

**Материалы секции**  
**ФИЗИКА**  
**СПЛОШНЫХ СРЕД**



**22-27 апреля 2018**  
**НОВОСИБИРСК**



НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

МНСК-2018

ФИЗИКА СПЛОШНЫХ СРЕД

Материалы

56-й Международной научной студенческой конференции

22–27 апреля 2018 г.

Новосибирск  
2018

УДК 53  
ББК 22.3я431  
Ф 50

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

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

Ответственный секретарь секции — Е. А. Рухлинская

Экспертный совет секции:  
д-р физ.-мат. наук С. Г. Миронов  
д-р физ.-мат. наук А. А. Чернов  
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 56-й Междунар. науч. студ.  
конф. 22–27 апреля 2018 г. / Новосиб. гос. ун-т. — Новосибирск :  
ИПЦ НГУ, 2018. — 104 с.

ISBN 978-5-4437-0744-0

**УДК 53**  
**ББК 22.3я431**

ISBN 978-5-4437-0744-0

© СО РАН, 2018  
© Новосибирский государственный  
университет, 2018

NOVOSIBIRSK STATE UNIVERSITY  
SIBERIAN BRANCH OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

ISSC-2018

PHYSICS OF CONTINUOUS MEDIA

Proceedings  
of the 56<sup>th</sup> International Students Scientific Conference

April, 22–27, 2018

Novosibirsk  
2018

УДК 53  
ББК 22.3я431  
Ф 50

Section scientific supervisor — Dr. Phys. Math. Prof., Ac. A. K. Rebrov

Section head — Cand. Phys. Math. D. F. Sikovsky

Section responsible secretary — E. A. Rukhlinskaya

Section scientific committee:  
Dr. Phys. Math. S. G. Mironov  
Dr. Phys. Math. A. A. Chernov  
Cand. Phys. Math. A. S. Vereshchagin  
Cand. Phys. Math. V. V. Prikhodko  
Cand. Phys. Math. A. A. Shoshin

**Ф 50** Physics of continuous media : Proceedings of the 56<sup>th</sup> International Students Scientific Conference. April, 22–27, 2018 / Novosibirsk State University. — Novosibirsk : IPC NSU, 2018. — 104 p.

ISBN 978-5-4437-0744-0

**УДК 53**  
**ББК 22.3я431**

ISBN 978-5-4437-0744-0

© SB RAS, 2018  
© Novosibirsk State University, 2018

## АЭРОФИЗИКА

УДК 533.6.011

### **Влияние вязкости на пристеночное давление при сверхзвуковом истечении сфокусированных струй из полузакрытых каналов**

В. Ю. Амельчукова, Д. С. Попова, Д. В. Федорова  
Институт теоретической и прикладной механики  
им. С. А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск,  
Новосибирский государственный университет,  
Новосибирский государственный технический университет

Щелевое сопло для малоразмерных устройств в настоящее время являются эффективной альтернативой по отношению к соплу Лавала [1]. Оно представляет собой канал, один вход которого открыт, а второй ограничен полусферической или полуцилиндрической стенкой. К стенке примыкает форкамера с газом под давлением в несколько десятков атмосфер. Через направляющие отверстия газ поступает в канал. В [1] содержатся результаты численного моделирования и экспериментальных измерений давлений в контрольных точках на внутренней поверхности полузакрытого канала. При этом для струй, втекающих под углом в  $90^\circ$ , отличие в численных и экспериментальных результатах в среднем на 15 % меньше, чем для струй, втекающих под углом  $15^\circ$ . В первом случае ударные волны не достигают стенок канала, а во втором отражаются от них. В окрестности контакта ударной волны с поверхностью формируется отрывная зона, которая не может быть получена при использовании уравнений Эйлера. Проведено численное моделирование на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса, получено качественное совпадение с экспериментальными данными. Установлено, что при численном моделировании газодинамики течения в полузакрытом канале со сфокусированными струями для получения параметров потока по его поверхности необходимо учитывать влияние вязкости.

---

1. *Abashev V. M., Eremkin I. V., Zhivotov N. P., Zamuraev V. P., Kalinina A. P., Tretyakov P. K., Tupikin A. V.* // Journal of Physics: Conference Series. V. 894. № 1. 2017. 012130 p.

Научные руководители — д-р физ.-мат. наук, доцент А. П. Калинина,  
канд. физ.-мат. наук, доцент В. П. Замураев

**Изучение взаимовлияния каналов термоанемометра  
постоянного сопротивления при измерении характеристик потока**

Л. В. Афанасьев

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

Термоанемометры до сих пор широко используются для измерений средних и пульсационных характеристик потока. Как правило, в экспериментах обычно ограничиваются одним или двумя (очень редко тремя) идентичными каналами термоанемометров с одинаковыми типами датчиков. Доступные коммерческие приборы являются относительно дорогими устройствами. Но они рассчитаны на использование кабелей до 5 м длиной. В некоторых задачах этой длины не достаточно. К сожалению, увеличение длины кабеля ухудшает частотный диапазон измерения пульсаций. В особых случаях это удается устранить. В частности, новый набор термоанемометров постоянного сопротивления, который планируется использоваться в лаборатории № 14 ИТПМ СО РАН, адаптирован для работы с длинными кабелями (до трех-четырех раз длиннее коммерческих) без значимого уменьшения частотного диапазона.

В данной работе выполнены проверочные измерения для трех идентичных каналов приборов СТА-2017\_1/2/3 с идентичными датчиками с ниточкой толщиной 10 мкм, подключенные к приборам кабелями длиной 18,8, 14, 13 м соответственно. Измерения сделаны при расположении приборов друг над другом для определения их взаимовлияния, при установке в стенд, а также при их разнесенной установке. Измерения позволили определить уровень взаимовлияния данной измерительной системы.

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



**Экспериментальное исследование ключевых стадий  
ламинарно-турбулентного перехода инициируемого  
неоднородностью поверхности на скользящем крыле**

Е. В. Ветров

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

В настоящее время неустойчивость пограничного слоя на скользящих крыльях исследуется довольно интенсивно. По имеющимся данным из наиболее опасных внешних возмущений, определяющих переход на скользящем крыле, выделяются неоднородности поверхности крыла и вихревые возмущения набегающего потока. При низкой степени турбулентности положение ламинарно-турбулентного перехода на скользящем крыле определяется несколькими этапами: восприимчивость, линейная и нелинейная неустойчивость пограничного слоя.

Эксперименты проводились в аэродинамической трубе Т-324 с низкой степенью турбулентности. Для инициации ламинарно-турбулентного перехода, вызванного шероховатостью поверхности крыла, был изготовлен специальный контролируемый источник — круглая наклейка диаметром 5 мм и высотой 85 мкм, установленный вблизи передней кромки модели. Наиболее сильные амплитуды вихрей неустойчивости поперечного течения (НПТ) наблюдались вниз по потоку от источника, т. е. это стационарные возмущения, измеренные по трансверсальной координате. Положение ламинарно-турбулентного перехода было найдено для различных скоростей течения и в нескольких сечениях.

Полученные в ходе эксперимента данные пригодны для детальной верификации современных методов предсказания ламинарно-турбулентного перехода на скользящих крыльях. Они позволяют также решить задачу восприимчивости, которая включает преобразование возмущений от неоднородности поверхности в собственные возмущения пограничного слоя для более детального исследования данного вопроса.

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

**Моделирование механических и тепловых возмущений  
при поверхностном нагреве конденсированных сред**

С. А. Гвоздев

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

Образование и распространение тепловых и механических возмущений широко представлено в повседневной практике, например, контактные взаимодействия в технических механизмах и машинах. Для разработки образцов новой техники и защитных средств необходимо уметь предсказывать результаты механических и тепловых воздействий на твердые тела. Натурные испытания и изготовление опытных образцов достаточно затратное мероприятие, поэтому имеется необходимость численного моделирования сценариев поведения образцов.

В работе была рассмотрена одномерная задача о поверхностном нагреве пластины (металл, керамика). Повышение температуры вызывает повышение давления в пластине и, как следствие, распространение волн возмущений. Была построена численная модель на основе явной разностной схемы уравнений баланса массы, импульса и энергии. Уравнения баланса замыкались уравнениями состояния и процесса упруго-пластичности. В расчетах были учтены фазовые переходы, в частности, при повышении температуры твердое тело переходило в жидкое состояние, а затем из жидкого состояния в газообразное. Учитывался и обратный переход из жидкого состояния в твердое. Были получены распределения давления и температуры по телу. Также были построены фазовые диаграммы некоторых металлических и керамических материалов.

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

## **Экспериментальное исследование полей скорости в вихревой трубе Ранка — Хилша методом ЛДА**

М. Р. Гордиенко, Д. П. Езендеева

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

В работе экспериментально исследуется энергоразделение в газодинамическом потоке в вихревой трубке Ранка — Хилша. Этот эффект, называемый эффектом Ранка, до сих пор не имеет адекватного физического объяснения. Это связано с недостатком достоверных экспериментальных данных о распределении скорости и температуры внутри вихревой трубы. В связи с этим чрезвычайно востребовано обстоятельное экспериментальное исследование нестационарного течения в трубе Ранка, которое могло бы пролить свет на происхождение эффекта.

Работа направлена на исследование полей скорости внутри вихревой трубы Ранка — Хилша методом лазерной доплеровской анемометрии.

В работе труба Ранка — Хилша состоит из двухщелевого завихрителя и рабочего канала. Холодный выход из вихревой трубы выполнен в виде цилиндрического канала, а горячий — в виде радиального диффузора. Сечение рабочего канала представляет собой квадрат со стороной 34 мм. Теплоизоляция отсутствует. Рабочий канал состоит из трех секций, каждая из которых имеет два оптических стеклянных окна с противоположных сторон.

Построена карта режимов при избыточном давлении на входе от 1 до 6 бар. Карта режимов показала, что эффект разделения температуры в такой вихревой трубе наблюдается отчетливо, хотя эффективность разделения в полтора раза меньше, чем в вихревой трубе с круговым поперечным сечением с диаметром трубы, равным стороне квадрата.

Диагностика поля скорости проведена методом ЛДА в центральной плоскости. Все три компоненты скорости измерены в трех поперечных сечениях центральной плоскости (вблизи завихрителя, в центре рабочего канала и вблизи горячего выхода). Измерены пульсации компонент скорости. Максимум пульсационных амплитуд наблюдался вблизи границы обратного и прямого течений. Максимум окружной компоненты скорости наблюдался на расстоянии одного калибра от завихрителя. Площадь обратного потока достигала плоскости горячего выхода. В среднем течении циркуляционных зон не наблюдалось.

Научные руководители — д-р техн. наук, проф. В. Г. Меледин,  
канд. техн. наук И. К. Кабардин

**Численное моделирование обтекания гидропрофиля**

Е. И. Дауэнгауэр

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

Современное состояние вычислительных технологий позволяет проводить высокоточные численные расчеты для предсказания характеристик течений в задачах обтекания при достаточно высоких числах Рейнольдса ( $Re$ ). Прямое численное моделирование (DNS) уравнений Навье — Стокса вместе с методом крупных вихрей (LES) являются надежными инструментами описания нестационарных турбулентных потоков. За последние двадцать лет в этой области произошел существенный прогресс, что отразилось в имеющихся в литературе описаниях валидированных численных расчетов в области  $Re = 10^5 - 10^6$ , построенных по скорости натекающего потока и длине хорды крыла [1–4].

Мы исследуем задачу обтекания гидропрофиля при  $Re = 2,7 \times 10^5$ , применяя метод спектральных элементов в коде Nek5000 [5] и LES при различных углах атаки. Используя более  $10^5$  спектральных элементов и различный порядок полиномов, мы изучаем влияние боковых стенок на процессы ламинарно-турбулентного перехода, а также эффекты, связанные с величиной угла атаки. Численные расчеты послужат дополнительным источником информации о течениях, исследуемых экспериментально в Институте теплофизики.

Работа поддержана грантами РФФИ № 17-08-01199-а и 18-38-00907-mol\_a.

---

1. *Jensen K.* Large-eddy simulation of flow around a NACA 4412 airfoil using unstructured grids. CTR. Annu. Res. Br. 1996. P. 225–232.

2. *Shan H., Jiang L., Liu C.* Direct numerical simulation of flow separation around a NACA0012 airfoil // Comput. Fluids. 2005. Vol. 34. P. 1096–1114.

3. *Rodríguez I., Lehmkühl O., Borrell R., Oliva A.* Direct numerical simulation of a NACA0012 in full stall // Int. J. Heat Fluid Flow. 2013. Vol. 43. P. 194–203.

4. *Hosseini S. M., Vinuesa R., Schlatter P., Hanifi A., Henningson D. S.* Direct numerical simulation of the flow around a wing section at moderate Reynolds number // Int. J. Heat Fluid Flow. 2016. Vol. 61. P. 117–128.

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

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Р. И. Мулляджанов

**Оптическая диагностика потока воздуха в распределителе газовых потоков для установок каталитического обеззараживания выбросов**

Д. П. Езендеева, М. Р. Гордиенко, С. В. Какаулин  
Новосибирский государственный университет,  
Новосибирский государственный технический университет

Современной проблемой в области экологической безопасности является снижение выбросов вредных веществ в атмосферу. В рамках этой проблемы актуально создание компактных, энергоэффективных каталитических установок для обезвреживания газовых выбросов летучих органических соединений. Ключевым компонентом таких установок является каталитический картридж. Эффективность его работы обеспечивается подачей в картридж газового потока с равномерным полем скоростей. В связи с этим чрезвычайно востребовано экспериментальное исследование течения в макете распределения газовых потоков.

Работа направлена на разработку макета распределителя газовых потоков для каталитического обезвреживания газовых выбросов.

Для обеспечения эффективности равномерного распределения газового потока в каталитической установке разработан и создан макет распределителя газовых потоков и аэродинамический измерительный стенд для его испытаний. Макет состоит из следующих блоков: секция смесителя, секция контроля, поворотное устройство, секция катализатора, узел форсунки. Контролировались массовые расходы потоков воздуха, температуры в потоках и перепады давления на каталитическом картридже и поворотном устройстве.

После поворота течение приобретает струйный характер с зоной рециркуляции, что негативно сказывается на работе каталитического реактора. Коррекция поля скорости внутри поворотного устройства осуществлялась путем вставки крыловидных профилей. Распределение скорости контролировалось методом лазерной доплеровской анемометрии, реализованного в комплексе ЛАД-078, произведенного в институте теплофизики СО РАН. Комплекс позволяет измерять одновременно две проекции вектора скорости в диапазоне 0,001 ... 400 м с ошибкой, не превышающей 0,5 %. Получены профили скорости в поперечных сечениях вдоль линии симметрии, в прямолинейном участке и в области после поворота потока под прямым углом. В результате был создан макет распределителя газовых потоков с правильным распределением полей скорости для эффективной работы каталитической установки.

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

## Спектральный перенос энергии в турбулентных струях с переменной плотностью

В. А. Иващенко

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

Турбулентные потоки включают в себя много различных масштабов движения, которые взаимодействуют нелинейно, что создаёт трудности для описания системы. Определённые упрощения об однородности и изотропности потока позволяют получить разные корреляции. Они описываются уравнениями, полученными для структурных функций, которые характеризуют взаимосвязь между разными точками в пространстве и времени. Уравнения становятся более сложными для случая анизотропной и неоднородной турбулентности. Однако «точные» уравнения, похожие на уравнение Колмогорова для случая однородной изотропной турбулентности, все ещё могут быть записаны и проанализированы.

Изменение плотности привносит новые физические механизмы, которые сильно влияют на характеристики потока. Недавно [2] был получен развитый подход, который расширяет прежние методы на случай переменной плотности для описания двухточечных корреляций для стратифицированной турбулентности. В нашей работе мы анализируем уравнения на структурные функции в случае анизотропной неоднородной турбулентности, используя метод прямого численного моделирования для турбулентных струй с переменной плотностью. Изменение плотности обеспечивается путём смешения различных газов (воздух, углекислый газ, гелий). Мы изучаем спектральный перенос энергии и влияние эффектов анизотропии и переменной плотности на различные слагаемые уравнений баланса.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 14-19-01685.

---

1. Hill R. J. Exact second-order structure-function relationships // J. of Fluid Mechanics. 2002. V. 468. P. 317–326.

2. Kurien S., Smith L., Wingate B. On the two-point correlation of potential vorticity in rotating and stratified turbulence // J. of Fluid Mechanics. 2006. V. 555. P. 131–140.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Р. И. Мулладжанов

**Экспериментальное исследование взаимодействия падающих слабых ударных волн на сверхзвуковой пограничный слой плоской затупленной пластины при числе Маха  $M = 2,5$**

В. Л. Кочарин

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

В рабочей части аэродинамических труб на модели могут воздействовать квазистационарные возмущения в виде слабых ударных волн. Исследования влияния слабых ударных волн проводились в работах [1–2], в которых было выявлено, что слабые ударные волны оказывают сильное влияние на сверхзвуковой пограничный слой.

Данная работа посвящена экспериментальным исследованиям взаимодействия падающих слабых ударных волн на пограничный слой плоской пластины с затупленной передней кромкой при числе Маха  $M = 2,5$  и нулевым углом атаки, радиус затупления передней кромки составлял  $r = 2,5$  мм. Экспериментальное оборудование, постановка эксперимента и методы обработки подробно описаны в [1]. Для создания пары слабых ударных волн использовалась клейкая лента ПВХ, которая вертикально устанавливалась на боковой стенке рабочей части трубы.

Проведенные исследования показали, что при попадании слабых ударных волн на переднюю кромку затупленной пластины в пограничном слое обнаруживаются области возмущенного течения. В областях возмущенного течения обнаруживаются высокоинтенсивные пики. Показано, что наибольший уровень пульсаций массового расхода в пограничном слое возникал под воздействием заднего фронта слабой ударной волны.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-01-00743.

---

1. *Vaganov A. V., Ermolaev Yu G., Kolosov G. L., Kosinov A. D., Panina A. V., Semionov N. V.* Impact of incident Mach wave on supersonic boundary layer // Thermophysics and Aeromechanics. 2016. V. 23. Is. 1. P. 43–48.

2. *Yermolaev Yu. G., Yatskih A. A., Kosinov A. D., Semionov N. V., Kolosov G. L., Panina A. V.* Experimental study of the effects of couple weak waves on laminar-turbulent transition on attachment-line of a swept cylinder // AIP Conf. Proc. 2016.

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

## **Моделирование течения в импульсной аэродинамической трубе ИТ-302М**

А. И. Кутепова

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

В работе выполнено численное моделирование нестационарного течения в тракте аэродинамической трубы (АДТ) импульсного типа на примере установки ИТ-302М. Цикл работы подобных установок является достаточно сложным и включает в себя процессы электрического разряда в закрытой камере, истечения газа с дросселированием, установление сверхзвукового течения в сопле и в окрестности модели, течение газа при переменных параметрах торможения и срыв сверхзвукового режима. Эти явления сопровождаются нестационарным теплообменом газа со стенками АДТ, который может оказывать значительное влияние на характер течения. В силу короткого времени пуска, нестационарного поведения характеристик потока, а также высокой температуры торможения в установках такого типа средства диагностики течения значительно ограничены. Развитие вычислительной техники к настоящему времени позволяет рассчитывать полный цикл работы установки с приемлемыми упрощениями. Поэтому возникает возможность существенно повысить информативность аэродинамического эксперимента путем проведения численного моделирования для тех же условий.

Цель исследования — создание вычислительной модели аэродинамической трубы ИТ-302М, или «виртуальной АДТ», для моделирования условий эксперимента и выполнения модернизации установки. Основная задача — выполнение расчетов рабочего цикла установки для типовых условий эксперимента.

Используя вычислительный пакет Ansys с гидродинамическим решателем Fluent, выполнялись расчеты течения в аэродинамической трубе импульсного типа. Были исследованы особенности запуска установки, выполнены расчеты нестационарного истечения газа из форкамеры через профилированное сопло для различных вариантов компоновок установки, исследовано влияние диффузора на продолжительность режима. Кроме того, было изучено распространение неоднородностей течения в нестационарном потоке во время запуска установки.

Работа поддержана грантом РФФИ № 18-01-00536.

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



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

А. С. Лебедев, К. В. Коновалов, И. А. Мик  
Новосибирский государственный университет,  
ООО «Тион Инжиниринг»,  
Новосибирский государственный технический университет

Интерес к фильтрующим материалам вызван, в первую очередь, нарастающей проблемой очистки воздуха как в промышленности, так и в быту. Современные листовые волокнистые фильтрующие материалы характеризуются высокой плотностью и низкой прочностью. Для достижения приемлемых показателей перепада давления и эффективности фильтрации, материал формируется в виде тонких гофрированных листов, заключенных в несущий корпус, что дополнительно увеличивает цену конечного продукта.

В качестве альтернативного решения обозначенных проблем, впервые получен НЕРА-фильтр (High Efficiency Particulate Air) объемной фильтрации на основе каркасных волокон микронного диаметра и фильтрующих волокон субмикронного диаметра. Производство каркасных волокон осуществляется методом экструзии расплава полипропилена на вращающуюся шпулю. Фильтрующие волокна изготавливаются методом электроформования — вытягивания раствора полимера электрическим полем с последующим осаждением на сформировавшийся слой каркасных волокон.

На основании данного подхода разработана методика получения материала с плотностью распределения субмикронных волокон, возрастающей по направлению потока фильтруемого воздуха.

Разработана методика ресурсных испытаний, включающая в себя последовательное загрязнение материала аэрозолем. Проведено исследование влияния осажденных аэрозольных частиц на структуру слоев субмикронных фильтрующих волокон. Исследование полученных образцов с градиентным нанесением фильтрующего волокна показало, что градиентный материал имеет больший ресурс фильтрации по сравнению с образцами с равномерным нанесением волокон.

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

**Экспериментальное исследование инициирования горения  
в сверхзвуковом потоке путем инжекции  
в него поперечно направленной детонационной волны**

А. А. Литвинцева

Новосибирский государственный университет

Целью работы является изучение процессов инициирования химических реакций в сверхзвуковом потоке путем инжекции в него детонационной волны и перестройки потока при таком воздействии. В работе приводятся результаты экспериментальных исследований воздействия на сверхзвуковой поток кислород-водородной смеси инжектируемым в него потоком, генерируемым детонационной трубкой, установленной в стенке сверхзвукового канала.

