дуговой плазменной пушки, последующий нагрев плазмы осуществляется с помощью пучков быстрых нейтральных атомов. В настоящее время для измерения параметров плазмы в ГОЛ-NB ведутся работы по созданию диагностики нейтрального атомарного пучка. Принцип работы диагностики заключается в измерении ослабления пучка быстрых нейтральных атомов, пропущенного через плазму, вдоль разных хорд. Это позволяет получить линейную плотность плазмы. Система диагностики пучка представляет собой набор вторично-эмиссионных датчиков, каждому из которых соответствуют определённые координаты относительно плазмы и определённый канал в системе регистрации данных. Такая многоканальная система позволяет получить пространственное распределение плотности плазмы. Однако для получения более достоверных данных необходимо знать угловой разброс пучка. Так как основой разрабатываемой диагностики будет существующий пучок, на данном этапе работы необходимо определить его угловую расходимость.

Для определения угловой расходимости на пути пучка была помещена пластина с щелью шириной 1мм. Пластина закреплена на подвижном штоке так, что существует возможность перемещать щель в плоскости, перпендикулярной пучку. Была проведена серия экспериментов с различным положением щели относительно центра вакуумной камеры.

В работе будет представлена характеристика угловой расходимости диагностического пучка.

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

**Кинетика ионообразования в положительно заряженной плазме  
коронного разряда в воздухе. Масс-спектрометрические  
исследования и численное моделирование**

Очиров О. О.

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

Коронный разряд широко применяется в масс-спектрометрических ионных источниках с химической ионизацией при атмосферном давлении. Актуальной является задача управления составом ионов-реагентов с целью оптимизации условий ионизации для веществ различных классов, имеющих разные газо-фазные энергетические характеристики.

Ранее было показано существенное влияние концентрации паров воды на ионный состав в масс-спектрометрическом ионном источнике [1]. Проведенные экспериментальные исследования показали возможность наблюдать кинетические эффекты, связанные с переносом заряда с первичных ионов на ионы-продукты, путем изменения концентрации в воздухе основного агента ион-молекулярных реакций – воды в диапазоне концентрации  $10 \div 10000$  ppm.

Следующая стадия исследований, представленная в настоящем докладе, направлена на моделирование кинетики образования ионов в положительно заряженной плазме коронного разряда, с целью в дальнейшем получения инструмента для оптимизации процессов ионизации микропримесей в воздухе. Модель реализована в программной платформе COMSOL Multiphysics. Получены результаты моделирования для области вблизи коронирующего электрода, а также для внешней области с учетом положительного ионного объемного разряда на основе имеющихся данных о константах скорости ион-молекулярных реакций [2, 3]. Обсуждены сходства и различия результатов моделирования с экспериментальными данными.

- 
1. Shahin M. M., Journal of Chemical Physics, 45 (1966) 2600.
  2. Sieck L. W. et al, Plasma Chem Plasma Process, 21(3) (2001) 441.
  3. Sieck L. W. et al, Plasma Chem Plasma Process, 20(2) (2000) 235.

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

## Исследование травления поликарбоната и полипропилена в плазме аргона

Ощенко И. И., Трошенкова Д. А.

Ивановский государственный химико-технологический университет

Одним из наиболее перспективных и современных методов модификации поверхности полимеров является воздействие низкотемпературной плазмы, которое позволяет изменить свойства поверхностей полимеров и расширить области их использования. Целью данной работы является исследование кинетических закономерностей травления пленок поликарбоната и полипропилена в плазме аргона при различных условиях обработки и количества полимерных материалов в реакторе.

Образцы поликарбоната размещали по образующей на термостатируемой стенке цилиндрического стеклянного реактора диаметром 3 см в зоне положительного столба. Площадь образцов поликарбоната в реакторе ( $S$ ) изменялась в пределах от 28,65 до 85,95 см<sup>2</sup>. Доля поверхности реактора, занятой полимером достигала 26,84 % от общей площади реактора в зоне горения разряда ( $S = 320,2$  см<sup>2</sup>).

При изменении тока от 20 до 110 мА, напряженность электрического поля и приведенная напряженность поля уменьшается. Интенсивность излучения линий атомарного кислорода и аргона увеличиваются пропорционально току разряда и уменьшается с ростом давления газа. Например, интенсивность излучения линии атомарного кислорода ( $\lambda = 845$  нм) увеличивается в 3,7 раза с ростом тока разряда. Интенсивность излучения линии аргона ( $\lambda = 811$  нм) также увеличивается в 4,1 раза с увеличением тока разряда.

На основании измеренных краевых углов смачивания водой и глицерином образцов полипропилена и поликарбоната методом лежащей капли была рассчитаны поверхностная энергия ( $\sigma$ ), ее полярная ( $\sigma^p$ ) и дисперсионная ( $\sigma^d$ ) компонента. Величина поверхностной энергии изменяется в зависимости от условий обработки образцов. Так при увеличении тока и давления поверхностная энергия поликарбоната и полипропилена проходит через максимум. Увеличение линейной скорости потока газа практически не влияет на величину поверхностной энергии для поликарбоната и приводит к уменьшению поверхностной энергии полипропилена. Изменение поверхностной энергии происходит за счет увеличения ее полярной составляющей, дисперсионная составляющая при обработке уменьшается.

Научный руководитель – аспирант Овцын А. А.

## Теоретическое моделирование кипения вольфрама при импульсном нагреве

Попов В. А.

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

По современным представлениям в термоядерном реакторе с магнитным удержанием стенки камеры будут подвергаться постоянным и импульсным потокам плазмы, нейтронов и другими, приводящими к разрушениям. Так, в строящемся экспериментальном термоядерном реакторе ИТЕР предполагается импульсная тепловая нагрузка до  $10 \text{ ГВт/м}^2$  длительностью несколько миллисекунд. Импульсные тепловые нагрузки такой величины на материалы могут моделироваться электронными пучками.

Работа направлена на теоретическое моделирование кипения при облучении импульсным электронным пучком. Моделирование проводилось для вольфрама, как перспективного материала для пластин дивертора, и параметров электронного пучка (длительность 150 мкс, мощность на мишени  $30 \text{ ГВт/м}^2$ , энергия электронов 100 кэВ), достижимых на установке в ИЯФ СО РАН с целью дальнейшей проверки и использования.

Электронный пучок имеет большую по сравнению с плазмой глубину выделения энергии. Это приводит к тому, что паровое экранирование наступает позже. Из-за этого температура поверхности достигает более высоких значений. При этом температура может подниматься до столь высоких значений, что мощность испарения становится сравнимой с мощностью нагревания. Тогда рост температуры поверхности замедляется. Нагрев на глубине при этом продолжается, что приводит к тому, что температура под поверхностью становится больше температуры поверхности. Давление испаряющегося материала, оказываемое на поверхность, становится меньше давления насыщенных паров, что означает, что приповерхностный слой жидкости становится перегретым. Перегретая жидкость может закипеть. Условия вскипания и вопросы протекания кипения обсуждаются в работе. По оценкам, время образования пузыря определяет возможность вскипания, а время развития пузыря порядка  $10^{-5}$  с. Кипение объясняет краткость времени вылета наблюдаемых капель. Оценки разрушения капли в газе над материалом в условиях установки предсказывают ограничение на размер капли  $d$  в зависимости от её скорости  $u$ :

$$du^2 < \frac{1\text{М}^3}{\text{с}}$$

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

## **Новое поколение термоэмиссионных преобразователей энергии для наземной энергетики**

Ракипов А. С., Поденко С. С., Карасёва К. В.  
Санкт-Петербургский горный университет

Разработки термоэмиссионных преобразователей энергии (ТЭП) получили развитие в середине XX века, в связи с растущими энергетическими потребностями человечества. Фундаментальные изыскания в области плазменной энергетики предоставили возможность разработки высокоэффективных ТЭП.

ТЭП – это диод, состоящий из высокотемпературного электрода (эмиттера), который, благодаря термоэлектронной эмиссии, испускает электроны на низкотемпературный электрод (коллектор).

Преобразование энергии осуществляется путем динамической подачи паров цезия в межэлектродное пространство через перфорированный коллектор. По результатам экспериментов собрана большая база характеристик цезиевых ТЭП, дающая возможность создания низкотемпературных ТЭП. Термоэмиссионные методы генерации электроэнергии – одни из наиболее перспективных и освоенных методов (в т. ч. для применения в космосе) прямого преобразования тепловой энергии в электрическую.

Повышение эффективности ТЭП достигнуто путем снижения эффективной работы выхода электронов коллектора в парах цезия.

Используемые нами плазменные технологии позволили сформировать графеновые структуры на поверхности коллектора ТЭП с аномально низкой работой выхода электронов. При длительной экспозиции в парах цезия при давлении  $\sim 1-10$  Торр, температуре  $\sim 750$  °К, дисперсные графитовые чешуйки различной толщины и размеров, исходно хаотически нанесенные на поверхность перфорированного никелевого коллектора, трансформируются в графитовые зерна с прямолинейными границами и одинаковой толщиной в окрестностях отверстий. Предполагается, что на внешней графеновой границе преобразованного графитового зерна образуется структура Cs-O-Cs, при этом один из атомов Cs интеркалирован под слой графена. Подобная поверхностная структура имеет аномально низкую работу выхода ( $<1$  эВ) при температурах порядка 1000 °К, что и объясняет аномальное повышение эффективности ТЭП. На данный момент, в условиях лаборатории, получено трехкратное увеличение КПД вплоть до 30 %.

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

## **Зарядка пылевых частиц несферической формы во внешнем электрическом поле**

Ростом А. М.

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

Электростатические свойства (монопольные, дипольные и квадрупольные), форма (шаровидная или удлинённая) и тип (проводящий или изолирующий) частиц пыли очень важны, для объяснения поведения плазмы вокруг, а также взаимодействие между частицами в плазме. В данной работе проведены численные расчёты распределения заряда по поверхности проводящего цилиндра и эллипсоида и между ними проведено сравнение. Также рассчитана зависимость полного заряда эллипсоидальной частицы от средней длины свободного пробега ионов между резонансными ион – нейтральными столкновениями.

Цель работы заключается в объяснении электростатического поведения несферических пылевых частиц в плазме, и проведение численного моделирования несферических частиц пыли.

В случае цилиндра особенность мешает нам посчитать распределение заряда аналитически[1]. Уравнение, которое может объяснить форму эллипсоида, и приближают случай цилиндра найдено и использовано для расчёта распределения поверхностного заряда в присутствии внешнего электрического поля.

Когда рассчитано распределение заряда, дипольный и квадрупольный моменты заряженной пылевой частицы могут быть вычислены.

Как оказалось, цилиндрическая частица, обладает большими дипольными и квадрупольными моментами, чем эллипсоидальная частица. Ёмкость частиц эллипсоидальной и цилиндрической формы для равных аспектных соотношений одинакова.

Для расчёта полного заряда пылевых частиц эллипсоидальной формы использована численная модель, которая основано на математическом моделировании методом Монте-Карло и расчёте траекторий ионов. Было проведено сравнение результатов данной модели для частиц одинаковых эллипсоидальной формы и полученных ранее результатов для частиц сферической формы [2]. Как показывают результаты, заряд, нормированный на ёмкость пылевой частицы, в пределе OML (Orbital Motion Limited), для частиц разной геометрии (размера, формы), совпадает и составляет  $\sim 2,4$  безразмерных единиц.

---

1. Smythe W. R. Static And Dynamic Electricity (1989).

2. Sukhinin G. I., Fedoseev A. V., Salmikov M. V. / Contrib. Plasma Phys. 56, No. 5, 397–402 (2016)

## Подготовка экспериментов по генерации ТГц-излучения в планарном двухстадийном генераторе

Сандалов Е. С.

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

В настоящее время в ИЯФ на установке ЭЛМИ ведутся исследования по генерации мощных импульсов мм-излучения в двухканальном планарном мазере на свободных электронах с двумерной распределенной обратной связью. Источником накачки волн являются два ленточных электронных пучка со следующими параметрами:  $E_e \approx 0.8-1.0$  МэВ,  $I_b \approx 1-3$  кА,  $\tau_b \approx 5$  нс. В проведенных экспериментах достигнут уровень мощности 20-30 МВт в импульсе излучения с частотой 75 ГГц при его длительности  $\sim 100$  нс [1]. Следующим этапом развития этих исследований является создание двухстадийного генератора терагерцового излучения [2]. Принцип действия такого генератора состоит в следующем: с помощью первого ленточного пучка создается мощный импульс мм-излучения в низкочастотной (НЧ) секции генератора, который передается в его высокочастотную секцию (ВЧ). В ВЧ-секции осуществляется накопление и рассеяние мм-излучения на втором ленточном пучке с преобразованием частоты в ТГц-диапазон. Основными целями данной работы являются оптимизация и тестирование основных элементов электродинамической системы двухстадийного генератора. Среди них: трансформатор бегущей волны в квазистоячую для ВЧ-секции; электродинамическая система НЧ-секции в виде комбинированного резонатора, состоящего из входного 2D и выходного 1D брэгговских рефлекторов, а также волновой дефлектор для передачи мм-излучения из НЧ- в ВЧ-секцию генератора. Исследования свойств элементов ТГц-генератора проводились с помощью 3-D моделирования и «холодного» тестирования. В докладе представлены результаты анализа и сопоставления полученных данных, а также результаты первых экспериментов по генерации излучения с использованием оптимизированных элементов.

---

1. Аржанников А. В и др. Письма в ЖТФ, 2013, том 39, вып. 18, С. 12-16.

2. Arzhannikov A. V et al. Proc. of VI Int. Workshop «Strong Microwaves in Plasmas», N. Novgorod, Russia, 2006, Vol. 1, P. 228–232.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. Синицкий С. Л.

**Разработка магнитной диагностики для установки ГОЛ-NB**

Содной А. Б.

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

В ИЯФ СО РАН строится установка ГОЛ-NB [1] – открытая ловушка для удержания плазмы. Нагрев плазмы в установке реализуется методом инъекции нейтральных пучков.

Плазма в ловушке может быть подвержена развитию различного вида неустойчивостей, которые препятствуют квазистационарному удержанию плазмы и получению проектных параметров. Виды неустойчивостей, такие как: альфеновская ионно-циклотронная неустойчивость (AIC), дрейфовая конусная неустойчивость (DCLC), bounce неустойчивости, искажение формы плазмы и др., наблюдались на различных плазменных установках.

Цель данной работы заключается в создании магнитной диагностики для установки ГОЛ-NB для изучения магнитной активности плазмы, в том числе определения параметров и природы периодических колебаний.

Система магнитной диагностики разрабатывается на основе опыта установок ГОЛ-3 и ГДЛ. Планируется создать две подсистемы диагностики: для многопробочной секции и центральной ловушки.

Для измерения магнитных сигналов в многопробочной секции предлагается использовать кольцевую сборку датчиков магнитного поля для измерения пространственных компонент магнитного поля в установке и диамагнитные петли для измерения диамагнетизма плазмы.

Измерения в центральной ловушке также будут проводиться кольцевой сборкой совместно с линейной сборкой, датчики которой будут расположены по длине установки.

---

1. Postupaev V. V. et al., Nuclear Fusion, 2017, 57, 036012.

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

## **Изучение влияния высокоэнергетического протонного пучка на конструкционные материалы**

Соколова Е. О.

Новосибирский государственный университет

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

В Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН создан оригинальный ускорительный источник эпитепловых нейтронов, пригодных для лечения злокачественных опухолей методом бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ).

На исследуемой установке было предложено провести эксперименты по изучению блистеринга. Известно, что явление блистеринга, т. е. возникновение пузырей и отшелушивание поверхностного слоя мишени, облученной ионным пучком, приводит к перегреву и испарению литиевого слоя нейтроногенирующей мишени. Для получения пучка нейтронов, пригодных для БНЗТ, используется пороговая реакция  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ , которая протекает при сбросе протонного пучка на литиевую мишень толщиной 50 мкм с медной подложкой. Таким образом, явление блистеринга может иметь существенный вклад в условия формирования нейтронного потока.

На пути следования ускоренного протонного пучка на установке была размещена мишень с помещаемыми в нее исследуемыми образцами, отполированными до зеркального блеска: медным и медно-танталовым. Конструкция мишени позволяет измерять полный ток протонов, осуществлять эффективный теплосъем, измерять температуру образцов с помощью терморезисторов и производить непрерывный мониторинг состояния поверхности. Для детального изучения образцов после облучения используется электронный микроскоп.

В данной работе представлены результаты экспериментов по изучению влияния протонного пучка с энергий 2 МэВ на медный и медно-танталовый образцы. Определен порог блистеринга при различных температурах поверхностей.

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

## Функционализация оксида графена в плазме SF<sub>6</sub>

Соловьев Б.

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

Введение атомов фтора в структуру оксида графена (ОГ) за счет сильных связей С-Ф повышает его окислительную и тепловую стабильность до температур 400° С, что имеет немаловажное значение для практических приложений. В работе фторирование ОГ, полученного модифицированным методом Хаммерса, проведено в плазме SF<sub>6</sub> в диапазоне мощностей от 100 до 350 Вт, длительностью до 45 мин при скорости потока газа до 100 см<sup>3</sup>/мин. Для генерации плазмы использованы индукционные и емкостные генераторы. С целью уменьшения дефектообразования в плазме образцы устанавливались так, как показано на рис. 1. Измерения спектров комбинационного рассеяния («Интегра Спектра», НТ МДТ) не показали увеличения пика D, относительно линии G, что означает отсутствие заметного дефектообразования на поверхности ОГ. Из исследований методом энергодисперсионного анализа («INCA Energy», Oxford Instruments) обнаружено, что содержание фтора на поверхности ОГ увеличивается пропорционально мощности плазмы (см. рис. 2) и времени обработки в плазме. Измерения электрических параметров («Есориа 5000 HMS») также показали постепенное возрастание сопротивлений в зависимости от времени экспозиции образцов в плазме. В работе проводится обсуждение полученных результатов.

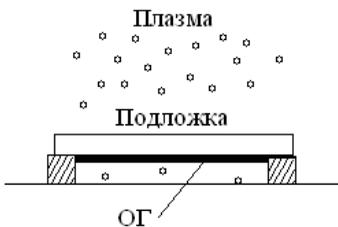


Рис. 1. Схема расположения пленки ОГ в плазме.

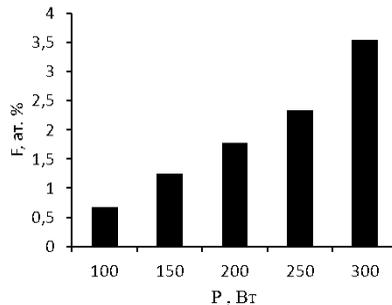


Рис. 2. Зависимость содержания фтора в атомных % от мощности плазмы при времени экспозиции 1 мин.

Научный руководитель – канд. физ.-мат.наук, вед. науч. сотр. Неустроев Е. П.

**Новые возможности зондовой регистрации анизотропных функций распределения электронов и ионов по скоростям в плазме**

Страхова А. А., Мурильо О.  
Санкт-Петербургский горный университет

Развит метод плоского одностороннего зонда для диагностики сильно анизотропных функций распределения (ФР) заряженных частиц в плазме.

Исследована возможность измерения ФР методом плоского одностороннего зонда без разложения в ряд по полиномам Лежандра. При условии, что ширина аппаратной функции зондового метода много меньше энергетической ширины ФР, получены соотношения, связывающие энергетическую и угловую ширины ФР. При выполнении данных соотношений вторая производная зондового тока пропорциональна ФР и, таким образом, может быть измерена при ее произвольной (в известном смысле) анизотропии.

Метод экспериментально апробирован на примере функции распределения рассеянных электронов в пролетном режиме низковольтного пучкового разряда в He. Показано, что в этих условиях, традиционный метод, предусматривающий нахождение коэффициентов в разложении функции распределения в ряд по полиномам Лежандра, не применим.

Разработана физическая модель формирования функции распределения электронов в пролетном режиме низковольтного пучкового разряда в He и на основе алгоритма Монте-Карло выполнено численное моделирование, результаты которого хорошо согласуются с экспериментальными данными.

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

## **Метод регистрации индикатрисы упругого рассеяния электронного пучка на атомах в плазме**

Страхова А. А., Мурильо О., Петров П. А.  
Санкт-Петербургский Горный университет

Разработан метод экспериментального определения индикатрисы упругого рассеяния электрона на атоме из результатов измерения рассеянной части функции распределения электронов (ФРЭ) в низковольтном пучковом разряде (НПР).

