

Материалы секции
ФИЗИКА
СПЛОШНЫХ СРЕД



10-13 апреля 2020
НОВОСИБИРСК

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

МНСК-2020

ФИЗИКА СПЛОШНЫХ СРЕД

Материалы
58-й Международной научной студенческой конференции

10–13 апреля 2020 г.

Новосибирск
2020

УДК 53
ББК 22.3
Ф 50

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

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

Ответственный секретарь секции — Л. А. Иванова

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

Ф 50 Физика сплошных сред : Материалы 58-й Междунар. науч. студ. конф. 10–13 апреля 2020 г. / Новосиб. гос. ун-т. — Новосибирск : ИПЦ НГУ, 2020. — 58 с.

ISBN 978-5-4437-1061-7

УДК 53
ББК 22.3

ISBN 978-5-4437-1061-7

© СО РАН, 2020
© Новосибирский государственный университет, 2020

NOVOSIBIRSK STATE UNIVERSITY
SIBERIAN BRANCH OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

ISSC-2020

PHYSICS OF CONTINUOUS MEDIA

Proceedings
of the 58th International Students Scientific Conference

April, 10–13, 2020

Novosibirsk
2020

УДК 53
ББК 22.3
Ф 50

Scientific Supervisor — Acad. RAS A. K. Rebrov

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

Responsible secretary — E. A. Ivanova

Section scientific committee

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

Dr. Phys.-Math. Sci., Prof. RAS A. A. Chernov

Dr. Phys.-Math. Sci., Prof. RAS K. V. Lotov

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

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

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

Ф 50 Physics of Continuous Media : Proceedings of the 58th International Students Scientific Conference. April, 10–13, 2020 / Novosibirsk State University. — Novosibirsk : IPC NSU, 2020. — 58 p.

ISBN 978-5-4437-1061-7

УДК 53
ББК 22.3

ISBN 978-5-4437-1061-7

© SB RAS, 2020

© Novosibirsk State University, 2020

АЭРОФИЗИКА

УДК 551.501.816(571.16)

Интерпретация лидарных наблюдений стратосферного аэрозоля над г. Томском в 2012 г. методом обратных траекторий

Ю. А. Бобрусова

Институт химической кинетики и горения
им. В. В. Воеводского СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный технический университет

Полярные стратосферные облака (ПСО) оказывают заметное влияние на процессы, проходящие в атмосфере, и климат планеты. Они играют существенную роль в механизме образования озоновых дыр.

Лидарные наблюдения тропосферы и стратосферы над г. Томском в декабре и январе 2012 г. показали, что аэрозольное наполнение стратосферы характеризовалось сильной изменчивостью. Были зарегистрированы ярко выраженные пики аэрозольного рассеяния на высотах от 14 до 20 км.

Для анализа аэрозольной составляющей атмосферы использовалось отношение обратного рассеяния, $R(H) = \frac{\beta_\alpha(H) + \beta_m(H)}{\beta_m(H)}$, где $\beta_\alpha(H)$, $\beta_m(H)$ — коэффициенты обратного аэрозольного и молекулярного рассеяния соответственно. При наличии аэрозоля на некоторой высоте $R(h) > 1$, при отсутствии — $R(h) \approx 1$. Были проведены расчеты обратных траекторий от г. Томска и его окрестности (± 100 км), начинающиеся на высотах 10–35 км с шагом 0,5 км по высоте. Расчет траекторий проводился по данным GDAS с помощью пакета HYSPLIT.

По результатам работы был сделан вывод о том, что в декабре и январе 2012 г. в г. Томске наблюдались полярные стратосферные облака.

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

2. Hagen O. F., Obert W. Cluster formation in expanding supersonic jets: effect of pressure, temperature, nozzle size, and test gas // J. Chem. Phys. 1972. V. 56, № 5. P. 1793–1802.

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

Численное моделирование динамики струйного осциллятора методом крупных вихрей

Е. И. Дауэнгауэр

Новосибирский государственный университет
Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск

В данной работе численно при помощи метода крупных вихрей (*Large-eddy simulation*, LES) исследуются гидродинамические свойства струйного осциллятора. Струйный осциллятор представляет собой компактное устройство, не имеющее подвижных частей, которое генерирует на выходе пространственно осциллирующую струю. Подобная динамика является результатом эффекта Коанда, т. е. состояния бистабильности внутреннего течения. Только недавно это устройство стало объектом интенсивных исследований в качестве управляющего элемента, что позволило влиять на такие свойства потока, как сопротивление и динамика отрывной зоны, а также для интенсификации процессов перемешивания [1]. И хотя об актуаторах подобного типа уже известно достаточно много, интенсивное развитие и текущее состояние вычислительной техники позволят детально исследовать выбранный объект.

Мы численно исследуем гидродинамические свойства струйного осциллятора, геометрия и размеры которого взяты согласно экспериментальной работе [2], в диапазоне значений Рейнольдса от 3×10^3 до 30×10^3 . Все расчеты проводятся при помощи вычислительного кода, основанного на методе спектральных элементов (*Spectral element method*, SEM), для замыкания уравнений Навье — Стокса используется динамическая модель Смагоринского, основанная на гипотезе турбулентной вязкости. Используя для грубой сетки около 98×10^3 спектральных элементов с порядком базисных полиномов $N = 4, 6$ и 8 , что соответствует $6,3 \times 10^6$, $21,1 \times 10^6$, 50×10^6 вычислительных узлов сетки, мы исследуем свойства осциллирующей струи.

Работа поддержана грантом РФФИ № 18-38-20167.

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

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

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

О зависимости размеров кластерной струи от степени конденсации газового потока

К. А. Дубровин

Новосибирский государственный университет

В ходе проведения исследования локальной плотности в сверхзвуковых потоках аргона был обнаружен новый газодинамический эффект: образование независимой кластерной струи, сопутствующей традиционному и хорошо изученному газовому потоку, истекающему из сопел в вакуум или разреженное пространство [1]. В результате данной работы на основе фотометрических данных представлен анализ изменения формы и структуры кластерного потока при вариации начальных параметров истечения газа из сопла.

Работа выполнена на вакуумном экспериментальном газодинамическом стенде отдела прикладной физики физического факультета НГУ «ЛЭМПУС-2».

В ходе работы отлажена система регистрации изображений истекающих из сопел потоков, возбужденных источником электронов, на основе фотоаппарата Nikon D7200 с объективом DX AF-S Micro Nikkor SWM, а также методика фотометрии регистрируемых потоков на основе принципа относительных измерений. Исследована зависимость формы и структуры потоков от начальных параметров истечения (давление торможения P_0 , давление в фоновом пространстве P_h , температура в форкамере T_0 и диаметр критического сечения сопла d_* , линейное число Рейнольдса Re_L). На основе полученных данных установлена зависимость коэффициента пропорциональности K (между диаметром кластерной струи и степенью расширения $N = \frac{P_0}{P_h}$) от среднего размера образующихся в потоке кластеров S [2]. Предложена эмпирическая модель формирующегося кластерного потока в сверхзвуковых струях легкоконденсирующихся газов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №20-01-00332/20).

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

2. Hagen O.F., Obert W. Cluster formation in expanding supersonic jets: effect of pressure, temperature, nozzle size, and test gas // J. Chem. Phys. 1972. V. 56, № 5. P. 1793–1802.

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

**Экспериментальное исследование параметров потока газа
в компланарном тракте с помощью метода
Лазерного доплеровского измерителя скорости**

А. В. Золотухин, И. А. Чохар

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

Компланарные каналы, образованные пересекающимися под определенным углом ребрами на противоположных стенках, по причине довольно высокого эффекта интенсификации теплообмена получили в настоящее время широкое распространение в рекуперативных теплообменных аппаратах, при охлаждении сопел реактивных двигателей и лопаток газотурбинных двигателей, а также зеркал лазеров. В данный момент в работах по исследованию компланарных каналов имеются преимущественно результаты интегральных характеристик (рост теплоотдачи, потери давления, теплогидравлическая эффективность). Физика происходящих процессов, в частности турбулентная структура течения, остается при этом малоизученной. Однако доказано, что наличие компланарных каналов в теплообменном устройстве значительно повышает гидравлические потери (по сравнению с гладкими каналами), что, в свою очередь, компенсируется паритетным ростом теплообменных качеств.

Для детального изучения тонкой структуры потока в компланарных каналах был разработан аэродинамический стенд, который имеет все необходимые элементы для создания качественного аэродинамического потока. В ходе работы был проведен ряд экспериментов по исследованию влияния угла скрещивания (60° , 90° и 120°), шага между ребрами и числа Рейнольдса на аэродинамическую структуру потока в отдельных ячейках канала. В экспериментах были использованы бесконтактные и контактные методы изучения потока, такие как оптический диагностический метод — Лазерный доплеровский измеритель скорости (ЛДИС) и метод локального измерения давлений — трубка Пито — Прандтля.

В результате исследований были получены зависимости коэффициента гидравлического сопротивления в компланарных каналах с различным углом скрещивания ребер от числа Рейнольдса. Впервые были получены профили продольных и поперечных скоростей и их пульсаций в отдельных ячейках экспериментального участка с углом скрещивания 90° . Обнаружено, что течение в компланарных каналах является крайне сложным и трехмерным.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ 19-38-90030).

Научный руководитель — д-р техн. наук, проф. В. И. Терехов

Исследование динамики перемещения радиального анодного участка столба дуги в двухкамерном цилиндрическом электроде

Н. Ибраимов

Новосибирский государственный университет

Эффективность работы плазмотрона в значительной мере определяется ресурсом непрерывной работы электрода. Эрозия электрода является определяющим фактором, который ограничивает время его работы. Интенсивность эрозии зависит от приэлектродных процессов и процессов, происходящих в теле электрода. Поэтому исследование эрозии электродов является актуальной задачей. В ходе более ранних исследований было установлено, что эрозия полого цилиндрического медного анода в двухкамерном плазмотроне определяется скоростью перемещения анодной области дуги. В свою очередь, скорость перемещения анодной области дуги зависит от расхода плазмообразующего газа и величины тока дуги. Для каждой величины расхода плазмообразующего газа в двухкамерном плазмотроне существует предельный (критический) ток, выше которого происходит резкое увеличение уровня эрозии анода.

В настоящей работе представлены результаты исследования динамики перемещения радиального анодного участка столба электрической дуги в двухкамерном медном цилиндрическом аноде плазмотрона постоянного тока и ее влияния на величину эрозии анода. Обнаружено, что по мере роста расхода плазмообразующего газа происходит изменение характера перемещения прианодной области дуги от непрерывного к скачкообразному, вызванное началом процесса шунтирования анодного участка столба дуги. Начало процесса шунтирования радиального анодного участка столба дуги приводит к увеличению эрозии анода на порядок, несмотря на сохранение высокой средней скорости перемещения приэлектродной области дуги.

Научный руководитель — С. П. Ващенко

Исследование динамических характеристик сжимаемого ламинарного отрывного течения

А. И. Кутепова

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

Использование ламинарного трансзвукового аэродинамического профиля должно позволить существенно повысить энергоэффективность летательных аппаратов следующего поколения. Взаимодействие ударной волны с ламинарным пограничным слоем (SWBLI) может приводить к отрыву течения на ламинаризованных профилях. Особенностью этих отрывных течений является турбулизация пограничного слоя в зоне SWBLI. Положение точки ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП) в зоне взаимодействия оказывает существенное влияние на характер потока SWBLI. Поэтому для правильного прогнозирования характеристик естественного ламинарного трансзвукового профиля важно правильно предсказать положение перехода. Эта проблема особенно важна для нестационарных явлений (например, трансзвукового бафтинга). Целью данной работы является попытка предсказать положение ЛТП в зоне SWBLI для нестационарных условий. В работе используются два подхода для моделирования турбулизации пограничного слоя. В первом подходе точка ЛТП определяется на основе e^N -метода. Во втором случае положение перехода моделировалось на основе использования RANS-модели Ментера.