Эксперименты проводились на импульсной сверхзвуковой аэродинамической установке с форкамерой постоянного объема. Число Маха потока  $M = 4$ , давление торможения до 1 МПа, температура торможения 293 К. В качестве рабочего тела использовались кислород-водородные смеси. В стенке сверхзвукового канала сечением  $70 \times 70$  мм<sup>2</sup> устанавливалась детонационная трубка, инжектирующая в поток струю продуктов детонации.

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

Применявшиеся методы измерений позволили получить первые экспериментальные данные об инициировании горения в сверхзвуковом потоке путем инжекции в него поперечно направленной детонационной волны.

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

## Математическое моделирование гетерогенных сред

А. В. Мишин

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

Работа имеет отношение к проблемам теоретического описания гетерогенных сред.

На основе гипотезы о теле сравнения тело сравнения есть эффективная среда. Методом вариаций получены эффективные коэффициенты, а не вилка, как ранее. Также показано, что статистические методы и метод самосогласования приводят к идентичным эффективным коэффициентам. Анализ эффективных коэффициентов показал наличие фазового перехода в механических смесях (например, металл–диэлектрик) и наличие несущей фазы.

Делается акцент на методе условных моментов, так как в рамках этой теории в ряде случаев получаются эффективные уравнения с соответствующими эффективными коэффициентами для среды в целом, и для каждой фазы отдельно.

Описано поведение микронеоднородных систем с несущей жидкой, газовой фазой, переход от несущей жидкой фазы к несущей твердой фазе и, соответственно, описание сред с несущей твердой фазой. Описана фильтрация жидкой фазы, представлен вывод закона Дарси и его обобщение — закон Форхгеймера. Представлена сила Стокса и ее обобщение, связанное с инерцией по аналогии с выводом закона Форхгеймера.

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

## **Изучение механизма взаимодействия слабых ударных волн со сверхзвуковым пограничным слоем плоской пластины**

М. В. Питеримова

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

Изучение возникновения турбулентности в сжимаемых пограничных слоях вблизи поверхности летательных аппаратов (ЛА) важно для построения перспективной высокоскоростной авиационной техники.

Известно, что сценарий ламинарно-турбулентного перехода в пограничных слоях значительно зависит от возмущений в набегающем потоке.

Помимо акустических пульсаций в рабочей части сверхзвуковых аэродинамических труб на обтекание модели летательных аппаратов также могут оказывать влияние квазистационарные возмущения — волны Маха. В полете слабые ударные волны могут излучаться с поверхности аппаратов и воздействовать на их элементы. В результате такого воздействия на пограничный слой даже при ламинарном обтекании могут увеличиваться тепловые потоки к поверхности. По этой причине его необходимо учитывать при оценке уровней теплового нагружения ЛА как дополнительное к известным явлениям.

В работе применяется методика введения контролируемых возмущений в сверхзвуковое течение. Цель экспериментов — определение зоны взаимодействия слабых ударных волн с областью течения около передней кромки плоской пластины и выявление механизмов зарождения и развития возмущений в пограничных слоях.

Эксперименты проводились в малошумной сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-325 ИТПМ СО РАН при числе Маха  $M = 2$  с использованием в качестве модели плоской пластины с затупленной передней кромкой. Слабые ударные волны генерировались с помощью двумерной наклейки шириной 2,5 мм, размещенной на боковой поверхности стенки рабочей части.

В результате экспериментов получено, что двумерная наклейка на боковой поверхности рабочей части порождает возмущение в виде N-волны в свободном потоке.

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

## **Численное моделирование дисперсных потоков при лазерной наплавке**

Т. А. Полянский

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

В работе представлены результаты численного моделирования механизмов формирования порошковой струи при выходе из длинной металлической трубки. Цель исследования — увеличение коэффициента использования порошка в технологиях лазерно-порошковой наплавки.

Численное исследование проводилось при помощи программного обеспечения, написанного на основе библиотеки с открытым исходным OpenFOAM. Газодинамические уравнения решаются методом конечных объемов. Движение частиц рассматривается в лагранжевом подходе. При моделировании движения частиц особое внимание уделяется законам взаимодействия частиц между собой и со стенками сопла. Распределение по размеру и плотность дисперсной фазы совпадают с характеристиками никелевого порошка марки ПР-Н77Х15СЗР2-3 (диаметр частиц от 20 до 60 микрон).

В расчётах варьировался расход несущего газа, диаметр трубок и параметры моделей взаимодействия частиц со стенками. В результате были получены статистические распределения параметров частиц в порошковой струе на различных расстояниях от выхода трубки, оказывающие влияние на ширину струи и как следствие коэффициент использование порошка.

Работа поддержана грантом РФФИ № 17-48-540781.

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

## **Численное моделирование формы канала лазерного реза**

Т. А. Полянский

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

В работе представлена численная модель процесса лазерной резки стальных листов с нейтральным газом, учитывающая тепловые потери в разрезаемый материал. Целью исследования является установление механизмов, определяющих разное качество поверхности реза толстых листов металла при использовании лазерного излучения разных длин волн. Задачей исследования является создание программного комплекса, дающего количественные достоверные данные о формировании лазерного реза излучением с заданными характеристиками.

Численное исследование проводилось при помощи программного обеспечения написанного на основе библиотеки с открытым исходным OpenFOAM. Конечно-объемным методом решалось трёхмерное уравнение теплопроводности на динамической сетке с подвижной границей. Полученные результаты сопоставлялись с экспериментальными данными для лазерной резки волоконным и CO<sub>2</sub>-лазером листов нержавеющей стали толщиной 1, 5 и 8 мм. Исследовано распределение поглощенной энергии для характерных распределений интенсивностей излучения.

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

**Влияние боковых струй на структуру сверхзвукового потока в канале переменного сечения**

Д. С. Попова, Д. В. Федорова, В. Ю. Амельчукова  
Институт теоретической и прикладной механики  
им. С. А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск,  
Новосибирский государственный университет,  
Новосибирский государственный технический университет

Эффективность подвода теплоты в камере сгорания определяется полнотой сгорания горючего и потерями полного давления. Для управления потоком в настоящее время широко применяются струи. Боковая дросселирующая струя способствует предварительному торможению потока, а также воспламенению топливной смеси, подаваемой выше по потоку. Поэтому изучение боковых струй представляет отдельный интерес.

С целью оценки влияния вязкости и турбулентности проведено нестационарное двумерное CFD-моделирование на основе SST-модели турбулентности при втекании струи в плоский канал с непрофилированным соплом, получено распределение числа Маха в различные моменты времени после начала втекания струи в сверхзвуковой поток в канале с числом Маха 2. Использовалась численная схема с высоким порядком точности. Поперечный размер секции постоянного сечения составлял 30 мм.

Проведено сравнение с литературными экспериментальными данными [1] и получено качественное совпадение с ними. Количественные отличия были неизбежны, так как отличалась геометрия щели: в эксперименте она была компактная, в расчетах — протяженная. Исследовано влияние параметров модели турбулентности (productlimiterclipfactor) на степень совпадения результатов расчетов и экспериментов. Определен диапазон значений, при котором совпадение максимально.

Работа выполнена в рамках проекта СО РАН III.22.6.2 и при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-08-00183).

---

1. Timothy Ombrello and Campbell Carter // Journal of Propulsion and Power. 2015. V. 2. 654 p.

Научные руководители — д-р физ.-мат. наук, доцент А. П. Калинина,  
канд. физ.-мат. наук, доцент В. П. Замураев

**Экспериментальное исследование локализованных возмущений в пограничном слое плоской пластины, генерируемых ограниченными вибрациями поверхности**

И. А. Садовский

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

В работе исследуется влияние источника возмущений — отклоняемой квадратной мембраны на пограничный слой плоской пластины. Измерения проводились для двух скоростей: 16 м/с и 3,5 м/с. Из полученных результатов ясно, что картина изолиний пульсаций скорости характерна для продольных возмущений «streaky structures», которые преобладают в течении. Однако при дальнейшем изучении был использован Фурье-фильтр и вычленены высокочастотные возмущения. Стало ясно, что в областях, где мембрана совершает свое движение, формируются высокочастотные волновые пакеты. Распределение этих волновых пакетов по интенсивности по нормали к поверхности показывает наличие двух максимумов, что характерно для пакетов волн Толмина — Шлихтинга. Если рассматривать распределения амплитуд волновых пакетов по направлению потока, то становится ясно, что для скорости 3,5 м/с они быстро затухают, в то время как для 16 м/с ведут себя не так однозначно: на переднем фронте амплитуда волнового пакета существенно меньше и не увеличивается, а на заднем фоне — возрастает на всей области измерений.

Цель исследования — изучить динамику и развитие возмущений, возбуждаемых локализованным поверхностным вибратором в пограничном слое плоской пластины.

Для того чтобы избавиться от неконтролируемых искажений в пограничном слое, вызванных выступающей мембраной, и расширить диапазон скоростей с помощью 3D-печати был создан источник контролируемых возмущений. Этот источник помещается в пластину так, чтобы поверхность неотклоненной мембраны не выступала над пластиной. С его помощью можно менять форму мембраны не внося существенных изменений в установку.

В ближайшем будущем будет проведен эксперимент с использованием данного устройства на скоростях выше 16 м/с. Планируется исследовать возмущения, генерируемые квазидвумерным и трехмерным вибратором. Работа поддержана грантом РФФ 16-19-10330.

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



## Диффузионное горение водорода в микроструях

А. С. Тамбовцев

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

Потребление углеводородного сырья является основой современной энергетики. В этой связи возникает большой интерес к развитию водородной энергетики и как следствие к сжиганию водорода. Особый интерес вызывает процесс горения водорода при его струйном истечении из различного типа горелок, форсунок, сопел. Физико-химические свойства струйного горения водорода широко исследуются во всем мире как теоретически, так и экспериментально. Также определенный интерес вызывает диффузионное горение водорода в воздушной среде с точки зрения повышения устойчивости пламени и снижения вредных выбросов в атмосферу оксидов азота.

Цель настоящей работы состояла в экспериментальном исследовании диффузионного горения водорода в круглых микроструях с прямым каналом диаметром  $d = 42, 50, 200, 279$  мкм и изогнутым каналом диаметром  $d = 206, 266$  мкм при его истечении в воздух. Особое внимание было уделено исследованию характеристик области развития ламинарно-турбулентного перехода и ее роли в процессе горения круглой микроструи водорода. Для получения теневых картин в процессе эксперимента использовался прибор ИАБ-451. Расход водорода контролировался электронным расходомером. Для сопел с диаметром более 50 мкм найдены диапазоны расходов, при которых в пламени формируется область ламинарно-турбулентного перехода, при этом с увеличением скорости струи уменьшается пространственный размер ламинарной области.

Поведение ламинарной области в струе, истекающей из изогнутого канала, аналогично поведению ламинарной области в струе, истекающей из прямого канала, с той разницей, что гидродинамическая неустойчивость (вихри Дина), зарождающаяся в искривленном канале, существенно влияет на форму факела. Зона с ламинарным течением является стабилизатором горения всего пламени в целом, а в зоне с турбулентным течением происходит интенсивное смешение горючего с окислителем. Также отмечается тот факт, что горение в ламинарной зоне может происходить независимо от горения в зоне с турбулентным течением.

Полученные данные позволяют более глубоко понять особенности режимов микроструйного горения водорода, перспективного для различных горелочных устройств.

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

**Исследование устойчивости локальных отрывных течений  
над волнистой поверхностью**

С. А. Тарасов  
ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск

При технологическом изготовлении проницаемой поверхности крыла на ней может образоваться волнистость. В технических приложениях также часто встречаются волнистые стенки [1]. Поэтому решение проблемы получения количественных оценок влияния волнистости поверхности на устойчивости ламинарного пограничного слоя представляет практический интерес.

Эксперименты проводились в аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ СО РАН на модели плоской пластины с волнистой поверхностью, высота которой такова, что за горбами формируются области локальных отрывов потока. Предметом исследования являются распределения профилей скорости в оторвавшемся пограничном слое в условиях развития естественных и контролируемых вихревых возмущений на различных частотах.

Получены и проанализированы распределения амплитуд возмущений поперек сдвигового течения в различных сечениях вниз по потоку. Проведено сравнение данных с экспериментальными результатами в других локальных отрывных течениях [2].

---

1. *Kowalewski T. A., Szumbariski J., Blonski S.* Low-Reynolds-number instability of the laminar flow between wavy walls // Proc. Sixth Intern. ASME Conf. Nanochannels, Microchannels and Minichannels ICNMM2008. ASME, 2008. P. 62070.1–62070.8.

2. *Boiko A. V., Dovgal A. V., Grek G. R., Kozlov V. V.* Physics of transitional shear flows. Berlin: Springer, 2012. 272 p.

Научный руководитель — член-корр. РАН, проф. А. В. Бойко

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

Р. В. Толстогузов

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

Импактные струи с горением широко применяются для организации процессов обработки материалов, резки металлов, нагрева поверхностей. Закрутка потока позволяет существенно интенсифицировать процессы теплообмена, достичь радиальной однородности теплопереноса вблизи импактной поверхности и стабилизировать пламя в более широком диапазоне чисел Рейнольдса и коэффициента избытка топлива по сравнению с потоком без закрутки. Однако закрутка способствует образованию «застойных» вихревых зон, которые негативно сказываются на равномерности теплоотвода. Данные особенности закрученных течений все еще недостаточно изучены даже для свободных струй и пламени, а для течений, натекающих на преграду, исследованы крайне слабо.

Данная работа посвящена исследованию влияния крупномасштабных вихревых структур, присутствующих в потоке, на структуру течения импактной закрученной струи с горением.

Измерения проводились на экспериментальном стенде, состоящем из горелочного устройства с завихрителем, устройства для засева потока, участка контроля расхода воздуха и пропана, а также термостатированной импактной поверхности. Горелочное устройство представляло собой профилированное сопло (с выходным диаметром  $d = 15$  мм) с расположенным внутри лопастным завихрителем. Измерение полей мгновенной скорости проводилось методом анемометрии по изображениям частиц (PIV). Для засева потока добавлялись частицы диоксида титана.

В работе были выявлены характерные режимы горения импактного закрученного пламени и проведена их визуализация. Были получены реализации поля мгновенной и средней скорости характерных режимов горения для закрученного импактного пламени при различных расстояниях от сопла до импактной поверхности, значениях числа Рейнольдса, коэффициентов избытка топлива и степенях закрутки потока.

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

**Влияние геометрии канала на структуру сверхзвукового потока  
при пристеночной подаче топливной газовой смеси**

Д. В. Федорова, В. Ю. Амельчукова, Д. С. Попова  
Институт теоретической и прикладной механики  
им. С. А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск,  
Новосибирский государственный университет,  
Новосибирский государственный технический университет

В последнее время численные и экспериментальные исследования запуска и работы сверхзвуковых прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД) приобретают все более высокую популярность, поскольку этот тип двигателя не нуждается в баке с окислителем. Метод запуска камеры сгорания [1] интересен тем, что одновременно затрагивает все три аспекта: проблему минимизации потерь полного давления, задачи эффективного смешения и воспламенения топливной смеси. Принципиальным является подача топливной смеси выше по потоку от струи сжатого воздуха, создающей эффект дросселя, что приводит к торможению потока до околосвуковых скоростей.

Данная работа посвящена численному моделированию подобного способа запуска на примере плоской и осесимметричной канала с использованием нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса, замыкаемых SST-моделью турбулентности, и упрощенной химической кинетики. В обоих случаях получен пульсирующий режим горения, однако отличается локализация околосвуковой области. В плоском канале околосвуковая область расположена в центре сечения канала, а в осесимметричном случае она имеет кольцевое сечение конечной ширины.

Получено, что определяющую роль в смешении газов играет не только пограничный слой, а ударные волны, вызванные втекающими струями.

Работа выполнена в рамках проекта СО РАН Ш.22.6.2 и гранта РФФИ 17-08-00183.

---

1. *Третьяков П. К., Забайкин В. А., Прохоров А. Н.* URL: <http://www.itam.nsc.ru/upload/iblock/9f5/01318.pdf>.

Научные руководители — д-р физ.-мат. наук, доцент А. П. Калинина,  
канд. физ.-мат. наук, доцент В. П. Замураев

## **Вертикальные аэродинамические трубы**

А. Ш. Шадрина

Аэрокосмический лицей им. Ю. В. Кондратюка, г. Новосибирск

Использование аэродинамических труб позволяет с минимальными затратами средств и времени определить аэродинамические характеристики ЛА, обучить парашютистов и рассмотреть свободное падение тел. Аэродинамическая труба — устройство, благодаря которому моделируется воздействие воздушных потоков на тело. За счет восходящего вертикального воздушного потока симулятор свободного падения удерживает человека (или любое другое тело) в состоянии парения, достигнутого за счет уравнивания веса объекта и силы сопротивления воздушного потока. Так как сила воздействия потока напрямую зависит от площади взаимодействия тела и потока, равновесие достигается с помощью изменения положения тела относительно потока (изменение площади соприкасаемой поверхности). Зависимость положения и движения тела в потоке от силы тяжести и подъемной силы показана работой программы.

Час тренировки на трубе способен заменить неделю регулярных прыжков. Главными недостатками при использовании симулятора свободного падения является закрепление некоторых неверных рефлекторных навыков (так как создаваемая ситуация не полностью идентична свободному падению, что было выяснено в результате проведения опытов на модели) и возможность создавать лишь один постоянный поток, в то время как в реальности существует возможность возникновения разнонаправленных потоков. Аэродинамиками уже предложены пути решения данных проблем — они основаны на изменении подачи потока и рабочей части трубы.

Научный руководитель — М. В. Сысолина

**Моделирование струй при небольшом числе Рейнольдса  
для управления потоком в задачах энергетики и транспорта**

А. К. Шевченко

Новосибирский государственный технический университет

Цель работы — исследование структуры плоского течения из узкой щели, стационарного и с искусственно введенным возмущением.

Микроструи актуальны для энергетики при сжигании водорода. Истечение водорода из форсунок и сопел горелок представляет интерес с точки зрения повышения устойчивости пламени и снижения выбросов в атмосферу оксидов азота. Возникает потребность в управлении этим процессом. Например, под влиянием акустики в струе формируется вихревая структура, способствующая росту подсоса воздуха, повышению степени смешения смеси топливо-воздух, устойчивости пламени, снижению температуры и длины пламени и, как результат, сокращению эмиссии вредных веществ. Результаты применимы также в задачах снижения шума и сопротивления летательных аппаратов.

Исследование струи выполнено путем численного решения уравнений Навье — Стокса при помощи пакета Open FOAM. Сходимость по времени в стационарном случае достигается при помощи критериев сравнения поля скорости в различные моменты времени. Анализ сходимости к независимому от сетки и положения границ решению также использует подходящие критерии сравнения результатов пар расчетов на последовательных сетках.

Результаты показаны в виде линий тока, изолиний давления, компонент векторов скорости и завихренности, интегральных характеристик струи — характерных толщин и максимума скорости на оси. Для численного исследования течения применяется параметрический анализ — изучение зависимости характеристик течения от геометрических и физических параметров.

В работе проверено влияние шага по координате и времени, разрежения и сгущения сетки, длины и ширины области расчета, аппроксимации конвективных слагаемых, различных решателей систем алгебраических уравнений, граничных условий на входе в струю, числу Рейнольдса. Исследуются сценарии развития возмущений из численной неустойчивости и при введении малых случайных возмущений типа «белого шума» или нестационарных граничных условий с колебаниями различной частоты и амплитуды.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, доцент С. Н. Яковенко

**Исследование развития пограничного слоя у плоской поверхности в потоке за проходящей ударной волной в условиях предполагаемого МГД-взаимодействия**

Е. К. Шипко

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

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

В данной работе используется классическая ударная труба, в канале которой происходит движение газа за проходящей ударной волной. При этом на стенках канала из-за вязкого трения происходит образование ПС. Для реализации необходимых параметров магнитогазодинамического (МГД) взаимодействия необходимо исследовать структуру ПС и определять характерные зоны развития ПС. В данной работе рассматривается методологический подход к визуализации структуры пограничного слоя.

Визуализации ПС осуществлялась прямотеневым методом с использованием высокоскоростной камеры. Через смотровые окна, расположенные друг напротив друга, пропускался свет зеленого лазера, который отклонялся по мере прохождения через градиент плотности в области ламинарного ПС. В результате наблюдалась область затемнения потока (тень) около поверхности, высота которой росла с ростом толщины ПС. Было установлено, что в зоне ЛТП происходит уменьшение высоты тени, а в условиях турбулентного течения тень не наблюдается так как свет преломляется не регулярно.

Для обработки полученных данных разработана программа, с помощью которой можно отследить границу тени и динамику развития ПС, а также выделить этапы, соответствующие ламинарной, турбулентной зонам и зоне ЛТП. Анализ данных показал, что данная методика позволяет наблюдать за динамикой развития ПС и может быть использована в условиях предполагаемого МГД-эксперимента. Также в процессе разработки находится дублирующий метод — анализ пульсаций давления на обтекаемой поверхности, получаемых с использованием пьезоэлектрических датчиков давления.

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

## Использование программы Spesair для расчета теплового излучения газа на поверхность спускаемого космического аппарата

Т. Ю. Шкрёдов

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

При обтекании возвращаемого космического аппарата, входящего в атмосферу, формируется высокотемпературный ударный слой. Расчет теплового потока на поверхность необходим при разработке тепловой защиты космического аппарата. При высоких скоростях обтекания (более 10 км/с) или больших размерах аппарата важный вклад в общий поток тепла может вносить тепловой поток излучения нагретого воздуха в ударном слое, сравнимый со значениями конвективного теплового потока.

Целью данной работы является расчет радиационного теплового потока на поверхность спускаемого космического аппарата с учетом поглощения излучения в газе по модели плоского слоя.