Решено кинетическое уравнение Больцмана методом разложения в ряд по числам столкновений и экспериментально определена рассеянная часть функции распределения электронов методом плоского одностороннего зонда, позволяющего измерить ФРЭ без разложения в ряд по полиномам Лежандра, при условии, что ширина аппаратной функции зондового метода много меньше энергетической ширины функции распределения и интегральным членом в выражении для второй производной зондового тока по потенциалу зонда можно пренебречь.

Используя аналитическую теорию и апробированную методику для нахождения рассеянной части ФРЭ в пролетном режиме НПР, разработана методика нахождения индикатрисы упругого рассеяния электрона на атоме. Теория проверена сравнением с численными расчетами методом Монте-Карло.

Метод апробирован в плазме низковольтного пучкового разряда в He. Получено хорошее соответствие экспериментально измеренной индикатрисы упругого рассеяния электрона с энергией 30 эВ на атоме He и известных данных о дифференциальном сечении, в том числе, и полученных из пучковых экспериментов.

Показано, что для реализации разработанной методики определения индикатрисы упругого рассеяния электрона на атоме не требуется никаких априорных данных.

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

## **Поиск оптимальных параметров лазерного кильватерного ускорения для экспериментов в ИЛФ СО РАН**

Туев П. В.

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

Эксперименты по лазерному плазменному кильватерному ускорению ставятся в десятках мест по всему миру. Уже давно пройден этап демонстрационных экспериментов, и делается упор на возможность прикладных применений. Основным направлением является разработка доступного источника пучков заряженных частиц из-за возможности их формирования из плазменных электронов. Наличие в Институте лазерной физики (ИЛФ) СО РАН лазерного комплекса, способного производить фемтосекундные пучки с тераваттной мощностью, позволяет проводить эксперименты по данной тематике на базе институтов СО РАН.

Несмотря на успехи в исследованиях плазменного ускорения, описание двух- и трехмерной нелинейной динамики лазер-плазменного взаимодействия не может быть сделано аналитически и требует привлечения численного моделирования. С недавнего времени моделирование эволюции лазерного излучения было реализовано в квазистатическом коде `lcode`, в уравнении эволюции плазмы которого не заложен эффект захвата электронов. Основной вызов в данной работе заключался именно в решении этой проблемы.

Разработана методика учета захвата электронов плазмы в рамках квазистатического приближения. Нестандартная реализация численного решателя `lcode` позволила реализовать этот процесс через моделирование части плазменных электронов как фантомных частиц пучка. После проверки состоятельности нового алгоритма методом воспроизведения известных данных проведено масштабное исследование возможных сценариев проведения эксперимента. Рассмотрено как взаимодействие заданного лазерного пучка с плазмой различной плотности, так и влияние отклонений его параметров от базовых на ускорение электронов в однородной плазме. Найдены возможности управления зарядом, энергией и угловым разбросом электронного сгустка, что позволяет спроектировать источник пучков заряженных частиц с перестраиваемыми параметрами.

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

## **Исследование формирования и транспортировки пучка отрицательных ионов водорода**

Харченко В. А.

Новосибирский государственный университет

В ИЯФ СО РАН разрабатывается инжектор нейтральных атомов с двухступенчатой схемой ускорения отрицательных ионов водорода. Пучок формируется в ионном источнике и ускоряется до энергии  $\sim 100$  кэВ [1], а затем, дополнительно ускоряется до энергии до 1 МэВ в ускорительной трубке [2]. Между источником и ускоряющей трубкой расположен вакуумный бак, который откачивается двумя крионасосами. В баке расположены 2 магнита, которые смещают пучок относительно оси источника. Использование магнитов позволяет очистить пучок от паразитных частиц и препятствует попаданию вторичной плазмы в источник. Отрицательные ионы генерируются за счет поверхностно-плазменного механизма. Для усиления генерации использовался цезий. Измерения параметров пучка проводились с помощью калориметра с водяным охлаждением. Для измерения распределения мощности пучка вдоль сечения использовался ряд термпар на калориметре.

В данном докладе описывались эксперименты по транспортировке пучка через вакуумный бак. Были измерены основные характеристики пучка: ток и профиль мощности. Измерен полный ток пучка на калориметр при различных параметрах. Исследована зависимость тока пучка от давления водорода. Измерен профиль мощности пучка.

На вход предполагаемой ускорительной трубки было транспортировано 60 % тока пучка.

---

1. Abdrashitov G. F., Belchenko Yu. I., Gusev I. A., Ivanov A. A., Kondakov A. A., Sanin A. L., Sotnikov O. Z., Shikhovtsev I. V. Characteristics of a High-power RF Source of Negative Hydrogen Ions for Neutral Beam Injection into Controlled Fusion Devices // Plasma Physics Reports, 2017, Vol. 43, No. 1, P. 12–17.

2. Ivanov A. A., et al. Development of a negative ion-based neutral beam injector in Novosibirsk // R. S. I., 2013, Vol. 85, pp. 02B102.

Научный руководитель – Сотников О. З.

**Расчет структуры диамагнитного «пузыря» в открытой ловушке**

Христо М. С.

Новосибирский государственный университет

Линейные осесимметричные магнитные ловушки считаются перспективными для создания термоядерных источников нейтронов и реакторов с высокой плотностью мощности. Одним из новых предложенных методов по повышению параметров плазмы в таких ловушках является режим диамагнитного удержания [1]. В связи с этим возникла потребность в детальном теоретическом исследовании таких режимов, в частности, расчете детальной пространственной структуры равновесия.

Для исследования силового равновесия плазмы высокого давления в диамагнитном «пузыре» с учетом непараксиальности используется уравнение Грэда-Шафранова, а для учета эффектов переноса – уравнение баланса частиц, полученное в рамках магнитогидродинамической теории. Вследствие нелинейности данных уравнений применяются численные методы решения.

Получены и анализируются решения системы уравнений равновесия и переноса в непараксиальном случае. В дальнейшем для более детального моделирования плазмы в данной системе будет учтено влияние зависимости анизотропного давления плазмы от абсолютного значения магнитного поля, а также найдены нестационарные решения для того, чтобы получить представление о процессе формирования «пузыря».

---

1. Beklemishev A. D. Diamagnetic «bubble» equilibria in linear traps // Physics of Plasmas 23, 082506 (2016).

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

**Оптимизация транспорта кластерной плазмы в молекулярном пучке**

Чиненов С. Т.

Новосибирский государственный университет

В настоящее время интенсивно исследуются процессы формирования кластеров в сверхзвуковых газовых потоках, влияние ионизации газовых кластеров на их состав и структуру, на протекание реакций синтеза и распада с участием кластеров. Для определения химического состава нейтрального молекулярного потока широко применяются масс-спектрометры. В отличие от нейтрального, в ионизованном газовом потоке кулоновские силы расталкивания затрудняют пролёт ионизованных частиц до детектора масс-спектрометра.

Типичная газодинамическая установка с блоком молекулярно-пучковой масс-спектрометрии представляет собой последовательность вакуумных камер, разделённых коллимирующими диафрагмами с отверстиями малого диаметра. Целью работы является поиск оптимальных условий транспорта изучаемой пробы из сверхзвуковой струи конденсирующегося газа через скиммер и коллимирующую диафрагму молекулярно-пучковой системы на датчик масс-спектрометра.

Работа выполнена на установке ЛЭМПУС-2 отдела прикладной физики физического факультета НГУ [1]. Разработаны и испытаны два варианта ионизации газового потока: в струе за сверхзвуковым соплом и непосредственно в форкамере сопла до истечения. Установлены достоинства и недостатки обоих способов ионизации. С целью поиска и выбора оптимальной ионной оптики предварительно проведено моделирование процесса с помощью программного пакета SIMION. Собрана и испытана рабочая схема ионной оптики. Проведена серия экспериментов с обоими вариантами ионизации газа. В качестве рабочих газов в экспериментах и модельных расчётах использованы легко конденсирующийся аргон и слабо конденсирующийся азот. Заданные режимы истечения предусматривали формирование кластеров в широком диапазоне размеров, от олигомеров до тысячемеров. Установлены оптимальные условия транспорта кластерных ионов до детектора масс-спектрометра. Построены зависимости интенсивности полезного сигнала от параметров ионно-оптической системы, доли ионизованных частиц и размера кластеров.

---

Ходаков М. Д., Зарвин А. Е., Коробейщиков Н. Г., Каляда В. В. Масс-спектрометрия сверхзвуковых кластеризованных потоков метана и аргон-метановых смесей // Вестник НГУ: Серия «Физика», 2012, Т. 7, вып. 3. С. 84–95.

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

**Источник ионов с малой интенсивностью для диагностики  
анализатора низкоэнергетических частиц**

Шоколов А. Д.

Новосибирский государственный университет

Диагностическая система реактора ИТЭР включает в себя два анализатора атомов перезарядки. Анализатор LENPA – Low Energy Neutral Particle Analyzer – предназначен для измерения потоков атомов в тепловом диапазоне энергий (10 – 200 кэВ). Анализатор HENPA – High Energy Neutral Particle Analyzer – должен обеспечить регистрацию атомов в надтепловом диапазоне энергий (0.1 – 2.2 МэВ), где наибольший интерес представляет регистрация нейтрализованных быстрых ионов отдачи, возникающих в плазме в результате упругих столкновений тепловых ионов с термоядерными  $\alpha$ -частицами. Для калибровки и контроля работы анализаторов требуется источник ионов малой интенсивности.

Цель данной работы – изучение работы источника ионов гелия, с энергией ионов пучка равной 40 кэВ. На расстоянии 70 см от источника пучок должен обеспечивать равномерную засветку (в пределах  $\pm 20\%$ ) окружности диаметром 2 см. При этом полная интенсивность пучка, проходящего через эту окружность должна регулироваться в диапазоне  $(0.1 - 1) \times 10^{-12}$  А. На протяжении 30 минут стабильность энергии пучка должна быть не хуже  $\pm 0.25\%$ , а его интенсивность не должна меняться на величину более чем  $\pm 10\%$ .

В данной работе представлены результаты экспериментального изучения источника, а также приведены планы дальнейших экспериментов.

Научный руководитель – Колмогоров А. В.

## Электронно-пучковая спектроскопия сверхзвуковых потоков молекулярного азота

Яковлева Т. С.

Новосибирский государственный университет

В работе определяется вращательная температура струи молекулярного азота, истекающей из сверхзвукового сопла в затопленное пространство. Давление в форкамере 4 бара, давление фона в камере расширения 60-80Торр. Сверхзвуковая струя разреженного газа активировалась ускоренным пучком электронов с током в диапазоне от 20 до 90 мА и энергией пучка 10кэВ, в результате чего образовывалась низкотемпературная электронно-пучковая плазма. Образование возбужденных молекулярных ионов азота происходит прямым электронным ударом из основного состояния молекулы азота  $N_2(X^1\Sigma_g^+)$  в состояние  $N_2^+(B^2\Sigma_u^+)$ . Полосы первой отрицательной системы наблюдаются в результате радиационного перехода из состояния  $N_2^+(B^2\Sigma_u^+)$  в состояние  $N_2^+(X^2\Sigma_g^+)$ . Излучение из камеры расширения регистрировалось спектрометром ДФС-452, предварительно откалиброванным по линиям ртути и неоновой лампы, спектр записывался на ПЗС-линейки.

В результате были получены спектры молекулярных полос первой отрицательной системы азота (1-ОС) с разрешенной вращательной структурой. Было установлено, что распределение молекулярных ионов азота по вращательным уровням подчиняется статистике Больцмана, что позволило определить вращательную температуру ионов, которая использовалась для восстановления вращательной температуры молекулы азота в основном состоянии. Измерение вращательной температуры было сделано в различных точках вдоль струи, в результате определена зависимость вращательной температуры молекулы азота в струе от расстояния до сопла.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, доцент Автаева С. В.

## Расчет распределения концентрации водорода при различных схемах подачи в сверхзвуковой камере сгорания

Акинин С. А.

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

Изучение процессов смешения, воспламенения и горения в сверхзвуковом потоке на сегодняшний день представляет особый интерес для задач аэродинамики. Важное прикладное значение в подобных исследованиях состоит в получении высокой полноты сгорания топлива в сверхзвуковой камере гиперзвукового прямоточного воздушно-реактивного двигателя. Для этого необходимо обеспечить эффективное смешение топлива и воздуха при минимальной длине камеры сгорания (КС), т. е. определить распределение концентрации водорода по длине КС. Программный продукт линейки ANSYS CFD и в частности ANSYS Fluent представляют широкий набор инструментов для решения таких задач. В качестве исходной геометрии была выбрана реальная конфигурация канала КС. Подробно особенности конфигурации канала КС и технологии испытаний описаны в [1].

Основная цель настоящей работы состояла в трехмерном моделировании смешения и течения двухкомпонентной среды «воздух – водород» внутри КС при сверхзвуковой скорости потока.

Расчет структуры течения в КС проводился в трехмерной постановке на основе полных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, дополненных  $k-\epsilon$  моделью турбулентности. Температура стенок во всех случаях была фиксированной и составляла  $T_w = 300$  К. Толщина пограничного слоя на входе принималась равной 10 мм. Расчет позволил оптимизировать количество пусков. Было установлено, что использование подачи через четыре форсунки на каждом пилоне приводит к тому, что массовая концентрация водорода в щелевых каналах ниже или близка к стехиометрическому соотношению.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-08-01548).

---

Акинин С. А., Старов А. В. Обеспечение воспламенения водорода и стабилизации горения при сверхзвуковых скоростях потока в канале камеры сгорания // Материалы XX Всероссийской научной конференции с международным участием «Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии». Томск. 2016. С. 158–160.

Научный руководитель – канд. техн. наук Старов А. В.

## **Траекторные параметры движения снаряда при большой начальной скорости**

Алкин М. Б.

Новосибирское высшее военное командное училище

Разработка перспективных образцов вооружения с использованием электромагнитных ускорителей [1] предполагает движение снаряда на пассивном участке траектории с большой начальной скоростью при относительно малых значениях баллистического коэффициента. В этом случае при дальнобойной стрельбе значительный участок траектории находится в разреженных слоях атмосферы [2].

Целью работы является моделирование траекторных параметров движения снаряда для определения свойств траектории, оценки тепловых нагрузок и эффективности системы при начальных скоростях до 3 км/с и значениях баллистического коэффициента, меньших единицы.

Решалась система уравнений внешней баллистики [2]. Изменения параметров атмосферы по высоте учитывалось в соответствии с [3]. Коэффициент сопротивления в каждой точке траектории оценивался по закону сопротивления 1943 г. [4].

Выполнено тестирование алгоритма. Для модельного снаряда получены параметры движения (координаты, скорость, температура торможения в критической точке) в любой точке траектории при стрельбе по неподвижной цели. Выявлены особенности распределения скорости вдоль траектории при больших углах бросания.

---

1. Семкин Н. Д., Сухачев К. И., Дорофеев А. С. Методы и средства ускорения частиц естественного и техногенного происхождения // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. С. П. Королева. 2015. Т. 14. № 4. С. 171–191.

2. Дмитриевский А. А., Лысенко Л. Н., Богодистов С. С. Внешняя баллистика.– М.: Машиностроение, 1991. 640 с.

3. ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная. Параметры. М.: Изд-во стандартов, 2004. 180 с.

4. Коновалов А. А., Николаев Ю. В. Внешняя баллистика. М.: ЦНИИ информации, 1979. 228 с.

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

## Исследование процесса заполнения газовой смесью сосуда с микросферами

Альянов А. В.

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

В данной работе было проведено математическое моделирование процесса заполнения реактора с покоящимися микросферами газовой смесью. Стенки микросфер являются проницаемыми для гелия, но непроницаемыми для других газов [1]. Данный процесс лежит в основе мембранно-сорбционного метода выделения гелия из гелийсодержащих газовых смесей. Мембранно-сорбционный метод, разработанный в институте теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича [2] является более энергоэффективным, чем используемый в настоящее время криогенный.

Для моделирования процесса были взяты уравнения [3] законов сохранения массы, импульса и энергии для каждого из компонентов газовой смеси внутри и снаружи микросфер. Данные уравнения были усреднены по объёму, в котором содержится большое количество микросфер, но, в то же время, изменения параметров газа в котором незначительно. Итоговая система уравнений решена с использованием существенно не осциллирующей схемы (ENO) [4].

---

1. Tsugawa R. T., Moen I., Roberts P. E., Souers P. C. // Journal of Applied Physics, 1976, Vol. 47, No. 5, P. 1987–1993

2. Фомин В. М. и др. Способ разделения многокомпонентной парогазовой смеси // Патент № 2508156. Зарегистрирован в госреестре изобретений РФ 27 февраля 2014.

3. Верещагин А. С., Фомин В. М. Математическая модель движения смеси газов и полых избирательно проницаемых микросфер // Прикладная механика и техническая физика. 2015. Т. 56, No 5. С. 5–17.

4. Essentially Non-Oscillatory and Weight Essentially Non-Oscillatory Schemes for Hyperbolic Conservation Laws: Rep.: NASA/CR 97-206253. ICASE Report 97-65 / Institute for Computer Applications in Science and Engineering; Executor: Chi-Wang Shu: 1997.

Научные руководители – д-р физ.-мат. наук, акад. РАН Фомин В. М.  
канд. физ.-мат. наук Верещагин А. С.

## **Исследование влияния спиральности на растяжение вихревых трубок в изотропной турбулентности**

Борыняк К. И.

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

Изотропная турбулентность представляет собой турбулентность, для которой все статистические параметры течения одинаковы во всех направлениях. В трехмерной изотропной турбулентности накачка энергии в поток происходит в некотором узком диапазоне масштабов, затем за счет взаимодействия вихрей энергия передается в направлении мелких масштабов, и в итоге диссипируется в тепло. Таким образом формируется каскад турбулентности, который занимает определенный спектральный интервал. При этом процесс передачи энергии может зависеть от характера накачки. Главной задачей при подготовке расчета стояло задание силы, толкающей поток. В виду особенности моделируемого течения, задаваемая сила при осреднении по пространству должна давать нулевой результат, а также быть случайной по величине. Сила задавалась на крупных масштабах в связи с фактом передачи энергии с крупных масштабов на более мелкие.

В литературе есть данные о влиянии спиральности на перенос энергии в изотропной турбулентности, при разных способах внесения спиральности в поток и они разнятся, по ним можно только сказать, что спиральность замедляет прямой перенос энергии по масштабам. Но как она влияет конкретно на растяжение вихрей – вопрос до конца не исследован. И мы хотим исследовать именно это явление.

В ходе работы выполнено моделирование изотропной турбулентности с различными способами накачки и получены значения растяжений вихрей в зависимости от задания силы. Результаты показали, что доминирует положительное растяжение вихрей и поток энергии в сторону мелких масштабов. Но в области спирального вихря наблюдаются как пятна с сильным отрицательным растяжением вихрей, так и пятна с сильным отрицательным потоком энергии. Ни то ни другое не наблюдается в случае отсутствия спиральности в накачке.

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

## **Влияние параметров микроструктуры облака верхнего яруса на матрицу обратного рассеяния света**

Брюханов И. Д.

Национальный исследовательский Томский государственный университет

В настоящее время существенное влияние облаков верхнего яруса (ОВЯ) на радиационный баланс атмосферы Земли является общепризнанным. Отсутствие учёта микроструктуры таких облаков при соответствующих расчётах является одним из значимых источников погрешностей. Этому способствует малая изученность процессов, протекающих в них.

Инструментальное определение ряда параметров микроструктуры облаков невозможно вследствие их нарушения при заборе проб. Однако, их оценка возможна при анализе изменения состояния поляризации лазерного излучения после его взаимодействия с частицами облака. Начиная с 2011 г. на уникальном поляризационном лидаре НИ ТГУ исследуются оптические и геометрические характеристики облаков, в том числе и такие, измерить которые инструментально невозможно [1]. Оценка параметров микроструктуры ОВЯ возможна на основе совместного анализа экспериментальных данных с результатами теоретических расчётов. Ранее была разработана и программно реализована методика формирования матриц обратного рассеяния света (МОРС) полидисперсных ансамблей частиц на основе теоретических расчётов [2]. Для этого использовалась база данных Института оптики атмосферы (ИОА СО РАН, г. Томск), объединяющая матрицы, рассчитанные теоретически для гексагональных ледяных пластинок.

Настоящий доклад посвящён обновлённой методике формирования МОРС на основе дополненной базы данных, содержащей результаты расчётов для ледяных пластинок и столбиков. Полученный таким образом массив матриц, рассчитанных для различных параметров распределения частиц в облаке по размерам, пространственной ориентации и форме, будет использован для дальнейшего сопоставления с результатами экспериментов по поляризационному лазерному зондированию атмосферы с целью определения параметров микроструктуры реальных облаков.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-05-00710).