Для выполнения расчетов была построена структурированная блочная расчетная сетка с общим количеством ячеек 113 000. Моделирование выполнялось с помощью пакета ANSYS Fluent. Расчеты производились с использованием модели турбулентности Ментера, учитывающей ЛТП, и ламинарной модели.

Было изучено взаимодействие падающей косо ударной волны с ламинарным пограничным слоем, развивающимся на пластине. Ударная волна генерировалась с помощью клина, расположенного под некоторым углом над пластиной. В качестве начальных условий принималось развитое течение ламинарного пограничного слоя на пластине, на который в момент времени $t = 0$ падает косо ударная волна, создаваемая резким отклонением клина. После чего рассчитывалась нестационарная задача эволюции области взаимодействия. В задаче были рассмотрены разные углы атаки клина.

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

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

Прямое статистическое моделирование высокоскоростных разреженных течений углекислого газа около затупленных тел

А. К. Латышев

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

При проектировании космических аппаратов (КА), предназначенных для полетов на Марс, необходимо детальное исследование аэротермодинамических характеристик этих аппаратов вдоль всей траектории спуска. На высотах более 60 км существенную роль играют эффекты разреженности. Основным инструментом численного исследования высокоскоростных разреженных течений является метод прямого статистического моделирования (ПСМ). Использование метода ПСМ для расчетов аэротермодинамики КА в атмосфере Марса осложняется достаточно сложной структурой молекулы углекислого газа — основного компонента атмосферы. Для анализа применимости молекулярных моделей метода ПСМ для течений углекислого газа необходимо сравнение с экспериментальными данными по высокоэнтальпийным течениям. Наилучшим образом реальные условия высокоскоростного полета моделируются в баллистических трассах.

Настоящая работа посвящена численному моделированию методом ПСМ высокоскоростных разреженных течений углекислого газа около затупленных тел и анализу применимости используемых численных моделей путем сравнения с экспериментальными данными по величине отхода головной ударной волны, полученными в баллистических трассах [1]. В расчетах использован программный пакет SMILE [2]. Особое внимание уделяется вопросу влияния учета колебательно-колебательного обмена на предсказательную способность численного моделирования.

1. Liao D., Liu S., Huang J. et al. Measurement and numerical simulation of shock standoff distances over hypersonic spheres in CO₂ in a ballistic range // Shock Waves. 2020. Vol. 30. P. 131–138.

2. Ivanov M. S., Markelov G. N. and Gimelshein S. F. Statistical simulation of reactive rarefied flows: numerical approach and applications // AIAA Paper. 1998. №. 98–2669.

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

**Учет производства NO в гетерогенных реакциях
методом прямого статистического моделирования**

А. С. Литвинцев

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

Поверхностные реакции играют существенную роль в переносе тепла на поверхность спускаемого аппарата, входящего в атмосферу. Поскольку эти реакции являются экзотермическими, отсутствие модели их учета в расчете может привести к существенному занижению значения теплового потока на поверхность спускаемого аппарата.

При моделировании аэротермодинамики спускаемых аппаратов на больших высотах (более 80 км) нельзя опираться на сплошносредные модели, основным инструментом численного расчета таких течений является метод прямого статистического моделирования (ПСМ). Для моделирования поверхностных процессов в рамках метода ПСМ требуется информация о вероятностях и временах процессов для конкретных молекул. Ранее был предложен подход для получения такой микроскопической информации на основе детальных макроскопических кинетических механизмов поверхностных процессов. Одним из ограничений предложенного подхода является отсутствие учета реакций рекомбинации, приводящих к образованию монооксида азота. Такие реакции могут играть существенную роль в кинетике поверхностных процессов. В настоящей работе проведено обобщение подхода на кинетику поверхностных процессов, включающих образование монооксида азота.

Предложенная модель была основана на кинетическом механизме Куро-таки для теплозащитного покрытия на основе SiO_2 . Модель была реализована в программном комплексе SMILE++, добавлена возможность участия одного типа вещества сразу в нескольких реакциях рекомбинации (рекомбинации Или — Ридела и Лэнгмюра — Хиншельвуда) с различными реагентами. Верификация модифицированного программного комплекса проводилась путем сравнения равновесной заселенности поверхности атомами N и O с учетом различных реакций в зависимости от температуры с рассчитанными аналитически равновесными значениями. Было достигнуто отличное согласие результатов расчетов с теорией, что демонстрирует способность предложенной модели предсказывать макроскопические скорости реакций в условиях термического равновесия.

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

**Перенос аэрозолей от пирокумулятивных облаков,
образовавшихся в результате пожаров за июль-август 2019 г.**

И. И. Романченко

Институт химической кинетики и горения
им. В. В. Воеводского СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный технический университет

Пирокумулятивные облака, или пирокумуляусы, образуются в результате сильных пожаров или взрывов вулканов. Летом 2019 г. были зафиксированы многочисленные пожары на территории России в Сибири, Канады, Аляски, Казахстана. Наличие аэрозолей в атмосфере определяется зондированием лидарными системами.

Для анализа аэрозольного состава атмосферы использовалось отношение $R(H) = \frac{(\beta_\alpha(H) + \beta_m(H))}{\beta_m(H)}$, где $\beta_\alpha(H)$, $\beta_m(H)$ — коэффициенты обратного аэрозольного и молекулярного рассеяния.

По результатам лидарных наблюдений, выполненных в г. Томске в августе 2019 г., в стратосфере на высотах от 10 до 20 км было обнаружено явно выраженное аэрозольное рассеяние. Чтобы подтвердить природу аэрозольных слоев от пирокумулятивных выбросов от пожаров, были использованы методы расчета обратных изоэнтропических траекторий движения воздушных масс. Расчеты были проведены для высот от 10–16 км с шагом 0,2 км. Траектории были рассчитаны по набору данных — GDAS, с использованием программного пакета HYSPLIT, доступного на сайте NOAA. Данные по пожарам были взяты с сайта NASA с архивами данных о пожарах — FIRMS. Пожары фиксировались спутником VIIRS с высоким разрешением 350 × 350 м/пиксель.

Проведенные расчеты показали, что аэрозольные слои, зафиксированные в г. Томске, были занесены воздушными массами, проходящими над пожарами больших размеров. На некоторых высотах могло происходить смешение аэрозольных слоев от нескольких источников пожаров из разных регионов.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. А. А. Черемисин

Исследование газодинамической структуры сверхзвуковых неравновесных микроструй элегаза

А. В. Савельева

Новосибирский государственный университет

В струйных течениях многоатомных газов могут возникать эффекты, связанные с проявлением внутренних степеней свободы молекул и колебательно-поступательной релаксацией. Влияние такой термической неравновесности для большинства течений газов на макромасштабах не проявляется вследствие малого времени релаксации. Однако в высокоскоростных микроструях характерные времена течений и колебательной релаксации сопоставимы, что может приводить к изменению газодинамической структуры струй и влиянию на их устойчивость и дальнобойность. В связи с отсутствием данных систематических исследований таких течений вызывает интерес сравнение газодинамической структуры сверхзвуковых микроструй многоатомных газов с известными данными для струй воздуха. В данной работе представлены результаты по моделированию равновесных и неравновесных микроструй газа SF_6 (элегаз), истекающих из осесимметричных микросопел в затопленное пространство. Геометрия микросопел соответствовала реальным соплам для экспериментальных исследований. Расчеты проводились в программе ANSYS Fluent. Для моделирования колебательно-поступательного энергообмена использовалась двухтемпературная модель релаксационных течений на основе уравнения Ландау — Теллера. В параметрических исследованиях варьировались степень нерасчетности струй и диаметр сопла в диапазоне $1,363 \div 4$ и $16,1 \div 1000$ мкм соответственно. Проведено сопоставление данных численного моделирования микроструй газов SF_6 и воздуха, а также сопоставлены расчетные данные по ширин-визуализации микроструй SF_6 с данными ранее проведенных экспериментов. Показано, что с уменьшением диаметра микросопла происходит уменьшение размеров волновых ячеек струи SF_6 в отличие от воздуха. Также показано, что для струй SF_6 из сопла диаметром 250 мкм происходит сильное ослабление вариаций параметров потока на волновых ячейках, вызванное термической релаксацией молекул.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук И. С. Цырюльников

Параметрическое исследование закрученного потока за аксиальным завихрителем

Д. А. Суслов

Новосибирский государственный университет
Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск

Вихревые потоки обширно используются в различных областях техники [1]. В закрученном потоке может возникать нестационарное вихревое явление, называемое прецессирующим вихревым ядром (ПВЯ) [1, 2]. ПВЯ характеризуется сильными периодическими пульсациями давления и скорости в пространстве [2, 3], которые могут вредить гидроэнергетическому оборудованию [4]. Особенности эффекта ПВЯ достаточно детально представлены в литературе, однако не имеется обобщенных данных о влиянии степени поджатия потока и параметра закрутки на амплитудно-частотные характеристики ПВЯ. Нахождение обобщенных зависимостей нужно для точного прогнозирования возникновения ПВЯ в технических устройствах на этапе проектирования.

Работа посвящена обобщению параметров ПВЯ на выходе из аксиального завихрителя при изменении угла наклона лопаток и диаметра сужающего сопла. Представлена частотная характеристика закрученного потока за аксиальным завихрителем. Режимы с присутствием ПВЯ определялись при помощи двух микрофонов, поля скорости измерялись лазерным доплеровским анемометром. Показано, что ПВЯ возникает путем изменения угла наклона лопаток завихрителя и диаметра выходного сопла. В случае сильного закрученного потока и отсутствия сужения соплом ПВЯ вырождается из-за сильного смещения потока к стенкам камеры. Найдена линейная зависимость числа Струхала от модифицированного параметра крутки. Обобщение частотных характеристик закрученного потока с ПВЯ выполнено для набора аксиальных завихрителей.

1. Gupta A. K., Lilley D. G., Syred N. Swirl flows // Tunbridge Wells. Kent, England: Abacus Press, 1984. 488 p.

2. Syred N. A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems // Progress in Energy and Combustion Science. 2006. Vol. 32, № 2. P. 93–161.

3. Chanaud R. C. Experiments concerning the vortex whistle // J. of the Acoustical Society of America. 1963. Vol. 35, № 7. P. 953–960.

4. Alekseenko S. V., Okulov V. L. Swirl flow in technical applications // Thermophysics and aeromechanics. 1996. Vol. 3, № 2. P. 97–128.

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

Исследование режимов диффузионного горения микроструи водорода

А. С. Тамбовцев

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

Экспериментальные исследования диффузионного горения круглой микроструи водорода, проведенные ранее, показали, что существуют различные сценарии для данного процесса. С изменением скорости истечения микроструи U_0 в диапазоне диаметров сопла от 0,25 до 1 мм происходит следующее:

1) горение чисто ламинарной микроструи с наличием ламинарного пламени большой дальности ($U_0 \leq 150$ м/с);

2) разделение факела на две области: одна сферической формы с ламинарным характером течения в ней и наличием ламинарной микроструи чистого водорода, другая с турбулентным потоком и горением. Две эти области разделяются между собой четко наблюдаемой зоной «перетяжки» пламени ($U_0 \sim 150$ м/с);

3) отрыв турбулентного пламени от зоны «перетяжки» пламени ($U_0 \sim 200$ м/с);

4) прекращение горения в турбулентной области микроструи при сохранении горения в ламинарной. Горение в ламинарной области сохраняется вплоть до трансзвуковых скоростей истечения микроструи, но при наличии такого явления, как «запирание» сопла ($U_0 \sim 331$ м/с);

5) прекращение горения всей микроструи ($U_0 > 331$ м/с).

В рамках работы была поставлена задача экспериментального исследования особенностей горения круглой микроструи водорода при наличии внешней струи воздуха, истекающей из коаксиально расположенной щели.