Была написана программа, в которой для решения одномерного уравнения переноса излучения в газе вычисляется интеграл:

$$2\pi \int_0^{\pi} I_{\lambda,p} \left(1 - e^{-\frac{\kappa_{\lambda,i} * \Delta x}{\cos \theta}}\right) e^{-\frac{(\sum_{k>i} \kappa_{\lambda,k}) * \Delta x}{\cos \theta}} \sin \theta \cos \theta d\theta,$$

где  $I_{\lambda,p}$  — спектральная интенсивность излучения абсолютно черного тела,  $\kappa_{\lambda,i}$  — спектральный коэффициент поглощения  $i$ -го слоя,  $\theta$  — угол между направлением луча и нормалью к поверхности. Коэффициент поглощения определялся на основе расчетов по программе Spesair.

С помощью программы рассчитана интенсивность излучения в точке торможения потока на поверхности спускаемого космического аппарата.

Влияние поглощения излучения в газе определялось сравнением величин радиационного потока тепла и спектральных интенсивностей излучения на поверхности аппарата, рассчитанных с учетом и без учета поглощения. Результаты данной работы будут использованы для дальнейшего развития вычислительных средств решения задачи о переносе излучения в газе на поверхность спускаемого космического аппарата в осесимметричной и трехмерной постановке.

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



## **Плазмохимический синтез субмикронных частиц порошка диоксида кремния хлоридным методом**

В. В. Эм

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

Нано- и субмикронные порошки диоксида кремния находят широкое применение в различных технологиях, например, используются в качестве модификаторов в лакокрасочных материалах, наполнителей композиционных материалов, в частности, белых и цветных резин и герметиков на различной основе, диспергаторов слеживающихся продуктов, компонента адсорбентов, тонкой керамики, перспективного материала для косметики и фармацевтики и т. д. Одним из наиболее перспективных методов синтеза субмикронных частиц диоксида кремния является хлоридный метод, который представляет собой способ получения порошка в результате высокотемпературного окисления паров тетрахлорида кремния в реакторе проточного типа. Процесс плазмохимического синтеза хлоридным методом является одним из самых простых с точки зрения технологической реализации, одностадийным и легко масштабируемым.

Целью работы является экспериментальное исследование зависимости характерного диаметра частиц диоксида кремния и размеров их агломератов в зависимости от режимных параметров установки — энтальпии плазменной струи и скорости закалки порошка. Площадь удельной поверхности образцов и средний размер частиц будет определяться методом БЭТ, внешний вид агломератов, морфология и микроструктура частиц — с помощью растровой и просвечивающей электронной микроскопии, анализ на элементный состав — методом электронной дифрактометрии.

В результате предварительно проведенных экспериментов в режиме встречной закалки конечного продукта получен аморфный порошок диоксида кремния, средний размер которого составил 28 нм, при этом доля загрязняющего хлора в порошке — 0,0 масс. %.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Е. В. Картаев

# ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 532.529.5

## Численное исследование локальных характеристик газожидкостного течения в микроканале

А. Н. Антонов

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

Тенденция к миниатюризации при разработке микроканальных теплообменников, микроканальных реакторов и биологических чипов определяет большой интерес к экспериментальным и расчетным исследованиям газожидкостных течений в микроканалах. Тем не менее одной из актуальных и нерешенных задач остается определение локальных характеристик таких течений в каналах прямоугольного сечения, которые широко распространены в микрожидкостных системах.

Целью данной работы является численное исследование локальных характеристик течения при всплытии газового пузыря в вертикальном канале прямоугольного сечения. Расчеты проводились методом жидкости в ячейке (VOF) с помощью программного пакета OpenFOAM. В процессе расчета определялась фазовая доля жидкости  $\alpha$  в ячейках расчетной сетки при решении уравнения переноса  $\frac{\partial \alpha}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \alpha = 0$ , после чего решалась система уравнений движения для жидкости с плотностью и вязкостью, которые получены линейной интерполяцией. Расчеты проводились для элемента симметрии, составляющего  $\frac{1}{4}$  от поперечного сечения каналов  $420 \times 280$  мкм и  $400 \times 210$  мкм. Перепад давления на длине канала изменялся от 1 до 5 кПа. Установлено, что капиллярные силы определяют распределение толщины пленки жидкости в поперечном сечении канала, они приводят к стягиванию жидкости в углы канала и формированию тонкой пленки жидкости на стенках. Результаты показывают, что толщина и форма пленки жидкости значительно отличаются для длинной и короткой стороны канала. При этом толщина пленки на длинной стороне канала изменяется в зависимости от расстояния до головной части пузыря, поэтому известный закон Тейлора для определения локальной толщины пленки жидкости не может быть применен для прямоугольных микроканалов.

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

## **Изучение режимов смешанной конвекции в пористом канале с источником тепловыделения**

М. С. Астанина

Томский государственный университет

Современный уровень развития приборостроения, энергетики и промышленности требует исследований в области конвективного теплопереноса с целью улучшения систем охлаждения источников энергии. Исследования в этой области позволяют предугадывать работу систем с тепловыделяющими элементами и предотвращать их преждевременный выход из строя. Особую ценность имеют задачи, в которых параметры рабочей среды зависят от внешних факторов (давление, температура и т. п.).

Цель данного исследования — моделирование режимов смешанной конвекции в горизонтальном пористом канале при наличии тепловыделяющего элемента на нижней стенке. Выделение тепла на источнике происходит за счет постоянного теплового потока. Изучаемая область заполнена ньютоновской теплопроводной жидкостью, удовлетворяющей приближению Буссинеска, течение — ламинарное. Вязкость жидкости рассматривается в зависимости от температуры по экспоненциальному закону.

Для математического описания процессов конвективного теплопереноса в пористой зоне была использована модель Дарси — Бринкмана. Дифференциальные уравнения в частных производных, описывающие анализируемый процесс, формулируются на основе нестационарных уравнений для случая переменной вязкости с использованием безразмерных переменных «функция тока — завихренность — температура».

Сформулированная краевая задача реализована численно методом конечных разностей на равномерной сетке. Разработанная вычислительная методика протестирована на серии модельных задач, а также на множестве разностных сеток. Изучено влияние параметра, характеризующего интенсивность тепловыделения источника, пористости среды, а также отдельно проанализированы поля локальных и интегральных характеристик при варьировании параметра изменения вязкости  $S$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-79-20141).

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, доцент М. А. Шеремет

**Дискретно-континуальное моделирование процесса рекристаллизации  
в термобарьерных покрытиях и жаропрочных сплавах  
при интенсивной термической нагрузке**

Д. С. Бабич, Д. Д. Моисеенко, С. В. Панин

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

Высокие требования, предъявляемые к новым материалам, диктуют необходимость создания и развития современных методов компьютерного моделирования поведения сред со структурой в экстремальных условиях нагружения. Большие градиенты температур, циклическая ударная нагрузка могут приводить к катастрофической деградации материала. Экспериментальные исследования модельных образцов и последующие натурные испытания готовых конструкций весьма трудоемки и дорогостоящи. В связи с этим теоретическое прогнозирование на базе компьютерного эксперимента является весьма актуальным.

Разработан новый подход для моделирования процесса рекристаллизации на базе клеточных автоматов с учетом возможности двойникового роста кристаллитов. Метод включает в себя механизмы для моделирования трансформации структуры, переноса тепловой энергии, теплового расширения и зарождения дефектов. В методе явно учитывается пористость и неоднородность структуры материала.

Моделировались образцы с характерным размером активных элементов 60 нм. Размеры образцов  $2.88 \times 2.4 \times 1.6$  мкм<sup>3</sup>. Начальная температура каждого элемента задавалась 300 К, начальные значения деформации напряжений были нулевыми. Величина временного шага — 1 нс. На первой стадии происходит нагрев до 1500 К; на второй стадии — охлаждение до 300 К.

В результате проведенного численного эксперимента было показано, что в пористых образцах процесс рекристаллизации происходит медленней, чем в беспористых. Причем в последних значение коэффициента термического расширения не оказывает влияния на скорость рекристаллизации.

С другой стороны, значение коэффициента термического расширения существенно влияет на характер распространения и степень концентрации дефектов структуры. Например, было показано, что в материале с низким значением коэффициента теплового расширения, величины кривизны и кручения кристаллической решетки выше. Это приводит к формированию новых дефектных структур и последующему усталостному разрушению материала.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Д. Д. Моисеенко

**Численное исследование турбулентной диффузии в щелевой струе**

А. Ю. Баженов, К. И. Борыняк  
Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск,  
Новосибирский государственный университет

Плоская турбулентная струя имеет большое практическое применение в сферах, связанных с переносом массы и тепла. Кроме того, данная область важна для изучения турбулентности, поскольку плоская турбулентная струя является прототипом потока вблизи стенки. Данный поток усложнен тем, что его динамика зависит от двух пограничных слоев стенки и от дворового слоя. Фокус в данной работе был сделан на исследование динамики вихревых структур в различных областях струи. Щелевая струя является сложным течением из-за взаимодействия между двумя пристенными слоями и двумя перпендикулярным им слоями смешения. При этом неустойчивости, генерируемые вблизи стенки, имеющие в основном вид продольных вихрей, будут взаимодействовать с неустойчивостями слоев смешения (типа Кельвина — Гельмгольца). Такое взаимодействие может приводить к различным эффектам, одним из которых является эффект меандрирования струи, с образованием крупномасштабных квазидвумерных вихревых структур.

Интересным вопросом, исследованным на данном этапе, была динамика завихренности и спиральности в струе. На начальном этапе струи различные знаки завихренности расположены в разных слоях смешения. Ниже по потоку завихренность разных знаков поочередно начинает попадать в ядро струи, что интенсифицирует перемешивание. И наконец, в дальней области вихри разных знаков начинают идти друг за другом в продольном направлении.

В настоящей работе были получены поля мгновенной скорости и концентрации с меандрированным поведением, которое объясняется неустойчивостями, вызванными продольными вихрями, образованные в пристеночной области. Интересным эффектом, обнаруженным в данной работе, стал эффект усиления поперечных пульсаций скорости вблизи стенки с удалением вниз по потоку. Вторым интересным эффектом, обнаруженным в работе, является наличие областей с контргradientным переносом концентрации примеси на внешней границе струи.

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

## **Влияние температурной неоднородности на подстилающей поверхности на тепломассоперенос в атмосфере**

М. С. Бобров, Н. Н. Козюлин  
Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск,  
Новосибирский государственный университет

Крупномасштабные неоднородности в распределении пара и влаги, сопровождаемые образованием крупных вертикальных вихрей смерчеобразного типа, давно наблюдаются над незамерзающими водоемами, когда температура окружающего воздуха падает ниже нуля. Подобные водоемы являются источником тепла и влаги, создавая близкие к вертикальным конвективные потоки, в которые вовлекается окружающий холодный воздух. Данный эффект интересен не только сложной для изучения физикой, но и возможностью влияния на местный микроклимат и перенос различных примесей, содержащихся в поверхностном слое атмосферы.

Данная работа посвящена исследованию влияния температурной неоднородности на поверхности земли на образование крупномасштабных вихревых структур, влияющих на тепломассоперенос в атмосфере.

Исследования проводились путем численного моделирования, с использованием схем четвертого порядка точности по пространству и третьего по времени. Расчетная область представляла собой параллелепипед с соотношением сторон  $10 \times 10 \times 1$ . В качестве температурной неоднородности был выбран узкий протяженный участок, температура которого выше температуры окружающей поверхности. Исследовались течения в диапазоне чисел Рэлея от  $10^7$  до  $10^{10}$ . Статистическое исследование результатов проводилось с помощью методов POD (Proper Orthogonal Decomposition) и SPOD (Spectral Proper Orthogonal Decomposition).

В результате работы были обнаружено, что взаимодействие горизонтального градиента температуры на поверхности и силы плавучести приводит к генерации слоев завихренности, ориентированных параллельно температурной неоднородности. Данная вихревая структура индуцирует в окружающем воздухе поле скорости, стягивающая воздух на низких высотах в горизонтальном направлении. При этом возникают периодические горизонтальные колебания положения центрального восходящего потока на низких частотах с образованием пар крупных вертикальных вихрей.

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

## Оптимизация геометрических параметров оребренной поверхности теплообменных аппаратов

А. А. Богунова

Тюменский индустриальный университет

Традиционный расчет теплоотдачи через ребристую стенку при заданном оребрении и значении коэффициента теплоотдачи хорошо изучен и не вызывает затруднений. Другое дело, когда требуется рассчитать само оребрение, т. е. определить наиболее рациональную форму и размеры ребра.

Задачей данного исследования было найти оптимальное сочетание между геометрическими характеристиками оребрения стенки при условии ее наименьшего веса и заданной величине теплового потока через нее.

Для решения поставленной задачи воспользовались наиболее простым случаем, когда ребра прямоугольного сечения постоянной толщины. Рассмотрен случай передачи тепла через плоскую ребристую стенку прямоугольного сечения безграничных размеров. Стенка оребрена со стороны меньшего коэффициента теплоотдачи.

Первый этап решения задачи состоял в определении ряда оптимальных значений геометрических параметров некоторого ребра. Рассматривалась задача получения максимального значения теплового потока  $Q$ , снимаемого с поверхности ребра, при варьировании толщины  $\delta$  и высоты ребра  $l$ . Получение ряда этих значений дало возможность установить зависимость между ними и записать ее аналитически. Решение задачи реализовывалось методом общего одномерного поиска.

Вторым шагом исследования было определение наличия зависимости между указанными параметрами и, в дальнейшем, установление вида этой зависимости.

Был произведен подбор эмпирической зависимости на основании имеющихся данных. Зависимость приобрела вид:  $\delta = 1,008 \cdot l^{1,999}$ .

Поскольку исходные данные для расчета были получены опытным путем, то они вполне могли содержать погрешность, что могло сказаться на расчетах. Поэтому в качестве коэффициентов полученной зависимости взяли округленные значения, т. е. в итоге получили зависимость вида:

$$\delta = l^2.$$

Был проведен анализ полученного уравнения регрессии — найден коэффициент детерминации  $R^2$ . Коэффициент детерминации достаточно близок к единице ( $R^2 = 0,999882$ ), что указывает на то, что выбранное уравнение регрессии хорошо описывает зависимость между переменными.

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

**Исследование динамики закрученной импактной струи  
методом численного моделирования.**

К. И. Борьяняк, А. Ю. Баженов  
Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск,  
Новосибирский государственный университет

В данной работе методом крупных вихрей были проведены расчеты импактной струи с различными степенями закрутки в диапазоне  $S = 0-1$ , организованной соплом с профилем Витошинского. Число Рейнольдса составляло 10 000. Струя, вытекающая в затопленное пространство, натекала перпендикулярно на плоскую преграду конечной толщины, температура противоположной стенки которой была задана равной постоянной величине, отличной от температуры струи внутри сопла на  $10^\circ\text{C}$ .

В данном отчете представлены результаты для расстояния между соплом и преградой в три калибра в приближении бесконечно тонкой пластины (т. е. вся пластина имела постоянную температуру). Для математического моделирования был использован развиваемый в ИТ СО РАН LES-солвер с динамической моделью Смагоринского, основанный на библиотеке OpenFoam. Для уравнения переноса температуры использовалась динамическая модель подсеточной теплопроводности.

На основе полученных в данной работе распределений турбулентного теплового потока вблизи преграды был сделан вывод о корреляции между прохождением вихревых структур во внешнем слое смешения и локальными пульсациями теплового потока вблизи поверхности (для расстояний от лобовой точки больше радиуса сопла). Это свидетельствует о значительной роли вихревых структур в процессе турбулентного теплообмена с преградой вдали от лобовой точки. В работе сделано заключение, что продольные вихревые структуры способствуют теплообмену, индуцируя пульсации скорости в поперечном к стенке направлении.

В случае сильной закрутки струи ( $S = 1$ ), характеризующейся распадом вихревого ядра и образованием центральной зоны рециркуляции вблизи сопла, влияние преграды на структуру и особенности динамики потока было слабым и сказывалось только для расстояния порядка одного калибра. В сильно закрученной струе возникают нестационарные пульсации скорости вследствие прецессии вихревого ядра, которое способствует теплообмену между жидкостью / газом в зоне рециркуляции и струей, поступающей из сопла.

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



## **Исследование кипения в большом объеме на локальном нагревателе с наномодифицированными поверхностями**

В. Ю. Владимиров, Ф. В. Роньшин

Новосибирский государственный университет,

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

Развитие современной микроэлектроники направлено на увеличение вычислительной мощности устройств путем уменьшения размеров полупроводниковых элементов и увеличения плотности их компоновки. В результате значительно возрастает количество тепла, выделяемое единицей поверхности чипа. Однако верхние границы рабочих температур остаются практически неизменными. Данная тенденция требует поиска новых, более эффективных решений для отвода тепла.

Одним из наиболее распространенных методов охлаждения является осуществление фазовых переходов жидкость — газ. Соответственно интенсификация процесса теплообмена при кипении в различных условиях представляет значительный интерес для современной индустрии микроэлектроники. Важным направлением в улучшении эффективности охлаждающих систем таким методом является изменение свойств поверхностей, на которых происходит кипение, путем нанесения покрытий, создания специальной геометрии, выращивания микро- и наноразмерных структур.

В данном исследовании проведены эксперименты по кипению дегазированной, деионизированной воды в большом объеме. Использовался нагреватель, намотанный на медный сердечник диаметром 5 мм. Сердечник был впрессован в тефлоновый диск. На медной поверхности с различными покрытиями (вольфрамовое и молибденовое) методом газоструйного химического осаждения выращивались нанопроволки из оксида кремния. В роли катализатора выступало олово. Из нанопроволок формировались коконы и микроканалы.

Удалось достигнуть интенсификации кипения на поверхности вольфрама с наномодифицированной структурой. Проведено измерение контактного угла методом сидящей капли. Контактный угол до эксперимента составил  $18^\circ$ . С помощью сканирующего электронного микроскопа была изучена морфология поверхностей до и после эксперимента. По результатам серии экспериментов продемонстрировано разрушение микроканалов при кипении. Коконь оказались более устойчивы по сравнению с микроканалами.

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

## Энергосберегающие технологии в бассейне спортивно-оздоровительного комплекса

Н. Б. Гальванцев

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Доклад посвящен анализу работы системы горячего водоснабжения и вентиляции здания спортивного комплекса с плавательным бассейном СК «Зодчий» г. Тюмень. Выявлены источники вторичных энергетических ресурсов и разработаны мероприятия по повышению энергетической эффективности работы систем водоснабжения душевых и системы приточно-вытяжной вентиляции. Произведены укрупненные расчеты энергетических эффектов предлагаемых мероприятий.

Плавательный бассейн является крупным источником сброса низкопотенциальной тепловой энергии. Для повышения эффективности работы бассейна возможно несколько направлений энергосбережения: использование тепла сточных вод душевых; использование тепла и влаги воздуха системы вентиляции.

Утилизация теплоты сточной воды от душевых для нагрева воды на горячее водоснабжение эффективное мероприятие в области энергосбережения, хотя и имеет ряд недостатков в связи с высокой коррозионной активностью сточных вод и загрязнением теплообменных аппаратов. Нами предлагается противоточный медный теплообменник типа «труба в трубе» с фильтрационной сетки на входе. В теплообменнике организовано самотечное движение греющих и нагреваемых сред. Теплообменное устройство будет служить первой ступенью для нагрева воды на горячее водоснабжение душевых. В качестве второй ступени будет использоваться теплообменник, в котором греющей средой будет вода из тепловой сети или тепловой насос.

Нагрузка на горячее водоснабжение составляет 81,2 кВт. Заменяв первую ступень нагрева холодной воды с 10 до 17 °С, на сточных водах тепловая нагрузка снижается на 28 % (22,73 кВт). При использовании теплового насоса тепловая энергия централизованного источника не используется, затраты электроэнергии составят 14,6 кВт.

Со стороны приточно-вентиляционной системы предлагается рекуперация тепла с тепловым насосом в качестве осушителя. Потребления тепловой энергии при применении рекуперации при расчетной температуре воздуха составит 414,4 кВт, а экономия — 652,6 кВт тепловой энергии. При включении теплового насоса потребность в тепловой энергии от стороннего источника отсутствует, но затраты на электрическую энергию составят 104,8 кВт.

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

**Экспериментальное исследование двухфазного течения в прямоугольных широких микроканалах  $0,05 \times 10$  и  $0,15 \times 10$  мм<sup>2</sup>**

Ю. А. Дементьев, Ф. В. Роньшин

Новосибирский государственный университет,

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

В настоящее время наблюдается большой интерес к исследованиям, связанным с капиллярной гидродинамикой и теплообменом в микроканальных системах, где характерные размеры канала составляют сотни микрон. Увеличение числа полупроводниковых элементов на единицу площади обуславливает высокую интенсивность тепловыделения в микроэлектронных системах. Поэтому важной задачей является оптимизация охлаждения микроэлектронных систем с наибольшим коэффициентом теплоотдачи. В связи с этим для широкого круга технических приложений важное значение имеет понимание гидродинамики в микроканалах, где происходят наиболее эффективные процессы тепло- и массопередачи.

Двухфазные системы имеют большой потенциал для решения задачи охлаждения. В большинстве работ используются длинные микроканалы, однако короткие каналы являются более перспективными для охлаждения миниатюрных устройств с высоким тепловыделением, таких как микрочипы. В теплообменниках на основе коротких микроканалов могут быть достигнуты достаточно малые перепады давления. Установлено, что высота и ширина горизонтального микроканала существенно влияют на границы между режимами течений в микроканале.

В работе экспериментально исследовано двухфазное течение вода-азот в каналах размером  $0,05 \times 10$  и  $0,15 \times 10$  мм<sup>2</sup>. Разработанная шлирен-методика позволила зарегистрировать основные параметры двухфазного течения, такие как плёнки на верхней и нижней стенках микроканала. Было выделено и описано пять режимов течения: струйный, пузырьковый, вспененный, раздельный и кольцевой. Была написана программа в среде Matlab, которая позволила определить количественные характеристики режимов, такие как газосодержание, области верхней и нижней плёнок, частоты образования пузырей, перепад давления. На основании количественных характеристик построены критерии переходов между режимами и режимные карты. Также, был экспериментально измерен перепад давления в микроканале. Показано, что максимальный перепад давления достигает почти две атмосферы.