---

1. Samokhvalov I., Bryukhanov I. // E3S Web of Conferences, 11, 2016, 00021 (6 p.); doi: 10.1051/e3sconf/20161100021.

2. Самохвалов И. В., Насонов С. В., Брюханов И. Д., и др. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56, № 8/3. С. 281–283.

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

## Исследование ближнего поля струи с вихрями Дина при низких числах Рейнольдса

Вихорев В. В.

Новосибирский государственный университет

Главная особенность течения, сформированного в криволинейном канале – возникновение завихренности, которое приводит к рождению пары противовращающихся вихрей. Дальнейшее рассмотрение течения позволяет говорить об особенностях развития в затопленном пространстве.

В работах [1, 2], представлены результаты экспериментальных исследований структуры течения в затопленных круглых струях, сформированных в криволинейных каналах для различных диаметров сопла ( $d = 20, 9, 1.5$  мм) и влияния акустического поля на возникающие в струе вихревые структуры. Эксперименты проводились на струйных установках в ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск. Для визуализации течения применялось два метода исследования – лазерно – дымовая визуализация и метод PIV. С помощью этих методов были получены мгновенные картины поперечных и продольных сечений струи и поля завихренности  $\omega_z$ .

Для получения пространственных профилей средней и пульсационной составляющих скорости на различных расстояниях от сопла были проведены термоанемометрические измерения.

При переходе к меньшим диаметрам сопла был рассмотрен процесс диффузионного горения смеси пропан-бутана. Пламя при диффузионном горении пропана подвержено трансформации под действием акустического поля и развивающихся в струе неустойчивостей.

---

Литвиненко М. В., Литвиненко Ю. А., Вихорев В. В., Козлов Г. В. Влияние акустических колебаний на круглую струю, сформированную в криволинейном канале. Вестник НГУ. Сер. Физика. 2015. Т. 10. No. 2. С. 67–72.

Литвиненко Ю. А., Балбуцкий А. Б., Вихорев В. В., Козлов Г. В., Литвиненко М. В. Экспериментальное исследование развития гидродинамической неустойчивости в круглой микроструе пропана при воздействии внешнего акустического поля с горением и без горения. Вестник НГУ. Сер. Физика. 2015. Т. 10. No. 4. С. 21–28.

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

**Моделирование поведения металлической пластины при  
поверхностном нагреве потоком излучения в одномерном случае**

Гвоздев С. А.

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

Образование и распространение волн сжатия в твердых телах широко представлено в повседневной практике, например, контактные взаимодействия в технических механизмах, ультразвуковая диагностика, военное дело и т. д. Для разработки образцов новой техники и защитных средств необходимо уметь предсказывать результаты воздействий на твердые тела. Изготовление опытных образцов и натурные испытания изделий достаточно затратное мероприятие, поэтому есть необходимость в моделировании различных сценариев поведения образцов.

Повышение температуры вызывает повышение давления в металле и, как следствие, распространение волн. В работе была рассмотрена одномерная задача о поверхностном нагреве металлической пластины потоком излучения, в частности, влияние распространения волн на процесс переноса тепла в металлической пластине. Численное моделирование проводилось, на основе явной разностной схемы уравнений баланса массы, импульса и энергии. Для решения задачи о поверхностном нагреве, система уравнений баланса была дополнена уравнениями переноса тепла. Полная система уравнений замыкалась уравнениями состояния и процесса упруго-пластичности в форме Прандтля-Рейса. Задавались начальные и граничные условия.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, зав. лаб. № 11 Краус Е. И.

**Моделирование поведения металлической пластины при  
поверхностном нагреве потоком излучения в одномерном случае**

Гвоздев С. А.

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

Образование и распространение волн сжатия в твердых телах широко представлено в повседневной практике, например, контактные взаимодействия в технических механизмах, ультразвуковая диагностика, военное дело и т. д. Для разработки образцов новой техники и защитных средств необходимо уметь предсказывать результаты воздействий на твердые тела. Изготовление опытных образцов и натурные испытания изделий достаточно затратное мероприятие, поэтому есть необходимость в моделировании различных сценариев поведения образцов.

Повышение температуры вызывает повышение давления в металле и, как следствие, распространение волн. В работе была рассмотрена одномерная задача о поверхностном нагреве металлической пластины потоком излучения, в частности, влияние распространения волн на процесс переноса тепла в металлической пластине. Численное моделирование проводилось, на основе явной разностной схемы уравнений баланса массы, импульса и энергии. Для решения задачи о поверхностном нагреве, система уравнений баланса была дополнена уравнениями переноса тепла. Полная система уравнений замыкалась уравнениями состояния и процесса упруго-пластичности в форме Прандтля-Рейса. Задавались начальные и граничные условия.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Краус Е. И.

## **Повышение эффективности аппаратов воздушного охлаждения газа**

Грабовский В. Ю.

Тюменский индустриальный университет

При транспортировке газа по магистральным газопроводам немаловажную роль отводят процессу его охлаждения. Данный процесс достаточно энергоемок с точки зрения потребления энергии на привод аппаратов. Таким образом, повышение эффективности работы аппарата воздушного охлаждения (АВО) – один из основных факторов экономии топливно-энергетических ресурсов и снижения себестоимости транспорта газа.

В работе рассмотрены основные существующие методы повышения эффективности АВО, и выбран наиболее эффективный из них, заключающийся в установке рабочего колеса вентилятора из композитных материалов и замене диффузора, с целью снижения потерь и уменьшения степени рециркуляции воздуха. Произведен расчет предложенного типа АВО, в результате которого было получено, что потребление электроэнергии снизилось на 43 %, а также увеличилась эффективность охлаждения на 2,5 %.

Дополнительно проведен анализ изменения температуры газа по длине газопровода при наличии аппарата воздушного охлаждения, а также при его отсутствии.

На основе проведенного анализа было получено, что при определенных параметрах температура газа становится равной температуре грунта приблизительно на одном и том же расстоянии от компрессорной станции как при наличии, так и при отсутствии АВО. Полученные данные требуют дополнительного исследования в области применения аппаратов воздушного охлаждения при транспорте газа.

Научный руководитель – Захаренко С. О.

**Теоретическое и экспериментальное исследование  
формоустойчивости оболочек грузов для гравитационного накопителя**

Егоров В. А.

Новосибирский государственный университет

На сегодняшний день электроэнергетика устроена так, что производство электроэнергии должно строго соответствовать ее потреблению. Это приводит к тому, что неравномерное потребление электроэнергии в течение суток требует подстройки производства энергии. В случае использования ТЭС или АЭС такие подстройки приводят к существенному снижению их КПД. Для решения этой и подобных проблем разрабатываются накопители энергии промышленных масштабов. В определенных условиях наиболее целесообразно применение гравитационных накопителей с системой вертикального подъема твердых грузов. К грузам для таких накопителей энергии должны предъявляться жесткие эксплуатационные требования. Цель работы – определение этих требований и исследование способов их достижения.

В работе были изучены условия устойчивости грузов в виде высоких колон для наполняющих веществ с различными механическими характеристиками. Определено, что максимальное отношение прочности на сжатие уплотненного грунта к давлению его формирования достигается при числе пластичности 20-25 % и влажности 12 %.

Исследованы характеристики полимерных оболочек грузов и необходимые требования к ним. Для ориентированных полипропиленовых пленочных нитей исследования температурно-временной зависимости долговременной прочности и усталостные испытания предсказывают срок эксплуатации оболочек в течение 50 лет при нагрузке 20 МПа. Исследование ползучести нитей подтверждает прогноз значения длительной прочности и указывает на необходимость понижения доразрывного удлинения нитей с 10 % до 5 %.

Показана возможность использования комбинации сшивки электронным пучком и ориентационной термовытяжкой молекул полимера с целью улучшения показателей долговременной прочности и ползучести. Выработаны изменения в технологии получения нитей, приводящие к улучшению этих показателей.

Результаты расчетов и экспериментальных исследований будут применяться при конструировании гравитационных накопителей на твердых грузах.

Научный руководитель – канд. техн. наук Бакиров Т. С.

## Функция распределения скорости ветра для г. Тюмени

Жарикова Т. М.

Тюменский индустриальный университет

В Тюменской области преобладают ветра со скоростью от 3 до 5 м/с. По данным повторяемости направления ветра, в январе доминируют юго-западные ветры (33 %), а в июле – северо-западные (24 %). Вероятность скорости ветра в январе составляет 29,4 %, в июле – 38,4 %.

В таблице 1 показаны скорости ветра и вероятности распределения ветра, а также дифференциальная вероятность появления скорости для г. Тюмени, для января месяца. Аналогичная работа проводится для остальных месяцев года.

Таблица 1

Характеристики ветроэнергетических ресурсов г. Тюмени

Скорость ветра $u$ , м/с	Вероятность распределения ветра $f(u)$ , %	Дифференциальная вероятность появления скорости $t_i$
0-1	25,8	2260,08
2-3	29,4	2569,56
4-5	22,3	1949,02
6-7	12,4	1083,76
8-9	4,4	384,56
10-11	2,5	218,5
12-13	2	174,8

Функция распределения скорости ветра г. Тюмень:

$$f(u) = \left(\frac{k}{c}\right) \times \left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} \times e^{-\left(\frac{u}{c}\right)^k};$$

$$t_i = \frac{f(u) \times 8760}{100};$$

$$c \times \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) = u_i \times t_i;$$

$$c^2 \times \Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) = u_i \times t_i;$$

$$f(u) = 0,323 \times \left(\frac{u}{c}\right)^{1,102} \times e^{-\left(\frac{u}{6,514}\right)^{2,102}}.$$

Определяя функцию распределения по месяцам года и аналитическую функцию зависимость мощности ВЭУ от скорости ветра в районе г. Тюмени, можно рассчитать ожидаемую выработку электрической энергии в течение года.

Научный руководитель – канд. тех. наук, доцент Антонова Е. О.

## **Определение оптимальных условий заряжания при начальной температуре +40 °С**

Зыкова А. И., Саморокова Н. М., Сидоров А. Д.  
Томский государственный университет

Повышение дульной скорости снаряда остается одной из основных задач внутриваллистического проектирования артиллерийских систем. Одним из методов ее решения – использование вместе со снарядом присоединенного заряда (ПЗ). ПЗ – это дополнительное топливо нового типа располагается непосредственно за снарядом и движется вместе с ним, обеспечивая дополнительный подгон. Настоящее исследование способствует совершенствованию традиционного артиллерийского вооружения.

Целью данной работы был расчет максимально возможных дульных скоростей снаряда в допустимом диапазоне давлений и необходимой для этого компоновки пороха и топлива ПЗ, которые определялись путем параметрических исследований на основании серии экспериментов на модельной установке при начальной температуре метания +40 °С. В опытах использовался инертный модельный снаряд фиксированной массы, зерненный пороховой заряд, ПЗ из перспективного топлива в полиэтиленовом контейнере. В опытах измерялись давление в камере установки, скорость снаряда при движении по стволу и в момент вылета.

Для выполнения работы была посчитана серия опытов, проведенных в НИИ ПММ ТГУ. В результате проведенных расчетов был получен закон горения нового топлива ПЗ при начальной температуре метания +40 °С. Все расчетные величины определялись как параметры согласования расчетных и экспериментальных данных при решении прямой задачи внутренней баллистики. Рассогласование экспериментальных и расчетных величин: не превышает 1 %.

В ходе параметрических исследования изменялась масса штатного заряда в камере и масса присоединенного заряда ПЗ. В допустимом диапазоне давлений скорость остается практически неизменной вне зависимости от того, на сколько увеличивается масса пороха или масса ПЗ. Это обусловлено слишком быстрым сгоранием ПЗ.

Однако, повышение дульной скорости может достигаться при воспламенении ПЗ с некоторой задержкой, поэтому были найдены оптимальные импульсы задержки воспламенения, которые позволили увеличить скорость снаряда на 21 %. На практике это может быть реализовано за счет использования замедлителей воспламенения.

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

**Исследование влияния двумерной шероховатости  
на структуру течения в области благоприятного градиента давления  
на скользящем крыле**

Каприлевская В. С.

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

Для современных самолетов гражданской и военной авиации, оборудованных стреловидными крыльями, типичной проблемой является формирование продольных возмущений, ввиду технологий изготовления и условий эксплуатации крыльев. К ним относятся: общая шероховатость поверхности, наличие заклепок и стыков в подвижных частях крыла, налипание снега и пыли во время полета. Существование вторичного течения при обтекании стреловидного крыла является причиной реализации дополнительного механизма неустойчивости. Вместе это ведет к ламинарно-турбулентному переходу при благоприятном градиенте давления. При этом остается малоисследованным вопрос о влиянии двумерной шероховатости на данный процесс.

Для моделирования подобной ситуации в малотурбулентной аэродинамической трубе АТ-324 ИТПМ СО РАН проводилась серия экспериментов по обтеканию скользящего крыла при наличии двумерного и трехмерного элементов шероховатости. Многослойная двумерная шероховатость с шириной 15 мм, длиной 270 мм и толщиной одного слоя 0.13 мм была расположена за трехмерной цилиндрической шероховатостью диаметром 1.6 мм и высотой 0.78 мм. Модель крыла была установлена под углом атаки  $-11,1^\circ$  для формирования благоприятного градиента давления над верхней плоскостью крыла. Скорость набегающего потока составила 9.2 м/с. Возбуждение вторичных возмущений осуществлялось с помощью наложения акустического поля. Интенсивность звука была измерена шумомером и составила 90 дБ.

В результате проделанной работы было получено, что при обтекании двумерного элемента шероховатости происходит выработка нового поперечного масштаба продольных возмущений. Также обнаружено, что при наложении акустического поля процессы перестроения продольных структур сдвигаются вверх по течению.

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

## Сравнение методов калибровки трехкомпонентного термоанемометра

Корнев Э. В.

Новосибирский государственный университет

Одним из классических инструментов при решении задач аэродинамики является термоанемометр – прибор для измерения скорости потока жидкости или газа, принцип действия которого основан на зависимости между скоростью потока и теплоотдачей проволоочки, помещенной в поток и нагретой электрическим током. Наиболее широко используются однокомпонентные приборы с применением датчиков с одним чувствительным элементом. Такие устройства позволяют проводить измерения модуля скорости и пульсаций потока. Для того чтобы измерить значения компонент вектора скорости и пульсаций потока по измеренным компонентам, используются многоканальные приборы с применением датчиков, имеющих три и более чувствительных элемента.

В работе представлено описание разработанного трехкомпонентного термоанемометра ТПС3-2. Прибор выполнен по схеме термоанемометра постоянного сопротивления (ТПС) так, что величина подаваемой на проволочку электрической энергии в любой момент времени соответствует теплоотдаче в окружающую среду. Таким образом, напряжение питания моста изменяется в зависимости от скорости потока и измеряется в процессе работы. Термоанемометр содержит три канала измерения скорости потока (измерительных моста) и измеритель температуры набегающего потока. Принцип определения направления вектора скорости основан на изменении условий охлаждения нагретого чувствительного элемента потоком в зависимости от направления обдува. Это выражается в изменении выходных напряжений прибора в зависимости от ориентации датчика в потоке. За счет специальной калибровки возможно определение ориентации датчика и вычисление скорости потока на основе трех напряжений, измеренных тремя каналами прибора.

В работе приводится сравнение результатов калибровки датчика термоанемометра ТПС3-2, полученных методом прямой калибровки, использующим алгоритм поиска по таблице, и аналитическим методом, основанном на принципе эффективных скоростей охлаждения.

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

**Изучение феномена снижения эффективности фильтрации  
волокнистых фильтрующих материалов  
при загрязнении капельным аэрозолем**

Лебедев А. С., Мик И. А.

Новосибирский государственный университет  
ООО «Тион Инжиниринг»

Впервые получен НЕРА (High Efficiency Particulate Air) фильтр объемной фильтрации на основе толстослойного самонесущего волокнистого материала. Для улучшения фильтрующих свойств была разработана и испытана методика внедрения в толщу материала фильтра волокон субмикронного диаметра. Также была разработана методика исследования эксплуатационных характеристик фильтрующих материалов, включающая в себя последовательное загрязнение образцов.

Разработан стенд для контролируемого загрязнения образцов аэрозолями твердых (поваренная соль) и жидких (сигаретный дым) частиц. Создан испытательный стенд для исследования эффективности фильтрации образцов фильтрующего материала.

Ресурсные испытания образцов фильтрующего материала показали, что загрязнение твердыми и жидкими частицами по-разному влияет на изменение эффективности фильтрации и перепад давления материала. В то время, как по мере загрязнения твердыми частицами, эффективность фильтрации материала растет, для случая жидких частиц было зафиксировано падение эффективности. При этом, перепад давления при загрязнении твердыми частицами растет заметно быстрее, чем в случае загрязнения жидкими частицами табачного дыма. Исследование подвергнутых загрязнению образцов с помощью сканирующей электронной микроскопии показало, что тонкая структура субмикронных волокон в наиболее загрязненных слоях объемного фильтрующего материала нарушена, тогда как в слабо загрязненных волокна сохранили свою целостность. Это явление происходит, по-видимому, под воздействием двух факторов, во-первых: из-за действия сил поверхностного натяжения, при объединении и укрупнении жидких частиц жидкость деформирует сетку волокон вплоть до ее разрыва, во-вторых: жидкие частицы плотно упаковываются в слой волокна, которые в объемном фильтре имеет плоскую геометрию, и затрудняют проход воздуха через слой, в результате сила сопротивления воздуха растет слой фильтрующих волокон.

Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук, доцент Горев В. Н.

## **Экспериментальное исследование взаимодействия сверхзвукового потока с поперечно направленной детонационной волной**

Литвинцева А. А.

Новосибирский государственный университет

Целью работы является изучение взаимодействия сверхзвукового газового потока с поперечно направленной детонационной волной, исследование процессов воспламенения и детонации в сверхзвуковом потоке, инициируемых детонационной волной. В качестве рабочего тела используется смесь воздуха с горючим газом (водород, метан, кислород). Смесь газа может быть предварительно подготовлена в форкамере или в струю воздуха может инжектироваться горючий газ. Во втором случае будет изучаться воздействие инжектируемой струи на структуру потока и исследоваться их перемешивание.

Импульсная аэродинамическая установка включает форкамеру емкостью 8л с электродинамическим клапаном, профилированное щелевое сопло (число  $M = 4$ , сечение в сверхзвуковой части  $70 \times 70 \text{ мм}^2$ ).

Установка оснащена системой диагностики, в которую входят электрические зонды для измерения скорости детонационной волны в детонационной трубке, многоканальная система регистрации временных зависимостей давлений тензодатчиками с дифференциальными усилителями для измерений давлений Пито, статистических давлений в канале, давления в дозвуковой части сопла, пьезодатчики для регистрации амплитуды фронтов давления. Для получения теневых картин потока установлен прибор Теплера с диаметром пучка 125 мм. Реализованы два способа получения изображений: в первом в качестве источника света использовался полупроводниковый лазер, во втором применялся RGB-светодиод, позволяющий получить три теневые картины, разнесенные по времени на заданную величину.

Давление торможения до 1 МПа, температура торможения комнатная. Время открытия клапана 2.3 мс. Время установления потока 4.5 мс.

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

## Низкотемпературная сепарация природного газа с применением вихревых труб

Макаров А. В.

Тюменский индустриальный университет

Вихревая труба (труба Ранка-Хилша) – устройство, в котором сжатый газ при расширении разделяется на два потока – один более холодный, чем исходный, и второй – более горячий. Принцип его действия основан на одноименном эффекте энергетического разделения в потоке вязкой сжимаемой жидкости.

Наибольший интерес представляет применение холодильного эффекта вихревой трубы в установках низкотемпературной сепарации (УНТС) для выделения из газа нежелательных примесей – паров воды и тяжелых углеводородов.

Предложенная схема УНТС состоит из сепаратора первой ступени, рекуперативного теплообменника-сепаратора и вихревой трубы. Использование рекуперативного теплообмена в сочетании с вихревой трубой позволяет получить более высокую степень сепарации, по сравнению с дроссельной схемой. Помимо этого, установка, основанная на вихревом эффекте способна обеспечивать необходимый перепад температур при меньшем перепаде давления, нежели установка, использующая эффект Джоуля-Томпсона.

Одно из направлений дальнейшего развития технологии сепарации с применением эффекта Ранка-Хилша – разработка и эксплуатация трехпоточных вихревых труб (ТВТ). Главная проблема при использовании «стандартной» двухпоточной вихревой трубы (ДВТ) для низкотемпературной сепарации – испарение части конденсата и его унос вместе с горячим потоком при неудовлетворительной работе сепаратора, что негативно сказывается на эффективности газоочистки в целом. Применение ТВТ позволяет не только отделить жидкую фазу, но и повысить степень извлечения высших углеводородов при практически идентичной ДВТ тепло- и холодопроизводительности на существенно меньших перепадах давления.