В результате проведенных экспериментов были получены теневые картины для различных режимов горения микроструи водорода в присутствии внешней струи воздуха, при различных значениях расходов. Сценарии диффузионного горения микроструй водорода, описанные ранее, сохраняются и в данной ситуации, но с определенными нюансами, такими как деформация формы области перетяжки пламени (трансформация формы из сферической в цилиндрическую), интенсификация турбулентного горения с ростом скорости истечения внешней струи.

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

**Учет свойств реального газа в сверхзвуковом потоке
высокоэнтальпийной аэродинамической трубы**

М. В. Фролов

Новосибирский государственный университет

Экспериментальные исследования в высокоэнтальпийных аэродинамических трубах кратковременного действия дают наиболее полное приближение к натурным условиям полета сверхзвуковых летательных аппаратов с одновременным соблюдением подобия по большому количеству критериев. Однако задача определения течения рабочего тела в газодинамическом тракте аэродинамической трубы является достаточно сложной, поскольку при высоких температурах торможения газа происходит возбуждение колебательных степеней свободы, в которых запасена часть внутренней энергии газа. При истечении газа в сопло возможны термически неравновесные процессы, термодинамическая модель равновесного реального газа не вполне корректна. В данной работе рассматривается сравнение равновесного, неравновесного и замороженного процессов течения газа в сверхзвуковом сопле импульсной аэродинамической трубы.

На основе алгоритма расчета параметров потока в одномерной постановке с учетом уравнения состояния реального газа был произведен расчет неравновесного течения в сопле с использованием модели релаксации Ландау — Теллера. Входными данными для расчета течения являются экспериментальные данные по давлениям в газодинамическом тракте установки, начальная температура рабочего тела и геометрические характеристики сопла. Для увеличения точности расчета параметров потока предусмотрена возможность использования дополнительной экспериментальной информации о температуре торможения, скорости, толщине вытеснения или статическом давлении в потоке.

Проведены расчеты параметров потока для экспериментов, проводимых на аэродинамической трубе в диапазоне температур торможения 1000–3000 К и давлений 100–500 бар с профилированными соплами с числами Маха от 6 до 8, с учетом термической неравновесности. Проведена оценка погрешности основных газодинамических параметров течения при практическом применении данного алгоритма.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук И. С. Цырюльников

ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 536.423.1

Моделирование динамики роста парового пузырька в однородно перегретой жидкости

И. В. Владыко

Новосибирский государственный университет

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

В работе теоретически исследуется динамика одиночного парового пузырька, образованного в результате гомогенной нуклеации в равномерно перегретой жидкости. Несмотря на то что данная задача является классической и неоднократно решалась различными авторами, существующие на данный момент аналитические решения обладают рядом существенных ограничений, связанных прежде всего с использованием тех или иных значимых допущений. В частности, известное решение Плессета — Цвика описывает динамику роста пузырька только при больших числах Якоба и только для тепловой стадии. В настоящей работе сделана попытка нахождения аналитического решения данной задачи в широком диапазоне чисел Якоба и на всех стадиях процесса: динамической, переходной и тепловой.

В модели использовалась схема однородного равновесного парового пузырька, согласно которой динамика его роста определяется только внешней задачей. Переход к переменным, в которых межфазная граница в течение всего процесса остается неподвижной, позволил найти полуаналитическое решение в виде достаточно простого интегро-дифференциального уравнения. Показано, что на больших временах решение задачи становится автономным и в предельных случаях малых и больших чисел Якоба в точности совпадает с известными в литературе зависимостями (в частности, зависимостью Лабунцова — Ягова).

Дальнейший анализ рассматриваемой системы проводился численно, с использованием неявной разностной схемы Кранка — Николсона и метода Рунге — Кутты 4-го порядка. Показано, что решения интегро-дифференциального уравнения и численной краевой задачи находятся в хорошем соответствии.

Таким образом, найдено полуаналитическое решение задачи о росте пузырька в однородно перегретой жидкости, справедливое в широком диапазоне чисел Якоба и на всех стадиях процесса. Сравнение полученных полуаналитического и численного решений показало их хорошее соответствие.

Научные руководители — д-р физ.-мат. наук, проф. РАН А. А. Чернов,
канд. физ.-мат. наук А. А. Пильник

Исследование локальных гидродинамических характеристик течения в вертикальной сборке стержней

С. М. Волков

Новосибирский государственный университет

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

На сегодняшний день обеспечение эффективной и безопасной работы атомных энергетических установок является приоритетной задачей. В частности, для решения данной задачи необходимо знать гидродинамические характеристики течения теплоносителя в активной зоне ядерного реактора. Тепловыделяющие элементы внутри тепловыделяющей сборки (ТВС) фиксируются с помощью дистанционирующих элементов, которые, в свою очередь, создают возмущение в потоке. Дополнительный интерес представляет изучение влияния таких элементов на структуру потока.

Данная работа посвящена измерению локальных значений скорости теплоносителя и касательного напряжения трения на поверхности стержня имитатора твэла, а также определению закономерности влияния относительного шага расположения стержней и их диаметра на вышеупомянутые гидродинамические характеристики.

Измерения проводились на двух установках с 7- и 37-стержневыми моделями ТВС с дистанционирующими решетками. В качестве теплоносителя использовалась вода при температуре 25 °С. Эксперименты проводились при числах Рейнольдса 500, 2500, 5000, 10000.

Измерение касательного напряжения трения осуществлялось электродиффузионным методом. Получены данные по осевому и аксиальному распределению касательного напряжения трения для 37-стержневой сборки, диаметр стержней — 9 мм, относительный шаг между стержнями — 1,4.

Измерения профиля скорости осуществлялись при помощи лазерной доплеровской измерительной системы (ЛДИС) ЛАД-08. Получены данные по осевой осредненной и пульсационной скоростям для 7-стержневой сборки при диаметрах стержней 9, 10, 15 мм, с относительным шагом 1,4.

Полученные данные могут быть использованы для верификации вычислительных кодов.

Научный руководитель — канд. техн. наук П. Д. Лобанов

Солитоны и бризеры в уравнениях Кортевега — де Фриза: прямое преобразование рассеяния

А. С. Гудько

Новосибирский государственный университет
Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск

Уравнение Кортевега — де Фриза описывает поведение волн на поверхности неглубокого слоя жидкости. Оно принадлежит классу интегрируемых уравнений, вследствие чего к нему можно применить прямое преобразование рассеяния [1]. Прямое преобразование рассеяния позволяет по известному волновому профилю в некоторый момент времени найти данные рассеяния (спектр), которые далее изменяются во времени достаточно тривиальным образом. Этот метод представляет собой одно из наиболее ярких достижений математической физики прошлого века.

В данной работе мы используем численный алгоритм типа Боффетта — Осборна для определения спектра рассеяния для потенциала (профиля волны), описываемого уравнением Кортевега — де Фриза [2]. Рассматривается правая задача рассеяния на локализованном потенциале, а также возмущение на конденсате. Связь между граничными условиями функции в задаче Захарова — Шабата и коэффициентами рассеяния задана матрицей рассеяния, которая ищется численно. Точность численного метода дискретизации достигает шестого порядка благодаря использованию разложения Магнуса в задаче Захарова — Шабата [3]. Для верификации используются N -солитонные и N -бризерные решения, а также другие точные решения, соответствующие, к примеру, задаче рассеяния на прямоугольном потенциале. В работе будет представлено систематическое сравнение точности методов разного порядка, а также продемонстрированы результаты анализа производного волнового поля.

1. Захаров В. Е., Манаков С. В., Новиков С. П., Питаевский Л. П. Теория солитонов: метод обратной задачи. М.: Наука, 1980.

2. Boffetta G., Osborne A. R. Computation of the direct scattering transform for the nonlinear Schrödinger equation // J. of Computational Physics. 1992. Vol. 102, № 2. P. 252–264.

3. Mullyadzhanov R., Gelash A. Direct scattering transform of large wave packets // Optics Letters. 2019. Vol. 44, № 21. P. 5298–5301.

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

Томографическое исследование структуры энергетических материалов

Д. А. Данилко

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

Взрывчатые вещества (ВВ) широко используются в различных областях промышленности, научных исследованиях и специализированных устройствах. Одним из важнейших параметров взрывчатого вещества является его чувствительность, т. е. способность возникновения взрыва при воздействии на взрывчатый материал.

По современным представлениям, чувствительность ВВ к ударному воздействию определяется химическим составом и структурой материала заряда: пористостью, дисперсностью исходных кристаллов, наличием трещин. В теории детонации существует модель горячих точек [1]. Она заключается в том, что химическая реакция в детонационной волне инициируется в локальных областях разогрева вблизи неоднородностей плотности. Такими неоднородностями являются как поры, так и различные пустоты, образующиеся при изготовлении взрывчатого образца.

Используя оборудование станции синхротронного излучения ВЭПП-3, методом рентгеновской микротомографии были получены трехмерные распределения плотности различных взрывчатых веществ [2]. По этим данным находились связанные области, которые считались порами. Проведен анализ формы пор, построены гистограммы распределения пор по размерам. В работе представлены результаты томографических исследований ряда образцов ВВ, изготовленных по разным технологиям.

Полученные данные позволяют понять механизм чувствительности и инициирования реакции в детонационной волне в гетерогенных взрывчатых веществах.

1. Charles L. Mader, Shock and Hot Spot Initiation of Homogeneous Explosives // The Physics of Fluids. 1963. Vol. 6. P. 375.

2. Kuper K. E., Zedgenizov D. A., Ragozin A. L., Shatsky V. S. X-ray topography of natural diamonds on the VEPP-3 SR beam // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. 2009. Vol. 603, № 1–2. Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Э. Р. Пруэлл

Получение наночастиц металлов взрывом

Г. Р. Дашапилов

Новосибирский государственный университет

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

При детонации смеси взрывчатого вещества с металлсодержащими органическими соединениями в продуктах взрыва формируются частицы металла или оксида металла, покрытые детонационным углеродом. Размер полученных частиц варьируется от нескольких единиц до сотен нанометров. На размер частиц может влиять множество факторов: взрывчатое вещество, наличие либо отсутствие углеродсодержащих добавок, металл, используемое металлсодержащее соединение и другие факторы.

В данной работе представлены результаты по исследованию зависимости среднего размера наночастиц палладия от количества и типа используемого металлсодержащего соединения. В качестве взрывчатого вещества использовался состав ТАТБ/октоген в равных массовых долях без дополнительных углеродсодержащих добавок. В первом случае использовались различные органические соединения палладия, такие как нитрат палладия, ацетат палладия, каприлат палладия и стеарат палладия. Массовая доля их была одинакова и составляла 3 % в каждом эксперименте. Во второй постановке в качестве металлсодержащего соединения использовался бензоат палладия, изменялась его массовая доля.

Полученные частицы палладия имели средний размер в пределах 1,5–6,4 нм. При этом распределения частиц по размерам получились практически монодисперсными. Такой способ позволяет получать наночастицы палладия с шагом среднего размера менее одного нанометра.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. О. Кашкаров

**Исследование витания струй
при течении нагреваемой пленки жидкости**

Ю. А. Кротченко

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

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

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

Целью данной работы являлось исследование влияния взаимодействия трехмерных волн с термокапиллярными структурами на характеристики пленочного течения при числах Рейнольдса 15 и 33 и начальной температуре жидкости 23 °С.

В ходе работы был создан и отработан алгоритм измерения волновых характеристик течения. Показано, что с увеличением плотности теплового потока величина отклонения струи от среднего значения в нижней части нагревателя возрастает и с увеличением теплового потока толщина пленки в струе возрастает. Измерены пространственные характеристики движения струй.