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

**Экспериментальное исследование прецессирующего  
двойного вихря в гидродинамической вихревой камере**

С. В. Дремов

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

Изучение закрученных потоков представляет собой важную часть современной гидродинамики. Особую роль в данном направлении занимают крупномасштабные вихревые структуры. Исследование подобных структур имеет большую ценность, как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения, так как они регулярно встречаются в природе и в технических устройствах. Среди множества режимов вихревого течения, наиболее уникальным является режим стабильного прецессирующего двойного вихря. Сравнительно небольшое количество экспериментальных данных по подобному режиму является основной проблемой, сдерживающей развитие теорий для описания этого объекта.

Целью работы является получение количественных данных о прецессирующей двойной вихревой структуре. Исследования проводились на замкнутом гидродинамическом контуре. Основными параметрами являлись число Рейнольдса и конструктивный параметр крутки. Режим двойного вихря наблюдался в широком диапазоне параметров.

В работе использовался метод цифровой трассерной визуализации. С его помощью были измерены как средние по времени, так и мгновенные профили тангенциальной и аксиальной скорости. Профили позволили определить основные параметры вихревых ядер, которые в дальнейшем можно будет использовать в построениях различных теоретических моделей.

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

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

**Изучение проникновения фонового газа  
в сверхзвуковую струю аргона в условиях развитой конденсации**

К. А. Дубровин

Новосибирский государственный университет

Вопрос проникновения фонового газа внутрь сформированной сверхзвуковой струи исследуется уже давно. Однако при изучении сверхзвуковой струи в условиях развитой конденсации была обнаружена область вторичного потока нетрадиционной формы, образованной кластерами больших размеров («след», [1]), которая может вносить изменения в проникновение фонового газа внутрь струи. В данной работе поставлена задача отладки и проведения спектральных измерений в сверхзвуковых струях газов с целью подтверждения или опровержения изменения степени проникновения фонового газа в сверхзвуковую струю со «следом».

Работа выполнена на вакуумном экспериментальном газодинамическом стенде отдела прикладной физики физического факультета НГУ «ЛЭМ-ПУС-2» в потоках аргона при добавлении в состав фонового газа примеси азота  $N_2$ .

В ходе работы отлажена система регистрации излучения, возбужденного электронным пучком с энергией свыше 15 кэВ, на различных участках первичной струи («бочки») и «следа». Получены соответствующие поправки, учитывающие влияние рассеяния электронов на фоновом газе, нелинейности зависимости излучения от плотности фонового газа и прочие. Была выполнена серия измерений в видимом и УФ-диапазоне с помощью спектрометра Ocean Optics USB4000, получены кривые изменения интенсивности излучения газа в потоке при перемещении области измерений вдоль оси струи и поперек неё на разных расстояниях от сверхзвукового сопла. Предложена эмпирическая модель проникновения фонового газа в сверхзвуковую струю с образованной вторичной структурой («следом»).

---

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

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

## **Гидродинамика и теплообмен опускающего пузырькового течения при малом газосодержании**

И. А. Евдокименко

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

В настоящее время изучение двухфазных потоков является актуальной проблемой, что подтверждают достаточно много исследований, берущих своё начало с середины прошлого века. Большая часть этих работ посвящена восходящим течениям, а опускающие потоки нуждаются в более глубоком изучении.

Существует несколько различных режимов течений двухфазных потоков: пенные, снарядные, пузырьковые и пленочные. В данной работе был рассмотрен пузырьковый режим течения.

Из выполненных ранее работ известно, что изменение размера и количества пузырей влияет на локальную гидродинамику потока и, соответственно, теплообмен. Однако степень влияния дисперсного состава на характеристики потока является открытым вопросом.

Были получены данные о влиянии газосодержания на гидродинамику и теплообмен нисходящих потоков. Эксперименты проводились в вертикальной трубе с внутренним диаметром 20 мм. При заданной скорости потока 0,3 м/с и числе Рейнольдса, равному 6000, количество и размер пузырей регулировались изменением скорости «срезающего» потока жидкости вблизи торцов системы капилляров. Для определения положения пузырей использовался метод плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции (ПЛИФ, PLIF), комбинированный с методом цифровой трассерной визуализации (PIV). Влияние дисперсного состава газовой фазы на теплообмен измерялось с помощью тепловизора и миниатюрных резистивных датчиков температуры с номинальным сопротивлением 1000 Ом при 0 °С. Для измерения теплообмена производился нагрев тонкостенного участка трубы длиной 520 мм и толщиной стенки 0,2 мм. Нагрев производился с помощью источника питания постоянного электрического тока.

В результате были получены данные по распределению скорости жидкости по сечению канала и влиянию пузырей разных размеров на теплообмен.

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

**Коррекция распределения поля скорости при изготовлении макета распределителя газовых потоков каталитических реакторов окисления летучих органических соединений**

С. В. Какаулин, Д. П. Езеендеева, М. Р. Гордиенко

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

Современной проблемой в области экологической безопасности является снижение выбросов вредных веществ в атмосферу. Актуально создание компактных, энергоэффективных каталитических установок для обезвреживания газовых выбросов летучих органических соединений. Ключевым компонентом таких установок является катализаторный картридж, однако эффективность его работы обеспечивается за счет подачи в картридж газового потока с равномерным полем скоростей. При возникновении неустойчивостей потока необходима коррекция поля скорости для эффективной работы каталитического картриджа.

Работа направлена на коррекцию распределения поля скорости при изготовлении макета распределителя газовых потоков каталитических реакторов окисления летучих органических соединений.

Для эффективного распределения газового потока в каталитической установке разработан и создан макет распределителя газовых потоков и аэродинамический измерительный стенд для его испытаний. Макет состоит из следующих блоков: секция смесителя, секция контроля, поворотное устройство, секция катализатора, узел форсунки. Из-за наличия поворотного устройства вследствие искривления течения потока на поток действуют центробежные силы, направленные от центра кривизны к внешней стенке воздуховода распределителя газовых потоков. Это воздействие обуславливает образование интенсивного струйного течения у внешней стенки и образование вихревой зоны, распространяющейся от поворота до каталитического картриджа. Такой характер течения сокращает сечение основного потока и существенно ослабляет эффективность работы каталитического картриджа. Для коррекции поля скорости перед каталитическим картриджем изготовлены крыловидные вставки в поворотном устройстве. Вставки изготавливались на 3D-принтере. Контроль поля скорости производился методом лазерной доплеровской анемометрии. Крыловидные вставки плавно поворачивали поток, обеспечивая тем самым равномерное поле скорости на каталитическом картридже и снижение гидравлического сопротивления.

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

**Численное исследование передачи температурных пульсаций  
турбулентным потоком газа при обтекании тонких пленок  
из пьезоэлектрического материала**

Н. Н. Козюлин, М. С. Бобров  
Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск,  
Новосибирский государственный университет

Идея преобразования низкопотенциального тепла в электрическую энергию очень актуальна (например, повышение КПД отдельных устройств, сбор энергии окружающей среды).

В данной работе моделировался прототип электропреобразователя, использующего пьезоэлектрический эффект. Было исследовано проникновение пульсаций температуры из турбулентного потока газа в массив тонких пластин (200 нм) из твердого материала с параметрами типичного сегнетоэлектрика ( $\text{BaTiO}_3$ ).

Также была проведена серия расчетов с разным интегральным масштабом турбулентных пульсаций (0,00008 м; 0,00025 м; 0,00075 м). Была использована трехмерная модель, учитывающая неоднородности потока тепла. Особое внимание было обращено на задание входных начальных условий. Используемый метод задания турбулентных условий на входе — генерация анизотропной синтетической турбулентности без дивергенции в потоке, аналогичен заданию поля температур.

В данной работе было исследовано два случая: случай корреляции пульсаций продольных компонент скорости и температуры и случай, когда пульсации продольных скоростей и температуры нескоррелированы. Целью данного исследования было сравнение процессов теплообмена в этих случаях. На основе этого можно сделать вывод о том, какие условия влияют на интенсификацию теплообмена.

Было показано, что вихревые структуры пограничного слоя, представляющие собой продольные вихри, приводят к тому, что пространственные флуктуации температуры в пластине вдоль продольного сечения пластин имеют существенно меньшую амплитуду, чем вдоль поперечного потока сечения. Такое распределение температуры позволяет в теории предложить схему утилизации тепловой энергии путем установки на пластину продольных полосчатых электродов с шириной соответствующей среднему расстоянию между продольными вихрями в пограничном слое. Было показано, что при наличии корреляции между флуктуациями скорости и температуры интенсивность теплообмена увеличивается.

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



## **Исследование эффективности теплообменных аппаратов со вставками из пористого алюминия**

А. В. Макаров

Тюменский индустриальный университет

Повсеместное применение теплообменных аппаратов делает актуальным вопрос уменьшения их габаритов и металлоемкости при сохранении необходимой эффективности. Успешное решение данной задачи осуществимо главным образом с помощью интенсификации теплообмена.

Особый интерес представляет использование вставок из материалов с открытой пористостью для интенсификации процессов теплообмена. Сочетание широкого диапазона свойств и простоты изготовления элементов конструкций из пористых материалов позволяет использовать их в самых различных условиях. Кроме того, с помощью пористых элементов можно реализовать процессы фильтрации, дросселирования, разделения фаз и т. д.

Характеристики теплообменных аппаратов со вставками из пористых материалов зависят от множества различных переменных: как от свойств самого пористого материала (геометрии канала, диаметра пор, коэффициента теплопередачи), так и от параметров потока (одно- или двухфазная среда, давление, температура, массовый расход и т. д.). В связи с этим расчет и проектирование подобных теплообменных аппаратов представляет собой достаточно нетривиальную задачу.

В представленной работе проведена интерпретация результатов эксперимента по исследованию эффективности испарителей со вставками из пористого алюминия по сравнению с обычным кожухотрубным испарителем с аналогичными геометрическими параметрами. Оценка производилась с помощью построения графиков зависимости безразмерных критериев Стантона и Рейнольдса.

Научный руководитель — С. О. Захаренко

## Численное моделирование частичного разряда в гелиевом пузырьке

М. Б. Мередова

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

Одним из эффективных способов исследования изоляции в высоковольтном оборудовании является метод регистрации частичных разрядов (ЧР). Оборудование подвержено возникновению неисправностей вследствие того, что в твердом диэлектрике со временем появляются трещины и газовые полости. В этих полостях под действием высокого напряжения время от времени происходит формирование электронных лавин, в результате чего газ в полости ионизируется, и газовая полость ведет себя как проводник в течение короткого времени  $\sim 10$  нс. Таким образом, исследование лавинных процессов в газовом пузырьке необходимо для понимания физики ЧР в диэлектрической изоляции.

В настоящей работе исследовано влияние развития лавин в газовой полости, заполненной гелием, на амплитуду и импульса тока при ЧР в твердом диэлектрике.

Промежуток между плоскими электродами считался заполненным твердым диэлектриком с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon > 2$ . Круглое включение с  $\varepsilon = 1$ , имитирующее газовую полость, помещалось на оси симметрии промежутка. Расчет электрического поля выполнялся с помощью уравнения Пуассона со значениями потенциала  $\varphi = U_0$  на нижнем электроде и на верхнем электроде. Решались уравнения переноса для электронов, отрицательных ионов с учетом процессов ударной ионизации, фотоионизации, рекомбинации и диффузии. Исследовались распределение концентраций заряженных частиц в пузырьке, напряженность электрического поля, форма импульсов тока, заряд, прошедший во внешней цепи, и заряд на стенках пузырька, образовавшийся при ЧР.

Работа поддержана грантом РФФИ № 16-19-10229.

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

## **Устройство и применение генератора горящих и тлеющих частиц для моделирования природных пожаров**

В. В. Перминов

Томский государственный университет

В литературе известно, что распространение природных пожаров осуществляется за счет нескольких механизмов — радиационного и конвективного переноса тепла от пламени и переноса горящих частиц. В ряде случаев определяющую роль зажигания лесных горючих материалов (ЛГМ) и распространения пожаров играют горящие и тлеющие частицы, которые переносятся конвективной колонкой фронта пожара и ветром, что приводит к образованию новых очагов. В результате проведения натурных экспериментов установлено, что в качестве горящих и тлеющих частиц при прохождении фронта пожара выступает кора деревьев, а также веточки [1].

В 2015 году в Институте оптики атмосферы СО РАН была сконструирована и изготовлена уникальная установка для генерации горящих и тлеющих частиц различного вида, размера и формы. Конструкция генератора позволяет широко варьировать энергетическими характеристиками потока горящих частиц.

В работе описываются основные параметры установки, подбор оптимальных режимов работы установки, в соответствии с характеристиками реальных пожаров. В результате в полунатурных условиях экспериментально исследован перенос горящих и тлеющих частиц коры и веточек сосны и условий зажигания ими подстилающей поверхности. Использование бесконтактного метода ИК-диагностики позволило оценить температуру переносимых частиц, а также скорость их перемещения.

---

1. *Filkov A., et al.* Investigation of firebrand production during prescribed fires conducted in a pine forest // Proceedings of the Combustion Institute. 2017. V. 36. № 2. P. 3263–3270.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Д. П. Касымов

## **Повышение энергоэффективности в системах газоснабжения за счет утилизации теплоты уходящих газов на базе двигателя Стирлинга**

А. Л. Распутин

Тюменский индустриальный университет

На компрессорных станциях магистральных газопроводов газотурбинные установки используются для привода центробежных компрессоров, повышающих давление в трубопроводе. Большая часть энергии, обеспечивающей привод турбины, отводится в виде теплоты в потоке выхлопных газов. В статье кратко излагаются исследования, проведенные для оценки целесообразности утилизации уходящих газов газоперекачивающих агрегатов для выработки электроэнергии.

Поиск новых источников энергии неизбежен, поскольку мировой спрос на энергию постоянно растет и растут цены на традиционную энергию. Газовая турбина является одним из источников энергии, который применяется в различных отраслях промышленности. Одним из способов повышения эффективности газовой турбины является способ объединения газовой турбины с другим тепловым двигателем, который может значительно повысить эффективность. Таким тепловым двигателем является двигатель Стирлинга. Выхлопные газы ГТУ поступают в нагреватель двигателя Стирлинга, обеспечивая его теплотой, необходимой для работы. Расчеты производительности двигателя Стирлинга показывают возможность получения до нескольких сотен кВт электроэнергии от выхлопа газовой турбины.

В 215 линейных компрессорных станциях, входящих в состав ЕСГ (единой системы газоснабжения) России, имеется около 3300 газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом. Была произведена оценка общей величины тепловой мощности выхлопных газов всех ГТУ, входящих в состав ЕСГ, которая составила 87,8 ГВт. Применение утилизационного комплекса на основе двигателя Стирлинга позволит вырабатывать дополнительную электроэнергию, которую можно использовать для собственных нужд компрессорной станции. Срок окупаемости двигателя Стирлинга с его установкой составляет три — четыре года.

Таким образом, можно сделать вывод, что в России существуют большие возможности в сфере энергосбережения и увеличения энергоэффективности в системах газоснабжения при помощи утилизации теплоты уходящих газов газоперекачивающих агрегатов.

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

## **Повышение энергоэффективности работы газотурбинных установок на компрессорных станциях магистральных газопроводов**

Н. В. Рыдалина

Тюменский индустриальный университет

Энергетической стратегией России на период до 2020 года предусматривается сокращение потерь и снижение затрат на всех стадиях технологического процесса при добыче, подготовке и транспорте газа.

Поэтому вопрос повышения энергоэффективности ГТУ на компрессорных станциях магистральных газопроводов на современном этапе является актуальным.

В работе разработан комплекс мер, направленных на экономию топлива и снижению затрат на электроэнергию при работе ГТУ на компрессорных станциях магистральных газопроводов.

Прежде всего проведена оценка изменения удельной мощности ГТУ в зависимости от температуры наружного воздуха. В результате получено увеличение удельной мощности при понижении температуры наружного воздуха и одновременно увеличение расхода топлива.

В целях уменьшения расхода топлива и приближения режима работы ГТУ к номинальному предложено использовать подогрев воздуха, поступающего в компрессор, с одновременным подогревом газа перед поступлением его в камеру сгорания. Предложена схема, позволяющая улучшить показатели работы ГТУ.

Были исследованы кожухотрубчатые теплообменные аппараты с трубами  $25 \times 2$  мм, позволяющие нагревать газ и воздух до необходимых температур.

Произведен расчет экономии топлива при подогреве воздуха перед поступлением в компрессор: средняя экономия составляет 15 %, а в случае подогрева газа — 2 %.

Проведен также расчет экономии электроэнергии за счет выработки ее на детандер-генераторе ТДА-СРТ-100/130-5,5/0,6 ВРД для ГТК-16. В результате экономия электроэнергии на работу самой ГТУ составила 83 %. В расчетах не учитывалось вспомогательное оборудование: вентиляция, отопление, освещение и т. п.

Таким образом, можно заключить, что проект экономически эффективен.

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

**Экспериментальное исследование коэффициентов теплопроводности и температуропроводности неодима в конденсированном состоянии методом лазерной вспышки**

Д. А. Самошкин, А. Р. Хайрулин

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

Активное изучение свойств лантаноидов началось с конца 50-х годов прошлого столетия, когда были разработаны методики их очистки и получены металлы со сравнительно малым содержанием примесей. Тем не менее до настоящего времени многие свойства редкоземельных металлов (РЗМ) экспериментально не исследованы либо изучены недостаточно. В настоящее время теплопроводность и температуропроводность лантаноидов изучена наиболее тщательно в низкотемпературной области и области умеренных температур (вблизи 293 К). В области высоких температур, соответствующих твердой фазе, данные по теплофизическим характеристикам РЗМ являются фрагментарными, а в ряде случаев противоречивыми.

Анализ литературы показал, что данные по тепло- и температуропроводности легких РЗМ в жидком состоянии малочисленны, малоинформативны и противоречивы (характер изменения теплопроводности с температурой не воспроизводится). Кроме того, результаты измерений могут существенно расходиться за пределы суммарных погрешностей. В связи с этим полученные нами экспериментальные результаты позволяют заполнить подобный пробел и уточнить существующую информацию о коэффициентах переноса тепла неодима в широком интервале температур конденсированного состояния.

Были проведены измерения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности неодима в интервале температур 295–1770 К методом лазерной вспышки с погрешностью 2–5 %. Подробно исследовано поведение температурной зависимости измеренных свойств в широком интервале температур твердого и жидкого состояний, включая области фазовых переходов. Разработаны аппроксимационные уравнения и таблицы справочных данных для научного и практического использования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-79-10237).

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

## Численное моделирование стационарного течения в треугольном микроканале

Н. Е. Сибиряков

Новосибирский государственный университет

В данной работе рассматривается стационарное течение жидкости в микроканале с треугольным сечением.

Движение жидкости происходит не только из-за внешних сил, но и из-за разности давлений внутри жидкости, вызванной различной кривизной поверхности. В тонких пленках жидкости течение можно считать ламинарным — это существенно упрощает основные уравнения гидродинамики. В нашей модели температура стенок и всего объема жидкости поддерживается постоянной. На свободной границе жидкости происходит испарение, которое пропорционально площади свободной границы и температуре жидкости. Из-за испарения меняется толщина жидкости в канале и возникает дополнительное условие на нормальную компоненту скорости на границе. Поскольку размер канала мал, поверхность жидкости в сечении можно считать дугой окружности.

Угол между касательной к границе жидкости и касательной к поверхности называется контактным углом смачивания, который в данном решении считается постоянным. При такой постановке задачи аналитически находится связь между кривизной поверхности и высотой воды в канале. Кривизну поверхности и угол раствора канала дают элемент площади свободной границы. При усреднении скорость жидкости в канале по сечению, стационарное течение жидкости описываются системой из двух обыкновенных дифференциальных уравнений: одно — на изменение скорости вдоль канала, второе — на изменение толщины слоя жидкости.

Полученную систему уравнений, учитывающую наклон канала, мы решали численно по методу Рунге-Кутты. Начальные условия заданы на входе в канал: обезразмеренные скорость и высота равны 1. Если пренебречь влиянием силы тяжести, то у полученной системы можно найти первый интеграл и свести ее к одному уравнению.

Моделирование позволяет предсказывать форму жидкости в канале для различных значений параметров: поверхностного натяжения жидкости, контактного угла смачивания, угла раствора канала, теплоты испарения. Численные и аналитические расчеты показывают, что толщина пленки монотонно падает, а скорость растет. Это связано с тем, что при движении жидкости в таком микроканале ее толщина уменьшается. Но при этом уменьшается и радиус кривизны жидкости. Значит, давление внутри уменьшается, а скорость жидкости увеличивается.

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

## **Особенности применения цикла Майсоценко в устройствах кондиционирования воздуха**

Д. С. Суровнев

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Здоровье, трудоспособность, а также общее самочувствие человека значительным образом определяется условиями микроклимата в помещениях, где он проводит большую часть своего времени. Ежедневно каждый человек потребляет порядка 15 кг воздуха, поэтому очень важно, чтобы он не оказывал пагубное влияние на здоровье человека. Системы кондиционирования воздуха обуславливают комфорт нашей жизни, подавая свежий воздух в помещение и при этом охлаждая его до комфортных для человека температур. Несмотря на свою полезность, традиционные устройства кондиционирования воздуха имеют весомый недостаток — значительные затраты на электроэнергию, поэтому потребность в использовании устройств, позволяющих существенно сократить затраты на энергоносители, очень востребована.

В данной работе мы предлагаем рассмотреть системы кондиционирования, работающие на основе цикла Майсоценко. Устройства, в основе работы которых лежит цикл Майсоценко, позволяют организовать кондиционирование с минимальными требованиями к энергетическим мощностям. В сравнении с традиционными системами кондиционирования, потребление энергии кондиционерами, работающими по циклу Майсоценко, снижено в 10 раз. Помимо незначительных затрат на электроэнергию у кондиционеров на основе цикла Майсоценко есть еще одно значимое преимущество — отсутствие химических хладагентов. Исследуемые в данной работе системы кондиционирования работают на природном, экологически чистом принципе. Таким образом, рассматриваемые устройства кондиционирования воздуха справляются сразу с двумя важными вопросами: потребление человеком свежего воздуха и минимальные затраты на электроэнергию.