В данной работе был проведен расчет параметров трехпоточной вихревой трубы по методике, описанной в работах Меркулова А. П. На основании полученных данных, в программном пакете для моделирования газо- и гидродинамических процессов Ansys CFX была построена модель ТВТ и проведена серия испытаний для определения оптимальных параметров и режима работы установки.

Научный руководитель – Захаренко С. О.

**Математическая модель гетерогенной упругой среды**

Мишин А. В.

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

В данной работе представлена физическая модель гетерогенной упругой среды, которая представляет собой периодическую смесь. Описаны основные детали метода условных моментов (МУМ) на примере уравнения теплопроводности, его преимущество и недостатки. Произведено сравнение с другими методами, такими как метод смесей (МС) и теория эффективных модулей (ТЭМ).

Приведен анализ стационарных уравнений движения и теплопроводности для изотропных и анизотропных гетерогенных структур, полученных МУМ, который включает в себя описание новых членов в данных уравнениях (т. к. билаплас в уравнении теплопроводности), эффективных параметров (коэффициент теплопроводности, параметры Ламе), вида межфазных взаимодействий (межфазные силы и поток тепла).

В качестве примеров приведены аналитические решения гетерогенных одномерных уравнений. Найдена для многофазной гетерогенной среды критическая пористость. Приведено сравнение с другими методами и экспериментом.

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

**Влияние нагрева/охлаждения носика конической модели на эволюцию возмущений в гиперзвуковом пограничном слое**

Настобурский А. С., Бунтин Д. А.  
Новосибирский государственный университет

Положение ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП) в гиперзвуковом пограничном слое оказывает существенное влияние на такие характеристики космического аппарата, как теплообмен с окружающей средой, поверхностное трение и сопротивление. Предсказание ЛТП является одной из важнейших задач динамики вязкой жидкости [1]. В работе [2] было исследовано, что неравномерности распределения температуры на поверхности модели могут значительно влиять на положение ЛТП. Также было показано, что этот эффект зависит от выбора зоны локального температурного воздействия. Целью текущей работы является определение нагрева/охлаждения острого и притупленных носиков конуса на положение ЛТП при различных параметрах потока.

Влияние нагрева/охлаждения носика конической модели на эволюцию возмущений в гиперзвуковом пограничном слое было изучено экспериментально в гиперзвуковой аэродинамической установке «Транзит-М» при числе Маха  $M = 5,95$  в диапазоне единичных чисел Рейнольдса  $Re_1 = (6 \div 52) \cdot 10^6$  1/м на конусе длиной  $L = 450$  мм. Эксперименты выполнялись для различных радиусов притупления  $r_n = 0; 0,75; 1,5; 2$  мм. Для охлаждения носика до температур  $T_c = -190$  °С применялся жидкий азот, а нагрев (до  $T_h = 150 \div 180$  °С) производился омическим нагревателем. Температура поверхности модели измерялась тепловизионной камерой. Положение ЛТП определялось по тепловым потокам, распределение которых получено с помощью алгоритма Кука-Фельдермана.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-01-04788.

---

1. Бойко А. В., Кирилловский С. В., Маслов А. А., Поплавская Т. В. Инженерное моделирование ламинарно-турбулентного перехода: достижения и проблемы (обзор) // ПМТФ, Т. 56. № 5. 2015.

2. Fedorov A., Soudakov V., Egorov I., Sidorenko A., Gromyko Y., Bountin D., Polivanov P., Maslov A. High-speed boundary-layer stability on a cone with localized wall heating or cooling // AIAA Journal. 2015. Vol. 53. P. 2512–2524.

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

## **Исследование газожидкостной струи конвергентного сопла с центральной подачей жидкости**

Нестеров А. Ю.

Новосибирский государственный университет

Газожидкостные форсунки широко используются для распыления жидкости в различных технологиях, например, при сжигании отходов в нефтяной отрасли. Для понимания процессов взаимодействия жидких струй и капель с газовым потоком необходимы комплексные экспериментальные исследования газожидкостных струй. Ранее установлено, что одним из факторов, влияющих на структуру потока, является образование пленки на внутренней поверхности сопла, разрушение которой дает крупные капли на периферии струи. Эта особенность наряду с формированием мелких капель в ядре струи вызывает выраженную бимодальность фракционного состава спрея. Бимодальность может быть также следствием вторичного разрушения капель. Для определения роли вторичного разрушения в бимодальной структуре потока проведено моделирование газожидкостной струи при центральной подаче жидкости в форсунку. При этом исключается образование крупных капель на периферии струи из-за стекающей пленки. Газожидкостный поток исследован оптическими методами: теневая визуализация потока, определение дисперсного состава методом малоуглового рассеяния (Malvern Spraytec), определение скорости газа и дисперсной фазы методами PIV и лазерной доплеровской анемометрии. Для работы с плотными газожидкостными потоками был создан прототип лазерного доплеровского анемометра на основе промышленного измерителя длины волны света.

Комплексное исследование газожидкостного потока позволило получить профили скорости газа и жидкости, а также распределение капель по размерам. Показана принципиальная возможность измерения скорости частиц методом ЛДА. Подтверждено наличие бимодального распределения размеров капель в потоке в отсутствие стекающей пленки. При определении возможности возникновения бимодального распределения рассмотрены механизмы вторичного разрушения капель в потоке, характеризующиеся числами Вебера  $We = 50-100$ . Установлено, что  $We$  соответствуют вторичному разрушению капель по типу «парашют» и «парашют со струйкой», создающим два характерных размера капель.

Научный руководитель: д-р физ.-мат. наук Поплавский С. В.

**Анализ интенсивности многократно рассеянного  
в плотной аэрозольной среде излучения**

Ни Е. В., Брюханов И. Д.

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Научные исследования, контроль качества продукции в промышленном производстве, мониторинг окружающей среды органами охраны труда и экологического контроля требуют оперативного получения информации о размерах и концентрации частиц в дисперсной среде. Предпочтительность использования метода лазерного зондирования для решения таких задач определяется его высокой разрешающей способностью, оперативностью получаемых экспериментальных данных и возможностью определения параметров микроструктуры аэрозолей там, где их невозможно определить контактными методами. Чаще всего для интерпретации получаемых данных используется уравнение лазерного зондирования, полученное в приближении однократного рассеяния. Это справедливо при зондировании сред, характеризующихся малой оптической плотностью ( $\tau \leq 1$ ). Исследование оптически плотных сред осложняется необходимостью учёта многократного рассеяния, который представляет собой непростую задачу, как в плане теоретического описания, так и при практической реализации.

На кафедре ОЭС и ДЗ НИ ТГУ разрабатывается оптический анализатор размеров и концентрации частиц дисперсных сред на основе учёта многократного рассеяния. Для пространственной фильтрации потоков, обусловленных однократным и многократным рассеянием, предполагается использовать два приёмных устройства: одно из них – работающее «на просвет», – предназначено для регистрации однократно рассеянного излучения; второе используется для регистрации многократно рассеянного назад излучение.

В докладе обсуждаются принципиальная схема прибора и результаты лабораторного моделирования с использованием водно-молочного раствора с различной концентрацией жиров.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-05-00710).

Научный руководитель – к.ф.-м.н., доцент Брюханова В. В.

## Моделирование режимов горения метано-воздушной смеси в горелке с раздельной подачей топлива

Никитин П. Ю.

Томский государственный университет

Результаты, полученные при решении задач о влиянии диффузии на воспламенение и горение газовых смесей, могут быть использованы для повышения коэффициента полезного действия двигателей внутреннего сгорания с раздельной подачей топлива и окислителя.

Целью настоящей работы является исследование диффузионного горения метано-воздушной смеси в камере сгорания с раздельной подачей топлива и окислителя, определение закономерности воспламенения смеси.

Рассматривается камера сгорания с раздельной подачей компонентов топлива, представляющая собой цилиндрическую трубку радиуса  $R$ . Через камеру сгорания со скоростью  $U$  раздельно подаются метан и кислород с концентрациями  $a_{O_2in}$  и  $a_{CH_4in}$ . Метан подается на радиусе  $r_{shag}$ . Кислород подается на периферии через пространство между стенками трубки и границей подачи горючего. Внутри камеры сгорания газы перемешиваются за счет диффузии. Правый торец трубки разогрет до температуры  $T_5$ . Полагается, что газ обменивается теплом с боковой поверхностью трубки по закону Ньютона с коэффициентом теплообмена  $\alpha_5$ . Теплоприход от химического процесса описывается по закону Аррениуса со вторым порядком реакции.

Математическая постановка задачи определяется уравнениями теплопроводности для газа, баланса массы метана в смеси и кислорода с соответствующими начальными и граничными условиями.

Решение задачи было выполнено конечно-разностным методом продольно-поперечной прогонки. Точность численного счета проверялась путем решения частных постановок задачи горения. Согласно проверке на достоверность погрешность расчета составила не более 1 %

Из решения задачи показан механизм формирования и распространения фронта горения метано-воздушной смеси в случае избытка окислителя.

Показано, что воспламенение происходит только в том случае, когда окислитель и горючее перемешиваются в соотношении, достаточном для начала химических реакций, при этом температура смеси в данной области должна быть выше температуры самовоспламенения метано-воздушной смеси.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, Моисеева К. М.

## **Моделирование течения крови в дисковом насосе вспомогательного кровообращения**

Новичихина Д. А.

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

Использование дискового насоса трения (насоса Теслы) в качестве имплантируемого насоса вспомогательного кровообращения обусловлено его характеристиками (в частности малой тромбогенностью). В ИТПМ СО РАН создан прототип такого имплантируемого насоса.

В работе проводится аналитическое и численное моделирование течения крови в дисковом насосе вспомогательного кровообращения.

Разработана математическая модель течения вязкой жидкости в зазоре дискового насоса с плоскими и профилированными дисками. На основе этой модели определены оптимальные параметры прототипа насоса – расходно-напорные характеристики, величина междискового зазора, входной и выходной радиусы дисков.

Найдено аналитическое решение уравнений Навье-Стокса для установившегося ламинарного течения жидкости между двумя равномерно и совместно вращающимися дисками. Величина зазор между дисками не постоянная и задается аналитической формулой. Решение ищется асимптотическим разложением компонент скорости и давления в радиальном направлении. Полученная бесконечная система дифференциальных уравнений в частных производных образует рекуррентные соотношения, из которых неизвестные функции рассчитываются последовательно. Нулевая и первая аппроксимации решения находятся аналитически, а последующие аппроксимации требуют решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений.

Проведено сравнение аналитических расчетов (первая аппроксимации решения) и численного решения (система уравнений Навье-Стокса) для течения в зазоре между двумя плоскими и профилированными вращающимися дисками.

Получены распределения давления, тангенциальной и радиальной скоростей для аналитического и численного решения для случая плоских и неплоских дисков. Показано, что аналитические формулы хорошо описывают течение между плоскими и профилированными дисками и их можно использовать для расчетов характеристик дисковых насосов.

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

## **О новом механизме воздействия слабых ударных волн на сверхзвуковой пограничный слой**

Питеримова М. В.

Новосибирский государственный университет

Изучение возникновения турбулентности в сжимаемых пограничных слоях, реализующихся около поверхности летательных аппаратов (ЛА), необходимо для развития перспективной высокоскоростной авиационной техники. Как известно, сценарий ламинарно-турбулентного перехода в пограничных слоях в значительной степени зависит от уровня возмущений в набегающем потоке. В сверхзвуковых аэродинамических трубах существует высокий уровень акустических пульсаций в рабочей части, вызывающий возбуждение собственных возмущений пограничного слоя, развитие которых приводит к раннему переходу. Кроме акустических пульсаций в рабочей части аэродинамической трубы на обтекание модели летательных аппаратов могут воздействовать квазистационарные возмущения в виде волн Маха. Поскольку такое воздействие на пограничный слой может увеличивать тепловые потоки к поверхности даже при ламинарном обтекании, то его необходимо учитывать при оценке уровней теплового нагружения ЛА как дополнительное к известным явлениям, например, таким как ламинарно-турбулентный переход. Это особенно важно для тонких передних кромок: они могут разрушаться от дополнительного нагрева при больших скоростях движения. Для условий полета слабые ударные волны могут излучаться с поверхности аппаратов и воздействовать на элементы ЛА.

В работе развивается методика введения контролируемых слабых ударных волн в сверхзвуковой поток. Целью экспериментов является определение зоны взаимодействия падающих скачков с областью течения около передних кромок моделей, и исследовать механизмы зарождения и развития возмущений в пограничных слоях.

Эксперименты были проведены в сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-325 ИТПМ СО РАН при числе Маха  $M = 2$ . Слабые ударные волны генерировались с помощью двумерной наклейки размещённой на боковой поверхности стенки рабочей части. Измерения производились в свободном потоке и пограничном слое плоской пластины.

По условиям экспериментов получено, что двумерная наклейка в рабочей части аэродинамической трубы генерирует возмущение в виде  $N$ -волны Эв в свободном потоке. При воздействии этой волны на переднюю кромку плоской пластины впервые обнаружено порождение пары совращающихся стационарных продольных вихрей в пограничном слое.

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

## **Исследование топологии ограниченного вихревого течения в полигональных контейнерах**

Подольская И. Ю., Шарифуллин Б. Р.

Новосибирский государственный университет

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

При разработке вихревых аппаратов в энергетических, биологических и химических технологиях для улучшения тепло-массообменных процессов необходимо знать характеристики вихревого течения, режимы формирования и разрушения самоорганизующихся вихревых структур.

Вихревой распад – один из ключевых параметров, влияющих на процессы переноса во многих инженерных приложениях. Данное явление характеризуется самопроизвольной сменой структуры закрученного течения и образованием рециркуляционных зон.

Наиболее простой моделью для исследования вихревых распадов является вихревое течение, генерируемое в цилиндрическом контейнере вращением одного из его торцов. Известно, что возникновение вихревого распада в такой модели зависит от числа Рейнольдса  $Re = \Omega R^2 / \nu$ , где  $\Omega$  – угловая скорость вращения крышки,  $R$  – ее радиус, а  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости, от относительного удлинения  $h$  (отношение высоты цилиндра к его радиусу), а также от граничных условий.

В различных технических приложениях конфигурация контейнера может отличаться от цилиндрической. Геометрия контейнера может существенно влиять на условия возникновения вихревого распада.

В работе проведено исследование влияния объема контейнера на структуру замкнутого вихревого течения.

Выполнено сравнение структуры вихревого течения в полигональных контейнерах при отсутствии осевой симметрии с вихревым течением в осесимметричных конфигурациях замкнутого контейнера.

Показано, что структура течения в полигональном контейнере имеет общие закономерности со структурой течения в цилиндрическом контейнере с различной геометрией боковой поверхности и с частично вращающейся крышкой.

Научный руководитель – д-р техн. наук, проф. РАН Наумов И. В.

**Исследование влияния фракции и массовой доли абразивной компоненты на свойства композиционных покрытий, сформированных методом холодного газодинамического напыления**

Полухин А. А., Шикалов В. С., Ряшин Н. С., Филиппов А. А.  
Институт теоретической и прикладной механики  
им. С. А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск

Холодное газодинамическое напыление (ХГН) – метод формирования покрытий, прототипирования 3D объектов и создания новых материалов, в том числе композиционных. Для создания таких материалов могут использоваться смеси порошков металлов и высокотвердой керамики  $V_4C$ , включения которой способны повысить стойкость всего материала к абразивному износу и увеличить его твердость. В настоящей работе исследовано влияние фракции порошков карбида бора и его массового содержания в композиционных ХГН покрытиях  $Ni + V_4C$  на свойства поверхности, микроструктуру и микротвердость этих покрытий.

С применением плоского сопла Лавалья, подложек из титанового сплава BT20 и порошковых смесей никеля и  $V_4C$  различных фракций получены композиционные  $Ni + V_4C$  покрытия с различным содержанием  $V_4C$ . Измерены средние значений параметров шероховатости  $Ra$ ,  $Rq$  и  $Rt$  этих покрытий, исследованы их микроструктура и состав с помощью оптических методов и методов электронной микроскопии. Для порошков  $V_4C$  с  $d_{50} = 44$  и  $63$  мкм получено объемное содержание абразивной компоненты в ХГН покрытиях  $C_{Va} > 0,27$ . Проведено измерение микротвердости покрытий в поперечном сечении. Получена зависимость микротвердости композитных ХГН покрытий  $Ni + V_4C$  от массового содержания в них частиц карбида бора и размера этих частиц.

Результаты данной работы демонстрируют возможность формирования методом ХГН композитных  $Ni + V_4C$  покрытий с заданными составом и механическими характеристиками.

Работа выполнена благодаря финансовой поддержке РФФИ по гранту № 16-19-10300.

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

## **Моделирование оптической системы приёмного канала коаксиального лидара многократного рассеяния**

Попов А. П.

Томский государственный университет

Сегодня лидарные исследования аэрозолей проводятся во многих развитых странах мира, таких как США, РФ, Канада и др. Обычно обработка лидарных данных осуществляется на основе уравнения лазерного зондирования, которое учитывает только однократное рассеяние и справедливо при зондировании образование малой оптической плотности. Если же среда оптически более плотная, необходимо учитывать вклад многократного рассеяния в лидарный сигнал. В зависимости от оптических и геометрических характеристик исследуемой среды мощность лидарного сигнала многократного рассеяния может принимать не только сопоставимые, но и существенно превышающие значения по сравнению с мощностью сигнала однократного рассеяния.

Поскольку сигнал однократного рассеяния формируется в узком объёме рассеивающей среды, ограниченном диаграммой направленности передатчика, а сигнал двукратного рассеяния в объёме, поперечное сечение которого определяется диаграммой направленности приёмной системы, вклад двукратного рассеяния можно определить, зная зависимость мощности лидарного сигнала от угла поля зрения. Выбор конкретных значений угла поля зрения, эффективных для выделения сигнала многократного рассеяния из лидарного сигнала, должен осуществляться, исходя из дальности облака и глубины зондирования [1].

Помимо мощности многократное рассеяние оказывает влияние ещё и на поляризационные характеристики лидарного сигнала. По этой причине использование в качестве фотоприёмного устройства ПЗС-камеры, позволяющей регистрировать не только мощность, но и распределение интенсивности в плоскости регистрации, позволяет существенно расширить возможности существующих лидарных систем.

В докладе обсуждаются результаты моделирования приёмной системы коаксиального лидара с использованием ПЗС-камеры.

---

1. Брюханова В.В. Лидарный сигнал в приближении двукратного рассеяния от удаленных аэрозольных образований: Дисс. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.05 – Оптика / Томск, 2013. 157 с.

Научный руководитель – к.ф.-м.н., доцент Брюханова В. В.

**Влияние звукопоглощающих покрытий на развитие возмущений на пластине в потоке смеси колебательно-возбужденных газов**

Решетова А. И.

Новосибирский государственный университет

Высокие скорости и температуры, реализующиеся вблизи летательных аппаратов при входе в атмосферу, приводят к возбуждению и неравновесности колебательных степеней свободы. Процессы возбуждения и неравновесности оказывают существенное воздействие, как на среднее течение, так и на развитие возмущений в гиперзвуковых пограничных слоях. Развивающимися возмущениями можно управлять методом звукопоглощающих покрытий [1].

В данной работе проведено численное моделирование обтекания сплошной пластины и пластины со звукопоглощающим покрытием под углом атаки в гиперзвуковом потоке ( $M_\infty=8,42$ ,  $Re_1=1,36 \times 10^6$ ,  $P_\infty=371,5$  Па,  $T_0=2430$  К,  $T_\infty=300$  К) смеси  $CO_2$  (0,44) с  $N_2$  (0,56) для условий экспериментов в импульсной аэродинамической трубе ИТ-302М ИТПМ СО РАН с учетом двух каналов колебательной релаксации молекул  $CO_2$ .

Численное моделирование проводилось на базе решения двумерных нестационарных уравнений Навье-Стокса в рамках модели термически совершенного газа. Для расчета влияния колебательной релаксации молекул  $CO_2$  к уравнениям Навье-Стокса производилось добавление 4-х уравнений сохранения колебательной энергии (для каждой колебательной степени свободы молекул  $CO_2$ ). Учёт неравновесности колебательных степеней свободы молекул  $CO_2$  с конечным временем релаксации производился добавлением источниковых членов, рассчитываемых по уравнению Ландау-Теллера при взаимодействии молекул  $CO_2$  между собой и при взаимодействии их с молекулами  $N_2$ . Акустические возмущения набегающего потока моделировались заданием суперпозиции стационарного течения и плоских монохроматических акустических.