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

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

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

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Е. Н. Шатский

Испарение микроразмерных капель воды на нагреваемой кремниевой подложке

К. А. Кунц, Д. П. Кириченко

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

Данная работа посвящена изучению испарения микроразмерных капель. В [1] установлено, что удельная интенсивность испарения сидячих капель (потеря массы за единицу времени на единицу свободной поверхности капли) начальным размером 10 мкм на конечной стадии может существенно снижаться. В [1] использовалась шероховатая подложка со среднеквадратичной шероховатостью 500 нм. В настоящей работе использовалась гладкая кремниевая подложка со среднеквадратичной шероховатостью 0,15 нм. Температура подложки, открытой в атмосферу и нагреваемой снизу при помощи элемента Пельтье, в эксперименте варьировалась в диапазоне от 23 до 100 °С при влажности воздуха 31–34 %. Микрокапли создавались путем распыления из шприца. В эксперименте применялся теневой метод с использованием высокоскоростной камеры FASTCAM SA1.1 с разрешением 1024×1024 пикселя и частотой от 250 до 5000 кадров в секунду и микроскопных объективов с высокой разрешающей способностью (*Mitutoyo Plan Apo Infinity Corrected Objectives*). Максимальное разрешение камеры в эксперименте составило 391 нм на пиксель (поле зрения камеры 400 мкм²).

1. Kirichenko D. P., Zaitsev D. V., Kabov O. A. Experimental investigation of picoliter liquid drops evaporation on a heated solid surface // J. of Physics. 2017. Vol. 925 (1), № 012026. Conference Series.

Научные руководители — д-р физ.-мат. наук О. А. Кабов,
канд. физ.-мат. наук Д. В. Зайцев

**Метод для визуализации деформации
свободной поверхности жидкости**

А. С. Мунгалов

Новосибирский государственный университет

Реализован метод для определения деформации свободной поверхности пленки жидкости, в англоязычной литературе *Moon-Glade Background Oriented Schlieren technique* (Moon-Glade BOS) [1]. Данный метод позволяет получить мгновенное поле деформации свободной поверхности жидкости и не требует сложного экспериментального оборудования. Moon-Glad BOS был реализован для конкретной задачи, а именно для исследования деформаций тонких пленок, вызванных термокапиллярным эффектом.

Метод Moon-Glade BOS основан на анализе изображений фильтра, отраженного от поверхности жидкой пленки. Фильтр, находящийся на некотором расстоянии от исследуемой поверхности, представляет собой прозрачную пленку, на которой распечатано большое количество точек. Фильтр просвечивается LED-панелью через диффузор. Камера регистрирует отражение фильтра от поверхности жидкости. Деформация жидкой пленки приводит к отклонению отраженных лучей и смещению точек фильтра относительно недеформированного слоя.

Поле деформаций восстанавливается в несколько этапов: для определения смещения точек фона проводится кросскорреляционный анализ изображений недеформированного слоя и деформированного. Далее, определив смещение, численно решаем дифференциальное уравнение Пуассона. Граничные условия: на границе исследуемой области деформации отсутствуют.

1. Vinnichenko N. A., Pushtae A. V., Plaksina Yu. Yu., Uvarov A. V. Measurements of liquid surface relief with moon-glade background oriented Schlieren technique // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2020. Vol. 114. P. 110051.

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

Осаждение тонких пленок SiO_x из активной газовой фазы

А. А. Родионов

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

Тонкие пленки субоксида кремния (SiO_x) находят широкое применение в опто- и микроэлектронике и солнечных элементах. Для их эффективного использования необходимо точно контролировать состав пленок. Одним из перспективных методов синтеза тонких пленок является лазерное осаждение. Состав осаждаемых пленок определяется параметрами лазерного факела, фонового газа и характером их взаимодействия. Несмотря на длительное применение метода импульсной лазерной абляции (ИЛА), характер взаимодействия продуктов ИЛА и активной газовой фазы изучен недостаточно. В настоящей работе мы проанализировали процесс осаждения (SiO_x) методом ИЛА кремния в кислородсодержащем фоновом газе.

Осаждение пленок проводилось методом лазерной абляции монокристаллического кремния в фоновой аргон-кислородной смеси в диапазоне давлений 3–60 Па и различном парциальном давлении кислорода. Мишень облучали второй гармоникой лазера Nd:YAG (532 нм) с длительностью импульса 8 нс. Число импульсов составляло 20 000. Плотность лазерного излучения 16 Дж/см². Степень окисления пленок определялась в различных точках поверхности с применением FTIR-анализа. Толщину пленки в разных точках определяли с помощью СЭМ и эллипсометрии.

Установлено, что толщина пленок экспоненциально уменьшается с ростом фонового давления. Это объясняется изменением режима разлета факела от свободномолекулярного к континуальному. Рост фонового давления приводит к повышению степени окисления пленок. Это вызвано торможением факела о фоновый газ, что ведет к увеличению числа столкновений между продуктами абляции и фоновым газом. С ростом давления фонового газа повышается плотность факела, газу сложнее проникнуть к центру факела, поэтому его периферия более окислена в сравнении с центром. Это объясняет повышение степени окисления пленок по мере удаления от лазерного пучка.

Работа выполнена благодаря гранту Президента РФ МК-2404.2019.8.

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

Экспериментальное исследование особенностей турбулентного перемешивания в камерах сгорания с закруткой потока

А. Г. Савицкий

Новосибирский государственный университет

Разработка современных газотурбинных установок (ГТУ) осложняется периодическим ужесточением экологических требований, предъявляемых к ГТУ. Одной из задач для разработчиков ГТУ является снижение эмиссии вредных веществ, таких как монооксид углерода (CO), оксиды азота (NO_x) и несгоревшие углеводороды (CH_x). В последнее время внедряется технология сжигания бедной предварительно перемешанной смеси. Организация смесеобразования является определяющим с точки зрения контроля вредных выбросов. Таким образом, исследование полей скорости и концентрации в камере сгорания необходимо для проектирования установок с низкой эмиссией вредных веществ. Цель данной работы — исследование особенностей смесеобразования и динамики турбулентных закрученных потоков при помощи современных методов оптической диагностики.

В последние годы широко используют бесконтактные методы оптической диагностики для измерения пространственных распределений скорости и концентрации, такие как анемометрия по изображению частиц (*Particle Image Velocimetry*, PIV) и лазерно-индуцированная флуоресценция (*Laser-Induced Fluorescence*, LIF). Данные методы имеют весомое преимущество: их применение оказывает минимальное влияние на исследуемый поток.

В данной работе были проведены эксперименты по изучению смесеобразования за фронтовым устройством реальной камеры сгорания ГТУ (число Рейнольдса 300 000), а также для модельной камеры сгорания ГТУ (число Рейнольдса 30 000). Оба эксперимента проводились без горения. Для эксперимента с реальной камерой сгорания были получены изображения, характеризующие среднее распределение концентрации. На основании полученных данных в эксперименте с модельной камерой сгорания представлены средние поля скорости и концентрации, средние пульсации скорости и концентрации, а также корреляция между скоростью и концентрацией.

Результаты данных экспериментов могут быть использованы для валидации результатов компьютерного моделирования процессов смесеобразования в камерах сгорания ГТУ.

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

**Моделирование многофазных систем
методом решеточных уравнений Больцмана**

И. Е. Сергеев

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

Метод решеточных уравнений Больцмана заключается в использовании дискретизованного кинетического уравнения Больцмана и может использоваться для моделирования эволюции многофазных и многокомпонентных систем. Его преимуществами являются линейность конвективного оператора, возможность нахождения давления из уравнения состояния, простые граничные условия, а также возможность выполнения параллельных вычислений благодаря локальности взаимодействия.

В данной работе для моделирования межфазного взаимодействия были использованы потенциал, предложенный Шаном и Ченом [1], и уравнение состояния Карнахана — Старлинга [2].

Затем с использованием потенциала Шана — Чена и уравнения Карнахана — Старлинга была проведена серия симуляций капли в насыщенном паре при различных значениях температуры, в которых с помощью уравнения состояния вычислялся коэффициент поверхностного натяжения в единицах решетки. Также были проведены симуляции релаксации вытянутой капли и столкновения двух капель.

Таким образом, в данной работе разработан алгоритм для моделирования двухфазных течений, получена зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры, проведены симуляции релаксации вытянутой капли и столкновения двух капель при различных начальных параметрах.

1. Shan X., Chen H. Lattice Boltzmann model for simulating flows with multiple phases and components // *Physical Review E*. 1993. № 47(3). P. 1815–1819.

2. Carnahan N. F., Starling K. E. Intermolecular repulsions and the equation of state for fluids // *AIChE Journal*. 1972. № 18(6). P. 1184–1189.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. В. В. Терехов

Гидродинамическая устойчивость и восприимчивость потока к внешним возмущениям для тел обтекания различной формы

Д. А. Созинов

Новосибирский государственный университет
Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск

Актуальным является широкий спектр задач управления характеристиками течения при обтекании потоком жидкости или газа тел различной формы, а также ее модификации. В данной работе рассмотрены режимы течения вокруг цилиндра и эллипсов с различными отношениями главных осей, а также различным углом по отношению к натекающему потоку. Характеристики режимов рассчитываются при помощи прямого численного моделирования уравнений Навье — Стокса. Мы используем линейный анализ устойчивости и восприимчивости для анализа осредненных полей скорости [1, 2], что позволяет верифицировать эти инструменты против данных прямого моделирования, а также выявить, как изменяется область восприимчивости потока к внешним возмущениям при изменении геометрии и ее ориентации в пространстве. Численные двумерные расчеты выполняются при помощи вычислительного кода Nek5000, основанного на методе спектральных элементов [3]. Эти результаты, полученные при достаточно низком числе Рейнольдса в диапазоне 100–1000, построенном по гидравлическому диаметру, будут представлены в виде диаграммы в зависимости от угла ориентации и отношения главных полуосей эллипса.

Работа частично поддержана грантами РФФИ № 18-38-20167, 19-48-543036.

1. Giannetti F., Luchini P. Structural sensitivity of the first instability of the cylinder wake // J. Fluid Mech. 2007. Vol. 581. P. 167–197.

2. Barkley D. Linear analysis of the cylinder wake mean flow // Europh. Lett. 2006. Vol. 75(5). P. 750–756.

3. Fischer P., Lottes J., Kerkemeier S. NEK5000: a fast and scalable high-order solver for computational fluid dynamics. 2008. URL: <https://nek5000.mcs.anl.gov>.

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

Микроструйное охлаждение светодиодного модуля

В. В. Трофимова

Новосибирский государственный университет

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

Струйное и спрейное охлаждение является одним из эффективных способов отвода тепла от высоконапряженных электронных компонент. Механизмами теплообмена в двухфазном режиме являются испарение с поверхности тонкой пленки, вторичная нуклеация, теплопередача на линии контакта.

В данной работе исследуется охлаждающая способность микроструйной системы применительно к светодиодному модулю с номинальной мощностью 300 Вт. Была проведена серия экспериментов по влиянию температуры охлаждающей жидкости на теплоотвод от поверхности светодиодного модуля. Эксперименты проведены при различных расходах жидкости.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Е. Я. Гагапова

**Калорические свойства сплава К-Pb эвтектического состава
в твердом и жидком состояниях**

А. Р. Хайрулин

Новосибирский государственный университет
Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск

Жидкий эвтектический сплав калий — свинец рассматривается как потенциальный теплоноситель — заменитель свинца для ядерных реакторов нового поколения [1]. Кроме этого, расплавы К-Pb относятся к интересному с фундаментальной точки зрения классу жидкометаллических систем с частично ионным характером межатомного взаимодействия [2]. В то же время многие теплофизические свойства и, в частности, энтальпия и теплоемкость системы калий — свинец исследованы недостаточно надежно и подробно.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование энтальпии и теплоемкости сплава калий — свинец эвтектического состава (90,7 ат. % Pb) в широком интервале температур, включающем твердое и жидкое состояния. Эксперименты проводились на массивном калориметре смешения с изотермической оболочкой. Погрешность измерения энтальпии не превышала 0,4 %.