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



**Динамика сухих пятен в пленке жидкости, движущейся под действием потока газа в миканале, при интенсивном локальном нагреве**

Е. М. Ткаченко

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

Проведены экспериментальные исследования гидродинамики и кризиса теплообмена при двухфазном течении в миканале при интенсивном нагреве от источника тепла  $1 \times 1 \text{ см}^2$ . Был проведен анализ экспериментальных фотографий с помощью программного обеспечения ImageJ. Установлено, что с ростом теплового потока суммарная площадь сухих пятен на нагревателе увеличивается, но при достижении определенной температуры поверхности нагревателя ( $\approx 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ) площадь сухих пятен начинает уменьшаться. В предкризисный момент почти весь нагреватель покрывается тонкой пленкой жидкости, в которой с большой частотой возникают и исчезают мелкомасштабные сухие пятна. Также была посчитана длина контактной линии. В отличие от суммарной площади сухих пятен, суммарная длина контактной линии увеличивается с увеличением теплового потока и перед кризисом достигает максимального значения.

Для детального изучения динамики образования и замывания сухого пятна были проведены эксперименты с высокоскоростной визуализацией. Для визуализации использовалась высокоскоростная камера FASTCAM SA1.1 CCD. Скорость съемки данной камеры может варьироваться от 5400 кадров в секунду при разрешении  $1024 \times 1024$  пикселей и до 675000 кадров в секунду при разрешениях менее  $1024 \times 1024$  пикселей. Камера оборудована оптической системой высокого пространственного разрешения (до 500 нм на 1 пиксель сенсора камеры). При визуальном анализе данных высокоскоростной визуализации (скорость съемки 100000 кадров в секунду) можно выделить несколько стадий образования сухого пятна: в начальный момент мы можем наблюдать сплошную пленку жидкости, далее возникает неоднородность пленки, затем очень быстро происходит ее разрыв, что приводит к образованию сухого пятна, далее наблюдается развитие данного пятна, а затем, через короткий промежуток времени, происходит замывание данного пятна. Таким образом, время жизни одного пятна составляет порядка 1 мс. Размер таких пятен составляет порядка 100 мкм.

Также было установлено, что при тепловом потоке  $450 \text{ Вт/см}^2$  на поверхности нагревателя ( $1 \text{ см}^2$ ) образуется и замывается около 1 млн сухих пятен за 1 секунду.

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

## Исследование особенностей горения водорода в высокоплотных смесях $\text{H}_2/\text{O}_2/\text{N}_2$ , $\text{H}_2/\text{O}_2/\text{CO}_2$ и $\text{H}_2/\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$

Д. С. Третьяков

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

Сжигание ископаемых топлив непосредственно в теплоносителе (сверхкритическая вода или водяной пар) повышает энергоэффективность и экологическую чистоту производства тепловой энергии [1].

Обзор данных по горению смеси  $\text{H}_2/\text{O}_2$  показал, что влияние азота, диоксида углерода и водяного пара на горение водорода в области низких температур ( $T < 723 \text{ K}$ ) и повышенных давлений ( $P > 0,1 \text{ МПа}$ ) слабо исследовано. В представленной работе впервые получены данные об особенностях горения высокоплотных смесей  $\text{H}_2/\text{O}_2/\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2/\text{O}_2/\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2/\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$  при равномерном медленном нагреве ( $1 \text{ K/мин}$ ) трубчатого реактора.

Методика, основанная на сравнении температуры реакционной смеси в центре реактора и температуры внешней стенки реактора, позволила определить вклад гомогенных и гетерогенных экзотермических реакций в тепловыделение при горении  $\text{H}_2$ . Исходя из временных зависимостей прироста температуры реакционных смесей, вызванного тепловыделением при окислении  $\text{H}_2$ , обнаружено, что температура самовоспламенения смесей  $\text{H}_2/\text{O}_2/\text{N}_2$  и  $\text{H}_2/\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$  на  $\approx 30 \text{ K}$  ниже, чем смеси  $\text{H}_2/\text{O}_2/\text{CO}_2$ . В отличие от горения  $\text{H}_2$  в среде  $\text{N}_2$  при определенных концентрациях реагентов в среде  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  зарегистрирован цепно-тепловой взрыв.

Установлено, что факторами, определяющими динамику окисления в среде  $\text{CO}_2$ , являются высокая теплоемкость смеси  $\text{H}_2/\text{O}_2/\text{CO}_2$ , химическое взаимодействие между ее компонентами и наличие адсорбированных молекул  $\text{CO}_2$  на внутренней поверхности реактора. Показано, что небольшая добавка воды к смеси  $\text{H}_2/\text{O}_2/\text{CO}_2$  приводит к цепно-тепловому взрыву. При окислении  $\text{H}_2$  в среде  $\text{H}_2\text{O}$  процесс протекает на фоне испарения воды и, как следствие, увеличения теплоемкости и теплопроводности реакционной смеси  $\text{H}_2/\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ ; реализации цепно-теплового взрыва способствует одновременное увеличение плотности реагентов и разбавителя.

Из полученных результатов следует, что при горении параметры системы ( $T$ ,  $P$ ), выше которых происходит цепно-тепловой взрыв, существенно зависят не только от концентрации реагентов, но и от природы разбавителя.

---

1. *Queiroz J. P. S., Bermejo M. D., Mato F., Cocero M. J.* // *J. Supercrit. Fluids*. 2015. V. 96. P. 103–113.

Научный руководитель — д-р хим. наук, доцент О. Н. Федяева

## **Динамика роста и отрыва паровых пузырей при кипении жидкостей на гладкой поверхности**

В. В. Туманов, В. С. Сердюков  
Новосибирский государственный университет,  
Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе

Несмотря на огромное количество работ, посвященных исследованию различных аспектов процесса пузырькового кипения, на сегодняшний момент общепринятая теория процесса отсутствует. В частности, многими исследователями было показано значительное влияние испарения микрослоя жидкости на процесс роста парового пузыря и локальный теплообмен в области активного центра парообразования.

В настоящей работе с использованием одновременно высокоскоростных методов измерения поля температур тепловыделяющей поверхности и макро-визуализации процесса с нижней стороны прозрачного нагревателя детально изучена эволюция размеров паровых пузырей, области микрослоя, а также сухого пятна, ограниченного контактной линией, при кипении жидкостей в области малых тепловых потоков.

В качестве рабочих жидкостей в экспериментах использовались деионизированная вода и этиловый спирт на линии насыщения при атмосферном давлении. Проводящая пленка из оксида индия-олова (ИТО), напыленная на сапфировую подложку, использовалась в качестве нагревателя.

В исследовании представлены новые опытные данные по эволюции паровых пузырей при кипении жидкостей на гладком нагревателе в широком диапазоне тепловых потоков. Используемая в работе экспериментальная методика позволила не только измерить внешний диаметр парового пузыря, но и регистрировать размеры области микрослоя жидкости и границу сухого пятна. Также в работе изучены особенности поведения двухфазного слоя вблизи поверхности нагревателя и сухих пятен при развитом и предкризисном режимах кипения жидкостей.

Полученная в исследовании экспериментальная информация может использоваться в будущем для формирования новых теоретических подходов при описании основных локальных характеристик процесса кипения, включая эволюцию различных областей теплообмена под паровым пузырем, отрывной диаметр, частоту зародышеобразования, развитие кризисных явлений и т. д.

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

## **Нестационарная аккумуляция инерционных частиц в турбулентном течении в плоском канале**

И. В. Хомченко

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

Изучение явления аккумуляции частиц в вязком подслое в пристенных турбулентных течениях имеет большую практическую важность для многих практических приложений, в которых встречаются турбулентные аэрозольные и газодисперсные потоки. Хотя аккумуляция приводит к росту концентрации частиц вблизи стенки на два-три порядка в сравнении с ядром потока, явление аккумуляции до сих пор остается мало изученным. Поэтому задача разработки новых статистических моделей пристенных турбулентных потоков, которые учитывают эффекты неравновесности и нелокальности, остается актуальной и по сей день.

Целью работы являлось исследование развития во времени процесса аккумуляции инерционных частиц с помощью прямого численного моделирования эволюции поля концентрации частиц в турбулентном течении в плоском канале с числом Рейнольдса, построенным по полуширине канала и динамической скорости  $Re_\tau = 180$ . В работе проводилось прямое численное моделирование динамики твердых точечных частиц в несжимаемой среде. Концентрация частиц предполагалась малой, влиянием частиц на турбулентный поток среды пренебрегалось. При разработке модели движения частиц и расчете ее траектории были использованы методы Галеркина, спектральных элементов, Адамса — Бэшфорта третьего порядка и интерполяционные полиномы Лагранжа. Для расчета турбулентного течения в канале была использована программа Nek5000.

Сравнение расчетных профилей концентрации с полученным ранее аналитическим выражением, справедливым в пределе больших времен, показало хорошее соответствие.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доцент Д. Ф. Сиковский

## Исследование ограниченного вихревого потока двухкомпонентной жидкости в цилиндрическом контейнере

Б. Р. Шарифуллин

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

В последнее годы во многих отраслях, таких как медицина, микробиологическая промышленность, нефтехимическая промышленность и т. д., требуется обеспечение мягкого, но эффективного перемешивания жидкостей, что приводит к необходимости создания вихревых биореакторов. Для исследования нелинейных эффектов в потоке вихревого биореактора лучше всего использовать модель двухкомпонентной системы несмешиваемых жидкостей различной кинематической вязкости и близкой плотности.

Целью работы является экспериментальное исследование закономерностей вихревого течения двухкомпонентной несмешиваемой жидкости в моделях ограниченных вихревых реакторов.

Исследования проведены в вертикальном цилиндрическом контейнере с верхним вращающимся диском. Контейнер заполнен двумя не смешивающимися жидкостями: 80%-м раствором глицерина (г) и подсолнечным маслом (о). При комнатной температуре (22,6 °С), плотности и кинематические вязкости рабочих жидкостей составляли  $\rho_g = 1208 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_o = 920 \text{ кг/м}^3$ ,  $\nu_g = 42,82 \text{ мм}^2/\text{с}$ , и  $\nu_o = 54,86 \text{ мм}^2/\text{с}$ . Поверхностное натяжение на границе раздела жидкостей  $\sigma = 0,0315 \text{ Н/м}$ . Эффект поверхностного натяжения обеспечивает устойчивую границу раздела. В данной конфигурации вихревое движение жидкости определяется числом Рейнольдса  $Re = \omega R_c / \nu_g$ , где  $\omega$  — угловая скорость вращения диска,  $R_c = 45 \text{ мм}$  — радиус цилиндрического контейнера.

При  $Re < 250$ , когда граница раздела плоская, эффект поверхностного натяжения мал и в растворе глицерина возникает тонкий слой циркуляции. При увеличении  $Re$  поверхностное натяжение начинает влиять на форму границы раздела, граница раздела деформируется, поднимаясь вверх вблизи оси и опускаясь вниз на периферии. При  $Re > 600$  в масле на оси появляется вихревая ячейка, а при  $Re > 1400$  течение становится неустойчивым.

В ходе работ определены общие закономерности деформации границы раздела и возникновения рециркуляционных зон. Сформулированы обобщающие зависимости и особенности массопереноса.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-00508.

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

## **Эволюция монослоя из левитирующих микрокапель над поверхностью нагретой жидкости**

А. И. Шатекова

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

Известно, что над нагреваемой жидкостью может образовываться структурированный монослой, состоящий из левитирующих микрокапель жидкости. Монослой состоит из нескольких сотен или тысяч капель размером порядка 10 мкм, образующих гексагональную структуру.

Исследование левитации микрокапель жидкости актуально для некоторых приложений. Например, при доставке лекарств спреями внутрь организма важно знать при каких условиях капли не касаются поверхности организма. Также условия левитации микрокапель необходимо знать при спрейном охлаждении, когда на нагреваемую поверхность направляется поток из микрокапель жидкости.

В данной работе исследованы размер монослоя и расстояние между соседними каплями в нем в зависимости от параметров эксперимента. Рабочий участок представляет собой пластину из нержавеющей стали, в центре которой встроен медный стержень размером  $1 \times 1 \text{ см}^2$ . В качестве рабочей жидкости используется дегазированная сверхчистая вода (MerckMillipore) с начальной температурой 25 °С. Рабочая жидкость помещается с помощью шприца на подложку в виде слоя с начальной толщиной 0,3–0,9 мм. Для регистрации формирования монослоя используется высокоскоростная камера в сочетании с оптической Шлирен-системой. Установлено, что монослой имеет эллиптическую форму, причем его размер увеличивается во времени приблизительно от 1 до 5 мм. Исследована зависимость расстояния между каплями от времени в диапазоне температур от 50 до 100 °С. Также получены зависимости расстояния между каплями от расстояния от центра монослоя.

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

## **Исследование влияния внешнего воздействия на поток в микроканале Т-типа**

П. Е. Янко

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

В случае, когда скорость химической реакции велика по сравнению со скоростью гомогенизации, возникает необходимость в микромиксере — устройстве, обеспечивающим непрерывное и безопасное проведение реакций с малым объемом реагентов, выделением теплоты или ядовитых веществ.

Контроль качества смешения является непростой задачей. Основные параметры, определяющие смешение в микромиксере — его геометрия и число Рейнольдса. Однако производство нового микроканала (т. е. изменение его геометрии) — более затратный процесс, чем варьирование числа Рейнольдса. Поэтому для контроля эффективности перемешивания в работе предложено активное возбуждение потока. Известно, что при фиксированных числах Рейнольдса ( $Re < 10$ ) наложение внешних возмущений позволяет добиться роста эффективности перемешивания без замены микроканала за счет возникновения неустойчивости на границе двух сред и как следствие, образования вихревых структур. Однако исследование влияния внешнего воздействия на смешение жидкостей в Т-микроканале при больших числах Рейнольдса ( $Re > 10$ ) до сих пор остается актуальной задачей.

В работе проведено измерение полей мгновенной скорости потока в Т-микроканале в широком диапазоне параметров (числа Рейнольдса ( $Re$ ), частоты ( $f$ ) и амплитуды ( $A$ ) внешнего воздействия) методом цифровой трассерной визуализации с микронным разрешением ( $\mu PIV$ ). На основе ансамбля 1000 двухкадровых изображений рассчитаны средняя и пульсационная скорости. Показано значительное изменение скоростных характеристик потока в центре канала для всех изученных режимов течения. Так, при увеличении частоты внешнего воздействия до  $f = 1000$  Гц наблюдалось уменьшение максимального значения средней скорости на 10 % для  $Re = 10$  и на 17 % для  $Re = 120$  относительно невозмущенного потока.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект №16-19-10519).

Научный руководитель — А. Ю. Кравцова

# ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

УДК 533.9.082.5

## Влияние характеристик магнитного поля пробочной ловушки на параметры плазмы резонансного импульсно-периодического микроволнового разряда

С. Г. Асанина, М. А. Корнеева

Российский университет дружбы народов, г. Москва

Исследования микроволновых резонансных разрядов форвакуумного диапазона давлений представляют большой интерес с точки зрения разработки источников излучения в широком спектральном диапазоне. ЭЦР-разряд обеспечивает создание сильно неравновесной плазмы с высокой плотностью и эффективно управляемыми параметрами. Целью данной работы являлось определение степени влияния пространственного распределения напряженности магнитного поля пробочной ловушки на параметры создаваемой плазмы микроволнового разряда.

Плазма формировалась в цилиндрическом резонаторе ( $TE_{111}$ ), помещенном в осесимметричное магнитное поле пробочной ловушки. Оно создавалось постоянными магнитами из  $SmCo_6$  с магнитным замыканием из пермаллоя. Перестройка профиля поля и его индукции ( $B = 573\text{--}1044$  Гс,  $R = 1,72\text{--}2,02$  — в минимуме ловушки) осуществлялась за счет изменения расстояния между магнитами с помощью микрометрической подачи. Пробой и поддержание разряда происходило от магнетронного генератора на частоте 2,45 ГГц при подводимой средней мощности 250 Вт в импульсно-периодическом режиме. Диапазон рабочих давлений —  $1 \cdot 10^{-3}\text{--}10$  Торр, плазмообразующий газ — аргон, фоновое давление не превышало  $1 \cdot 10^{-5}$  Торр.

В работе показано, что в форвакуумном диапазоне давлений процент поглощенной разрядом мощности практически не зависит от магнитного поля и составляет  $\sim 80\%$  при давлении  $4 \cdot 10^{-3}$  Торр и  $\sim 90\%$  при давлении  $2 \cdot 10^{-1}\text{--}10$  Торр. Высокая степень поглощения СВЧ-мощности в разряде приводит к резкому увеличению радиационных потерь в оптическом диапазоне. Отмечено, что освещенность при указанных значениях давления равна  $\sim 10$  лк ( $4 \cdot 10^{-3}$  Торр),  $\sim 450$  лк ( $2 \cdot 10^{-1}$  Торр),  $\sim 250$  лк (1 Торр). Проведенные измерения показали, что в указанном диапазоне давлений плазмообразующего газа концентрация электронов является критической для рабочей частоты. Таким образом, режим с наиболее эффективным вкладом энергии в разряд и максимальной светоотдачей (давление  $2 \cdot 10^{-1}$  Торр) является режимом генерации плазмы с критической плотностью.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доцент В. В. Андреев



**Источник плазменной струи с большой кинетической энергией**

Н. Р. Асмедьянов

Новосибирский государственный университет

Одним из наиболее перспективных направлений в решении современных вопросов энергетики является термоядерный реактор. В ИЯФ СО РАН разрабатывается вариант реактора на основе открытой магнитной плазменной ловушки ГДЛ (газодинамическая ловушка). В таких ловушках требуется постоянно поддерживать материальный баланс плазмы. Цель данной работы — создать источник плазменной струи с кинетической энергией, достаточно большой, чтобы при инжекции плазмы в направлении, перпендикулярном силовым линиям магнитного поля, преодолевать выталкивание магнитным полем, которое удерживает рабочую плазму. Источник также должен поддерживать материальный баланс рабочей плазмы с помощью инжекции плазмы.

Источник струи представляет собой плазменную пушку Маршалла со следующим принципом действия: на коаксиальные электроды подается напряжение ( $\sim 5$  кВ); происходит пробой газа, находящегося между этими электродами; образовавшиеся ионы и электроны образуют радиальный ток; вместе с током, бегущим по электродам, он создает азимутальное магнитное поле; возникает сила Лоренца, выталкивающая ионизированный газ вдоль пушки. Для проведения контролируемых экспериментов на ГДЛ важно знать параметры вылетающей струи и системы питания пушки. Наиболее достоверными диагностиками на данный момент являются пояс Роговского и зонды Ленгмюра. Пояс Роговского предназначен для измерения тока в контуре питания плазменной пушки. Два зонда Ленгмюра, расположенные вдоль линии пролета плазменной струи, позволяют измерить её фронтальную скорость и плотность в режиме тока насыщения в предположении, что тепловая скорость частиц плазменной струи много меньше направленной скорости струи.

Ряд проведенных экспериментов показал, что энергия струи возрастает с уменьшением добротности контура питания плазменной пушки. В одном из экспериментов с пониженной добротностью контура плотность энергии вылетевшей плазменной струи составила  $0,78$  Дж/см<sup>3</sup>, а плотность энергии магнитного поля, которую струя должна преодолеть, —  $0,38$  Дж/см<sup>3</sup>.

На данный момент основным выводом является положение, что для данной конструкции пушки можно добиться необходимых параметров.

Научный руководитель — Е. Ю. Колесников

## **Оптимизация боковой инжекции электронного пучка в кильватерную волну для эксперимента AWAKE**

М. А. Байструков, И. Ю. Каргаполов, С. В. Рева  
Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск,  
Новосибирский государственный университет

На данный момент идёт активное развитие методов кильватерного ускорения. Одним из наиболее перспективных методов является ускорение с использованием протонного драйвера. В CERN проводится программа AWAKE по реализации данного метода. Сейчас эксперименты осуществляются в одной секции длиной 10 м, изучается сама волна и поведение драйвера в ней. В дальнейшем планируется провести эксперимент по кильватерному ускорению электронного сгустка. Одна из задач, которую необходимо решить для проведения этого эксперимента, — выбрать метод инжекции электронного сгустка и вычислить параметры этой инжекции. Основных метода два — осевая инжекция электронов и боковая инжекция электронов. При этом каждый из подходов обладает своими преимуществами и недостатками. Боковая инжекция электронов проще осевой с конструкционной точки зрения, также нет необходимости сжимать пучок, однако поперечные поля волны сильно портят эмиттанс сгустка в процессе захвата, к тому же доля захваченных электронов невелика.

В данной работе рассматривается возможный способ решения этих проблем при помощи короткого скачка плотности плазмы. При этом в волне происходят биения амплитуды и образуются области с низкими полями. Если правильно подобрать параметры исходного сгустка и профиля плотности плазмы, то можно получить пучок удовлетворительного качества.

Вычисление этих параметров требует моделирования процесса захвата, что сопряжено с большими расчетными мощностями. Для ускорения этого процесса использовалась кластерная система. Моделирование осуществлялось при помощи параллельной версии программы LCODE. Также для увеличения эффективности вычислений была разработана программа для осуществления параллельного запуска многих вариантов процесса инжекции с внедрением пробных пучков.

В результате получено несколько конфигураций, при которых итоговый пучок обладает совокупностью таких параметров, как эмиттанс, разброс энергий, доля захвата и итоговая энергия сгустка.

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

## **Измерение динамики остаточных напряжений в меди после облучения электронным пучком**

И. И. Балаш

Новосибирский государственный университет

Плазма в термоядерном реакторе оказывает импульсное тепловое воздействие на дивертор. Возникают остаточные пластичные деформации и механические напряжения, приводящие к разрушению материалов. Остаточные деформации и напряжения могут релаксировать под действием постоянного потока плазмы на материал, в том числе из-за высокой температуры. Возникла гипотеза: релаксация деформаций и напряжений может вернуть материал в начальное состояние. Таким образом, при очередном импульсе не будет превышать предел прочности. Для проверки этой гипотезы было необходимо исследовать изменение остаточных деформаций и напряжений в нагретом материале.