В работе получены данные по динамике развития возмущений на сплошной пластине и пластине со звукопоглощающим покрытием при различных углах атаки. Показано, что звукопоглощающее покрытие на 18–57 % ослабляет интенсивность пульсаций давления на поверхности пластины по сравнению со сплошной поверхностью. Получено согласие расчетных и экспериментальных данных по пульсациям давления на поверхности пластины.

---

1. Воздействие звукопоглощающих материалов на интенсивность возмущений в ударном слое пластины, расположенной под углом атаки // А. А. Маслов, С. Г. Миронов и др. ПМТФ. Т. 53, № 2, 2012. С. 21–32.

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

## **Эволюция волнового пакета в сверхзвуковом пограничном слое на скользящем крыле**

Руменских М. С.

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

Недавние успехи в изучении поздних стадий перехода при малых дозвуковых скоростях связаны с методикой импульсного возбуждения в пограничном слое возмущений, локализованных по пространству и времени (волновые пакеты). Эксперименты показывают, что импульсное воздействие на пограничный слой с помощью метода «вдвух-отсос» через щель или вибрирующей поверхности приводит к образованию когерентных структур в сдвиговом течении. Аналогичных экспериментов с импульсным возбуждением волновых пакетов в сверхзвуковом пограничном слое скользящего крыла до сих пор не проводилось. Целью работы было возбуждение волнового пакета в сверхзвуковом пограничном слое скользящего крыла и изучение его эволюции вниз по потоку.

Эксперименты выполнены в малошумной сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-325 ИТПМ СО РАН при числе Маха  $M = 2$  и единичном числе Рейнольдса  $Re_1 = 6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ . В экспериментах использовалась модель крыла с углом скольжения передней кромки  $40^\circ$ . Измерения средних и пульсационных характеристик течения проводились с помощью термоанемометра постоянного сопротивления. Постоянная составляющая напряжения с выхода термоанемометра измерялась с помощью цифрового вольтметра Agilent 34401A. Пульсационный сигнал оцифровывался 12 разрядным АЦП с частотой дискретизации 1,25 МГц.

Искусственный волновой пакет генерировался импульсным тлеющим разрядом на поверхности скользящего крыла. Разряд зажигался между двумя медными электродами, отделенные друг от друга и от модели изолятором. Размер диэлектрического промежутка составлял около 0,6 мм. Electroды располагались параллельно набегающему потоку и монтировались заподлицо рабочей поверхности крыла. Для выделения контролируемых возмущений использовалось синхронное осреднение сигнала по 320 реализациям.

В работе получены данные об эволюции волнового пакета в сверхзвуковом пограничном слое скользящего крыла. Приводится сравнение с ранее полученными результатами на плоской пластине.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Ермолаев Ю. Г.

## **Кинематические характеристики течения степенной жидкости в трубе с внезапным сужением**

Рыльцева К. Е.

Томский государственный университет

Конструктивные элементы типа сужение или расширение являются широко распространенными составляющими трубопроводов и других систем для транспортировки различных материалов в жидком состоянии. Течения через подобные геометрические особенности имеют характерную структуру, которая зависит от множества факторов, в том числе от реологии жидкости, режима течения и геометрии конструкции. В связи с этим существует необходимость исследования кинематических характеристик течения жидкости в каждом конкретном случае.

В работе исследуется ламинарное стационарное течение степенной жидкости в трубе с внезапным сужением. Задача формулируется в переменных функция тока – вихрь в цилиндрической системе координат. Реология среды описывается моделью Оствальда – де Виля.

Жидкость поступает в трубу через входное отверстие с постоянным расходом. На стенках трубы задаются условия прилипания, на оси симметрии выполняются условия симметрии. В выходном сечении реализуются мягкие граничные условия.

Решение задачи получено методом установления на основе конечно-разностной схемы переменных направлений. Сходимость метода расчета течения в широком диапазоне изменения параметра нелинейности в реологическом уравнении обеспечивается его регуляризацией.

Построенные распределения линий тока вдоль трубы демонстрируют одномерные течения в большей части потока и двумерные течения в окрестности скачка сечения трубы. На основе полученной картины течения вводятся безразмерные геометрические характеристики структуры потока (длины участков двумерного течения до и после скачка сечения и длина циркуляционной зоны, образующейся в окрестности угла), тестируются различные способы получения их численных значений, исследуется поведение в зависимости от числа Рейнольдса, степени сужения трубы и показателя нелинейности жидкости. Проводится анализ и сравнение результатов с экспериментальными и численными данными, представленными другими авторами.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-08-03935 и гранта Президента МК-710.2017.1.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, Фролов О. Ю.

## Моделирование параметров движения груза на трёхступенчатой парашютной системе

Сташков П. Е.

Новосибирское высшее военное командное училище

При десантировании грузов широкое применение нашли трёхступенчатые парашютные системы (например, ОКС-4). Работа каждой из этих систем сопровождается последовательным вводом в действие стабилизирующего, тормозного и основного парашютов. При этом штатная эксплуатация ОКС-4 предполагает высоту десантирования не менее 150 м [1]. Целью работы является моделирование движения груза на трёхступенчатой парашютной системы (ПС) для наглядной иллюстрации основных фаз её работы и анализа нештатных вариантов десантирования, позволяющих уменьшить минимальную высоту отделения груза от воздушного судна.

В работе используется инженерный подход [2]. Решаются уравнения движения материальной точки и тела переменной массы. Для расчёта раскрытия и наполнения купола применена упрощённая модель [3], не требующая результатов эксперимента, и условие о постоянном пути наполнения [4].

Результаты расчётов сравнивались с данными, полученными после обработки видеосъемки реального десантирования грузов. Получено удовлетворительное согласие расчётных и экспериментальных данных.

В работе приводятся результаты, показывающие влияние метеоусловий, скорости десантирования, массы груза на параметры его движения. Показана возможность снижения минимальной высоты десантирования при использовании системы в одноступенчатом варианте.

---

1. Герасименко И. А. Воздушно-десантная подготовка. Часть I. Парашютно-десантные средства, их подготовка и десантирование личного состава (грузов). М.: Воениздат, 1986. 408 с.

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

3. Лобанов Н. А. Основы расчета и конструирования парашютов. М.: Машиностроение, 1965, 363 с.

4. Френч К. Е. Наполнение парашютов // Ракетная техника и космонавтика, 1963. Т. 1. № 11. С. 198–202.

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

## **Исследование структуры течения импактной закрученной струи с горением**

Толстогузов Р. В.

Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск,  
Новосибирский государственный университет

Импактные струи с горением широко применяются для оптимизации процессов обработки материалов, резке металлов, нагреве поверхностей. Закрутка потока позволяет существенно интенсифицировать процессы теплообмена, достичь радиальной однородности теплопереноса вблизи импактной поверхности и стабилизировать пламя в более широком диапазоне расхода потока по сравнению с потоком без закрутки. Однако, закрутка способствует образованию «застойных» вихревых зон, которые негативно сказываются на равномерности теплоотвода (прецессия и распад вихревого ядра). Данные особенности закрученных течений все еще недостаточно изучены даже для свободных струй и пламен, а для течений, натекающих на преграду, исследованы крайне слабо.

Данная работа посвящена исследованию влияния крупномасштабных вихревых структур, присутствующих в потоке, на структуру течения импактной закрученной струи с горением. Объектом данного исследования являются режимы горения закрученной струи, натекающей на преграду, при варьировании расстояния от сопла до импактной поверхности, числа Рейнольдса и коэффициента избытка топлива.

Экспериментальная установка включает горелочное устройство: профилированное сопло, внутри которого расположен завихритель лопастного типа, систему подачи пропановоздушной смеси, систему модуляции расхода смеси и термостатированную импактную поверхность. В работе определены резонансные частоты экспериментального стенда в диапазоне 10-1000 Гц, измерения проводились прецизионным микрофоном В&К. Измерение полей мгновенной скорости проводилось методом анемометрии по изображениям частиц (PIV). В поток добавлялись частицы диоксида титана. По измеренным полям мгновенной скорости были рассчитаны пульсации скорости и определены наиболее часто реализующиеся в потоке моды на основе метода главных компонент (POD).

Научный руководитель – Чикишев Л. М.

**Влияние величины угла сжатия на параметры динамического слоя за линией присоединения сверхзвукового отрывного течения**

Трубицына Л. П.

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

В работе [1] было обнаружено существование высоконапорного (динамического) слоя за линией присоединения сверхзвукового отрывного течения на угле сжатия. Динамический слой расположен над пограничным слоем и характеризуется высоким уровнем полного давления. Целью работы является определение диапазона значений угла сжатия, в котором существует динамический слой, и установление зависимости характеристик динамического слоя от величины угла сжатия.

Основной характеристикой динамического слоя в данном сечении является характерный пик на распределении измеренного полного давления (давления Пито) в зависимости от расстояния от поверхности уступа по нормали. Были проведены три серии измерений давления Пито для моделей угла сжатия с углом уступа  $20^\circ$ ,  $40^\circ$  и  $50^\circ$ . Экспериментальное оборудование и параметры потока описаны в [2]. Измерения проводились при помощи микроприёмника полного давления при разных расстояниях от линии присоединения, а также в поперечном сечении для разных значений трансверсальной координаты. Также была проведена шпирен-визуализация поля течения.

Анализ полученных результатов подтвердил наличие динамического слоя для всех рассматриваемых конфигураций моделей угла сжатия. Наблюдается соответствие экспериментальных данных с результатами численного расчёта. Подтверждено влияние продольных вихрей, образующихся за линией присоединения потока и описанных в [2], на структуру динамического слоя.

Работа поддержана грантом № 16-01-00314а.

---

1. Запрягаев В. И., Кавун И. Н., Липатов И. И. Возникновение высоконапорного слоя в угле сжатия при сверхзвуковой скорости потока. // Изв. РАН. Механика жидкости и газа, № 6, 2014. С. 149–158

2. Zaprugaev V. I., Kavun I. N., Trubitsuna L. P. Visualization of streamwise vortices structure near reattachment line of supersonic laminar separated flow // The 13th Asian symposium on visualization (Novosibirsk, Russia, June 22 – 26, 2015): abstracts. Novosibirsk: Parallel, 2015. P. 263–264.

Научный руководитель – д-р техн. наук, проф. Запрягаев В. И.

## Моделирование температурной стратификации в трубе Леонтьева с помощью пакета Ansys Fluent

Хахимов А. А.

Томский государственный университет

В настоящей работе при помощи прикладного пакета Ansys Fluent выполнено моделирование температурной стратификации газа в трубе Леонтьева, которая служит для безмашинного энергоразделения воздушных потоков для создания холодильно-нагревательных аппаратов [1]. Суть изобретения заключается в осуществлении способа температурной стратификации газа с помощью разделения газового потока на нагретую и охлажденную части, основанные на вихревом эффекте.

Целью настоящей работы является отработка алгоритма решения задачи с использованием средств пакета Ansys Fluent.

Постановка задачи основывается на [2]. Рассматривается теплообменник типа труба в трубе длиной  $L = 1000$  мм. Во внутреннюю трубу диаметром  $d_1 = 10,2$  мм и с углом раскрытия  $0,5^\circ$  подается сверхзвуковой газ. Во внешнюю трубу диаметром  $d_2 = 22$  мм подается дозвуковой газ. Решение проводилось на основе решателя *pressure-based*. В качестве рабочего вещества был выбран аргон ( $Pr = 0,66$ ). На входе в дозвуковой поток и сверхзвуковой поток задавались граничные условия *pressure-far-field*. В качестве модели турбулентности используется  $k - \epsilon$  модель.

Из решения показано, что на выходе трубки температура сверхзвукового потока превышает температуру дозвукового. Результат качественно соответствует [1].

---

1. Леонтьев А. И., Бурцев С. А., Визель Я. М., Чижиков Ю. В. Экспериментальное исследование газодинамической температурной стратификации природного газа // Газовая промышленность. 2002. № 11. С. 72–75.

2. Егоров К. С., Рогожинский К. С. Численное моделирование влияния числа Прандтля газа и схемы течения на эффективность работы устройства безмашинного энергоразделения // Наука и Образование: Научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 10. С. 21–35.

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

## **Исследование топологии ограниченного вихревого течения двухкомпонентной жидкости**

Шарифуллин Б. Р., Подольская И. Ю.

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

Вихревое течение двухкомпонентной жидкости имеет большой фундаментальный интерес из-за ряда интригующих особенностей: многочисленные топологические метаморфозы, обилие ячеек и тонких слоев циркуляции. С практической стороны исследование вихревого течения двухкомпонентной жидкости привлекает к себе внимание из-за приложений в вихревых биореакторах.

В данной работе изучается вихревой поток двухкомпонентной несмешиваемой жидкости, закрученный вращающейся крышкой в ограниченном цилиндрическом контейнере, заполненном водой и подсолнечным маслом. Разница в плотности между жидкостями обеспечивает устойчивую границу раздела. В данной конфигурации вихревое движение жидкости определяется числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{\omega R^2}{\nu},$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения диска,  $R$  – радиус вращающейся крышки,  $\nu$  – кинематическая вязкость масла.

В работе исследована эволюция топологии развития ячеек в воде и в масле. По мере того как  $Re$  увеличивается, в воде возникают циркуляционные ячейки. Граница раздела деформируется, поднимаясь вверх вблизи оси и опускаясь вниз на периферии. В это время в масле над границей раздела появляется контрциркуляционная ячейка.

Выявлены закономерности формирования ячеистой структуры ограниченного вихревого течения двухкомпонентной жидкости. Подтверждено численное предсказание наличия тонкого слоя циркуляции воды, примыкающего к границе раздела.

Научный руководитель – д-р техн. наук, проф. РАН Наумов И. В.

## **Оценка возможности МГД-управления ламинарно-турбулентным переходом в канале ударной трубы**

Шипко Е. К.

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

Исследования методов управления зоной ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП) в пограничном слое (ПС) при обтекании тонкой пластины остаются актуальными на сегодняшний день. Один из перспективных методов – применение электрических и магнитных полей для создания результирующей электромагнитной силы на поток.

В большинстве экспериментальных работ развитие ЛТП исследуют при обтекании модели потоком газа в рабочей камере аэродинамической установки импульсного или периодического действия. Но в данной работе используется классическая ударная труба, в канале которой происходит движение газа за проходящей ударной волной (УВ). При этом на стенках канала из-за вязкого трения происходит образование пограничного слоя.

Произведена оценка возможности проведения исследований МГД-воздействия на ЛТП в ударной трубе. Рабочая камера (РК) представляет собой канал прямоугольного сечения, установленный на конце канала низкого давления. Конструкция канала позволяет устанавливать устройства ионизации потока. Через оптические окна РК при моделируемых параметрах потока была выполнена визуализация ЛТП, образованного в пробке ударно сжатого газа и получены данные о динамике развития пограничного слоя. На основе полученных данных можно утверждать, что данный метод позволяет проводить исследования МГД-воздействия на структуру ПС у плоской поверхности.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Ядренкин М. А.

**Расчет радиационных тепловых потоков на поверхность  
возвращаемого космического аппарата**

Шкредов Т. Ю.

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

Обтекание возвращаемого космического аппарата при входе в атмосферу сопровождается формированием высокотемпературного ударного слоя. При разработке тепловой защиты космических аппаратов необходимы расчеты потока тепла на поверхность. При высоких скоростях обтекания (более 10 км/с) и больших размерах космического аппарата важную роль может играть тепловой поток излучения нагретого воздуха за ударной волной на поверхность аппарата, достигающий значений конвективного теплового потока.

Целью работы является определение влияния поглощения излучения на величину радиационного потока тепла на поверхность спускаемого космического аппарата.

Для определения радиационного теплового потока необходимо определение спектральных величин излучательной способности газа и коэффициента поглощения. В настоящей работе расчет этих величин выполнен с помощью программы Spesair (Laux С. О., 2002). Полученные зависимости излучательной способности от состава и температуры воздушной смеси использовались при численном решении одномерного уравнения переноса излучения с учетом поглощения. Для решения данной задачи была написана программа, в которой методом Монте-Карло производилось вычисление потока излучения на поверхность аппарата.

Чтобы определить влияние поглощения излучения рассчитанная величина радиационного потока тепла сравнивалась с потоком излучения без поглощения. Пространственное распределение концентрации компонентов воздушной смеси и температуры газа взято из полного расчета обтекания различных космических аппаратов вдоль линии торможения.

Результаты настоящей работы будут использованы для дальнейшего развития вычислительных средств для решения задачи о потоке тепла на поверхность спускаемого космического аппарата в более сложной постановке.

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

## **Трансформация состояния поляризации излучения в приёмном телескопе коаксиального лидара**

Эбель Р. Е.

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Одним из основных факторов климатообразования, оказывающим существенное влияние на круговорот воды и радиационный баланс нашей планеты является облачность. Радиационные свойства облачных образований определяются их микроструктурой, в частности фазовым составом, формой и размерами частиц, а в случае их не сферичности еще и ориентацией в пространстве.

Определение микроструктуры облаков традиционно проводится с использованием контактных методов, которые несмотря на свои достоинства, не лишены недостатков (например, внесение изменений в исследуемый объект и исследование не всего облака, а лишь малой его части). Дистанционные методы (например, метод лазерного зондирования) лишены этого недостатка. Суть данного метода заключается в последовательном облучении облака зондирующим излучением, регистрации отраженного излучения и сравнительном анализе характеристик посылаемого и регистрируемого излучения. Прибор реализующий эту идею называется «лидар».

Как правило, лидарный сигнал от облаков и других плотных аэрозольных образований формируется фотонами, которые претерпели несколько актов рассеяния на оптических неоднородностях в зондируемой среде. Известно, что многократное рассеяние лазерного излучения приводит к деполаризации лидарного сигнала. Поэтому учет изменения не только мощности, но и состояния поляризации рассеянного излучения позволяет расширить возможности метода лазерного зондирования.

В настоящее время на кафедре ОЭСиДЗ ТГУ разрабатывается лидар для зондирования плотных аэрозольных образований на основе учета вклада многократного рассеяния в лидарный сигнал.

Доклад посвящен обсуждению результатов моделирования приемного телескопа разрабатываемого лидара.

Научный руководитель – старший преподаватель Дорошкевич А. А.

**Возмущения от импульсного разряда  
в ламинарном сверхзвуковом пограничном слое**

Яцких А. А.

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

Одним из наиболее информативных методов экспериментального исследования ламинарно-турбулентного перехода в сдвиговых течениях является возбуждение искусственных пульсаций. Контролируемый ввод искусственных возмущений с заданными параметрами позволяет изучить их развитие и сравниваться с результатами теории и расчетов.

Перспективным является изучение развития локализованных по пространству и времени контролируемых возмущений (волновых пакетов). Такие возмущения обладают широкополосным частотным и пространственным спектром. В экспериментах при сверхзвуковых скоростях волновые пакеты генерируются с помощью импульсного разряда. В работах [1, 2] экспериментально исследовалось развитие контролируемых волновых пакетов в двумерном сверхзвуковом пограничном слое с помощью термоанемометрии. Обнаружено влияния энергии и длительности разряда на амплитуду и пространственные масштабы возбуждаемых волновых пакетов. Подробных данных о влиянии параметров импульсного разряда на возбуждаемые локализованные возмущения в сверхзвуковом пограничном слое нет.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию влияния параметров импульсного разряда на форму и амплитуду генерируемых волновых пакетов в двумерном сверхзвуковом пограничном слое.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-31-00388)

---

1. Яцких А. А., Ермолаев Ю. Г., Косинов А. Д., Семенов Н. В. Возбуждение и развитие волновых пакетов в сверхзвуковом сдвиговом слое // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2013. Т. 8, № 2. С. 70-78

2. Яцких А. А., Ермолаев Ю. Г., Косинов А. Д., Семенов Н. В. Эволюция волновых пакетов в сверхзвуковом пограничном слое плоской пластины // Теплофизика и аэромеханика, 2015. Т. 22, № 1. С. 17-28

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

# ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 62-642

## Сжигание дизельного топлива с принудительной подачей пара

Арсентьев С. С.

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

Теплоэнергетика составляет значительную часть в мировом производстве энергии. Однако, рост цен на качественные энергоносители, вызванный, в том числе, и истощением их запасов, обуславливает необходимость вовлечения в топливно-энергетический баланс низкокачественных непроектных топлив. В связи с этим актуальна проблема создания новых методов их сжигания, так как традиционные методы не являются эффективными с точки зрения экономичности и экологической безопасности. Одним из перспективных способов является сжигание жидких углеводородов с подачей перегретого водяного пара в зону горения. Такой способ сжигания предложен в Институте теплофизики СО РАН [Пат. РФ 2219435, 2003].