В результате измерений были получены новые надежные данные по энтальпии H_{298} твердого и жидкого сплава в интервале температур 423–1075 К. Разработаны аппроксимационные полиномы для температурных зависимостей энтальпии и теплоемкости C_p , на основе которых составлены таблицы справочных данных. Измеренная теплоемкость незначительно отклоняется от значений, рассчитанных по правилу аддитивности для идеального раствора, и уменьшается с температурой, что необычно для жидкометаллических систем. Предложено объяснение этого явления.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-79-00024).

1. Субботин В. И., Арнольдов М. Н., Козлов В. А., Шимкевич А. Л. Жидкометаллические теплоносители для ядерной энергетики // Атомная энергия. 2002. Т. 92, № 1. С. 31.

2. Lugt W. van der Poly anions in liquid ionic alloys: a decade of research // J. of Physics. 1996. Vol. 8, № 34. Condensed Matter. P. 6115–6138.

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

**Исследование работы теплообменного устройства
в системе вентиляции при реверсивных процессах**

А. В. Черкасова, К. А. Фадеев

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет

Проблема энергосбережения в России приобретает первостепенное значение. Это связано с увеличением роста цен на энергоносители, стоимость которых приближается к среднемировому уровню цен. В условиях холодного климата Западной Сибири проблема энергосбережения является весьма актуальной. Значительная часть территории России и практически вся Сибирь находятся в зоне холодного климата, что требует значительных затрат на отопление жилых и производственных помещений. Одна часть этих затрат связана с тепловыми потерями через наружные ограждения (стены и окна), а другая обусловлена расходом энергии на нагрев наружного воздуха в системе вентиляции. Все это делает крайне актуальной задачу существенного снижения энергозатрат на нагрев приточного воздуха в системе принудительной вентиляции. Одним из наиболее перспективных решений проблемы с точки зрения энергосбережения является использование технологии утилизации теплоты вытяжного воздуха для нагрева приточного. Для утилизации теплоты воздушных потоков могут применяться различные теплообменники.

Целью работы является исследование работы нового типа теплоаккумулирующего теплообменника при реверсивных режимах работы в системах вентиляции в климатических условиях Сибири. Следует отметить, что на разработанный тип теплообменника авторами в составе коллектива была подана заявка на получение патента РФ. Особенностью данного теплообменника является наличие фазового перехода, который позволяет существенно увеличить времена переключения между реверс-процессами (приточка/вытяжка) и тем самым повысить эффективность воздухообмена.

Научный руководитель — канд. техн. наук, доц. И. В. Мезенцев

**Экспериментальное исследование двумерного массива
из левитирующих микрокапель над поверхностью жидкости**

А. И. Шатекова

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

Данная работа является продолжением экспериментального исследования двумерного массива из левитирующих микрокапель над поверхностью нагретой жидкости. Двумерный массив состоит из нескольких сотен и тысяч капель, образующих упорядоченную треугольную структуру. Типичный размер капель составляет 10 мкм, высота левитации капель сопоставима с диаметром капель. Микрокапли жидкости образуются за счет конденсации восходящего потока пара. Механизм левитации капель — это сила трения Стокса, действующая на каплю со стороны восходящего потока, возникающего на границе раздела жидкость — пар/газ. В [1, 2] была разработана математическая модель зависимости высоты левитации от размера микрокапель, которая хорошо согласуется с полученными экспериментальными данными. Таким образом, механизм левитации капель выяснен, но вопрос о взаимодействии капель друг с другом остается до сих пор открытым. В связи с этим целью настоящей работы является экспериментальное определение зависимости расстояния между каплями от их размера и количества в массиве. В предыдущих работах были получены данные зависимости, но эксперименты проводились в нестационарных условиях (температура подложки росла, а толщина слоя жидкости уменьшалась в ходе каждой серии эксперимента). Для устранения этой неоднозначности была собрана новая экспериментальная установка и проведены новые исследования.

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

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

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

**Экспериментальные исследования нестационарной
тепловой гравитационно-капиллярной конвекции
в прямоугольной полости при внезапном нагреве вертикальной стенки**

Н. А. Шумилов, А. В. Михайлов

Новосибирский государственный университет

Новосибирский государственный технический университет

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

Свободно-конвективный теплообмен является распространенным типом течений жидкости в технических и технологических системах. Практически все реальные устройства работают в режимах включения и выключения нагрева или охлаждения. В этих режимах на жестких стенках развиваются нестационарные свободно-конвективные пограничные слои. Примером, где необходимы знания закономерностей развития пограничных слоев и режимов теплообмена, являются тонкостенные конструкции летательных аппаратов. При взлете и посадке, на начальных стадиях выхода на крейсерскую скорость меняются процессы нестационарного сопряженного конвективного теплообмена в топливных баках. Пространственная форма и интенсивность конвективных течений зависит от конфигурации полости и расположения разогретых и охлажденных стенок. При наличии неизотермической границы раздела жидкость — газ необходимо учитывать наличие термокапиллярного эффекта. Для оценок полей термических напряжений в конструкциях необходимо знать закономерности зависимостей полей температуры от времени в тонких стенках. Экспериментально исследована нестационарная тепловая гравитационно-капиллярная конвекция в прямоугольной полости при внезапном разогреве одной из вертикальных стенок электрическим током. Исследовано развитие во времени пространственной формы течений этилового спирта с числом Прандтля $Pr = 16$ при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Изучено развитие гидродинамического пограничного слоя на нагреваемой стенке и течения вдоль свободной поверхности слоя жидкости. Измерены профили скорости в процессе развития пограничных слоев и течения в объеме жидкости. С использованием тепловизора исследована эволюция полей температуры на свободной поверхности слоя жидкости и на вертикальной стенке, на которую натекает нагретая жидкость.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-48-540003 р_а и в части экспериментальных исследований при поддержке проекта ФНИ ГАН 2017-2020 проект III.18.2.5 Гос. рег. АААА-А17-117022850021-3

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук В. С. Бердников

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

УДК 533.9.082.5

Оптическая диагностика пучка отрицательных ионов водорода для БНЗТ

С. И. Абдрахманов

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

В настоящее время в ИЯФ СО РАН разрабатывается нейтронный источник на основе тандемного ускорителя для целей бор-нейтрон-захватной терапии (БНЗТ). Принцип действия тандемного ускорителя заключается в ускорении пучка отрицательных ионов водорода до энергии 1,25 МэВ, а затем, после перезарядки пучка на газовой аргоновой мишени, ускорения пучка протонов до энергии 2,5 МэВ и током до 15 мА. Исходя из перспектив будущего использования источника нейтронов в клинических условиях следует важная задача: разработка простой и эффективной процедуры контроля и настройки положения пучка частиц на всех стадиях, поскольку обладающий мощностью до 37,5 кВт пучок частиц, попадая на стенку вакуумного канала, приведет к быстрому выходу из строя всей установки.

Целью настоящей работы является разработка оптической диагностики для контроля и измерения положения пучка, его фокусировки и наклона, а также энергетического и углового разброса частиц пучка.

Для определения геометрических параметров пучка используется излучение, происходящее из-за взаимного возбуждения частиц пучка и атомов остаточного газа при прохождении пучком вакуумной камеры. Для увеличения интенсивности излучения в вакуумную камеру подается дополнительный газ. В данной работе рассмотрено влияние различных газов на параметры пучка. Излучение регистрируется при помощи КМОП-камер с двух различных ракурсов наблюдения. Энергетический и угловой разброс частиц пучка были измерены по доплеровскому смещению спектральной линии H_{α} .

В результате экспериментов были установлены параметры изображающей диагностики. Временное разрешение диагностики может быть меньше 10 мс в зависимости от требуемой точности измерений. Измерения положения пучка получено с точностью до 1 мм. Исходя из этого, следует, что диагностику можно использовать для автоматического контроля и коррекции положения пучка. В условиях высоких энергий для сохранения параметров диагностики необходимо увеличение напуска газа.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук С. С. Попов

**Оценка количества запертых частиц в винтовой ловушке
методами гамильтоновой динамики в одночастичном приближении**

Д. А. Аюпов

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

Установка СМОЛА (спиральная магнитная открытая ловушка) была создана в ИЯФ СО РАН для экспериментальной проверки возможностей метода винтового удержания и представляет собой многопробочную систему со спиральной симметрией [1]. Магнитное поле в установке создается системой круглых соосных катушек и двузаходной спиральной обмоткой.

При наложении радиального электрического поля частицы обоих знаков должны, увлекаясь электрическим дрейфом, относиться прочь от одного из концов установки. Существующие МГД-модели указывают на перспективность применения метода винтового удержания, предсказывая экспоненциальное подавление продольных потерь в такой системе с увеличением длины спиральной секции [2]. Однако кинетических моделей происходящего в этой системе нет.

Данная работа посвящена оценке числа захваченных (т. е. непролетных) частиц методами гамильтоновой динамики в следующих приближениях: одночастичность, отсутствие краевых эффектов (бесконечность длины спиральной секции), малость тока в спиральной обмотке установки (и, соответственно, малость спиральной добавки к магнитному полю).

Работа выполнена при поддержке РФФ (проект 18-72-10080).

1. Sudnikov A. V. et al. First Experimental Campaign on SMOLA Helical Mirror // Plasma and Fusion Research. 2019. Vol. 14. P. 2402023–2402023.

2. Beklemishev A. D. Radial and axial transport in trap sections with helical corrugation. Novosibirsk, 2016. P. 040006.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук И. С. Черноштанов

Оптимизация ВЧ плазменного эмиттера

В. А. Воинцев

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

В ИЯФ СО РАН в лаборатории 9-0 разрабатываются атомарные инжекторы для нагрева и диагностики плазмы в крупных термоядерных установках [1, 2]. В настоящее время ведется разработка нагревных инжекторов для токамаков TCV (Швейцария) [3], Compass-D (Чехия) и ST-40 (Англия).

Источником ионного пучка в данных инжекторах является высокочастотный плазменный эмиттер. Для увеличения эффективности генерации плазмы на задней стенке эмиттера установлены постоянные магниты. В данной работе было исследовано влияние поля постоянных магнитов на распределение плотности ионного тока насыщения на выходе эмиттера.

Для проведения измерений радиального распределения плотности плазмы была собрана установка с сеточным зондом. Для получения азимутальной зависимости распределения плотности ионного тока от магнитного поля магнитопровод с магнитами, установленный на задней стенке эмиттера, поворачивался на 15° при каждом новом измерении.

Также были проведены эксперименты по получению и диагностике атомарного пучка на нагревном инжекторе. В результате были измерены основные параметры пучка: энергия и ток пучка, распределение и размер пучка на выходе инжектора, угловая расходимость и фокусное расстояние, массовый состав.

В докладе представлены анализ распределения плотности ионного тока эмиттера и результаты экспериментов на нагревном инжекторе.

1. Ivanov A. A., Davydenko V. I., Deichuli P. P., Kreter A., Mishagin V. V., Podyminogin A. A., Shikhovtsev I. V., Schweer B., Uhlemann R. // *Rev. Sci. Instruments*. 2000. Vol. 71. P. 3728–3735.

2. Prokhorov I. A., Abdrashitov G. F., Averbukh I. I., Belov V. P., Davydenko V. I., Ivanov A. A., Kapitonov V. A., Kolmogorov V. V., Kondakov A. A., Shikhovtsev I. V., Sorokin A. V., Tkachev A. A. *Fusion Science and Technology*. 2013. Vol. 63(1T). P. 349–351.

3. Fasel D., Andrebe Y., Dubray J., Karpushov A., Kolmogorov V., Marletaz B., Marmillod P., Muehle L., Perez A., Shikhovtsev I., Siravo U. // *Fusion Engineering and Design*. 2017. Vol. 123. P. 331–335.