Использовался метод рентгеновской дифрактометрии. Для отработки методики измерения проводились с медными образцами. Для создания остаточных напряжений медные образцы облучались электронным пучком. На станции рассеяния синхротронного излучения «Аномальное рассеяние» были сняты дифрактограммы, по которым была вычислена зависимость угла рассеяния от угла наклона. По дифракционным кривым были вычислены компоненты тензоров деформаций, по которым были вычислены компоненты тензоров напряжений. У однократно облученного образца было значительное смещение дифракционного пика  $\sim 0,1^\circ$ . Для измерения динамики остаточных напряжений образцы изучались при постоянном угле наклона и изменяющейся температуре. Образцы грелись для релаксации напряжений. Были получены зависимости положения дифракционного пика от температуры, а также изучена релаксация, возникшая при нагреве облученного образца. Продемонстрировано измерение релаксации остаточной пластической деформации.

Научный руководитель — д-р хим. наук Б. П. Толочко

**Исследование характеристик ионного двигателя  
на основе скрещенных электрического и магнитного полей**

В. Е. Барышников, А. А. Олейник  
СУНЦ НГУ, г. Новосибирск

Наше исследование посвящено измерению характеристик варианта ионного двигателя для спутников. Двигатели такого класса сегодня используются в космической технике благодаря своим достоинствам: они потребляют от 0,1 до 10 и более кВт, имеют высокий КПД (порядка 60 %) и долгое время непрерывной работы (от 3 до 15 лет, а зачастую и более). Они выполняют роль маршевого двигателя и используются для тонкой корректировки орбиты. Несмотря на малую тягу в начале своего движения, за определенный срок ионный двигатель способен разогнать объект до высоких скоростей.

Особый интерес представляют ионные мини-двигатели как перспективные устройства для мини-спутников. Исследователи в настоящее время работают над задачей увеличения удельного импульса и облегчением системы, уменьшением веса ионного движка.

Работа двигателя осуществляется посредством ионизации инертных газов (в основном это ксенон и аргон) и ускорением ионов в межэлектродном пространстве под действием электрического поля.

Работа посвящена измерению характеристик ионного двигателя: полного тока, зависимости тока ионов от параметров ионного ускорителя. Наша цель — понять, какие изменения и усовершенствования могут быть внесены в двигатель, чтобы создать новый, более совершенный ионный двигатель для мини-спутника.

---

1. Электрические ракетные двигатели космических аппаратов и их влияние на радиосистемы космической связи / Важенин Н. А., Обухов В. А., Плохих А. П., Попов Г. А. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013.

2. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов / Горшков О. А., Муравлёв В. А., Шагайда А. А. / под ред. А. С. Коротева. М.: Машиностроение, 2008.

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

### **Разработка комплекса диагностик мишенной плазмы на ЛИУ**

В. В. Данилов, Д. И. Сквородин, С. С. Попов, П. В. Быков,  
Л. Н. Вячеславов, Ю. А. Трунев, А. В. Бурдаков,  
В. В. Куркучеков, М. А. Холопов, А. Г. Русских  
Новосибирский государственный университет,  
Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск,  
Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

ЛИУ представляет собой рентгенографический комплекс на основе линейного ускорителя, задача которого — получение серии коротких рентгеновских импульсов с высокой дозой излучения и малым размером источника. Для производства рентгеновской вспышки используется конверсия сильноточного пучка электронов энергии 4,6 МэВ в тормозное рентгеновское излучение на танталовой мишени. Для обеспечения малого размера источника рентгена необходима качественная фокусировка пучка на мишени. При этом происходит образование плотной мишенной плазмы, расширяющейся со скоростью порядка 10 км/с. Взаимодействие электронного пучка с плазменным облаком осложняет фокусировку пучка на мишени в силу следующих эффектов: зарядовая нейтрализация электронного пучка ионами плазмы, частичная токовая нейтрализация, асимметричное протекание обратного тока по плазме.

Для решения проблемы фокусировки пучка ЛИУ во втором импульсе необходимо знать основные параметры облака мишенной плазмы в этот момент времени: размеры, плотность и степень ионизации.

В работе представлен и обоснован проект комплекса диагностик на основе интерферометра и теневого рентгеновского зондирования для исследования динамики распространения плазменного облака на ускорителе ЛИУ. В качестве источника рентгена используется point Z-pinch со спектром 1–5 кэВ. Теневое изображение плазменного облака проецируется на подложку с нанесённым слоем сцинтиллятора CsI и регистрируется быстрой камерой SDU. Для разделения плотностей нейтральной и ионизованной компонент плазмы используется интерферометр на двух длинах волн — 1064 нм и 10,6 мкм. Для обеспечения временного разрешения диагностики на уровне 1 мкс применена широкополосная система регистрации на основе PIN-фотодиодов (для 1064 нм) и инфракрасных фоторезистивных детекторов (для 10,6 мкм). Интерферометр построен по квадратурной схеме для обеспечения возможности контроля рефракции зондирующего луча. Собран макет диагностики, представлены результаты, демонстрирующие его работоспособность.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Д. И. Сквородин

## **Нелокальное влияние облака пылевых частиц на окружающую плазму**

Н. А. Демин

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

Для описания наблюдаемых явлений в плазме тлеющего разряда с пылевыми частицами разработан новый теоретический подход, в котором учтено влияние нелокальной электронной кинетики на свойства формируемых пылевых структур и разрядную плазму. Самосогласованная гибридная модель пылевой плазмы тлеющего разряда основана на одновременном решении нелокального кинетического уравнения Больцмана для функции распределения электронов по энергии, дрейфово-диффузионного уравнения для ионов, дрейфово-диффузионного уравнения движения пылевых частиц и их зарядки, уравнения Пуассона для электрического поля в различной геометрической постановке (сферическая и цилиндрическая симметрия).

С помощью численных расчетов были получены радиальные распределения параметров плазмы разряда вокруг облака пылевых частиц: плотности электронов и ионов, средняя энергия электронов, распределение электрического поля, частоты ионизации газа электронным ударом и рекомбинации электронов и ионов на поверхности пылевых частиц, радиальные потоки электронов и ионов для различных распределений плотности пылевых частиц в облаке и различных размеров частиц. Исследовалось влияние параметров разрядной плазмы (величина заданного внешнего электрического поля, давление и сорт буферного газа, в том числе гелий и аргон) на структурные свойства формирующихся пылевых образований, а также влияние пылевых частиц на разрядную плазму. Было показано, что увеличение числа пылевых частиц в центральной части расчетной области приводит к обеднению плазмы электронами и к увеличению плотности ионов в пылевом облаке. Повышение плотности частиц в пылевом облаке приводит к росту потока ионов и электронов с окружающей плазмы на облако пылевых частиц.

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

## Диагностика пространственного распределения скорости плазмы в установке СМОЛА

А. А. Инжеваткина

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

Ключевой проблемой удержания плазмы в открытых ловушках является подавление потерь частиц и энергии с торцов. Для решения данной задачи была предложена концепция системы [1], активно накачивающая плазму обратно в ловушку с помощью внешнего источника питания. Данная идея основана на создании движущихся в системе отсчёта плазмы магнитных пробок, движение которых относительно плазмы создаётся ее вращением в скрещенных радиальном электрическом и винтовом магнитных полях. Для реализации концепции винтового удержания в ИЯФ СО РАН создана установка СМОЛА.

Определение азимутальной и продольной компонент скорости плазмы в каждой точке пространства необходимо для построения модели, описывающей движение потока плазмы в винтовой ловушке. В качестве одного из методов измерения скорости плазменной струи была использована диагностика доплеровского смещения спектральных линий с пространственным разрешением.

В ходе данной работы были получены спектральные линии  $\text{Na}$ -излучения плазменной струи при различных конфигурациях магнитного поля [3]. Наблюдаются различные доплеровские смещения линий по пространству, что свидетельствует о наличии вращения плазмы в установке.

По доплеровскому смещению  $\text{Na}$  определена линейная скорость и скорость вращения плазмы ( $\sim 10^6$  1/с). Указанная угловая скорость соответствует наличию радиального электрического поля до 100 В/см.

Установлено, что скорость вращения плазмы увеличивается вместе с магнитным полем, которое связано линейно с радиальным электрическим полем.

Предполагается, что в качестве дополнительного метода измерения скорости плазмы будет применен зонд Маха.

- 
1. *A. D. Beklemishev* // Fusion Sci. Technol. 2013. V. 63. № 1. P. 355.
  2. *V. V. Postupaev et al.* // Fusion Eng. Design. May 2016.
  3. *A. V. Sudnikov et al.* // 44th EPS Conf. on Plasma Physics. July 2017.

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

**Моделирование дифракции синхротронного излучения  
в мозаичном монокристалле**

С. Р. Казанцев

Новосибирский государственный университет

В термоядерном реакторе под действием импульсных тепловых нагрузок на вольфрамовую стенку дивертора ожидается возникновение трещин, что приведет к возникновению пластических деформаций. Для того чтобы понять, как образуются деформации и можно ли этого избежать, нужно измерить их динамику во время импульсной тепловой нагрузки. Сейчас в ИЯФ СО РАН идет разработка динамической диагностики таких деформации на основе быстрой дифрактометрии.

Метод быстрой дифрактометрии заключается в измерении дифракционной картины рассеянного на образце монокристалла пучка синхротронного излучения (СИ) и последующем восстановлении деформации образца по форме дифракционного пика. Работа проводилась в режиме дифракции на просвет, в качестве образца использовался мозаичный монокристалл вольфрама. В модели учитывались поглощение СИ и мозаичность, также для описания использовалось приближение кинематической теории дифракции. В пакете Wolfram Mathematica была написана программа для моделирования процесса рассеяния пучка СИ в мозаичном монокристалле вольфрама для расчета аппаратных функций для задачи восстановления деформации образца по форме дифракционного пика. Были проведены численные расчеты и сравнение с экспериментальными данными, которое выявило расхождение по форме интерференционного пика, которое предполагается уменьшить за счет использования более точной функции распределения, описывающей разориентированность кристаллической структуры монокристалла.

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



## Диодные и триодные цезий-бариевые ключевые элементы нового типа

Б. Д. Клименков  
Санкт-Петербургский горный университет

Согласно посланию Президента В. В. Путина Федеральному собранию от 01.03.2018 одним из ключевых направлений развития систем вооружений в Российской Федерации является разработка малогабаритных сверхмощных ядерных энергетических установок (ЯЭУ). Для решения этой задачи необходимы эффективные электронные приборы, позволяющие реализовать полное управление током в цепях ЯЭУ: ключевые элементы, термоэмиссионные преобразователи, инверторы, стабилизаторы тока и напряжения, трансформаторы, генераторы и др., имеющие удельную массу  $\gamma < 1$  кг/кВт и надежно работающие в приборном отсеке служебного модуля ЯЭУ.

В работе представлены результаты цикла исследований формирования электронной неустойчивости Бурсиана — Пирса и образования нелинейных структур в плазме диодных и триодных ключевых элементов с цезий-бариевым наполнением, а также продемонстрирована возможность их использования для реализации эффективной модуляции тока:

- в диодном приборе достигнута устойчивая модуляция тока и напряжения с частотой 5–20 кГц и полным прерыванием тока в диапазоне давлений цезия  $1,5 \cdot 10^{-3}$ – $3,5 \cdot 10^{-3}$  тор при величине межэлектродного зазора 0,2–2,0 мм, напряжении горения 5–6 В и плотности тока в разряде  $\sim 10$  А/см<sup>2</sup>;

- в условиях трехэлектродного ключевого элемента исследовано явление самопроизвольного обрыва тока и предложен новый эффективный способ модуляции тока. Выявлено, что механизм сеточного гашения при токах, близких к критическим, так же, как и механизм самопроизвольного обрыва, связан с возникновением электронной неустойчивости Бурсиана — Пирса;

- показано, что явление самопроизвольного обрыва тока оказывает значительное влияние на эффективность сеточного гашения. Достигнуты рекордные энергетические параметры ключевых элементов нового поколения: при анодном напряжении 50 В получена устойчивая модуляция на частотах 1–10 кГц удельной электрической мощности 5 кВт/см<sup>2</sup> и КПД более 95 %.

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

### **Литиевая нейтроногенерирующая мишень**

Б. Ф. Баянов, Д. А. Касатов, Я. А. Колесников,  
А. Н. Макаров, И. Н. Сорокин, С. Ю. Таскаев, И. М. Щудло  
Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск,  
Новосибирский государственный университет

В Институте ядерной физики СО РАН предложен, создан и функционирует ускорительный источник эпитепловых нейтронов для развития методики бор-нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей. Источник включает в себя ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией и литиевую мишень.

В работе представлены основные требования к нейтроногенерирующей мишени, описана ее конструкция, показан текущий способ напыления лития на мишень, объяснена необходимость модернизации и вынесения этого узла в автономный из источника эпитепловых нейтронов.

С этой целью был предложен и создан новый стенд напыления лития — в работе приведено описание стенда, основных его узлов и особенностей, проведен обзор различных систем для напыления лития, используемых в мире. Также в работе приведены результаты подбора оптимальных параметров для напыления лития, измерена значение и однородность толщины литиевого слоя в зависимости от параметров напыления. В работе даются рекомендованные параметры для напыления оптимального литиевого слоя для дальнейшего проведения экспериментов с генерацией нейтронов.

Научный сотрудник — канд. техн. наук И. Н. Сорокин

## Получение карбида титана в плазме электрической дуги постоянного тока

Е. А. Коломина

Лицей при Томском политехническом университете, г. Томск

В настоящее время химическая промышленность набирает серьезные обороты. Ежедневно химики всего мира пытаются создать новые материалы, которые будут намного легче и прочнее старых. Известным сверхтвердым материалом является карбид титана, поэтому его было бы хорошо лучше изучить его и научиться синтезировать самостоятельно.

Главным промышленным способом производства карбида титана является углетермический способ получения TiC из диоксида титана, который характеризуется большим энергопотреблением на стадии длительного синтеза в печах и при измельчении спеченных брикетов карбида титана в размольных агрегатах. Данный способ затрачивает большое количество энергии и времени, что является существенными минусами данной методики. Набирает популярность электродуговой метод получения карбида титана, в основе которого положена генерация плазмы электрическим разрядом постоянного или переменного тока.

В связи с этим настоящая работа излагает метод получения карбида титана. Методика заключается в синтезе карбида титана в плазме электрической дуги постоянного тока. Для реализации метода необходим экспериментальный плазмохимический реактор постоянного тока, имеющийся на базе Томского политехнического университета. С помощью данной установки проведена серия экспериментов. Полученные продукты анализировались методом рентгеновской дифрактометрии (Shimadzu XRD 7000s, CuK $\alpha$ ) и растровой электронной микроскопии (микроскоп Hitachi TM 3000).

В результаты, опираясь на данные рентгеновской дифрактометрии, были составлены таблицы и графики, наглядно показывающие, какое процентное содержание каждого материала получилось в каждом эксперименте.

Научный руководитель — канд. техн. наук, доцент А. Я. Пак

**Вихревое удержание плазмы с высоким  $\beta$  в открытой ловушке**

С. Е. Константинов  
Новосибирский государственный университет

Поперечное удержание плазмы в осесимметричных открытых магнитных ловушках является серьезной проблемой из-за наличия среднего магнитного бугра на оси системы, который влечет к возникновению желобковой неустойчивости. Однако если подключить внешние потенциалы к внешним электродам, можно значительно подавить поперечный перенос [1]. При таком воздействии приосевая плазма приобретает дополнительную азимутальную компоненту скорости, сгенерированную приложенными потенциалами качественно. Если характерные времена вращения сдвигового движения плазмы становятся порядка времени развития неустойчивости, желобок успевает размазаться между соседних слоев плазмы еще до всплывания. Основная мода неустойчивости благодаря эффекту конечного ларморовского радиуса ионов переходит в стадию нелинейного насыщения, и плазма удерживается в зоне вихревого течения. Ранее теория вихревого удержания была разработана для равновесия с  $\beta \ll 1$ , в настоящей работе производится обобщение на случай  $\beta \sim 1$ .

Для описания процессов, происходящих в плазме с  $\beta \sim 1$  со сдвиговым вращением, получена система из уравнений движения, замороженности магнитного поля, непрерывности и энергобаланса в приближении отщепления магнитного звука и с граничным условием, учитывающим влияние потенциала лимитеров. Для выделения эффектов, связанных с вихрем, система линеаризована по диссипативным членам.

В работе представлена аналитическая теория, описывающая вихревое движение плазмы в приближении одножидкостной магнитной гидродинамики и результаты компьютерного моделирования.

---

1. *Beklemishev, A. D., Bagryansky P. A., Chaschin M. S., Soldatkina E. I. Vortex Confinement of Plasmas in Symmetric Mirror Traps // Fusion Science and Technology, Taylor & Francis. 2010. V. 57. P. 351–360.*

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

**Исследование высокочастотных колебаний плазмы в ГДЛ**

З. Э. Коншин

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

Одной из основных задач в области управляемого термоядерного синтеза является удержание и нагрев плазмы. Распространенным типом устройств для удержания плазмы являются ловушки с магнитным полем, в частности, открытые магнитные ловушки. Примером открытой магнитной ловушки является газодинамическая ловушка (ГДЛ) в ИЯФ СО РАН. ГДЛ предназначена для удержания двухкомпонентной плазмы. Одна из них — «теплая» плотная плазма с максвелловским распределением — удерживается в газодинамическом режиме — потери плазмы через магнитные пробки (области на кольцах установки с сильным магнитным полем) аналогичны истечению газа из сосуда с малым отверстием. Для нагрева максвелловской компоненты в установку инжектируют нейтральные атомы, которые, ионизуясь, становятся второй компонентой — быстрыми ионами. Длина их свободного пробега больше длины установки, а удерживаются они как в классическом пробкотроне за счет сохранения магнитного момента.

Существенной проблемой для установок такого типа являются неустойчивости — быстро нарастающие колебания плазмы, которые могут привести к повышенным потерям плазмы из установки. Такие колебания сопровождаются возмущением магнитного поля установки, которое можно измерить с помощью магнитных датчиков.

В данной работе с помощью магнитной диагностики ГДЛ был проведен первичный анализ набора колебаний на частотах 30–50 МГц. Колебания представляют собой набор мод, следующих с интервалом по частотам 5–6 МГц. Каждая мода представляет собой следующие друг за другом короткие (< 10 мкс) всплески. Исследование зависимости фазы от продольной координаты показали, что источник колебаний может находиться в зоне поворота горячих ионов.

На основании этого было выдвинуто предположение, что наблюдаемые колебания связаны с дрейфовой конусной неустойчивостью. Для проверки этого предположения магнитная диагностика будет дополнена новыми зондами для получения большего углового разрешения.

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

## **Оптимизация параметров плазмы геликонного ВЧ-источника**

Е. И. Кузьмин

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

На сегодняшний день актуальными являются исследования воздействия плазмы на облицовочные материалы, которые предполагается использовать в качестве стенок термоядерных реакторов. Для проведения подобных экспериментов необходима плазма с определенными характеристиками (высокая плотность и плазменный поток, высокая степень ионизации).

Одной из наиболее перспективных установок, удовлетворяющих данным требованиям, является высокочастотный (ВЧ) геликонный источник. Главными преимуществами подобных установок являются высокая эффективность разряда, плазма с высокой плотностью, возможность выхода на стационарный режим, генерация плазмы в околоосевой области плазменной камеры, что значительно снижает потери плазмы и тепловые нагрузки на стенки камеры.

Геликонные плазменные установки относятся к безэлектродным источникам, в которых плазма создается антенной ВЧ. В эксперименте была использована антенна Na<sub>90</sub>уа-III, система магнитного поля, состоящая из пяти соленоидов, и генератор ВЧ-напряжения мощностью до 25 кВт. В данной работе изучено влияние подводимой ВЧ-мощности на параметры плазмы геликонного источника в диапазоне 1 / 17 кВт, проведен анализ, выполнено согласование нагрузок генератора и плазмы, а также приведены результаты измерения радиальных профилей плотности и электронной температуры плазмы геликонного разряда.

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

## Диагностика примесей в плазме установки СМОЛА по линиям собственного излучения

К. А. Ломов

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

Для экспериментальной проверки концепции винтового удержания плазмы [1] в ИЯФ СО РАН создана установка СМОЛА [2]. Начаты измерения параметров плазмы в различных режимах работы установки. Один из используемых методов первичной диагностики плазмы – спектральная диагностика в оптическом диапазоне, позволяющая определить состав примесей в плазме и выявить качественную зависимость их концентрации в разных точках установки от параметров установки.

В ходе данной работы произведено наблюдение и измерение относительной интенсивности излучения примесей в плазме в нескольких точках установки с помощью цветной цифровой камеры SDU-285C и набора светофильтров. Обнаружено различное излучение в диапазонах 500–570 нм и 700–800 нм.

С помощью спектрометра выполнена серия измерений спектра плазмы в оптическом диапазоне для различной плотности плазмы. Проведена идентификация диагностированных спектральных линий по базе данных атомных спектров NIST[3], определены вещества, дающие заметный вклад в спектр излучения примесей плазмы, — нейтральные и однократно ионизированные атомы La и Fe, входящих в состав конструкционных материалов катода плазменной пушки. В то же время выраженные линии атомов атмосферных газов в спектре плазмы не обнаружены, что подтверждает эффективность вакуумной системы установки.

Сравнение относительной интенсивности излучения примесей для различной плотности плазмы показало монотонную, но нелинейную зависимость. Оценено отношение интенсивности спектральных линий примесей к интенсивности линии  $D_{\alpha}$  плазмы — 0,005, что позволяет сделать вывод о незначительном влиянии испарения материала на целостность катода.

---

1. A. D. Beklemishev // Fusion Sci. Technol. 2013. Т. 1. V. 63. P. 355–357.

2. A. V. Sudnikov et al // Fusion Eng. Des. 2017. V. 122. P. 86–93.

3. A. Kramida, Yu. Ralchenko, J. Reader and NIST ASD Team (2018). NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.5.2). Gaithersburg : National Institute of Standards, 2018. URL: <https://physics.nist.gov/asd>.

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

## **Измерение профиля линейной плотности плазмы в ГОЛ-NB многохордовой диагностикой прошедших быстрых атомов**

А. В. Никишин

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

Установка ГОЛ-NB предназначена для изучения физики многопробочно-го удержания плазмы и состоит из центральной пробочной ловушки, двух многопробочных секций и концевых баков расширителей плазменного потока. Плазма в установке создается с помощью дуговой плазменной пушки, последующий ее нагрев в центральном соленоиде осуществляется с помощью пучков быстрых нейтральных атомов.