В данной работе изучается влияние режимных параметров (расхода и температуры водяного пара) на процесс горения жидких углеводородов в оригинальных горелочных устройствах в присутствии струи перегретого водяного пара. На примере дизельного топлива проведены измерения тепловыделения и газового состава продуктов сгорания.

Измерения тепловыделения осуществлялись с использованием проточного калориметра. Измерение выделяемого количества тепла основано на определении разности температуры теплоносителя на входе и выходе, расхода теплоносителя и топлива в стационарных условиях эксперимента. Для контроля состава газообразных продуктов горения ( $O_2$ ,  $CO$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$ ,  $CO_2$ ) использовался газоанализатор TESTO 350. Забор проб охлажденных до комнатной температуры продуктов реакции осуществлялся на выходе калориметра. По результатам измерений получено значение удельного тепловыделения до 45 МДж на 1 кг топлива. Измеренное содержание токсичных компонентов  $CO$  и  $NO_x$  в уходящих газах ниже уровня предельно допустимых концентраций и для  $CO$  не превышает 100 ppm. Найдены режимы, обеспечивающие одновременно низкую концентрацию  $CO$  и  $NO_x$  при высокой мощности тепловыделения.

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

## Оптимальная стратегия ремонта систем централизованного теплоснабжения г. Тюмени

Арсентьева С. А.

Тюменский индустриальный университет

Плохая теплоизоляция трубопроводов приводят к теплопотерям при транспорте теплоносителя, а также к коррозии трубопроводов. Капитальные затраты при сооружении систем теплоснабжения достигают 30 % средств, расходуемых на строительство объектов при обустройстве территории. В Западной Сибири эти затраты увеличиваются в 2 раза из-за сложных климатических и грунтовых условий.

Применение теплогидроизолируемых труб с использованием пенополиуретана (ППУ) – это использование новых энергосберегающих теплопроводов, позволяющих обеспечить безаварийное теплоснабжение.

Выполнена оценка экономического эффекта от прокладки в ППУ изоляции по отношению к прокладке теплосети в минераловатной изоляции.

Сравнительный коэффициент эффективности ( $\geq 0,2$ ) определялся из соотношения [1]:

$$\frac{\Delta Z}{\Delta K} = \frac{Z_{MB} - Z_{ППУ}}{K_{ППУ} - K_{MB}} = \frac{13963462 - 13329917}{3791285 - 3074952} = 0,888,$$

где  $Z_{MB}$  – приведенные затраты тепловой сети в минераловатной изоляции;  $Z_{ППУ}$  – приведенные затраты тепловой сети в ППУ изоляции;  $K_{ППУ}$  – капиталовложения в тепловую сеть с использованием ППУ изоляции;  $K_{MB}$  – капиталовложения в тепловую сеть с использованием минераловатной изоляции.

Срок окупаемости ( $\leq 5$  лет) определялся по формуле [1]:

$$T_{ок} = \frac{K_{ППУ} - K_{MB}}{Z_{MB} - Z_{ППУ}} = \frac{3791285 - 3074952}{13963462 - 13329917} = 1,13.$$

Из полученных данных следует, что при внедрении ППУ изоляции будут получены следующие основные преимущества:

- 1) снижение эксплуатационных затрат, увеличение срока эксплуатации за счет новой качественной технологии изоляции труб;
- 2) сокращение потерь теплоты за счет улучшенной тепловой изоляции.

---

1. Корпусова Н. С. Расчет основных показателей деятельности промышленного предприятия: методические указания по дисциплине «Экономика предприятий энергетического комплекса». Тюмень: ТюмГАСА, 2003. 29 с.

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент Антонова Е. О.

## **Методика измерения высоких концентраций водорода в пробах с большой массой на анализаторе водорода RHEN602 фирмы LECO**

Бабахина М. Н.

Томский политехнический университет

Материалы-накопители водорода (МНВ) являются основным материалом исследований водородной энергетики, разработка которых является основной и первостепенной задачей. Необходимо производить оценку критериев взаимодействия водорода с МНВ, а также исследование их свойств. Одним из основных критериев МНВ является водородная емкость, которую необходимо отслеживать.

Одним из способов определения концентрации водорода является метод экстракции в среде инертного газа [1, 2], принцип работы которого заложен в анализатор водорода RHEN фирмы LECO [3].

Данный анализатор является очень чувствительным для определения малых концентраций. Однако, при измерении больших концентраций происходит превышение порога чувствительности анализатора и невозможно с большой достоверностью определить концентрацию водорода в исследуемой пробе.

Таким образом, целью данной работы является разработка методики для измерения высоких концентраций водорода в материалах накопителей водорода методом плавления пробы в среде инертного газа. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выбор и обоснование выбора направлений исследования;
2. Подбор минимальной температуры начала анализа;
3. Подбор оптимального размера шагов нагрева печи и их числа;
4. Установление максимально возможной массы пробы;
5. Определение точности разработанной методики.

---

1. Проценко О. М. Опыт разработки методики измерения содержания водорода в титановых сплавах / Проценко О. М., Карачевцев Ф. Н., Механик Е. А. // Электронный научный журнал «Труды ВИАМ». 2014. № 12. С. 1–5.

2. Григорович К. В. Новые возможности современных методов определения газообразующих примесей в металлах // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73. № 1. С. 23–34.

3. Определение общего и поверхностного водорода методом плавления в атмосфере инертного газа: [Электронный ресурс] // LECO Corporation – представительство в России. 2012. Режим доступа: <http://ru.leco-europe.com/product/rhen602/>.

Научный руководитель – Кудияров В. Н.

## **Экспериментальное изучение двухфазного газожидкостного течения в микроканале оптическими методами**

Барткус Г. В.

Новосибирский государственный университет

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

Перспективы применения устройств на основе двухфазных газожидкостных течений или течений жидкость-жидкость на микромасштабе постоянно расширяются. Активное внедрение данной технологии в микроканальных теплообменниках, в биологических чипах для экспресс-анализа крови и в химических реакторах для получения малых объемов лекарственных средств тому являются примером. Большое количество экспериментальных и теоретических работ сделано в данной области двухфазных течений в микроканалах. Однако одной из актуальных и нерешенных задач остается детальное изучение структуры газожидкостного течения.

Целями данной работы являются построение достоверных карт режимов течения с определением границ режимов течения на основе метода двухлучевого лазерного сканирования и измерение толщины пленки жидкости методом лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ, LIF). В качестве экспериментального участка использовался микроканал с прямоугольным сечением  $420 \times 280 \text{ }\mu\text{m}$  с Т-образным смесителем на входе. Особенностью выполненной работы является использование микроканала относительно большой длины (27.5 см). В качестве газовой фазы использовался азот. Для визуализации течения также использовалась высокоскоростная видеосъемка.

По результатам работы получено, что для данного микроканала формируется три основных режима течения: течение с удлиненными пузырями (периодическое), переходное (непериодическое) и кольцевое. Данные о измеренной локальной толщине пленки были дополнены для больших скоростей газа, и наблюдается рост толщины пленки жидкости при увеличении приведенной скорости газа в центре микроканала. Измерения толщины жидкости вблизи углов канала невозможны, тем не менее, полученные результаты показывают накопление жидкости вблизи углов в менисках. Восстановлены профили межфазной поверхности и показана неравномерность распределения пленки в микроканале.

Исследование выполнено в ИТ СО РАН за счет гранта РФФИ № 15-08-07506 А.

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

**Моделирование пироотклика в пластине, нагреваемой потоком газа**

Бобров М. С., Козюлин Н. Н.

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

Увеличение КПД различных устройств является актуальной проблемой для многих отраслей техники. Одним из способов увеличения отношения полезной работы к затраченной является утилизация части тепловой энергии, выделяемой в ходе работы. Такая утилизация возможна с использованием пироэлектрического эффекта. Для создания такого типа преобразователей могут использоваться тонкие пластины из сегнетоэлектриков, с нанесенными на их поверхность электродами.

Для пироэлектрического эффекта имеет значение скорость изменения температуры образца, поэтому по возможности нужно использовать резкие фронты температуры в газе. Натекающий на тонкую пластину поток горячего воздуха должен быть способен прогреть ее за время движения фронта для получения большей мощности от работы преобразователя. Из этих соображений понятно, что нужно использовать как можно более тонкие пластины, собранные в решетку.

Целью настоящей работы было моделирование задачи сопряженного теплообмена между решеткой из пластин пироэлектрика ( $\text{BaTiO}_3$ ), толщиной 200 нм и натекающим на нее потоком газа (15 м/с) с температурой периодически меняющейся в диапазоне 20–120°С, с одновременным вычислением отклика поляризации в пластине на изменение температуры.

Расчеты гидродинамической и тепловой задач проводились по методу конечных объемов. Для описания пироэлектрического отклика в данной серии расчетов использовалась модель Ландау.

В результате работы удалось воспроизвести явление температурного гистерезиса и посчитать работу полученной системы, а также оптимизировать термодинамический цикл путем варьирования временной зависимости приложенного поля. Максимальная полезная работа достигалась в случае как можно более резкого переключения поля в моменты, когда средняя температура в образце имела нулевую производную по времени.

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

## Моделирование электрогидродинамических течений с фазовыми переходами и теплопереносом

Буковец А. А.

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, г. 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 используется метод решеточных уравнений Больцмана, применяющийся для расчета многофазных течений с теплопереносом [1]. В качестве уравнения состояния использовалось уравнение Ван-дер-Ваальса в безразмерных переменных (нормированных на значения давления, плотности и температуры в критической точке):

$$p = \frac{8\rho T}{3 - \rho} - 3\rho^2.$$

Реализованы двумерная и трехмерная модели с теплопереносом и фазовыми переходами, исследована тепловая конвекция при различных размерах области. В двумерной модели также исследуется движение пузырька и неустойчивость границы раздела жидкость-пар в электрическом поле. Использовалась зависимость диэлектрической проницаемости от плотности вещества в форме Клаузиуса–Мосотти:

$$\varepsilon = 1 + \frac{3\alpha\rho}{1 - \alpha\rho}.$$

Таким образом, удалось применить метод решеточных уравнений Больцмана для описания течений с фазовыми переходами в электрическом поле с учетом теплопереноса. 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: Серия «Математика, механика и информатика». 2005. 5, № 3. С. 29–42.

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

## **Исследование суточных колебаний температуры и тепловых потоков в макете грунтового термоэлектрического генератора**

Востриков С. А.

Унискан-ризерч, г. Новосибирск

Новосибирский государственный университет

Термоэлектрический эффект – явление преобразования тепловых потоков в электрическую энергию. Подобные преобразователи широко применяются в качестве альтернативных источников энергии уже много лет, однако в последние годы прогресс в области разработки и производства маломощных автономных электронных устройств расширил области потенциального применения термоэлектрических источников питания. В частности, особый интерес вызывает концепция термоэлектрического грунтового генератора, работающего благодаря искусственно сформированным тепловым потокам между почвой и воздухом. В перспективе подобный генератор может являться экономически эффективным и надежным решением для сенсорных охранных систем, работающих в труднодоступных местах, и имеющих типичное среднее потребление на уровне 10-20 мВт.

Для создания подобных генераторов необходимо иметь данные о величине и характере тепловых потоков между почвой и воздухом, которые можно сформировать искусственным образом, а также о возможном диапазоне генерируемой мощности, которая может быть достигнута.

В рамках данной работы был создан ряд тепловых макетов термоэлектрического генератора, а также система круглосуточного мониторинга температурных полей и генерируемых напряжений. Также была разработана методика измерения тепловых потоков, позволяющая вместе с системой мониторинга регистрировать параметры протекающих в макетах процессов. В период с сентября 2016 по февраль 2017 проводились полевые испытания тепловых макетов в условиях климата Новосибирской области. По итогам измерений, полученных в осенний период, средняя расчетная электрическая мощность составила 6 мВт при среднем потоке тепла 2,5 Вт. На основе полученных результатов выявлены уязвимые места, снижающие КПД макета, и в настоящее время ведется работа по усовершенствованию устройства.

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

**Моделирование гидродинамики и теплопереноса  
в химическом реакторе для получения тугоплавких металлов**

Гичёва Н. И., Дьяков Е. А.

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Метод осаждения тугоплавких металлов из парогазовой фазы является перспективным и оптимальным способом их получения. Среди априорных государственных проектов упоминается применение аддитивных газофазных технологий, что обуславливает актуальность исследований в данной сфере. В настоящее время существуют проблемы теоретического обоснования этих инновационных технологий, а также разработки методов прогнозирования результатов применения различных конструкций аппаратов.

Целью работы является создание физико-математической модели химического реактора для получения тугоплавких металлов и нахождение его оптимальных эксплуатационных параметров.

Рассмотрены процессы гидродинамики и переноса тепла и массы в цилиндрической вихревой камере. Произведено численное решение уравнений неразрывности, Навье-Стокса и транспортных уравнений для температуры и концентрации при различных параметрах и граничных условиях. Решение проводилось с использованием неявной обобщённой схемы переменных направлений в  $\Delta$ -форме и применением экспоненциальной схемы.

Результатами моделирования являются распределения полей скорости, температуры и концентрации в вихревой камере, рассчитанные при различных параметрах течения.

Изучено влияние закрутки на равномерность распределения характеристик, сделан вывод об увеличении равномерности слоя вещества на подложке и температуры в камере при закрутке потока.

Рассмотрена необходимость учёта воздействия свободной конвекции на течение в реакторе.

Достоверность результатов подтверждается совпадением решений, полученных различными методами, а также сравнением с аналитическими зависимостями и применением модели к решению классической задачи, давшим хорошее совпадение с точным решением.

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

## **Крупномасштабные вихревые структуры в тангенциальной вихревой камере**

Дремов С. В.

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

Исследование крупномасштабных вихревых структур представляет большой научный интерес, так как подобные структуры широко распространены в природе и регулярно встречаются в ней в самых разных масштабах, от квантовых до астрономических. Также, они используются в различных технических приложениях, например, в вихревых топках или сепараторах. Таким образом, помимо научного интереса, изучение таких структур открывает широкие возможности для решения практических задач. Основной проблемой данной темы является недостаток экспериментальных данных о вихревых течениях.

Целью работы является получение количественных данных о вихревых структурах с различной винтовой симметрией. В данной работе большее внимание уделяется стационарным винтовым вихрям. Исследования проводились на замкнутом гидродинамическом контуре при различных граничных условиях, что позволяло контролировать режим вихревого течения. Изменение граничных условий осуществлялось с помощью установки различных диафрагм на выходе вихревой камеры.

В работе были исследованы такие режимы вихревого течения, как стационарный центральный вихрь и стационарный винтовой вихрь. С использованием ЛДА метода были измерены тангенциальные и аксиальные профили скоростей для этих режимов. С помощью полученных профилей были определены базовые параметры вихревых структур, такие как шаг винта, циркуляция и поперечный размер. Результаты будут полезны для верификации аналитических моделей отдельных разделов теории по концентрированным вихрям [1].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-29-00093).

---

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

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

**Моделирование гидродинамики и теплообмена  
течения ньютоновской среды в кольцевом бункере  
с условиями прилипания-скольжения**

Дьяков Е. А., Гичёва Н. И.

Национальный исследовательский Томский государственный университет

В настоящее время в различных отраслях промышленности – химической, фармацевтической, пищевой, сельском хозяйстве, металлургии – широко используются и создаются новые порошковые и гранулированные материалы: минеральные удобрения, пластмассы, композиты и др. Производство таких сыпучих материалов связано с процессами сушки, смешения, измельчения, дозирования и перевозки. Важной частью одного из устройств, в котором осуществляются эти процессы является кольцевой бункер.

Перспективным направлением дальнейшего совершенствования этих устройств является создание математических моделей, способных, адекватно опытным данным, объяснять и предсказывать происходящие в них процессы.

В данной работе представлено численное моделирование динамики и теплообмена течения ньютоновской среды в кольцевом бункере. Течение и теплоперенос среды в бункере могут быть описаны системой уравнений в цилиндрической системе координат для осесимметричного случая, включающей уравнения Навье – Стокса, уравнение неразрывности, уравнение переноса тепла. Численное решение реализовывалось двумя методами в переменных «функция тока – вихрь» и физических переменных «скорость – давление». Для численного решения уравнений использовалась неявная обобщённая схема переменных направлений в «дельта» – форме. Решение проводится на разнесённой сетке с использованием контрольного объёма. Конвективные и диффузионные слагаемые описываются с использованием экспоненциальной схемы.

Достоверность полученных результатов подтверждается сопоставлением методов между собой и сравнением с экспериментальными данными.

В работе проводилось исследование влияния критериев Рейнольдса, Прандтля и безразмерного коэффициента скольжения на распределение изолиний тока и температуры.

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

**Динамика капли жидкости в мини-канале с потоком газа**

Исаченко Е. А., Орлик Е. В.

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

В связи с бурным развитием микроэлектроники необходимо рассматривать новые эффективные способы интенсивного отвода тепла. Так в современном оборудовании может выделяться тепловой поток порядка 1000 Вт и выше с  $1 \text{ см}^2$ , а воздушные системы охлаждения не способны удалять тепловые потоки свыше  $200 \text{ Вт/см}^2$ . Поэтому сегодня большое внимание уделяется исследованию систем, основанных на использовании импактных струй, течений двухфазного потока в мини-каналах и микро-каналах.

Одно из технических решений, с помощью которого может быть достигнута существенная интенсификация теплообмена, – устройство с формированием пристенных капельных течений жидкости в микро- и мини-каналах. Переход от сплошного пленочного течения к пристеночному капельному течению с увеличением протяженности контактных линий будет приводить к интенсификации теплообмена при испарении.

Цели данной работы: изучение динамики одиночной капли в зависимости от ее размера, движущейся по холодной поверхности и нагретой поверхности; изучение влияния высоты канала на динамику капли.

Схема экспериментальной установки включает в себя плоский канал с меняющейся высотой от 4 мм до 20 мм, съемные подложки, систему регулирования температуры подложки, систему подачи воздуха. Для регистрации контура капли на твердой подложке в работе использовался теневой метод. Изображения обрабатывались различными методами с помощью программного обеспечения (the Drop Shape Analysis by KRÜSS).

В ходе работы были проведены эксперименты на подложках при нескольких значениях температуры от комнатной температуры до  $70^\circ \text{C} \pm 0,2^\circ \text{C}$  в каналах высотой 4 мм и 6 мм. Найдены скорости, необходимые для начала движения капли, в зависимости от размера капли и высоты канала. А также посчитана сила трения, действующая на контактную линию капли.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Орлик Е. В.

## Изучение влияния наночастиц на скорость испарения жидкости

Канцеров П. Н.

Сибирский федеральный университет, г.Красноярск

Изучение процессов испарения наножидкостей в настоящее время имеют большое значение в связи с открытием уникальных свойств наночастиц. Исследование испарения важно в процессах фазовых переходов в теплообменных устройствах, применяемых в промышленности, охлаждении и кондиционном оборудовании.

Большая часть работ по испарению связано с испарением капель наножидкостей. В то же время мало внимания уделено динамике испарения в сравнительно крупных объемах, где наночастицы могут проявлять радикально другие свойства. В данной работе освещено исследование влияния на скорость испарения наножидкости на основе частиц оксида циркония ( $ZrO_2$ ).

Ход эксперимента состоял в нагреве емкости с жидкостью до температуры  $60^\circ C$  и ее поддержании в течении 20 минут. Процентное содержание наночастиц составляло 2 % по массе, в качестве базовой жидкости выступала дистиллированная вода.

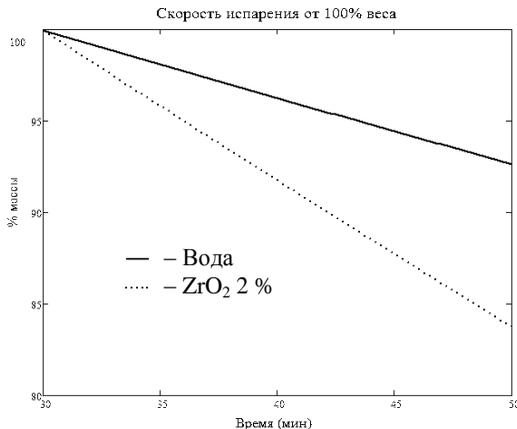


Рис. 1. Скорость испарения в зависимости от времени.

Разница в проценте испарившейся жидкости составило порядка 11 %, что показывает заметное увеличение скорости испарения в сравнении с чистой жидкостью.

Научный руководитель – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Дектерев А. А.