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

Неустойчивость сферически симметричных состояний динамического равновесия электронного газа Власова — Пуассона

М. Я. Воробьева

Новосибирский государственный университет

В работе изучается задача линейной неустойчивости сферически симметричных состояний динамического равновесия электронного газа Власова — Пуассона.

В последнее время эта задача стала еще более актуальной в связи с применением электронного газа для дополнительного ускорения элементарных частиц в экспериментальных установках, использующих встречные пучки. Кроме того, модель Власова — Пуассона по-прежнему сохраняет свою актуальность для решения проблемы управляемого термоядерного синтеза.

Цель данной работы заключается в доказательстве прямым методом Ляпунова абсолютной неустойчивости исследуемых состояний равновесия относительно малых сферически симметричных возмущений.

Для достижения этой цели уравнения Власова — Пуассона с применением неособенной замены независимых переменных Захарова были преобразованы к известной ранее бесконечномерной системе гидродинамических уравнений, которая напоминает систему уравнений распространения длинных волн по поверхности тонкого слоя завихренной идеальной жидкости в поле силы тяжести. Для функционала Ляпунова в виде вириала было получено линейное обыкновенное дифференциальное неравенство второго порядка с постоянными коэффициентами. В процессе интегрирования данного неравенства были найдены конструктивные достаточные условия линейной практической неустойчивости рассматриваемых состояний динамического равновесия по отношению к малым сферически симметричным возмущениям. Результатом этого интегрирования явилась априорная оценка снизу роста изучаемых малых возмущений. Данная оценка демонстрирует, что малые сферически симметричные возмущения исследуемых состояний равновесия нарастают со временем не медленнее, чем экспоненциально, причем независимо от того, выполнено известное достаточное условие линейной устойчивости Ньюкомба — Гарднера — Розенблюта или нет. Тем самым желаемая абсолютная неустойчивость доказана. Более того, обнаружен формальный характер достаточного условия линейной устойчивости Ньюкомба — Гарднера — Розенблюта.

Наконец, результаты настоящей работы согласуются с известной в электростатике теоремой Ирншоу о неустойчивости и расширяют область ее использования с классической механики на статистическую.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доц. Ю. Г. Губарев

Электромагнитная эмиссия из пучково-плазменной системы с высоким градиентом плотности

В. В. Глинский

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

Одним из перспективных способов генерации мощного электромагнитного излучения в терагерцовом диапазоне частот является инжекция гигаваттного релятивистского электронного пучка в удерживаемую магнитным полем плазму. Возбуждаемые пучком плазменные колебания могут трансформироваться в электромагнитные волны и выходить из плазмы. Эффективность такого способа генерации излучения в настоящее время исследуется на установке ГОЛ-ПЕТ в ИЯФ СО РАН. Недавние эксперименты на этой установке показали, что в плазме с предварительно созданными поперечными градиентами плотность мощности излучения в диапазоне 150–200 ГГц возрастает в 10–30 раз по сравнению со случаем однородной плазмы и достигает 4 МВт [1].

В данной работе особенности генерации электромагнитного излучения вследствие коллективного взаимодействия релятивистского пучка с сильно неоднородной плазмой, характерной для экспериментов [1], изучаются с помощью численного PIC-моделирования (*Particle In Cell*). Для количественного сравнения численных и экспериментальных результатов моделирование проводится для реальной относительной плотности электронного пучка и реального пространственного масштаба поперечной неоднородности плазмы.

I. Arzhannikov A. V., Ivanov I. A., Kasatov A. A., Kuznetsov S. A., Markarov M. A., Mekler K. I., Polosatkin S. V., Popov S. S., Rovenskikh A. F., Samtsov D. A., Sinitsky S. L., Stepanov V. D., Annenkov V. V. and Timofeev I. V. Well-directed flux of megawatt sub-mm radiation generated by a relativistic electron beam in a magnetized plasma with strong density gradients // *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2019. URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6587/ab72e3>

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук И. В. Тимофеев

**Измерение тока термоэлектронной эмиссии
с поверхности вольфрама при импульсном лазерном нагреве**

Н. В. Давыдов

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

Целью данной работы является измерение тока термоэлектронной эмиссии с вольфрама при импульсном нагреве лазерным излучением. Данное исследование востребовано, так как импульсный лазерный нагрев эквивалентен импульсному плазменному воздействию на вольфрамовый дивертор в ИТЭР. В ходе работы были разработаны и изготовлены источник высокого напряжения, анод, вакуумный фланец с токовводами. Были рассчитаны ожидаемые плотности тока термоэлектронной эмиссии. В результате опытов была отмечена корреляция импульсов лазерного излучения (а значит, и импульсов температуры) и импульсов тока, но экспериментально измеренный ток на несколько порядков превосходит рассчитанный теоретически, что свидетельствует о неоднородности лазерного луча по сечению. Также обнаружен эффект пробоя при высоких энергиях лазерного луча.

Таким образом, проведено измерение тока термоэлектронной эмиссии при помощи вакуумного диода, но в силу крайне высокой скорости роста плотности тока с ростом температуры для вычисления теоретических зависимостей необходимо учитывать неоднородность нагрева поверхности образца.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доц. А. А. Шошин

Проектирование диагностики функции распределения горячих ионов методом коллективного Томсоновского рассеяния на установке ГДЛ

А. С. Зайцев

Новосибирский государственный университет

Использование микроволнового излучения для изучения функции распределения ионов доказало свою эффективность для горячей плазмы, удерживаемой в тороидальных магнитных ловушках. В работе обсуждаются основные этапы разработки диагностики методом коллективного Томсоновского рассеяния. Целью данной работы было проектирование данной диагностики с выбором наиболее оптимальных параметров системы. Для достижения цели были сформулированы и выполнены следующие задачи:

- 1) изучение спектра зондирующего и рассеянного излучения в плазме;
- 2) расчет пучка и выбор оптимальных параметров геометрии ввода излучения в плазму;
- 3) разработка системы приема рассеянного излучения.

Система разрабатывается для установки ГДЛ, полностью осесимметричной открытой ловушки, основной частью которой является соленоид длиной 7 м, ограниченный с обеих сторон магнитными пробками. В качестве источника зондирующего пучка был выбран гиротрон с частотой излучения $54,47 \pm 0,01$ ГГц.

В рамках задач данной работы были получены следующие результаты. Во-первых, был изучен спектр гиротрона с помощью высокочастотного осциллографа Keysight Infinium UXR0594A, с полосой пропускания 59 ГГц, для того чтобы спроектировать систему фильтрации приемного тракта, которая будет подавлять излучение на частоте гиротрона, многократно превышающую по мощности рассеянное излучение. Спектр гиротрона был сопоставлен с теоретическим спектром Томсоновского рассеяния для плазмы ГДЛ. Получено, что спектр гиротрона не перекрываются с Томсоновским рассеянием на горячих ионах. Во-вторых, была рассчитана система ввода излучения в плазму, состоящая из волновода и системы зеркал. Система рассчитана так, чтобы фокусировать пучок гиротрона в центр плазмы, получая наилучшее пространственное разрешение. В-третьих, была рассчитана система приема рассеянного излучения, состоящая из системы зеркал и рупора.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. Л. Соломахин

**Влияние геометрии плазменного канала
на электрокинетические характеристики пучкового разряда**

А. Зубова

Санкт-Петербургский горный университет

Для решения задач современной ядерной энергетики требуется создание электронных приборов, устойчивых к высокому уровню радиации и температуры. Этим требованиям соответствуют приборы на основе неравновесной анизотропной плазмы.

В такой плазме формируются группы быстрых электронов с энергиями, много большими средних энергий всех электронов, которые оказывают существенное влияние на ее свойства, при этом вопрос взаимодействия быстрых электронов со стенками остается недостаточно изученным.

В настоящей работе проведено экспериментальное изучение влияния взаимодействия быстрых электронов со стенками и пристеночными слоями на свойства плазмы гелиевого низковольтного пучкового разряда в условиях газоразрядного стабилизатора тока и напряжения. Исследовано влияние геометрии боковой границы плазмы на длину энергетической релаксации электронов пучка и устойчивость электрических характеристик стабилизатора. Межэлектродный зазор ограничивался цилиндрическими и коническими экранами различных конструкций. Также проводились исследования неограниченного разряда.

Показано, что оптимальные условия обеспечивает конусный проводящий экран, с углом при основании, обеспечивающим свободную радиальную диффузию быстрых электронов. Такая геометрия плазменного канала при постоянном давлении газа дает возможность снизить концентрацию плазмы вдоль оси прибора в 4 раза, что увеличивает длину энергетической релаксации ФРЭС в 2 раза. Это позволяет увеличить плотность разрядного тока j_{\max} с 1 до 2 А/см² при давлениях гелия 0,5–1,0 тор и напряжении стабилизации 0–50 В.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доц. А. Ю. Грабовский

Электростатический зонд для измерения профиля плотности плазмы в транспортной секции установки СМОЛА

М. В. Ларичкин

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

Для уменьшения продольного потока вращающейся плазмы из открытой ловушки был предложен способ динамического многопробочного удержания винтовым магнитным полем [1]. Для экспериментальной проверки концепции винтового удержания плазмы в конце 2017 г. в ИЯФ СО РАН была запущена установка СМОЛА.

Целью работы являлось получение данных о пространственном распределении плотности плазмы в транспортной секции винтовой магнитной ловушки с температурой ~ 5 эВ и максимальной плотностью до 10^{19} м⁻³ зондовым методом. Зондовые методики широко используются, например, для измерения параметров плазмы газовых разрядов ($n \sim 10^{14}$ – 10^{22} м⁻³), периферийной плазмы крупных токамаков ($n \sim 10^{19}$ – 10^{21} м⁻³) [2].

Измерение двумерного распределения плотности в поперечном сечении плазмы осуществлялось при помощи трех электростатических зондов, закрепленных на подвижке, которая способна передвигаться вдоль одной из координат профиля плазмы, при этом становится возможно получение информации о плотности в трех точках поперечной координаты. Для повышения точности измерений в качестве «образцового» был выбран один зонд, остальные были откалиброваны по нему. Задачей работы являлись проектирование и сборка конструкции, состоящей из трех двойных электростатических зондов, измерительной схемы и шагового двигателя для перемещения зондов вдоль профиля плазмы, и проведение серии экспериментов в режиме с прямым магнитным полем. Каждый зонд представляет собой пару молибденовых электродов диаметром 0,2 мм, помещенных в керамическую трубку диаметром 1,55 мм с двумя каналами так, чтобы длина помещенных в плазму участков электродов была 5 мм. Показано, что профиль плотности плазмы с хорошей точностью описывается нормальным распределением, определен центр распределения плотности плазмы. Максимальная плотность в исследуемом режиме составляет $0,657 \cdot 10^{19}$ м⁻³.

1. Beklemishev A. D. // Fusion Sci. Technol. 2013. Vol. 63 (1T). P. 355–357.

2. Давыденко В. И., Иванов А. А., Вайсен Г. Экспериментальные методы диагностики плазмы. Новосибирск: НГУ, 1999.

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

Локальные магнитные измерения в винтовой магнитной ловушке СМОЛА

К. А. Ломов

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

Для улучшения параметров удержания плазмы в открытых магнитных ловушках в ИЯФ СО РАН была предложена концепция подавления продольных потерь из ловушки за счет динамического многопробочного удержания винтовыми пробками с управляемым вращением плазмы [1]. Для экспериментальной проверки этой концепции была создана установка СМОЛА, состоящая из входного расширителя с плазменной пушкой, транспортной секции с прямым и винтовым соленоидами и выходного расширителя с радиально сегментированным плазмоприемником [2]. В ходе первой серии экспериментов на СМОЛА были подтверждены основные предположения концепции: подавление аксиального потока плазмы и пинч-эффект в плазменном шнуре [3].