Ожидаемые параметры плазмы: температура от 1 до 50 эВ и плотность  $10^{13}$ – $10^{14}$  см<sup>-3</sup> с диаметром  $\sim 10$  см. Это позволяет использовать многохордовую диагностику прошедших атомов для измерения плотности плазмы. Преимуществом данного метода является возможность за одно измерение получить радиальное распределение плотности плазмы, а также наблюдать эволюцию профиля плотности в ходе эксперимента. Идея диагностики основана на ослаблении пучка быстрых нейтральных атомов при прохождении через плазму. Зная ослабление вдоль разных хорд, можно получить профиль линейной плотности плазмы. Для работы диагностики в обозначенных выше условиях необходим инжектор нейтралов с изменяемой энергией от 7 до 20 КэВ. Это позволяет подстраивать пучок под текущий эксперимент.

В данной работе был использован диагностический инжектор нейтралов на базе инжектора «Старт», который был откалиброван и модифицирован для работы в условиях улучшенного вакуума. Система диагностики пучка адаптирована для работы во внешнем магнитном поле и представляет собой набор из 11 вторично-эмиссионных датчиков с известными координатами относительно центра вакуумной камеры. Датчики имеют особую форму, позволяющую уменьшить перекрестные наводки и повысить точность измерения. В итоге диагностика должна обеспечить измерение линейной плотности плазмы  $10^{14}$ – $10^{15}$  см<sup>-2</sup>.

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



## **Получение тонких пленок меди с помощью комбинированного разряда при атмосферном давлении**

А. С. Пазыл

Казахский национальный университет имени аль-Фараби,  
г. Алматы, Казахстан

В данной работе был изучен метод получения тонких пленок меди на поверхности кремниевой подложки с помощью комбинирования двух типов разряда при атмосферном давлении: импульсного искрового разряда и плазменной струи при атмосферном давлении (на основе диэлектрического барьерного разряда (ДБР)) в потоке инертных газов He и Ar. В данном случае искровой разряд служил источником мономеров (precursor) и наночастиц малых размеров, которые, попадая в область однородного барьерного разряда плазменной струи, увеличиваются в размерах за счет коагуляции или поверхностного роста и осаждаются на поверхности подложки.

Характеристики плазменной струи и свойства получаемых тонких пленок зависят от типа расположения электродов и геометрии электродов. Поэтому было изучено несколько вариантов расположения электродов искрового разряда. Также были получены динамическая ВАХ комбинированного разряда. Температура поверхности подложки при взаимодействии с комбинированным разрядом была исследована с помощью термопары в сравнении с температурой при искровом разряде.

Толщина и изображение поверхности получаемых тонких пленок при разной длительности времени обработки были изучены с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) при разной разрешающей способности. Также был получен элементный состав поверхности полученных тонких пленок с помощью энергодисперсионной спектроскопии на базе СЭМ.

Полученные результаты показали, что комбинация импульсного искрового разряда и плазменной струи при атмосферном давлении в несколько раз увеличивает степень осаждения тонких пленок на поверхности подложки. При этом температура поверхности не превышает 50–60 °С из-за сильной неравновесности плазмы газового разряда, что делает плазму комбинированного разряда перспективным инструментом обработки на осаждения пленок на поверхности термонеустойчивых полимерных материалов.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доцент М. К. Досболаев

**Исследование формирования пучка отрицательных ионов  
в сильноточном поверхностно-плазменном источнике**

В. С. Пильщиков

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

В установках по созданию и исследованию плазмы с термоядерными параметрами актуальной проблемой является нагрев плазмы до высоких температур порядка 20 кэВ. Одним из способов нагрева является инжекция высокоэнергетичных нейтралов в плазму. В инжекторах используется нейтрализация высокоэнергетичных пучков положительных или отрицательных ионов водорода. Отрицательные ионы обладают малой энергией сродства к электрону, легко теряют электрон, поэтому их применяют в инжекторах нейтралов с энергией пучка более 100 кэВ/нуклон.

В Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера разработан мощный ВЧ поверхностно-плазменный источник отрицательных ионов водорода, использующий трехэлектродную многоапертурную ионно-оптическую систему, которая состоит из плазменного, вытягивающего и ускоряющего электродов и осуществляет формирование и ускорение пучка ионов.

В данном докладе представлены результаты исследования зависимости углового расхождения пучка от его энергии. Результаты исследований качественно совпадают с результатами моделирования эксперимента в программном пакете PBGUNS. Также представлены результаты исследования динамики поперечного профиля пучка отрицательных ионов на расстоянии 1,6 м от источника ионов с помощью сканирования цилиндром Фарадея.

Научный руководитель — О. З. Сотников

## **Рентгенографическое исследование структуры энергичных плазменных сгустков в длинном пробкотроне**

Т. А. Плотников, А. А. Новицкий

Российский университет дружбы народов, г. Москва

Существующие системы визуализации и жесткого тормозного излучения широко распространены в физических исследованиях. В последнем случае устройство разрабатывается с учетом специфики проводимых экспериментов.

В данной работе представлена конструкция камеры, предназначенной для изучения пространственной структуры высокотемпературных плазменных сгустков, генерируемых в области магнитного поля протяженного пробкотрона в условиях гиромангнитного авторезонанса. Целью работы является получение информации о поведении картины поля тормозного излучения, генерируемого в рабочем объеме плазменного ускорителя при взаимодействии сгустков с атомами остаточного газа и внутренними элементами рабочего объема при изменении рабочих режимов работы.

Представленное решение обладает высокой эффективностью регистрации квантов излучения до 350 кэВ, обеспечивая конвертирование спектра тормозного излучения в видимый диапазон с его последующей регистрацией ПЗС-матрицей. Устройство адаптировано для работы в магнитостатических и импульсных магнитных полях.

Корпус камеры-обскуры представляет собой два черненых вложенных друг в друга алюминиевых цилиндра, с закрепленными оптическими элементами, передвигающимися относительно друг друга. На входе камеры установлена свинцовая диафрагма с отверстием в 1 мм. На выходе расположена малощумящая ПЗС-матрица (SONY ICX285AL) со встроенной системой охлаждения на основе элемента Пельтье.

Для исключения влияния альbedo-излучения на качество получаемого изображения система экранирована свинцовым кожухом с толщиной стенок 5 см. Первичное изображение появляется при взаимодействии падающих рентгеновских квантов с плоским усиливающим экраном (РЕНЕКС ЭУ-ГЗ), которое при помощи МКП увеличивается по интенсивности более чем в 1000 раз. Относительное перемещение внутренних элементов относительно друг друга позволяет сфокусировать получаемое изображение в области приемной апертуры ПЗС, обеспечивая высокое качество изображения.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доцент В. В. Андреев

## Модель движения газа над поверхностью нагретого электронным пучком вольфрама

В. А. Попов

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

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

Работа направлена на теоретическое моделирование поведения капель, образовавшихся при кипении поверхности из-за облучения импульсным электронным пучком. Моделирование проводилось для вольфрама — перспективного материала для пластин дивертора и параметров электронного пучка (длительность 150 мкс, мощность на мишени  $30 \text{ ГВт/м}^2$ , энергия электронов 150 кэВ), достижимых на установке в ИЯФ СО РАН с целью дальнейшей проверки и использования.

Электронный пучок имеет большую по сравнению с плазмой глубину выделения энергии. Это приводит к тому, что паровое экранирование наступает позже. Из-за этого температура поверхности достигает более высоких значений: она способна подниматься столь высоко, что мощность испарения становится сравнимой с мощностью нагревания. Тогда рост температуры поверхности замедляется, нагрев же на глубине при этом продолжается, приводя к тому, что температура под поверхностью становится больше температуры поверхности. Давление испаряющегося материала, оказываемое на поверхность, становится меньше давления насыщенных паров. Это означает, что приповерхностный слой жидкости становится перегретым. Перегретая жидкость предположительно закипает. Образовавшиеся пузырьки в процессе расширения достигают поверхности. После коллапса пузырька образуется капля жидкого вещества. Она движется в потоке расширяющегося в вакуум газа. Учет влияния потока на движение капли является целью этой работы, для чего проводится расчет движения газа в одномерном приближении.

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

## **Эрозия анода электрической дуги при атмосферном давлении**

А. С. Прокофьев

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

В настоящее время основным способом получения низкотемпературной плазмы является нагрев газа при помощи электрической дуги. Плазмотроны широко используются в различных областях науки и техники. Одной из важнейших технологических характеристик, определяющих эффективность работы плазмотронов, является ресурс непрерывной работы электродов. Поэтому исследование эрозии электродов является актуальной задачей.

Целью настоящей работы являлось исследование режимов эрозии анода электрической дуги при атмосферном давлении. Анализ прианодных процессов показал, что, в отличие от вакуумных дуг, в дугах атмосферного давления нет физической необходимости в появлении анодного пятна, соответствующего режиму высокой эрозии электрода. Образование анодного пятна в дугах атмосферного давления связано с перегревом поверхности электрода.

Согласно экспериментальным данным тепловой поток в опорных пятнах дуги на несколько порядков выше, чем максимально возможный отводимый тепловой поток от плоской медной стенки в стационарном режиме. Это означает, что в молекулярных газах при неподвижном анодном пятне на медных электродах невозможно избежать плавления электрода. В силу этого один из путей обеспечения работоспособности электрода основан на рассредоточении теплового потока от пятна дуги на большую площадь путем его перемещения по поверхности электрода.

В данной работе для исследования эрозии анода был использован двухкамерный плазмотрон с вихревой стабилизацией дуги. В ходе работы были исследованы режимы высокой и низкой эрозии анода, а также определена область существования низкоэрозионного режима работы данного плазмотрона. Полученные результаты могут быть использованы для разработки методики определения области существования низкоэрозионного режима работы анода произвольной геометрии.

Научный руководитель — С. П. Ващенко

**Спектральные методы исследования лазерной плазмы**

М. С. Руменских

Новосибирский государственный университет

Процессы, происходящие в ионосфере и магнитосфере Земли, достаточно трудно поддаются моделированию, и создание физических моделей, описывающих взаимодействие космической плазмы с внешними возмущениями, невозможно без экспериментальной проверки в лаборатории.

В экспериментах, проводимых в Лаборатории 3.1 энергетики мощных лазеров (отдел лазерной плазмы) ИЛФ СО РАН проводятся эксперименты с лазерной плазмой для моделирования быстропротекающих процессов в околоземной космической среде. Одним из важных параметров является скорости движения различных ионных компонент лазерной плазмы. Одним из способов измерения скорости является Доплеровское уширение и смещение спектральных линий. Ширина спектральной линии определяется по формуле  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta V}{c}$ . В частности, это позволяет измерить поперечную составляющую скорости и конус лазерного факела. Применяемые лазерные мишени из полиэтилена дают ионы водорода и углерода разных зарядов, которые частично сепарируются и имеют разный конус разлета. Измерение этого эффекта возможно только спектральными методами с применением ПЗС линейки для регистрации профиля линии. Также предполагается проведение исследования по воздействию магнитного поля на угол разлета лазерной плазмы.

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

**Исследование угловых характеристик ленточного РЭП**

Д. А. Самцов

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

К важным областям применения сильноточных релятивистских электронных пучков (РЭП) относятся генерация электромагнитных колебаний в частотно-избирательных электродинамических системах миллиметрового диапазона и накачка большой плотности энергии верхне-гибридных колебаний в плазме применительно к ее нагреву и получению эмиссии субмиллиметрового излучения. Функция распределения скорости электронов пучка по углу определяет эффективность использования РЭП в указанных областях применения. В связи с этим нами разработана методика для измерений этой ключевой характеристики пучка.

Наибольшую трудность в проведении данных измерений представляет необходимость регистрации малой величины угловой расходимости электронов пучка, распространяющегося в сильном магнитном поле. В нашем случае требуется измерить функцию распределения МэВных электронов в магнитном поле  $\sim 0,1$  Тл с разрешением по углу около 1 градуса, а также описать ее изменения во времени с масштабом 0,3 мкс. Процесс ослабления замагниченного электронного потока при его движении в коллиматоре с поглощающими стенками был выбран нами в качестве принципа работы датчика. Такой датчик был ранее применён для измерения углового разброса электронов килоамперного пучка, генерируемого ускорителем У-2 [1]. Для повышения точности восстановления функции распределения электронов нами проведены точные расчеты поглощения электронов пучка в стенках коллиматора, в ходе которых учтено влияние вторичных электронов. В настоящее время датчик используется для исследования угловых характеристик ленточного РЭП, генерируемого в магнитно-изолированном диоде ускорителя У-3.

В представляемом докладе описана новая конфигурация датчика, которая оптимизирована для получения максимального разрешения при построении функции распределения электронов по углам. Изложены результаты измерений угловых характеристик электронного пучка на выходе из диода ускорителя У-3. Эти результаты сопоставлены с результатами компьютерного моделирования генерации пучка в этом диоде с учетом различных факторов, влияющих на угловую расходимость скорости электронов.

---

1. *Arzhannikov A. V., Makarov M. A., Samtsovetal D. A.* AIP Conf. Proc. 2016.  
URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4964200>.

Научные руководители — д-р физ.-мат. наук,  
проф. А. В. Аржанников, В. Д. Степанов

**Влияние собственных полей ультрарелятивистского сильноточного электронного пучка на его эмиттанс и форму сечения в ходе транспортировки в поворотном магните**

Е. С. Сандалов

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

В настоящее время в Институте ядерной физики СО РАН ведутся работы по созданию и оптимизации элементов линейного индукционного ускорителя для получения пучка высокой яркости. Проектные параметры ускорителя: энергия электронов пучка — 20 МэВ, ток — 2 кА, длительность импульса —  $200 \div 300$  нс, нестабильность энергии  $\pm 1\%$ . Для демонстрации высокой яркости пучка его необходимо сфокусировать на мишени в пятно размером не более 1 мм. Это заставляет уделять особое внимание вопросу прохождения пучка через элементы тракта транспортировки (такие как поворотный магнит, септум-магнит и кикер) с минимальным набором эмиттанса. Отработка основных элементов такого ускорителя уже проведена на его прототипе [1].

С целью продвижения к требуемым параметрам пучка нами проведен анализ источников увеличения его эмиттанса в тракте транспортировки. В качестве решения конкретной задачи приведен результат 3D-моделирования движения электронов в поле поворотного магнита с учетом собственных полей пучка. В этих расчетах исследовано изменение макроскопических параметров и фазовых характеристик пучка при его транспортировке в прямой и изогнутой трубе дрейфа при малом ( $\sim 200$  мА) и большом ( $\sim 2$  кА) токах пучка. 3D-моделирование проведено в программном пакете «CST Particle Studio» методом расчета трубок тока. В докладе представлены результаты моделирования, которые сопоставлены с аналитическими оценками теоретического рассмотрения [2].

---

1. *Logachev P. V. et al.* // Instruments and Experimental Techniques. 2013. V. 56(6). P. 672–679.

2. *Lee E. P.* Cancellation of the Centrifugal Space-Charge Force // Particle Accelerators. 1990. V. 25. P. 241–251.

Научные руководители — канд. физ.-мат. наук С. Л. Синицкий,  
канд. физ.-мат. наук Д. И. Сковородин



**Анализ источников питания магнетронно-распылительных систем**

С. В. Семенов

Новосибирский государственный университет

Свойства наноматериалов во многом зависят от режимов синтеза, от технологических параметров процесса в условиях вакуумного нанесения покрытий. К ним относятся: энергетические свойства потока из источника напыления; плазмохимические процессы при транспорте от источника к подложке; теплофизические процессы при взаимодействии потока с подложкой. Свойства покрытий во многом зависят от режима работы блока питания МРС.

В настоящее время используется несколько типов, или схем: источники питания постоянного напряжения (DC); среднечастотные импульсные источники питания (MF DC); источники питания импульсами высокой мощности (HiPIMS). Можно выделить несколько проблем при получении качественных нанопокрываний с помощью источников для МРС первых двух типов: транспорт микрокапельной фазы (диаметром до нескольких микрон) к подложке при повышенной мощности источника, трудности воспроизводимости таких свойств, как твердость и износостойкость, просветляющие или отражательные свойства покрытий для оптических систем, трудность получить сплошные тонкие наноплёнки толщиной менее 2–4 нм, 4 — в потоке вещества к подложке большая доля нейтральных частиц. Существенное влияние оказывает мощность потока в растущее покрытие, связанная с кинетической энергией, теплотой конденсации потока, потоком излучения из плазменного тора над поверхностью. Например, в углеродных покрытиях могут происходить нежелательные процессы графитизации. Импульсные источники питания для МРС, используемые в методе HiPIMS, способны обеспечить значительный поток вещества к растущей пленке в короткий промежуток времени (3–25 мкс). Существенная особенность метода в значительной концентрации заряженных частиц и высокая энергия плазменного потока.

Проведены исследования свойств покрытий, полученных с различными источниками питания МРС при помощи КР-спектроскопии, оптической спектроскопии.

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

## Композиционные наноструктуры на основе пористого кремния и графена для систем плазменной энергетики

Р. С. Смердов

Санкт-Петербургский горный университет

Предлагаемая работа посвящена разработке нового типа электродов для солнечных концентраторов, использующих явление фотонно-усиленной термоэлектронной эмиссии (ПЕТЕ).

В основе функционирования прототипа лежит явление термоэлектронной эмиссии фотовозбужденных электронов из полупроводникового катода (функционализированный пористый кремний) при высокой температуре. Концентратор будет работать при температурах, превышающих 200°C, что дает возможность использовать тепловую энергию для запуска процесса термоэлектронной эмиссии, повышая эффективность преобразования энергии до 50 %.

Возможность создания приборов на основе ПЕТЕ с полупроводниковыми (GaN) электродами была продемонстрирована в работе [1], однако существенным недостатком предложенного решения является тот факт, что количество фотонов, энергия которых превышает ширину запрещенной зоны GaN ( $E_g = 3,3$  эВ), составляет менее 1 % от общего количества фотонов, поступающих к поверхности. Указанный недостаток приводит к необходимости исследования пористого кремния (ПК), а также композиционных структур на его основе для последующего создания электродов, поскольку благодаря наличию эффекта квантового ограничения [2], а также возможностям по функционализации поверхности [3] модификация ширины запрещенной зоны данного типа материалов возможна в достаточно широком диапазоне (от 1 до 3 эВ).

---

1. Schwede J. W., Bargatin I., Riley D. C., Hardin B. E., Rosenthal S. J. Photon-enhanced thermionic emission for solar concentrator systems // *Nature Materials*. 2010. V. 9. P. 762–767.

2. Nolan M., O'Callaghan S., Fagas G., Greer J. C. Silicon nanowire band gap modification // *Nano Lett.* 2007. V.7. № 1. P. 34–38.

3. Yu. M. Spivak, S., Mjakin V., Moshnikov V. A. et al. Surface Functionality Features of Porous Silicon Prepared and Treated in Different Conditions // *J. of Nanomaterials*. 2016. V. 2016. 8 p.

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

## Дисперсионный интерферометр для токамака «Глобус»

В. О. Устюжанин

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

В исследованиях, связанных с физикой плазмы и УТС, широко используется интерферометрия. С её помощью можно определять такой параметр, как линейная плотность плазмы. Традиционно в интерферометрии плазмы используются интерферометры с пространственным разделением каналов (Майкельсона или Маха-Цандера). Но у таких систем есть важный недостаток — высокая чувствительность к вибрациям. Для измерения линейной плотности плазмы на сферическом токамаке «Глобус» в ФТИ им. А. Ф. Иоффе создаётся диагностическая схема на основе дисперсионного интерферометра. Дисперсионный интерферометр — это интерферометр, оптические каналы которого разделены по частотам, причем излучение в коротковолновом канале формируется методом удвоения частоты зондирующего излучения.

Данная работа посвящена разработке оптической схемы дисперсионного интерферометра для установки «Глобус». В качестве основы был взят дисперсионный интерферометр на установке газодинамической ловушки (ГДЛ) в институте ядерной физики им. Будкера.

При прохождении излучения через удвоитель частоты (нелинейный кристалл) часть излучения поглощается, происходит неравномерный нагрев кристалла, в результате чего возникает эффект тепловой линзы и температурные напряжения. Было проведено моделирование влияния этих эффектов на прохождение излучения через оптическую систему дисперсионного интерферометра и генерацию второй гармоники.

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

**Изучение подачи цезия в ВЧ-источник  
отрицательных ионов с большой площадью эмиссии**

В. О. Ушмоткин

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

В настоящее время в установках для термоядерных исследований необходима инжекция высокоэнергетичных нейтралов. Например, для строящегося токамака ИТЭР планируется инжекция нейтралов с энергией 0,5–1 МэВ. При энергиях от сотни и более кэВ эффективность нейтрализации пучка положительных ионов стремится к нулю, поэтому выгоднее их конвертировать из пучков отрицательных ионов (ОИ) за счёт низкой энергии сродства электрона (0,75 эВ для водорода).

Эффективность поверхностно-плазменного образования ОИ возрастает многократно при создании цезиевого самоподдерживающегося покрытия на поверхности, на которой образуются ОИ. Таким образом, правильная процедура ввода цезия в источник необходима для стабильной генерации пучка.

Для разработанного в ИЯФ поверхностно-плазменного ВЧ-источника ОИ применена подача цезия через распределительно-накопительную трубку непосредственно на плазменный электрод. Цезий выделяется во внешней печи из цезий содержащих таблеток при их нагреве. Термостабилизация плазменного электрода в диапазоне 120–250 °С облегчает перераспределение цезия по поверхности плазменного электрода и способствует обеспечению однородности эмиссии ОИ из источника. Однократная процедура подачи цезия в источник обеспечивает стабильную генерацию ОИ, которая поддерживается более месяца.

В данной работе описывается процедура формирования и активации цезиевого покрытия на плазменном электроде, в результате чего обеспечивается стабильная генерация пучка ОИ.