## **Исследование взаимодействия капли жидкости с нагреваемой поверхностью**

Кириченко Е. О.

Новосибирский государственный университет

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

В настоящее время актуальны исследования направленные на создание и совершенствование высокоэффективных теплообменных устройств. Глобальная миниатюризация требует применения новых технологий и новых моделей. Существует возможность применения в таких системах поверхностей с микро- и нанопокрытиями. Детальное исследование свойств различных поверхностей и их взаимодействия с каплями жидкости определяет возможность применения в высоконапряженных энергетических системах.

В данной работе исследуется взаимодействие капли воды с нагреваемой поверхностью. В качестве рабочей поверхности используются стеклянные подложки с различными типами покрытий. Капля формируется с помощью микропипетки и падает на нагретое стекло. Процесс падения и взаимодействия капли с подложкой фиксируется с помощью камеры Imaging Source DMK 33GP031 с разрешением 2,592x1,944 пикселей и частотой 15 кадров в секунду. Температура контролируется термопарой. Подложка закрепляется с помощью держателя с возможностью изменения угла наклона. Для подробной характеристики исследуются свойства поверхностей, такие как краевой угол смачивания, гистерезис краевого угла смачивания и свободная энергия поверхности с помощью прибора для изучения краевого угла смачивания и формы капли DSA 100E KRUSS.

Исследовано влияние типа и наклона поверхности на динамику капли жидкости, а также основные свойства различных поверхностей.

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

## **Экспериментальное исследование структуры потока в дисперсной фазе при снарядном режиме течения несмешивающихся жидкостей в Т-образном микроканале**

Ковалев А. В., Ягодницына А. А.

Новосибирский государственный университет

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

Течения жидкость-жидкость в микроканалах имеют большой потенциал для повышения эффективности технологических процессов в различных приложениях. Из ряда режимов течений, реализующихся в двухфазных потоках, наиболее перспективным для практического применения является снарядный режим. Данный режим характерен для микроканалов и может быть использован как в биологических анализах, за счёт высокоточного контроля над отдельными снарядами дисперсной фазы, так и в химических реакциях, где перенос вещества интенсифицируется за счёт наличия областей циркуляции. Тем не менее, гидродинамика течений в снарядах и перемычках, факторы, определяющие их форму и другие характеристики, необходимые для инженерных расчётов, остаются недостаточно изученными.

Настоящая работа посвящена изучению структуры потока в снарядах дисперсной фазы при течении касторовое масло – вода в микроканалах прямоугольного сечения с Т-образным входом. В рамках исследований была проведена визуализация снарядного режима течения, установлены границы его устойчивости. С помощью метода PTV (Particle Tracking Velocimetry) были получены распределения скорости в центральном сечении снарядов воды для различных комбинаций объёмных расходов фаз.

Используемые жидкости представляли комбинацию вязкой несущей и невязкой дисперсной фаз. Вязкости жидкостей различались примерно в 730 раз. Начиная с отношения расходов дисперсной фазы к несущей больше единицы наблюдалась значительная деформация и удлинение снарядов вниз по течению (до 50 % от начальной длины). Данная деформация сопровождалась изменением полей скорости в снарядах. При этом в некоторых случаях имели место не две, как описано в литературе, а четыре области рециркуляции – две в передней и две в хвостовой частях снаряда. Возможный механизм, объясняющий такое явление, это баланс сил межфазного натяжения и вязкого трения на границе снаряда.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 16-19-10519).

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

## **Профиль температуры при испарении различных жидкостей**

Корбанова Е. Г.

Новосибирский государственный университет

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

Процессы с фазовыми переходами на границе раздела жидкость-пар/газ остаются не до конца изученными. Особенно это актуально для микросистем, где сама межфазная граница трудно определима, а эффекты, возникающие в области слоя Кнудсена, становятся существенными.

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования температурного поля двухслойной системы жидкость-газ, включая границу раздела. Эксперименты проведены для различных жидкостей при локальном нагреве и испарении. В качестве рабочих жидкостей используются дийодметан ( $\text{CH}_2\text{I}_2$ ) и HFE-7100. Эксперименты проводились при квазистационарном режиме нагрева. Для измерения температурного профиля поперек слоев использовалась микротермопара с толщиной королька менее 4 мкм.

Синхронизация чтений микротермопары и положения микроподвижки производилась с помощью специально разработанного собственного софта на C++. Измерения позволили получить подробную картину температурного профиля поперек слоев жидкость-газ. Подтверждено существование скачка температуры на границе раздела жидкость-газ при атмосферном давлении также для жидкостей  $\text{CH}_2\text{I}_2$  и HFE-7100. Получены подробные данные для мощности нагревателя от 0 до 1,2 Вт.

Показано, что для различных жидкостей профиль температуры может иметь разный характер. В частности, при достаточном увеличении температуры нагревателя температура воздуха вблизи границы раздела  $\text{CH}_2\text{I}_2$ -воздух ниже температуры жидкости. В то время как для HFE-7100 температура воздуха выше температуры HFE-7100 на границе раздела. Также был измерен расход испарившейся жидкости, который составил 0,008 мкл/с для испарения  $\text{CH}_2\text{I}_2$  в воздух при мощности нагревателя 0,252 Вт и 0,477 мкл/с для HFE-7100 при мощности нагревателя 0 Вт.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Гатапова Е. Я.

## **Измерение распределение температуры на межфазной границе раздела «жидкость-газ»**

Крета А. С.

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

Исследование тепломассопереноса через границу раздела жидкости и газа является актуальной задачей на сегодняшний день. Интенсивное испарение с поверхности слоя жидкости под воздействием потока газа вызывает различные конвективные течения в слое жидкости. Форма и структура этих течений являются достаточно сложными и могут оказывать существенное влияние на интенсивность расхода испарения и, соответственно, на эффективность теплообменных аппаратов.

Целью исследования является экспериментальное изучение структуры конвективных течений и измерение распределения поля температур на поверхности свободно испаряющегося слоя жидкости под действием потока газа, с помощью ИК камеры.

Эксперименты проводились при атмосферном давлении в рабочем участке и неподвижном слое жидкости толщиной 5 мм. В качестве исследуемой жидкости использовалась легкокипящая жидкость HFE 7100. Площадь поверхности испарения составляла 100 мм<sup>2</sup> с соответствующим размером выреза в пластине 10x10 мм. Расход газа варьировался от 100 до 1000 мл/мин с шагом 100 мл/мин, что соответствует его средней скорости от 0,0139 м/с до 0,138 м/с. Температура системы «жидкость-газ» изменялась от 20 °С до 40 °С.

Проведены эксперименты по изучению влияния скорости потока газа и температуры системы «жидкость-газ» на распределение температуры на поверхности свободно испаряющегося слоя жидкости под действием потока газа. Градиент температуры на межфазной границе раздела измерялся инфракрасной камерой Titanium 570M. Определены сдвиговые напряжения на межфазной границе раздела вызванные термокапиллярным эффектом и потоком инертного газа. Показано, что основным фактором влияющим на развитие конвективных течений в горизонтально испаряющемся слое жидкости под действием потока газа является термокапиллярный эффект.

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

## **Численное моделирование движения пузырей в жидком металле с учетом процессов тепло-массообмена**

Кутлиметов А. Э.

Новосибирский государственный университет  
Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН,  
Новосибирский филиал

При возможной аварии в реакторах с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями связанных с разрывом теплообменных трубок водяной пар, находящийся в межконтурном пространстве, поступает в контур теплоносителя. В результате контакта жидкого металла с водяным паром происходит интенсивный теплообмен. В случае течей вода-натрий происходит интенсивная химическая реакция с выделением гидроксида натрия и водорода, происходит кипение теплоносителя. В результате образуется парогазовая смесь.

Настоящая работа посвящена моделированию движения газовых пузырей в каналах с жидкими металлами с учетом явления теплообмена между фазами. Для моделирования переноса газовой смеси в потоке теплоносителя используется двухжидкостное приближение и ряд приближений, таких как закон Дальтона, равенство давлений жидкой и газовой фазы, термодинамическое равновесие пара и газовых компонент.

В работе проведен анализ и выбраны соотношения для расчета межфазного трения для снарядов, движущихся в жидком металле, так как снарядный режим течения наиболее характерен для аварии с разрывом трубок парогенератора.

Для верификация моделей, используемых для моделирования движения газовых пузырей и снарядов в жидких металлах, институтом теплофизики СО РАН были проведены эксперименты по впрыску аргона в жидкие металлы, такие как свинец и сплав Розе. Полученные экспериментальные данные по изменению уровня теплоносителя, объемного содержания газа в канале и температуре теплоносителя в зависимости от расхода газа, инжектируемого в ТЖМТ, были сопоставлены с результатами моделирования.

Научный руководитель – канд. техн. наук Усов Э. В.

**Развитие динамической модели отражения  
ультракоротких лазерных импульсов от поверхности металла**

Лизунов С. А.

Новосибирский государственный университет

Ультракороткие лазерные импульсы все больше используются для обработки различных материалов (создание микродеталей, наноструктурирование поверхностей), поскольку это приводит как к экономии энергии, так и к созданию изделий значительно лучшего качества в сравнении с более длинными импульсами. За время действия ультракоротких лазерных импульсов на материал решетка остается холодной, поскольку энергия импульса поглощается электронами проводимости. Это сильно неравновесное состояние описывается двухтемпературной (2Т) моделью теплопроводности. Однако вызывает затруднение сравнение теоретических расчетов с экспериментом, поскольку не проводятся исследования зависимости оптических свойств материалов от температур, вместо этого предполагается, что оптические параметры металла постоянны и равны комнатным в течение всего времени действия импульса. Кроме того, не учитывается то, что в экспериментах отраженная энергия собирается со всей поверхности материала, и вместо этого решается одномерная задача в центре пятна облучения.

В данной работе впервые поставлена задача построения динамической модели отражения ультракороткого лазерного излучения от металлов на примере золота и цинка. 2Т модель нагрева металлов лазерным излучением с оптической моделью Друде были дополнены плазменным поведением металла при температурах порядка и больше температуры Ферми. Были рассмотрены другие оптические модели и проведено сравнение с экспериментальными данными.

Научные руководители – д-р физ.-мат. наук Булгакова Н. М.,  
д-р физ.-мат. наук Жуков В. П.

**Экспериментальное исследование теплообмена при микроструйном жидкостном охлаждении высоконапряженных элементов теплообменного оборудования**

Мордовской А. С.

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

Исследования процессов теплопереноса в микросистемах с фазовыми превращениями бурно развиваются в последнее время. Это связано с ростом технологических приложений, которые требуют передачи больших потоков тепла в ограниченном объеме, в том числе в компактных парогенераторах энергетических устройств, системах охлаждения микропроцессоров и т. д.

Целью данного исследования является экспериментальное исследование теплообмена при высоком уровне тепловыделения в условиях натекания микроструй на нагреваемую поверхность в диапазоне параметров, практически важном для развития систем терморегулирования микроэлектроники и космической техники.

В процессе данного исследования разработана и изготовлена экспериментальная установка для исследования теплообмена при микроструйном охлаждении теплонапряженной поверхности. Выполнено экспериментальное исследование осесимметричного охлаждения круглой теплонагруженной мишени диаметром 1 см тремя струями диаметром 0.45 мм с расстояния 1 мм. В качестве теплонагруженной мишени использовался полированный верхний торец медного цилиндра (медь марки М1). По длине цилиндра диаметром 1 см по его оси вмонтированы 4 термопары К типа диаметром 0,5 мм на расстоянии 1; 3; 5.3; 7.2 мм. В расширенном основании медного цилиндра вмонтированы 6 нагревательных картриджей и изолированная термopара К типа. В качестве охлаждающей жидкости использована дистиллированная вода с начальной температурой 22 °С.

Обнаружено, что бескризисное охлаждение теплонапряженной поверхности наблюдается в диапазоне тепловых потоков от 80 до 912 Вт/см<sup>2</sup>. Экспериментально показано, что скорость истечения жидкости в микроструях оказывает существенное влияние на эффективность охлаждения. Полученные экспериментальные данные демонстрируют зависимость коэффициента теплоотдачи, как от скорости охлаждающих струй, так и от теплового потока, что указывает на совместное влияние конвекции и кипения на механизм теплоотдачи.

Исследование выполнено в ИТ СО РАН.

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

## **Аэродинамика топочной камеры при четырехвихревой схеме течения**

Папулов А. П.

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

На данный момент в мировой энергетике доля твердых топлив в производстве электроэнергии составляет около 40 %. В последние годы возникает потребность в использовании низкосортных непроектных углей. Такие угли характеризуются высокой зольностью, значительным уровнем выхода летучих и высокой долей оксидов азота и серы. Для их сжигания необходима разработка специальных топочных устройств, соответствующих современным требованиям по эффективности и экологической безопасности, требующая детального изучения их внутренней аэродинамики на основе физического и численного моделирования.

В данной работе с использованием бесконтактных оптических методов диагностики потоков экспериментально исследована аэродинамика изотермической лабораторной модели (масштаб 1:25) перспективного топочного устройства с четырёхвихревой схемой сжигания топлива. Для этого был создан и отлажен экспериментальный стенд, основными элементами которого являются: магистраль подачи сжатого воздуха, модель вихревой топки, дымогенератор – для засева потока частицами (трассерами), измерительные системы (PIV, ЛДА), компьютер со специальным программным обеспечением.

В ходе проведения экспериментов получены распределения скорости потока внутри камеры сгорания в различных сечениях модели. В результате выявлены высокотурбулентные и застойные зоны. Показано, что течение имеет сложную пространственную структуру и состоит из четырех вихрей с вертикальной осью вращения. Полученные результаты могут быть использованы для верификации математических моделей расчета процессов горения в топке реального масштаба.

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

## Топология поверхностей скорости нуклеации над диаграммой бинарной системы А-В с перитектической и эвтектической линиями

Петрова-Богданова О. О.

Конструкторско-технологический институт  
научного приборостроения СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный технический университет

В работе рассматривается диаграмма с компонентами  $A$ ,  $B$  и химическим соединением  $A_xB_y$ , где различаются три линии равновесия  $bnb_0$ ,  $cnc_0$  и  $ava_0$ , см. рис. 1. Сочетание этих линий дает диаграмму с эвтектической точкой  $v$  и перитектической точкой  $n$ .

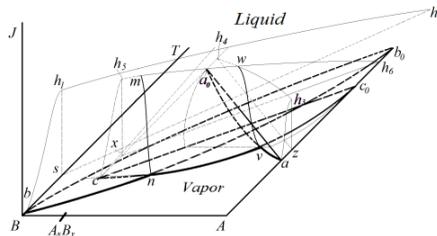


Рис. 1. Схематичная топология поверхностей скорости нуклеации

Из точек  $z$  и  $x$  схематично проводим линии спинодалей  $zh_4$ ,  $xh_6$ . Поверхность скорости нуклеации для гетерогенной фазы с компонентом  $A$  показана контуром  $h_3ava_0h_4w$ . При соединении точек  $h_5$ ,  $m$ ,  $w$ ,  $h_6$ ,  $c_0$ ,  $v$ ,  $n$  и  $c$  образуется поверхность для растворов с новым химическим соединением  $A_xB_y-A$ . Линия  $ck$  соответствует равновесиям раствора  $A_xB_y-B$ . При пересечении поверхностей образуется линия  $vw$ , которая соответствует множеству эвтектических точек. Аналогичным образом проходит построение поверхностей для перитектической точки  $n$ . Где при соединении точек  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $b_0$ ,  $n$ ,  $b$  образуется поверхность скорости зародышеобразования для раствора  $B$  в  $A_xB_y$ . Линия  $sh_2$  относится к спинодальной линии,  $h_1h_2$  – наибольшая скорость нуклеации для данной фазы. При пересечении поверхностей  $h_5wh_6c_0vnc$  и  $h_1h_2b_0nb$  возникает линия перитектических точек  $nm$ .

Работа поддерживается грантом Министерства Науки и Образования Российской Федерации в соответствии с договором № 14.Z50.31.0041 от 2017 года.

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

## **Работа двигателя Стирлинга на вторичных тепловых энергоресурсах для производства электроэнергии**

Распутин А. Л.

Тюменский индустриальный университет

Работа любых теплоэнергетических установок связана с отводом большого количества энергии в виде теплоты. Современные газотурбинные установки, выбрасывают в атмосферу продукты сгорания с высокой температурой. Между тем, использование части этой энергии, например, для выработки электроэнергии, представляет практический интерес. Эту энергию можно использовать при помощи теплоэнергетической установки на базе двигателя Стирлинга.

В газотурбинных установках температура уходящих газов составляет величину порядка 500-600 °С. Рабочим телом для двигателя Стирлинга является воздух. Эта теплота используется для его подогрева. Для расчета двигателя Стирлинга берутся следующие исходные данные: температура в нагревателе  $T_{г} = 740$  К; температура в холодильнике  $T_{х} = 293$  К; мощность двигателя  $N = 100$  кВт.

В ходе расчета действительная мощность двигателя получилась  $N_{д} = 80$  кВт. Коэффициент полезного действия двигателя Стирлинга составил 0,36.

Таким образом, теплота дымовых газов преобразуется в полезную механическую работу. Эта работа передается на электрогенератор, который установлен на одном валу с двигателем Стирлинга. Так как электрический КПД генератора равен 0,98-0,99, то полезная выработанная электроэнергия будет составлять порядка 75-80 кВт, что является существенным для компрессорных станций магистральных газопроводов.

В работе произведено сравнение экономического эффекта производства электроэнергии двигателем Стирлинга и дизель – генератором одинаковой мощности – 80 кВт. При ценах на двигатель Стирлинга с его установкой и аналогичных затратах на дизель-генератор срок окупаемости составил 3,5 года.

Преимущество двигателя Стирлинга состоит в том, что он работает на вторичных энергоресурсах и не образует продукты сгорания.

Таким образом, показано, что использование двигателя Стирлинга приводит к повышению коэффициента полезного использования топлива с выработкой дополнительной электроэнергии.

Научный руководитель – д-р техн. наук, проф. Степанов О. А.

## Оценка способности сохранения тепла в грунтовом баке аккумулятора

Рыдалина Н. В.

Тюменский индустриальный университет

В настоящее время активно рассматриваются варианты использования альтернативных источников энергии для получения тепловой энергии. Солнечные нагревательные установки можно использовать в качестве альтернативного источника получения тепловой энергии для нужд отопления и горячего водоснабжения. Однако в темное время суток, в пасмурную или холодную погоду, тепла полученного от солнечной нагревательной установки может быть недостаточно. Чтобы повысить эффективность использования солнечной нагревательной установки, можно предложить использовать сезонный аккумулятор тепла, в нем накапливать тепло, получаемое от солнца в теплое время года. Когда же тепла от солнечных батарей недостаточно, то благодаря аккумулятору и тепловому насосу запускать процесс расходования накопленного тепла [1].

В работе оценивается способность грунтового сезонного аккумулятора накапливать тепло от солнечной радиации, необходимое для организации теплоснабжения загородного дома. Для этого производится оценка интенсивности солнечного излучения в течение года. Определяется оптимальный объем и форма аккумулятора, с учетом возможности накопления тепла и необходимостью использовать его для отопления дома фиксированной площади.

Проведен расчет теплового сопротивления плоской, цилиндрической и сферической стенок. Определены коэффициенты теплопроводности в зависимости от площади поверхности бака аккумулятора для различной конфигурации. Установлено, что оптимальной формой бака в этом случае является цилиндр.

Осуществляется подбор оптимальной теплоизоляции бака, позволяющей минимизировать теплотепери из оценки теплопроводности аккумулятора. Определяется необходимая толщина защитного слоя.

Использование солнечных коллекторов вместе с сезонным баком-аккумулятором как дополнительного альтернативного источника тепловой энергии возможно даже в суровом сибирском климате [1].

---

1. Рыдалина Н. В., Лободенко Е. И. Организация теплоснабжения загородного дома с использованием возобновляемых источников энергии // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: материалы Межд. научно-практ. конфер. студ., аспирант., молодых учен. и спец. Тюмень: ТИУ, 2016. Т. 2. С. 91–95.

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

## **Экспериментальное исследование температуропроводности и удельной теплоемкости магнитотвердых материалов системы Sm-Co в широком интервале температур**

Самошкин Д. А.