При исследовании структуры магнитного поля в транспортной секции установки одиночными магнитными зондами было обнаружено возмущение азимутальной компоненты поля на частоте около 20 кГц. При включении винтового соленоида частота возмущения возрастает приблизительно в 1,2 раза. Для более подробного изучения наблюдаемого эффекта разработана многоканальная азимутальная магнитная измерительная система, состоящая из 12 магнитных зондов (100-витковые катушки длиной 5 мм и диаметром 5 мм), распределенных по азимутальной координате и отстоящих на 70 мм от оси установки. Эффективная площадь катушек и разрядность АЦП позволяют детектировать на частоте 20 кГц возмущения магнитного поля амплитудой от 1 мкТл, собственная резонансная частота системы составляет более 1 МГц. По регистрируемому измерительной системой сигналу восстанавливается азимутальная структура возмущения продольного тока в установке до 5 моды включительно.

В докладе представлены математические методы интерпретации сигнала магнитной измерительной системы и результаты исследования пространственной структуры тока в плазменном шнуре установки.

1. Beklemishev A. D. // Fusion Sci. Technol. 2013. Vol. 63 (1T). P. 355–357.
2. Sudnikov A. V. et al. // Fusion Engineering and Design. 2017. Vol. 122. P. 85.
3. Sudnikov A. V. et al. // Plasma and Fusion Res. 2019. Vol. 14. P. 2402023.

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

**Исследование продольной теплопроводности плазмы
в газодинамической ловушке**

А. К. Мейстер

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

В последние годы открытые ловушки показали значительный прогресс в параметрах удерживаемой плазмы. В теоретических работах было показано, что тепловой поток из открытой ловушки при прямом контакте плазмы с холодной торцевой пластиной может быть значительно снижен по сравнению с пределом классической (спитцеровской) теплопроводности. Это возможно благодаря барьеру амбиполярного потенциала, возникающему между пробкой и плазмодриемником и препятствующему проникновению холодных электронов в центр ловушки. При этом, согласно теории, величина энергии, выносимая из ловушки одной электрон-ионной парой, не должна превышать $8T_e$. Для построения законченной физической модели, описывающей процессы, происходящие в расширителе открытой ловушки, необходимо знать величину энергии, выносимой одной электрон-ионной парой, а также зависимость этой величины от различных параметров.

Для решения этой задачи была разработана, изготовлена и отлажена диагностическая система, способная измерять потоки частиц и энергии из плазмы по всей поверхности плазмодриемника. Система состоит из 21 набора датчиков, расположенных на плазмодриемнике крестообразно. Каждый набор включает в себя пирозлектрический болометр, датчик потока ионов и датчик полного тока. С помощью такой системы можно измерять пространственные зависимости параметра энергии, выносимой одной электрон-ионной парой, а также оценивать коэффициент вторичной эмиссии, являющийся ключевым фактором, влияющим на процессы в расширителе открытой ловушки.

В представляемой работе приведены первые результаты, полученные при помощи новой диагностической системы.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Е. И. Солдаткина

Точность определения температуры поверхности тугоплавких металлов в процессе ее разрушения термическим ударом

Г. А. Рыжков

Новосибирский государственный университет

Одна из основных проблем при создании термоядерного реактора — выбор материалов стенки, обращенной к плазме. Наиболее интенсивно плазма воздействует на стенку в диверторе. Для проекта ITER вольфрам был выбран в качестве материала для покрытия стенки дивертора. В процессе работы реактора вольфрамовое покрытие подвергается эрозии, зависящей от температуры, до которой нагревается покрытие под воздействием плазмы. Поэтому при экспериментальном моделировании воздействия импульсных тепловых нагрузок на стенку в диверторе токамака-реактора важно знать точное значение температуры поверхности вольфрама. Для расчетов температур поверхности используются методы радиационной пирометрии по интенсивности излучения и его спектральному составу. Но у этих методов существует недостаток: спектральная излучательная способность зависит от шероховатости поверхности, которая дополнительно возникает из-за пластической деформации приповерхностной области вольфрама в процессе нагрева и остывания вольфрама. Для определения излучательной способности шероховатой поверхности был сделан обзор литературных данных. По этим данным была построена математическая модель спектральной излучательной способности вольфрама с учетом шероховатости. Также при экспериментальном моделировании необходимо отрабатывать режимы работы электронного пучка, в которых требуется сохранять однородность пучка. Для этих целей используется тантал, поскольку он пластичен при комнатной температуре и мало подвержен растрескиванию, которое затрудняет контроль однородности нагрева. Но чтобы использовать тантал для измерения поглощенной мощности электронного пучка с помощью пирометров, нужна математическая модель его излучательной способности, которая также была сделана на основе литературных данных. В работе используются две камеры (на основе Si и InGaAs) с разными спектральными чувствительностями, для каждой из них оценена точность определения температуры поверхности с учетом шероховатости, по интенсивности излучения и отношению двух сигналов. Проведено сравнение температуры поверхности образца, измеренной с помощью пирометрии, и температуры поверхности, рассчитанной из параметров нагревающего электронного пучка.

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

Исследование разрядов и огней святого Эльма при вытягивании капель из капилляра электрическим полем

Т. А. Сайкина

Новосибирский государственный университет

Капиллярные электростатические явления малоисследованные. Хотя конус Тейлора был описан менее 60 лет назад, а свечение предметов в потоке заряженных капель, аналогичное огням св. Эльма, получено экспериментально 44 года назад.

Целями данной работы являются экспериментальное и теоретическое исследование взаимодействия капиллярных сил и электрических сил, действующих на заряженные капли воды в присутствии сильного электростатического поля, получение и наблюдение газовых разрядов в поле отрывающихся от капилляра и дробящихся от электростатической неустойчивости заряженных капель.

Установка представляет собой сосуд, заполненный водой, с капиллярами радиусом $r = 0,15 \div 0,45$ мм, вставленными в боковую стенку (от 1 до 7 шт.). Между водой в сосуде и внешним электродом и/или металлической сеткой, расположенными на расстоянии $5 \div 10$ см от концов капилляров, прикладывается напряжение $5 \div 20$ кВ. Экспериментально измеренное пороговое напряжение отрыва капель U соответствует теоретическому значению $U \geq 2\sqrt{r\sigma / \epsilon_0}$, где σ — коэффициент поверхностного натяжения воды.

Макрофотосъемкой с экспозицией $1,5 \cdot 10^{-6}$ с получены изображения **конусов Тейлора**, струй и отрывающихся капель средним диаметром 0,15 мм, летящих со скоростями $3 \div 5$ м/с.

В итоге проведенных экспериментов получено следующее.

1. В слабом потоке капель наблюдается область равномерного свечения, вытянутая от капилляра к плоскому электроду, а также локальное свечение в местах скопления заряженных капель на диэлектрических предметах, внесенных в разрядный промежуток. Это похоже на **огни святого Эльма**, полученные Войцеховскими.

2. В сильном потоке наблюдаются трассы свечения в виде ветвящихся линий, протяженных от капилляров к пластине. Они повторяют траектории разлета капель. Возможно, капли оставляют ионный след в воздухе, по которому протекает разряд, и происходит рекомбинационное свечение.

3. Измеренный ионный ток в разрядном промежутке в разы больше тока, переносимого заряженными каплями.

Наблюдаемые явления нельзя отнести ни к коронному, ни к искровому разрядам.

Научный руководитель — д-р техн. наук проф. Е. И. Пальчиков

Измерение электрической прочности перфтордибутилового эфира и моделирование этого стохастического процесса

А. В. Сандомирский

Новосибирский государственный университет

Проблема электрического пробоя в жидких диэлектриках очень актуальна, если учитывать техногенные катастрофы и аварии, происходящие на важных промышленных объектах. Часто это происходит из-за пробоев жидкого диэлектрика внутри трансформаторов и конденсаторов на электрических подстанциях высокого напряжения, при этом происходит разгерметизация оборудования, выброс и воспламенение больших объемов масла.

Целью данной работы являлось измерение эффективного напряжения пробоя для сферических электродов радиусом кривизны 30 мм, а также определение характера функции вероятности пробоя. Электроды были помещены в жидкий диэлектрик — перфтордибутиловый эфир (ПФДБЭ). С помощью специального аппарата подавалось линейно нарастающее переменное напряжение. При некотором напряжении происходил пробой. Среднее значение эффективного напряжения $\langle U_{\text{эфф}} \rangle$ получилось равным 41,8 кВ для зазора между электродами 2,5 мм. Среднеквадратичное отклонение σ составило 6,64 кВ. Аппроксимация функции плотности вероятности пробоя была выбрана в виде резко возрастающей функции

$$f(E) = AE^n.$$

Результаты моделирования данного стохастического процесса с хорошей точностью совпали с экспериментальными данными при значениях параметров $n = 6$ и $A = 1,6 \cdot 10^{-12}$. При этом значение $\langle U_{\text{эфф}} \rangle$ в серии модельных расчетов составило 42 кВ, а σ — 5,7 кВ. Для зазора 2,5 мм величина электрической прочности E получилась равной 168 кВ/см. При том же радиусе кривизны и зазоре 1 мм E возрастает до 217 кВ/см. При зазоре 2,5 мм и увеличении радиуса кривизны до 100 мм E уменьшается до 153 кВ/см. Это связано с изменением «эффективной» площади электродов.

При увеличении скорости нарастания поля (напряжения) электрическая прочность увеличивается. Продемонстрировано, что есть только понятие «динамической» прочности жидкого диэлектрика, зависящей от конкретной геометрии и формы подаваемого напряжения. Проведены измерения электрической прочности ПФДБЭ, построена компьютерная модель такого сильно стохастического процесса, как пробой жидких диэлектриков.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. А. Л. Куперштох

Исследование неустойчивости трехмерных состояний динамического равновесия самогравитирующего газа Власова — Пуассона

Ш. Сунь

Новосибирский государственный университет

В работе рассматриваются пространственные движения бесконечного бесстолкновительного самогравитирующего газа Власова — Пуассона нейтральных частиц в трехмерной системе декартовых координат.

Цель данной работы — доказать абсолютную линейную неустойчивость пространственных состояний динамического равновесия газа Власова — Пуассона относительно малых трехмерных возмущений.

В работе был осуществлен переход от кинетических уравнений, которые описывают движение изучаемого газа, к бесконечной системе соотношений, похожих на уравнения изэнтропического течения сжимаемой жидкой среды в приближениях «вихревой мелкой воды» и Буссинеска. В ходе доказательства неустойчивости было обращено известное достаточное условие устойчивости Ньюкомба — Гарднера — Розенблюта этих состояний равновесия по отношению к одному неполному незамкнутому подклассу малых пространственных возмущений. Также было получено дифференциальное неравенство, из которого при выполнении найденных в данной работе достаточных условий линейной практической неустойчивости исследуемых состояний динамического равновесия вытекает априорная экспоненциальная оценка снизу роста малых трехмерных возмущений. Поскольку эта оценка была выведена без дополнительных ограничений на рассматриваемые состояния равновесия, то тем самым доказана абсолютная линейная неустойчивость изучаемых пространственных состояний динамического равновесия газа Власова — Пуассона относительно малых трехмерных возмущений.

Результаты данной работы расширяют область применимости классической теоремы Ирншоу о неустойчивости, утверждающей, что всякая равновесная конфигурация точечных электрических зарядов неустойчива, если на них, кроме собственных кулоновских сил притяжения и отталкивания, никакие другие силы не действуют, на бесконечный бесстолкновительный самогравитирующий газ Власова — Пуассона нейтральных частиц.