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

Сложно представить современную технику без использования мощных постоянных магнитов. Работа по созданию новых магнито жестких материалов с уникальными свойствами ведется непрерывно. Одной из наиболее перспективных групп магнитотвердых материалов являются разнообразные соединения системы Sm-Co. Высокий интерес исследователей направлен на изучение магнитных свойств данных магнетиков. Надежная экспериментальная информация о связи магнитных свойств с иными характеристиками материала может стать фундаментом для лучшего понимания процессов, происходящих в магнетиках, и построения теории, предсказывающей их свойства. Однако было замечено, что в литературе практически отсутствуют достоверные данные по теплофизическим свойствам магнитных материалов, в частности по температуропроводности и удельной теплоемкости. В этой связи целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование коэффициента температуропроводности и удельной теплоемкости магнито жестких материалов на основе соединений Sm-Co в широком интервале температур твердого состояния, включая область магнитного фазового перехода.

Впервые были проведены измерения коэффициента температуропроводности методом лазерной вспышки в интервале 293–1173...1273 К и удельной теплоемкости методом дифференциальной сканирующей калориметрии в интервале 190–1271 К магнитотвердых материалов системы Sm-Co. Опыты проводились на образцах магнитов марок YX18, YX24 и YXG22, YXG30, содержащих в качестве основного компонента кристаллические фазы типа  $\text{SmCo}_5$  и  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ . Подробно исследовано поведение температурной зависимости температуропроводности и удельной теплоемкости в области магнитного фазового перехода. Определены критические индексы и критические амплитуды для всех исследованных соединений. Разработаны аппроксимационные уравнения и таблицы справочных данных для научного и практического использования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-38-20223).

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

## **Исследование теплообмена при ручейковом течении воды в миниканале под действием потока газа**

Светличная О. В.

Новосибирский государственный университет

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

Быстрый темп развития электроники ставит задачу эффективного охлаждения электронных компонент. Увеличение количества транзисторов на  $1 \text{ см}^2$  вызывает увеличение теплового потока с поверхности. Таким образом происходит перегорание электронных компонент. Отсутствие эффективных элементов охлаждения замедляет процесс развития более мощных вычислительных систем.

Двухфазные системы имеют большой потенциал для задачи охлаждения. Ручейковое течение под действием потока газа является разновидностью пленочного течения, однако существенным отличием от пленочного течения является наличие двух контактных линий (поверхность – жидкость – газ), в области которых теплообмен проходит более интенсивно. Коэффициент теплоотдачи в таком микрорегионе превышает среднее значение в области всего ручейка в 5-7 раз. Также преимуществом ручейкового течения является его энергоэффективность. За счет того, что расход жидкости меньше, чем при пленочном течении, тратится меньше энергии на прокачку газо-жидкостной смеси через участок.

Экспериментально исследованы режимы ручейкового течения воды в миниканале под действием потока азота, в зависимости от температуры подложки. Коэффициент теплоотдачи сильно зависит от режима течения и, для использования данной системы в охлаждении, важно знать при каких расходах жидкости и газа достигается максимально эффективное состояние системы.

Нами были построены карты режимов течения ручейка воды под действием потока газа азота для диапазона температур подложки  $20\text{--}60^\circ\text{C}$ . Показано, что с увеличением температуры подложки увеличивается интенсивность испарения, которая уже имеет высокое значение за счет того, что ручеек обдувается потоком сухого газа.

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

## **Энергоснабжение поселка района крайнего севера**

Смирнов К. Н.

Тюменский индустриальный университет

В настоящее время, больше половины территории Российской Федерации не подключено к централизованному электроснабжению. В первую очередь это районы крайнего севера, где прокладка линий электропередач обходится слишком дорого.

Энергоснабжение районов крайнего севера является одной из важных проблем. Наиболее остро данный вопрос стоит в регионах, где возникновение поселений связано с разработкой месторождений. В связи с этим в 2010 году была разработана программа «Малая распределенная энергетика», в ходе которой ожидается переход от однотипного развития энергетики как жесткой централизованной системы с преобладанием крупных источников генерации к разнообразию типов и форм установок в соответствии с особенностями конкретных потребителей и конкретных местных условий путем внедрения малых когенерационных установок.

В данной работе предложен к установке экологичный и экономичный вариант энергоснабжения поселка района крайнего севера (ЯНАО) посредством комбинированного использования когенерационных и ветроэнергетических установок. Произведен расчет газопоршневого агрегата с использованием теплоты уходящих газов в котле-утилизаторе и применением ветроэнергетических установок для частичного покрытия электрической нагрузки поселка. Произведена оценка экономической эффективности предлагаемого проекта с определением основных показателей.

Научный руководитель – Захаренко С. О.

## **Экспериментальное исследование динамики разрыва локально нагреваемого слоя жидкости**

Спесивцев С. Е.

Новосибирский государственный университет

Исследование теплоотвода от локального источника тепла становится в настоящее время одной из востребованных и сложнейших задач в теплофизике, поскольку прямым образом связано с проблемой охлаждения микроэлектронного оборудования. Одним из перспективных методов отвода высоких тепловых потоков от электронного оборудования являются технологии, использующие процессы с фазовым превращением, например испарение тонкого слоя жидкости. Динамика испарения и, соответственно, теплоотвод от источника теплоты существенным образом зависят от условий в тонком слое жидкости. Целью данной работы является исследование динамики разрыва тонкого слоя жидкости при нагреве от точечного источника тепла.

Эксперименты проводились при атмосферном давлении, температуре и относительной влажности воздуха  $28 \pm 2$  °С и  $25 \pm 3$  % соответственно. Высота слоя жидкости изменялась от 300 до 700 мкм. Плотность теплового потока достигала  $100 \text{ Вт/см}^2$  при диаметре нагревателя 1.6 мм. Визуализация и измерение толщины слоя жидкости осуществлялись с помощью шпирен и конфокального методов. Обнаружено, что разрыв слоя жидкости происходит в несколько этапов. Вначале происходит утончение слоя жидкости над областью локального нагрева за счет действия термокапиллярных сил и испарения. Дальнейшее утончение приводит к образованию остаточного слоя жидкости в области локального нагрева, который испаряется до критической величины, и возникает разрыв слоя жидкости. После разрыва область локального нагрева интенсивно осушается и формируется круглое сухое пятно.

В работе изучена зависимость толщины слоя над областью нагрева от времени для различной начальной глубины слоя. Критическая толщина остаточного слоя составляет менее 30 мкм. Обнаружено наличие пульсаций толщины слоя в области точечного нагрева перед формированием остаточного слоя. При увеличении толщины слоя жидкости плотность критического теплового потока увеличивается. Скорость формирования сухого пятна увеличивается с ростом толщины слоя и, соответственно, интенсивности локального нагрева. Одним из основных факторов, влияющих на разрыв остаточного слоя жидкости и формирование сухого пятна в области локального нагрева, является испарение.

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

## **Исследование потенциала пирозлектриков для термоэлектрической конверсии**

Сухоруков Г. С.

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

Пирозлектрический эффект – явления преобразования циклических изменений температуры в электрическую энергию, проявляющийся в пирозлектриках, одном из видов сегнетоэлектрических материалов. Так как рекуперация свободной тепловой энергии в электроэнергию является широким направлением исследований в области энергосбережения, пирозэффект широко изучался в 1980-х годах, тогда было показано, что удельная мощность пирозлектрических генераторов значительно меньше мощности пьезоэлектрических генераторов. Однако сейчас, современные разработки в области микро и нано технологий требуют пересмотра потенциала пирозлектриков в области микро и нано размерных генераторов. В связи с этим, исследование зависимости удельной мощности пирозлектрических преобразователей от их геометрии и параметров внешних температурных колебаний (частота, сдвиг фаз) является актуальной задачей.

В ходе работы было проведено численное моделирование пирозлектрической пластины в потоке жидкости, протекающей с гармонически меняющейся температурой, для разных частот температурных колебаний. Для описания пирозлектрика были использованы феноменологические соотношения Ландау для связи электрического поля, температуры и поляризации, а также теория пограничного слоя для описания температурного взаимодействия пластины с потоком жидкости.

В результате были получены зависимости удельной мощности от частоты циклов, а также от сдвига фаз между напряжением и температурой в цикле Олсена. Также была получена зависимость удельной мощности от частоты при оптимальном сдвиге фаз, из асимптотики которой следует, что удельная мощность пирозлектрического генератора может достигать 50 Вт / кг для 10 мкм пластины, что является обнадеживающим результатом.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Юдин П. В.

**Динамика и теплообмен в тонкой пленке жидкости,  
движущейся под действием потока газа в мини-канале**

Ткаченко Е. М.

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

На сегодняшний день мировая промышленность готова к выпуску высокопроизводительных электронных компонентов, плотность теплового потока на отдельных участках которых может достигать величины  $1000 \text{ Вт/см}^2$  и выше. Но использование таких устройств требует наличие эффективной системы охлаждения, так как необходима реализация отвода столь высоких значений удельных тепловых потоков в окружающую среду. Многообещающим способом отведения больших тепловых потоков является использование интенсивно испаряющейся пленки жидкости, движущейся под действием потока газа в канале. В работе выполнены систематические экспериментальные исследования течения и разрушения пленки воды, увлекаемой потоком газа в канале, при нагреве от локального источника тепла размером  $1 \times 1 \text{ см}^2$ . Исследовано влияние расходов жидкости и газа, высоты канала и угла наклона канала на теплообмен и критический тепловой поток (КТП).

Основная часть рабочего участка представляет собой пластину из нержавеющей стали, в которую впрессован медный стержень с квадратной головкой  $1 \times 1 \text{ см}^2$ . Стержень нагревается с помощью спирали, намотанной вокруг его нижней части. Такая конструкция нагревателя обеспечивает условие постоянства температуры на поверхности стержня. Рабочий участок накрыт прозрачной крышкой из оптического стекла, таким образом, формируя плоский канал. Высота канала составляет  $0,2 - 2,0 \text{ мм}$ , ширина составляет  $40 \text{ мм}$ . Газ (воздух с температурой  $24-27 \text{ }^\circ\text{C}$  и относительной влажностью  $15-30 \%$ ) подается в рабочий участок с помощью компрессора. Жидкость (дистиллированная вода Milli-Q с начальной температурой  $24 \text{ }^\circ\text{C}$ ) подается из термостата, попадает в канал через жидкостное сопло и движется под действием трения газа по пластине из нержавеющей стали в виде пленки. Газ после прохождения рабочего участка выходит в атмосферу, жидкость возвращается в термостат.

Обнаружено, что КТП для пленки воды, движущейся под действием газа, при массовом расходе воды  $175 \text{ кг/м}^2\text{с}$  достигает значения  $1,2 \text{ кВт/см}^2$ . При этом, КТП для кипения недогретой воды в мини-канале при том же массовом расходе жидкости достигает значения  $170 \text{ Вт/см}^2$ . Таким образом, подтверждается перспективность использования тонких пленок жидкости, движущихся под действием трения потока газа, в современных системах охлаждения оборудования с высоким локальным тепловыделением.

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

## **Динамика контактной линии при испарении капли жидкости на различных поверхностях**

Шонина А. М.

Новосибирский государственный университет

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

Использование наноструктурированных поверхностей позволяет существенно влиять и управлять процессами теплообмена и гидродинамики в различных приложениях. Одним из актуальных вопросов является поведение линии контакта трех фаз на поверхностях с различным покрытием [1].

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования динамики линии контакта трех фаз при испарении висящей капли на поверхностях с различным краевым углом смачивания. В качестве подложек использовались предметные стекла и оптические стекла с различным покрытием. Покрытия обладали достаточно хорошими адгезионными свойствами. В качестве рабочей жидкости использовалась сверхчистая вода (MilliQ), этанол и HFE-7100. Визуализация (сверху) динамики испарения проводилась посредством микроскопа Olympus BX51 с использованием различных объективов и монохромной видеокамеры. Дополнительно велась видеорегистрация с помощью теневого метода (вид сбоку), где фиксировался профиль капли и измерялись краевые углы смачивания при различных временах.

Представлены результаты изменения диаметра капли воды, краевого угла, объема и скорости контактной линии при испарении на поверхностях с различным покрытием. Показано, что существует различие во времени выхода из асимптотического режима и установлена связь данного факта с величиной краевого угла смачивания и его гистерезиса.

---

1. Gatapova E. Ya., Semenov A. A., Zaitsev D. V., Kabov O. A., Evaporation of a sessile water drop on a heated surface with controlled wettability // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2014. Vol 441. P. 776–785. <http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2013.05.046>

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Гатапова Е. Я.

## АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Акинин С. А.....	36	Крета А. С.....	91
Алкин М. Б.....	37	Кузьмин Е. И. ....	15
Альянов А. В. ....	38	Кутлиметов А. Э. ....	92
Аникеева К. И.....	5	Кучинская О. И. ....	16
Арсентьев С. С. ....	76	Лебедев А. С.....	50
Арсентьева С. А. ....	77	Лизунов С. А. ....	93
Бабихина М. Н.....	78	Литвинцева А. А. ....	51
Барткус Г. В. ....	79	Макаров А. В.....	52
Бобров М. С. ....	80	Мельникова А. И.....	16
Борьяняк К. И. ....	39	Мередова М. Б.....	17
Брюханов И. Д.....	40, 56	Мик И. А. ....	50
Буковец А. А.....	81	Минина О. В.....	16
Бунтин Д. А. ....	54	Мишин А. В.....	53
Вихорев В. В.....	41	Мордовской А. С. ....	94
Волчок Е. П.....	6	Мурильо О. ....	28, 29
Востриков С. А. ....	82	Настобурский А. С.....	54
Гвоздев С. А.....	42, 43	Нестеров А. Ю.....	55
Герман М. О.....	7	Ни Е. В. ....	56
Гичёва Н. И.....	83, 85	Никитин П. Ю. ....	57
Горн А. А. ....	8	Никишин А. В. ....	18
Грабовский В. Ю.....	44	Новичихина Д. А.....	58
Данилов В. В.....	9	Орлик Е. В. ....	86
Дремов С. В. ....	84	Очиров О. О.....	19
Дубровин К. А. ....	10	Ощенко И. И.....	20
Дьяков Е. А. ....	83, 85	Папулов А. П.....	95
Егоров В. А.....	45	Петров П. А. ....	29
Жарикова Т. М. ....	46	Петрова-Богданова О. О.....	96
Зыкова А. И. ....	47	Питеримова М. В. ....	59
Инжеваткина А. А.....	11	Поденко С. С. ....	22
Исаченко Е. А.....	86	Подольская И. Ю. ....	60, 71
Канцерев П. Н.....	87	Полухин А. А. ....	61
Каприлевская В. С.....	48	Попов А. П.....	62
Карасёва К. В.....	22	Попов В. А.....	21
Кириченко Е. О. ....	88	Ракипов А. С.....	22
Ковалев А. В.....	89	Распутин А. Л. ....	97
Козюлин Н. Н. ....	80	Решетова А. И. ....	63
Колесников Я. А. ....	12	Ростом А. М.....	23
Константинов С. Е. ....	13	Руменских М. С.....	65
Коншин З. Э.....	14	Рыдалина Н. В. ....	98
Корбанова Е. Г.....	90	Рьльцева К. Е. ....	66
Корнев Э. В.....	49	Ряшин Н. С. ....	61

Саморокова Н. М.....	47
Самошкин Д. А.....	98
Сандалов Е. С. ....	24
Светличная О. В. ....	99
Сидоров А. Д. ....	47
Смирнов К. Н.....	100
Содномай А. Б. ....	25
Соколова Е. О. ....	26
Соловьев Б. ....	27
Спесивцев С. Е. ....	101
Сташков П. Е. ....	66
Страхова А. А. ....	28, 29
Сухоруков Г. С. ....	102
Ткаченко Е. М.....	103
Толстогузов Р. В.....	67
Трошенкова Д. А. ....	20
Трубицына Л. П.....	68

Туев П. В.....	30
Филиппов А. А. ....	61
Хакимов А. А. ....	69
Харченко В. А. ....	31
Христо М. С.....	32
Чиненов С. Т.....	33
Шарифуллин Б. Р. ....	60, 70
Шикалов В. С. ....	61
Шипко Е. К.....	71
Шкредов Т. Ю. ....	72
Шоколов А. Д. ....	34
Шонина А. М.....	104
Эбель Р. Е. ....	73
Ягодницына А. А. ....	88
Яковлева Т. С. ....	35
Яцких А. А.....	74

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ФИЗИКА ПЛАЗМЫ</b> .....	5
Аникеева К. И. ....	5
Волчок Е. П. ....	6
Герман М. О. ....	7
Горн А. А. ....	8
Данилов В. В. ....	9
Дубровин К. А. ....	10
Инжеваткина А. А. ....	11
Колесников Я. А. ....	12
Константинов С. Е. ....	13
Коншин З. Э. ....	14
Кузьмин Е. И. ....	15
Мельникова А. И., Минина О. В., Кучинская О. И. ....	16
Мередова М. Б. ....	17
Никишин А. В. ....	18
Очиров О. О. ....	19
Ощенко И. И., Трошенкова Д. А. ....	20
Попов В. А. ....	21
Ракипов А. С., Поденко С. С., Карасёва К. В. ....	22
Ростом А. М. ....	23
Сандалов Е. С. ....	24
Содномай А. Б. ....	25
Соколова Е. О. ....	26
Соловьев Б. ....	27
Страхова А. А., Мурильо О. ....	28
Страхова А. А., Мурильо О., Петров П. А. ....	29
Туев П. В. ....	30
Харченко В. А. ....	31
Христо М. С. ....	32
Чиненов С. Т. ....	33
Шоколов А. Д. ....	34
Яковлева Т. С. ....	35
<b>АЭРОФИЗИКА</b> .....	36
Акинин С. А. ....	36
Алкин М. Б. ....	37
Альянов А. В. ....	38
Борыняк К. И. ....	39
Брюханов И. Д. ....	40
Вихорев В. В. ....	41
Гвоздев С. А. ....	42

Гвоздев С. А.....	43
Грабовский В. Ю.....	44
Егоров В. А. ....	45
Жарикова Т. М. ....	46
Зыкова А. И., Саморокова Н. М., Сидоров А. Д.....	47
Каприлевская В. С.....	48
Корнев Э. В.....	49
Лебедев А. С., Мик И. А. ....	50
Литвинцева А. А. ....	51
Макаров А. В. ....	52
Мишин А. В. ....	53
Настобурский А. С., Бунтин Д. А. ....	54
Нестеров А. Ю. ....	55
Ни Е. В., Брюханов И. Д.....	56
Никитин П. Ю. ....	57
Новичихина Д. А.....	58
Питеримова М. В.....	59
Подольская И. Ю., Шарифуллин Б. Р. ....	60
Полухин А. А., Шикалов В. С., Ряшин Н. С., Филиппов А. А.....	61
Попов А. П. ....	62
Решетова А. И.....	63
Руменских М. С.....	64
Рыльцева К. Е. ....	65
Сташков П. Е. ....	66
Толстогузов Р. В.....	67
Трубицына Л. П.....	68
Хакимов А. А.....	69
Шарифуллин Б. Р., Подольская И. Ю. ....	70
Шипко Е. К. ....	71
Шкредов Т. Ю. ....	72
Эбель Р. Е.....	73
Яцких А. А.....	74
<b>ТЕПЛОФИЗИКА</b> .....	<b>75</b>
Арсентьев С. С. ....	75
Арсентьева С. А. ....	76
Бабихина М. Н.....	77
Барткус Г. В. ....	78
Бобров М. С., Козюлин Н. Н. ....	79
Буковец А. А.....	80
Востриков С. А.....	81
Гичёва Н. И., Дьяков Е. А. ....	82
Дремов С. В. ....	83

Дьяков Е. А., Гичёва Н. И. ....	84
Исаченко Е. А., Орлик Е. В. ....	85
Канцерев П. Н. ....	86
Кириченко Е. О. ....	87
Ковалев А. В., Ягодницына А. А. ....	88
Корбанова Е. Г. ....	89
Крета А. С. ....	90
Кутлиметов А. Э. ....	91
Лизунов С. А. ....	92
Мордовской А. С. ....	93
Папулов А. П. ....	94
Петрова-Богданова О. О. ....	95
Распутин А. Л. ....	96
Рыдалина Н. В. ....	97
Самошкин Д. А. ....	98
Светличная О. В. ....	99
Смирнов К. Н. ....	100
Спесивцев С. Е. ....	101
Сухоруков Г. С. ....	102
Ткаченко Е. М. ....	103
Шонина А. М. ....	104
<b>АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ</b> .....	<b>105</b>

Научное издание

МАТЕРИАЛЫ  
55-Й МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ  
СТУДЕНЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

МНСК–2017

ФИЗИКА СПЛОШНЫХ СРЕД

Материалы конференции публикуются в авторской редакции

Подписано в печать 31.03.2017 г. Формат 60x84/16

Уч.-изд. л. 6,875. Усл. печ. л. 6,4.

Тираж 100 экз. Заказ № 33.

Издательско-полиграфический центр НГУ  
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2