Установленным здесь достаточным условиям линейной практической неустойчивости присуща конструктивность, которая позволяет использовать их как механизм тестирования и контроля при проведении физических экспериментов и выполнении численных расчетов.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доц. Ю. Г. Губарев

Моделирование кинетики нейтрального газа в расширителе газодинамической ловушки

Э. А. Федоренков

Новосибирский государственный университет

Нейтральный газ в расширителе газодинамической ловушки образуется в процессе нейтрализации истекающей плазмы. В квазистационарных условиях он распределяется по объему внутри плазменного столба и вокруг него. Предел по концентрации нейтралов внутри плазмы весьма низок: 10^{17} – 10^{18} м⁻³, поскольку перезарядка и появление новых электрон-ионных пар в процессах ионизации приводят к снижению эффективности расширителя по электростатической термоизоляции плазмы. Если действительно требуется откачка расширителя до такой низкой плотности, стоимость и габариты вакуумных систем для стационарных установок оказываются очень высокими. В то же время в экспериментах на ГДЛ показано, что повышение средней плотности нейтрального газа в объеме расширителя даже до 10^{21} м⁻³ не приводит к существенному снижению качества удержания. Это противоречие интерпретируется как результат оттеснения газа из плазмы к стенкам бака расширителя при его неоднородном нагреве.

Параметры физической модели явления соответствуют полустолкновительному режиму, когда длина свободного пробега в холодном газе вблизи стенки мала, а в том же газе вблизи плазмы сравнима с линейными размерами системы. При этом плотность газа меняется на два-три порядка. В таких условиях алгоритмы на основе методов Монте-Карло малоэффективны. Математическое моделирование задачи выполнено на основе решения кинетического уравнения с интегралом столкновений Больцмана. Использована эффективная консервативная схема для столкновений в системе центра масс на грубой сетке. Результаты тестов по установлению равновесной функции распределения демонстрируют работоспособность реализованного алгоритма.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. Д. Беклемишев

Динамика ионов при долговременной эволюции сильно нелинейной кильватерной волны в радиально-ограниченной плазме

В. К. Худяков

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

В современных экспериментах по плазменному ускорению релятивистские электронные пучки (или лазерные импульсы) возбуждают кильватерные волны с плотностью энергии порядка энергии покоя электронов. В данных условиях оказывается неприменимым предположение о неподвижности ионов плазмы уже на временах порядка нескольких периодов электронных колебаний.

Данная работа посвящена исследованию движения ионов, вызванного сильно нелинейной кильватерной волной в радиально-ограниченной плазме, с использованием квазистатического численного моделирования. Опрокидывание подобной волны сопровождается вылетом электронов за границу плазмы. Далее ионы внешних слоев начинают разлетаться под действием собственного нескомпенсированного заряда. Они проникают в окружающий газ и ионизуют его ударным механизмом. На разных радиусах электроны колеблются с различной амплитудой, что приводит к ненулевому среднему поперечному электрическому полю [1]. Под действием электрической силы ионы начинают двигаться к оси. Накапливающийся таким образом положительный заряд приводит к образованию ионно-звуковых солитонов [2]. К моменту возбуждения солитонов электроны плазмы терминируются, их температура согласуется с наблюдаемой скоростью ионного звука. Уникальной особенностью рассматриваемого случая является наличие сильной волны сжатия, которая появляется вблизи границы и распространяется внутрь плазмы. Когда эта волна приближается к оси, некоторые ионы отражаются от области высокой плотности и вылетают далеко за пределы исходного радиуса плазмы. Солитоны выживают на фоне этих возмущений ионной плотности.

1. Vieira J. et al. // *Physics of Plasmas*. 2014. Vol. 21. P. 056705.

2. Sahai A. A. // *Phys. Rev. Accel. Beams*. 2017. Vol. 20. P. 081004.

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

Изучение формирования и транспортировки слаботоочного стационарного пучка для калибровки систем диагностики плазмы

Е. А. Шишкин

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

В работе представлен источник пучка ионов водорода, предназначенный для калибровки датчиков, используемых в плазменных экспериментах с высокой температурой ионов. Ионы водорода в источнике генерируются с помощью ионизационной вакуумной лампы Байарда — Альперта. Далее ионы водорода попадают в зазор, где ускоряются продольным электрическим полем до требуемой энергии. Инжектор имеет следующие параметры: ток пучка до 50 мкА, напряжение ускоряющей системы 3–60 кВ, размер вытягивающей апертуры 1 см. Для регулировки плотности тока вблизи калибруемого датчика после ускоряющей системы установлена электростатическая линза. В работе представлены результаты численного моделирования процессов в пучке с использованием метода Монте-Карло, а также оценки следующих величин: температуры нити накала и тока пучка в зависимости от приложенной на эмитирующую спираль мощности. Для экспериментального изучения характеристик пучка, формируемого источником, подготовлен стенд.

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

**Исследование удержания быстрых ионов
в укороченной магнитной конфигурации на установке ГДЛ**

Е. А. Шмигельский

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

Работа посвящена экспериментальному исследованию перспективного подхода к удержанию плазмы в магнитных ловушках открытого типа — диамагнитному удержанию, ключевой особенностью которого является поддержание состояния плазмы со значением относительного давления плазмы (β), приближающимся к единице [1].

В рамках данной работы была подготовлена и проведена серия экспериментов на установке ГДЛ (ИЯФ СО РАН), в процессе которой исследовались параметры плазмы в новой магнитной конфигурации, позволяющей достичь существенного увеличения плотности энергии плазмы за счет сближения точек остановки быстрых ионов. В ходе работы для измерения диамагнетизма плазмы, достигающего своего максимального значения в точке остановки, была разработана и применена новая диамагнитная петля. Разработанная диагностика, обладающая низкой индуктивностью и работающая в связке с быстродействующим АЦП, позволила зарегистрировать возмущения плазмы с частотами до 60 МГц. В ходе экспериментов были проведены измерения электронной температуры и концентрации, зарегистрированы диамагнитные сигналы и значения потока нейтронов реакции синтеза D-D, а также исследована их зависимость от параметров разряда в новой магнитной конфигурации. Анализ полученных экспериментальных данных позволил качественно охарактеризовать влияние сближения точек остановки быстрых ионов на продольный профиль относительного давления плазмы.

1. Beklemishev A. D. // Physics of Plasmas. 2016. Vol. 23. P. 082506.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Д. В. Яковлев

Nonlocal properties of beam plasmas for development of plasma energetics

E. V. Shtoda

Saint Petersburg mining university

Given that the development of future plasma energetics depends on the application and control of nonequilibrium, anisotropic electron energy distribution functions (EEDF) in plasmas, the development of methods to measure and control EEDF is of great importance.

We present the technique for EEDF measurements with flat one-sided probes in beam plasmas and its application for developing new methods of controlling plasma parameters, based on the nonlocal nature of the electron energy distribution function (EEDF) [1, 2]. When the EEDF is nonlocal, electrons in the plasma form weakly-interacting groups — cold electrons, which are created by inelastic processes in the plasma volume and fast electrons, originating from the cathode and accelerated by the cathode potential fall. In order to demonstrate the possibility of the active EEDF control, a short (without positive column) dc discharge with thermionic cathode and two anodes was designed. One anode (diaphragm) had a hole in the center to allow plasma current to flow to the second anode. Experiments suggest the presence of two dramatically different modes, which are dependent on the diaphragm voltage. In the first mode, the diaphragm current weakly depends on diaphragm voltage, but in the second mode the diaphragm current strongly depends on diaphragm voltage. This characteristic behavior indicates that this device could be potentially used in a power application requiring low-voltage current or voltage stabilization. Through simulations and experimental measurements it is established, that different behavior of groups of fast and cold electrons in the cathode- diaphragm and diaphragm-anode regions allows to implement continuous management of the stabilized current.

1. Tsendin L. D. // Plasma Sources Sci. Technol. 1995. Vol. 4. P. 200.

2. Kaganovich I. D., Demidov V. I., Adams S. F., Raitsev Y. // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2009. Vol. 51. P. 124003.

Supervisor — Cand. Phys.-Math. Sci. A. Ju. Grabovsky

Указатель авторов

Абдрахманов С. И.	35	Мунгалов А. С.	25
Аюпов Д. А.	36	Родионов А. А.	26
Бобрусова Ю. А.	5	Романченко И. И.	13
Владыко И. В.	18	Рыжков Г. А.	46
Воинцев В. А.	37	Савельева А. В.	14
Волков С. М.	19	Савицкий А. Г.	27
Воробьева М. Я.	38	Сайкина Т. А.	47
Глинский В. В.	39	Сандомирский А. В.	48
Гудько А. С.	20	Сергеев И. Е.	28
Давыдов Н. В.	40	Созинов Д. А.	29
Данилко Д. А.	21	Сунь Ш.	49
Дауэнгауэр Е. И.	6	Суслов Д. А.	15
Дашапилов Г. Р.	22	Тамбовцев А. С.	16
Дубровин К. А.	7	Трофимова В. В.	30
Зайцев А. С.	41	Фадеев К. А.	32
Золотухин А. В.	8	Федоренков Э. А.	50
Зубова А.	42	Фролов М. В.	17
Ибраемов Н.	9	Хайрулин А. Р.	31
Кириченко Д. П.	24	Худяков В. К.	51
Кротченко Ю. А.	23	Черкасова А. В.	32
Кунц К. А.	24	Чохар И. А.	8
Кутепова А. И.	10	Шатекова А. И.	33
Ларичкин М. В.	43	Шишкин Е. А.	52
Латышев А. К.	11	Шмигельский Е. А.	53
Литвинцев А. С.	12	Шумилов Н. А.	34
Ломов К. А.	44		
Мейстер А. К.	45	Shtoda E. V.	54
Михайлов А. В.	34		

Содержание

АЭРОФИЗИКА

Бобрусова Ю. А.	5
Дауэнгауэр Е. И.	6
Дубровин К. А.	7
Золотухин А. В., Чохар И. А.	8
Ибраимов Н.	9
Кутепова А. И.	10
Латышев А. К.	11
Литвинцев А. С.	12
Романченко И. И.	13
Савельева А. В.	14
Суслов Д. А.	15
Тамбовцев А. С.	16
Фролов М. В.	17

ТЕПЛОФИЗИКА

Владыко И. В.	18
Волков С. М.	19
Гудько А. С.	20
Данилко Д. А.	21
Дашапилов Г. Р.	22
Кротченко Ю. А.	23
Кунц К. А., Кириченко Д. П.	24
Мунгалов А. С.	25
Родионов А. А.	26
Савицкий А. Г.	27
Сергеев И. Е.	28
Созинов Д. А.	29
Трофимова В. В.	30
Хайрулин А. Р.	31
Черкасова А. В., Фадеев К. А.	32
Шатекова А. И.	33
Шумилов Н. А., Михайлов А. В.	34

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Абдрахманов С. И.	35
Аюпов Д. А.	36

Воинцев В. А.	37
Воробьева М. Я.	38
Глинский В. В.	39
Давыдов Н. В.	40
Зайцев А. С.	41
Зубова А.	42
Ларичкин М. В.	43
Ломов К. А.	44
Мейстер А. К.	45
Рыжков Г. А.	46
Сайкина Т. А.	47
Сандомирский А. В.	48
Сунь Ш.	49
Федоренков Э. А.	50
Худяков В. К.	51
Шишкин Е. А.	52
Шмигельский Е. А.	53
Shtoda E. V.	54
Указатель авторов.....	55

Научное издание

МНСК-2020

ФИЗИКА СПЛОШНЫХ СРЕД

Материалы
58-й Международной научной студенческой конференции

10–13 апреля 2020 г.

Корректор *Д. И. Ковалева*
Верстка *А. С. Терешкиной*
Обложка *Е. В. Неклюдовой*

Подписано в печать 24.03.2020 г.
Формат 60 × 84/16. Уч.-изд. л. 3,6. Усл. печ. л. 3,3.
Тираж 100 экз. Заказ № 77.
Издательско-полиграфический центр НГУ
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Секция
ФИЗИКА
СПЛОШНЫХ СРЕД

ISBN 978-5-4437-1061-7



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