Научный руководитель — О. З. Сотников

**Кинетика упругого взаимодействия нейтрального газа и плазмы  
в расширителе открытой ловушки**

Э. А. Федоренков

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

Характерной особенностью большинства ловушек открытого типа является расширитель. В нём амбиполярный электростатический потенциал отражает электроны, что позволяет подавлять электронный поток тепла между центральной частью ловушки и плазмоприёмником. К сожалению, нынешние модели плазмы в расширителе кажутся слишком упрощёнными и не могут объяснять процессы, наблюдаемые в эксперименте. Например, остаточный газ в расширителе при взаимодействии с горячей плазмой может ионизоваться, что приводит к появлению холодных электронов, которые могут охладить плазму. Оценки предсказывают, что допустимая концентрация нейтралов в расширителе ГДЛ должна быть  $n \approx 10^{12} \text{см}^{-3}$ , однако в эксперименте это значение больше на несколько порядков. Для попытки объяснить этот эффект была выдвинута гипотеза о том, что плазма вытесняет нейтральный газ, и из-за этого концентрация нейтрального газа в плазме значительно уменьшается.

Данная работа посвящена теоретическому изучению взаимодействия нейтрального газа и плазмы с целью проверки этой гипотезы. Для этого была принята модель однократного упругого столкновения газа и заряженной частицы с большой передачей импульса газу. Остальными столкновениями пренебрегли, так как после столкновения скорость возрастает. При этом мы считали, что плазма стационарна и однородно заполняет бесконечный цилиндр, окруженный холодным нейтральным газом ( $T_{\text{gas}} \ll T_{\text{plasma}}$ ).

В рамках этой модели было преобразовано и решено уравнение Больцмана для двух различных случаев взаимодействия сталкивающихся частиц. Приведены графики функции распределения газа и радиального профиля концентрации при разных соотношениях радиуса плазмы и длины свободного пробега газа в плазме.

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

## **Исследование формирования и массового состава пучка кластерных ионов аргона**

В. А. Харченко

Новосибирский государственный университет

В настоящее время газовые кластерные ионы широко применяются для сглаживания и полировки поверхностей, травления подложек, осаждения тонких пленок, имплантации атомов на малые глубины. По сравнению с атомарными пучками пучки высокоэнергетических кластерных ионов при взаимодействии с твердой поверхностью проявляют уникальные свойства: высокое локальное энерговыделение и низкая удельная энергия [1]. При обработке поверхности в качестве рабочего газа в основном используются инертные газы, поскольку они не образуют химических связей с материалом поверхности. Кроме того, инертные газы при конденсации могут образовывать как небольшие, так и крупные кластеры.

Характер взаимодействия кластерных ионов с мишенью определяется их энергией и размером. Массовый состав ионно-кластерного пучка зависит от параметров газового источника (геометрии сопла, давления и температуры торможения) и условий ионизации. Масс-спектр ионно-кластерного пучка существенно отличается от масс-спектра не ионизованного кластерного пучка, поэтому необходимо изучить влияние условий формирования пучка на его состав.

Целью работы является определение массового состава пучка кластерных ионов аргона при различных условиях его формирования. Для получения масс-спектров была разработана оригинальная времяпролетная методика формирования пучка [2]. Работа выполнена на установке КЛИУС Отдела прикладной физики физического факультета НГУ.

В докладе описываются результаты экспериментов по определению массового состава пучка кластерных ионов аргона и азота. Получены и проанализированы масс-спектры ионно-кластерных пучков аргона и азота при различных давлениях торможения и условиях ионизации. Получен график зависимости эффективного размера кластерных ионов аргона от давления торможения.

---

1. *Yamada I., Matsuo J., Toyoda N., Aoki T., Seki T.* // *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.* 2015. V. 19 P. 12–18.

2. *Korobeishchikov N. G., Kalyada V. V. et. al.* Features of formation of gas cluster ion beams // *Vacuum*, 2015. Vol. 119. No. 9. P. 256–263.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Н. Г. Коробейщиков

## Ионные и столкновительные эффекты в схеме генерации терагерцового излучения

В. К. Худяков

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

Терагерцовое излучение (0.3–30 ТГц) находит широкое применение в различных областях науки. Источники в этом диапазоне открывают новые возможности в исследованиях воздействия такого излучения на материю, однако генерация ТГц импульсов с электрическими полями  $> 1$  МВ/см все еще остается сложной проблемой.

Недавно была предложена новая схема генерации узкополосного терагерцового излучения встречными кильватерными волнами в плазме, которые возбуждаются фемтосекундными лазерными импульсами [1]. На тераваттной лазерной системе в институте лазерной физики СО РАН данная схема позволяет получать ТГц-импульсы, превышающие по мощности одиночные импульсы новосибирского лазера на свободных электронах. Полная энергия излучения, а значит и эффективность такой схемы определяется временем жизни кильватерных волн. Первые теоретические и численные расчеты, в которых учитывалась только динамика электронов, показали, что длительность импульса излучения ограничена величиной  $\sim 100 \omega_p^{-1}$ . Для экспериментальной реализации данной схемы важно понять, насколько эта длительность может уменьшаться за счет эффектов ионной динамики и кулоновских столкновений.

С целью изучения этих эффектов в данной работе была реализована и внедрена в PIC-код модель кулоновских столкновений. Численное моделирование показало, что основным фактором, уменьшающим длительность излучения при параметрах предполагаемого эксперимента является продольная модуляция ионной плотности, создаваемая стоячей плазменной волной. Однако учет этого эффекта незначительно уменьшает эффективность схемы, если в качестве мишени для лазерных импульсов использовать азот.

---

1. *Timofeev I. V., Annenkov V. V., Volchok E. P.* // *Physics of Plasmas*. 2017. V. 24. P.103–106.

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

**Подготовка методики обнаружения подповерхностных разрушений,  
образованных при быстром нагреве поверхности вольфрама**

Д. Е. Черепанов

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

Вольфрамовые стенки дивертора ИТЭР могут подвергаться большой импульсной тепловой нагрузке, способной вызвать разрушение и расплытие их поверхности. Получившиеся при этом микрочастицы вольфрама представляют большую опасность для работы ИТЭР ввиду снижения параметров горячей плазмы при попадании в неё этих микрочастиц из-за накопления радиоактивного трития в них, что увеличивает радиационную опасность всего экспериментального реактора.

В ходе экспериментов на установке ВЕТА (Beam of Electron for material Test Applications) было обнаружено, что при равномерном нагреве на поверхности вольфрама, предназначенного для ИТЭР, появляются ярко светящиеся горячие точки. Это говорит о том, что поверхность прогревается неравномерно. Предполагается, что это происходит по причине структурных особенностей вольфрама, которые локально затрудняют распространение тепла вглубь материала. При последующих импульсах нагрева одни горячие точки исчезают и появляются новые. Последующий анализ с помощью СЭМ показывает, что исчезновение горячих точек вызвано отделением слабо связанных частей материала от поверхности. Для тщательного изучения этого процесса необходимо детальное исследование поверхности вольфрама во время нагрева и сразу после него.

Данная работа посвящена подготовке диагностического оборудования для наблюдения за поверхностью вольфрамовой пластинки, подвергающейся облучению мощным электронным пучком. Основная цель — обнаружить перегретые участки и определить их температуру. Для наблюдения за поверхностью используется система камер на основе ПЗС-матриц. Доклад посвящен описанию настройки и калибровки камер с целью определения температуры объектов по снимкам.

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



## Электронная ионизация малых кластеров аргона в разреженном потоке

С. Т. Чиненов

Новосибирский государственный университет

Одним из методов изучения кластерных газовых потоков является масс-спектрометрия с использованием электронного удара в качестве наиболее распространенного способа ионизации исследуемого газа. В отличие от анализа состава молекулярных веществ и смесей исследование нейтральных кластеров данным методом имеет ряд недостатков. Самым значительным является эффективная деструкция кластеров при электронном ударе. Целью настоящей работы являлось изучение фрагментации потока кластеров аргона при разных способах электронной ионизации: в сверхзвуковом потоке и в детекторе масс-спектрометра.

Работа выполнена на газодинамическом стенде ЛЭМПУС-2 ОПФ НГУ. Формирование кластерного потока осуществлялось за счет адиабатического расширения аргона через звуковое сопло в вакуум. При помощи скиммера формировался молекулярный пучок, транспортируемый в секцию детектора. В качестве анализатора использован квадрупольный масс-спектрометр Hiden EPIC 1000.

В ходе эксперимента кластерный поток ионизовался либо в камере расширения высоковольтными электронами хорошо сфокусированного луча (10 кэВ) при отключенном блоке ионизации масс-спектрометра, либо непосредственно электронами блока ионизации масс-спектрометра с энергией 40 или 70 эВ. На основе полученных масс-спектров проведен сравнительный анализ обоих методов ионизации. Обсуждены особенности регистрации кластеров в сверхзвуковом потоке. На полученных масс-спектрах кластеров, ионизованных высоковольтными электронами, наблюдались особенности, согласующиеся с теоретическими и экспериментальными данными по так называемым «магическим» кластерным числам [2].

---

1. *Zarvin A. E., Kalyada V. V., et al.* Condensable supersonic jet facility for analyses of transient low-temperature gas kinetics and plasma chemistry of hydrocarbons // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2017. V. 45. Issue 5. P. 819–827.

2. *Martin T. P.* Stability of As-S clusters // *The Journal of Chemical Physics*. 1984. V. 80. Issue 1. P. 170–175.

Научный руководитель — канд. тех. наук А. С. Яскин

## **Изучение турбулентных полей в плазме во время протекания РЭП в установке ГОЛ-3Т**

Е. А. Шишкин

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

Для изучения вопросов, связанных с генерацией терагерцового излучения из плазмы в ИЯФ СО РАН была создана установка ГОЛ-3Т. В ней терагерцовое излучение рождается в процессе коллективной релаксации релятивистского электронного пучка в плазме благодаря возбуждению турбулентных электрических полей. Целью данной работы является измерение усредненной амплитуды напряженности электрического поля с наиболее высоким пространственным разрешением. Одним из методов оценки величины напряженности электрического поля является измерение профиля спектральной линии (например,  $\text{H}\alpha$ ), излучающейся из плазмы. Излучение из плазмы, направляемое с помощью светосильного объектива на входную щель спектрометра ДФС-24, диспергируется в спектрометре и направляется для регистрации с помощью многоканального световодного коллектора на ФЭУ. Пространственное разрешение системы в поперечном направлении определяется размером световодного коллектора и коэффициентом уменьшения изображения входного объектива. В продольном направлении система усредняет величину напряженности электрического поля вдоль хорды наблюдения.

В данной работе были проведены исследования канала регистрации излучения: ФЭУ + усилитель + АЦП, а именно: линейность всей системы и шумовые характеристики. Так как рассматриваются малые амплитуды на малых временах, возникающие на ФЭУ шумы дают большую ошибку, в результате увеличивается доверительный интервал по краям профиля. Была найдена ошибка определения интенсивности на краю профиля линии значение которой составило  $5 \times 10^{-4}$ . Таким образом, с достаточной степенью точности можно провести измерения крыльев спектральной линии, так как значение шумовой контрастности превосходит перепад интенсивности в профиле спектральной линии.

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

**Источник пучка ионов ксенона для диагностики  
высокотемпературной плазмы**

А. Д. Шоколов

Новосибирский государственный университет

Пространственный профиль потенциала плазмы является одной из характеристик, необходимых для понимания физики в пробочных ловушках. Известный в настоящее время потенциал газодинамической ловушки (ГДЛ) был измерен при помощи набора ленгмюровских зондов и анализатора энергии ионов, покидающих плазму через пробки. Однако этих методов недостаточно для определения потенциала в центральной области плазмы с высокой плотностью ионов. В связи с этим возникла потребность создания источника тяжёлых ионов, способных дать достаточно информации о потенциале центральной части плазмы.

Цель данной работы — разработка источника ионов ксенона для определения потенциала центральной части плазмы в установке ГДЛ. Пучок первичных ионов  $\text{Xe}^{+1}$  имеет следующие параметры: ток до 7 мА, энергия ионов 60–75 кэВ, размер  $4 \times 20$  мм и угловую расходимость 4 мрад поперёк пучка. В процессе прохождения ионами  $\text{Xe}^{+1}$  плазмы образуется ион  $\text{Xe}^{+2}$ , для которого будет использоваться анализатор отклонённых частиц.

Научный руководитель — А. В. Колмогоров

## **Низковольтный стабилизатор напряжения на базе гелиевой плазмы с плотными пучками электронов**

Е. В. Штода

Санкт-Петербургский горный университет

Предлагаемая работа посвящена разработке плазменного управляемого стабилизатора напряжения на базе сильно неравновесной плазмы гелиевого низковольтного пучкового разряда.

Для решения этой задачи разработана особая триодная конструкция. Ее главная особенность состоит в том, что анод прибора выполнен в виде диафрагмы с центральным отверстием, а управляющий электрод вынесен из зоны разряда и расположен вне межэлектродного промежутка непосредственно за анодом (что является принципиальным для достижения цели работы).

В рабочих условиях экспериментального прибора зондовым методом исследована функция распределения электронов по скоростям и электрокинетические характеристики плазмы низковольтного пучкового разряда в гелии. Обнаружены режимы горения разряда с вольтамперными характеристиками, отвечающими требованиям эффективной стабилизации напряжения. Специальная трехэлектродная конструкция плазменного стабилизатора позволила реализовать полное управление функцией распределения электронов в различных зазорах прибора и тем самым гибко регулировать уровень стабилизированного напряжения в диапазоне 10–100 В.

Предлагаемый прибор обеспечивает получение стабилизированного напряжения за счет создания разряда между катодом и управляющим электродом через отверстие в основном аноде при отрицательном анодном потенциале и управления стабилизируемым напряжением. Такое управление может осуществляться как регулировкой давления гелия, так и изменением отрицательного потенциала на основном аноде.

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

## Указатель авторов

Амельчукова В. Ю. ....	5, 21, 26	Колесников Я. А. ....	72
Антонов А. Н. ....	32	Коломина Е. А. ....	73
Асанина С. Г. ....	62	Коновалов К. В. ....	15
Асмедьянов Н. Р. ....	63	Константинов С. Е. ....	74
Астанина М. С. ....	33	Коншин З. Э. ....	75
Афанасьев Л. В. ....	6	Корнеева М. А. ....	62
Бабич Д. С. ....	34	Кочарин В. Л. ....	13
Баженов А. Ю. ....	35, 38	Кузьмин Е. И. ....	76
Байструков М. А. ....	64	Куркучеков В. В., ....	67
Балаш И. И. ....	65	Кутепова А. И. ....	14
Барышников В. Е. ....	66	Лебедев А. С. ....	15
Баянов Б. Ф. ....	72	Литвинцева А. А. ....	16
Бобров М. С. ....	36, 46	Ломов К. А. ....	77
Богунова А. А. ....	37	Макаров А. В. ....	47
Борьяняк К. И. ....	35, 38	Макаров А. Н. ....	72
Бурдаков А. В. ....	67	Мередова М. Б. ....	48
Быков П. В. ....	67	Мик И. А. ....	15
Ветров Е. В. ....	7	Мишин А. В. ....	17
Владимиров В. Ю. ....	39	Моисеенко Д. Д. ....	34
Вячеславов Л. Н. ....	67	Никишин А. В. ....	78
Гальванцев Н. Б. ....	40	Новицкий А. А. ....	81
Гвоздев С. А. ....	8	Олейник А. А. ....	66
Гордиенко М. Р. ....	9, 11, 45	Пазыл А. С. ....	79
Данилов В. В. ....	67	Панин С. В. ....	34
Дауэнгауэр Е. И. ....	10	Перминов В. В. ....	49
Дементьев Ю. А. ....	41	Пильщиков В. С. ....	80
Демин Н. А. ....	68	Питеримова М. В. ....	18
Дремов С. В. ....	42	Плотников Т. А. ....	81
Дубровин К. А. ....	43	Полянский Т. А. ....	19, 20
Евдокименко И. А. ....	44	Попов В. А. ....	82
Езеендеева Д. П. ....	9, 11, 45	Попов С. С. ....	67
Иващенко В. А. ....	12	Попова Д. С. ....	5, 21, 26
Инжеваткина А. А. ....	69	Прокофьев А. С. ....	83
Казанцев С. Р. ....	70	Распутин А. Л. ....	50
Какаулин С. В. ....	11, 45	Рева С. В. ....	64
Каргаполов И. Ю. ....	64	Роньшин Ф. В. ....	39, 41
Касатов Д. А. ....	72	Руменских М. С. ....	84
Клименков Б. Д. ....	71	Русских А. Г. ....	67
Козюлин Н. Н. ....	36, 46	Рыдалина Н. В. ....	51

Садовский И. А.....	22	Федоренков Э. А.....	91
Самошкин Д. А.....	52	Федорова Д. В.....	5, 21, 26
Самцов Д. А.....	85	Хайрулин А. Р.....	52
Сандалов Е. С.....	86	Харченко В. А.....	92
Семенов С. В.....	87	Холопов М. А.....	67
Сердюков В. С.....	57	Хомченко И. В.....	58
Сибиряков Н. Е.....	53	Худяков В. К.....	93
Сковородин Д. И.....	67	Черепанов Д. Е.....	94
Смердов Р. С.....	88	Чиненов С. Т.....	95
Сорокин И. Н.....	72	Шадрина А. Ш.....	27
Суровнев Д. С.....	54	Шарифуллин Б. Р.....	59
Тамбовцев А. С.....	23	Шатекова А. И.....	60
Тарасов С. А.....	24	Шевченко А. К.....	28
Таскаев С. Ю.....	72	Шипко Е. К.....	29
Ткаченко Е. М.....	55	Шишкин Е. А.....	96
Толстогозов Р. В.....	25	Шкредов Т. Ю.....	30
Третъяков Д. С.....	56	Шоколов А. Д.....	97
Трунев Ю. А.....	67	Штода Е. В.....	98
Туманов В. В.....	57	Щудло И. М.....	72
Устюжанин В. О.....	89	Эм В. В.....	31
Ушмоткин В. О.....	90	Янко П. Е.....	61

## Оглавление

### АЭРОФИЗИКА

Амельчукова В. Ю., Попова Д. С., Федорова Д. В. ....	5
Афанасьев Л. В. ....	6
Ветров Е. В. ....	7
Гвоздев С. А. ....	8
Гордиенко М. Р., Езендеева Д. П. ....	9
Дауэнгауэр Е. И. ....	10
Езендеева Д. П., Гордиенко М. Р., Какаулин С. В. ....	11
Ивашенко В. А. ....	12
Кочарин В. Л. ....	13
Кутепова А. И. ....	14
Лебедев А. С., Коновалов К. В., Мик И. А. ....	15
Литвинцева А. А. ....	16
Мишин А. В. ....	17
Питеримова М. В. ....	18
Полянский Т. А. ....	19
Полянский Т. А. ....	20
Попова Д. С., Федорова Д. В., Амельчукова В. Ю. ....	21
Садовский И. А. ....	22
Тамбовцев А. С. ....	23
Тарасов С. А. ....	24
Толстогузов Р. В. ....	25
Федорова Д. В., Амельчукова В. Ю., Попова Д. С. ....	26
Шадрина А. Ш. ....	27
Шевченко А. К. ....	28
Шипко Е. К. ....	29
Шкретов Т. Ю. ....	30
Эм В. В. ....	31

### ТЕПЛОФИЗИКА

Антонов А. Н. ....	32
Астанина М. С. ....	33
Бабич Д. С., Моисеенко Д. Д., Панин С. В. ....	34
Баженов А. Ю., Борыняк К. И. ....	35
Бобров М. С., Козюлин Н. Н. ....	36

Богунова А. А. ....	37
Борьяняк К. И., Баженов А. Ю. ....	38
Владимиров В. Ю., Роньшин Ф. В. ....	39
Гальванцев Н. Б. ....	40
Дементьев Ю. А., Роньшин Ф. В. ....	41
Дремов С. В. ....	42
Дубровин К. А. ....	43
Евдокименко И. А. ....	44
Какаулин С. В., Езеендеева Д. П., Гордиенко М. Р. ....	45
Козюлин Н. Н., Бобров М. С. ....	46
Макаров А. В. ....	47
Мередова М. Б. ....	48
Перминов В. В. ....	49
Распутин А. Л. ....	50
Рыдалина Н. В. ....	51
Самошкин Д. А., Хайрулин А. Р. ....	52
Сибиряков Н. Е. ....	53
Суровнев Д. С. ....	54
Ткаченко Е. М. ....	55
Третьяков Д. С. ....	56
Туманов В. В., Сердюков В. С. ....	57
Хомченко И. В. ....	58
Шарифуллин Б. Р. ....	59
Шатекова А. И. ....	60
Янко П. Е. ....	61

## ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Асанина С. Г., Корнеева М. А. ....	62
Асмедьянов Н. Р. ....	63
Байструков М. А., Каргаполов И. Ю., Рева С. В. ....	64
Балаш И. И. ....	65
Барышников В. Е., Олейник А. А. ....	66
Данилов В. В., Сквородин Д. И., Попов С. С., Быков П. В., Вячеславов Л. Н., Трунев Ю. А., Бурдаков А. В., Куркучеков В. В., Холопов М. А., Русских А. Г. ....	67
Демин Н. А. ....	68
Инжеваткина А. А. ....	69
Казанцев С. Р. ....	70
Клименков Б. Д. ....	71



Баянов Б. Ф., Касатов Д. А., Колесников Я. А., Макаров А. Н.,	
Сорокин И. Н., Таскаев С. Ю., Щудло И. М. ....	72
Коломина Е. А. ....	73
Константинов С. Е. ....	74
Коншин З. Э. ....	75
Кузьмин Е. И. ....	76
Ломов К. А. ....	77
Никишин А. В. ....	78
Пазыл А. С. ....	79
Пильщиков В. С. ....	80
Плотников Т. А., Новицкий А. А. ....	81
Попов В. А. ....	82
Прокофьев А. С. ....	83
Руменских М. С. ....	84
Самцов Д. А. ....	85
Сандалов Е. С. ....	86
Семенов С. В. ....	87
Смердов Р. С. ....	88
Устюжанин В. О. ....	89
Ушмоткин В. О. ....	90
Федоренков Э. А. ....	91
Харченко В. А. ....	92
Худяков В. К. ....	93
Черепанов Д. Е. ....	94
Чиненов С. Т. ....	95
Шишкин Е. А. ....	96
Шоколов А. Д. ....	97
Штода Е. В. ....	98

Научное издание

МНСК-2018

ФИЗИКА СПЛОШНЫХ СРЕД

Материалы 56-й Международной научной  
студенческой конференции

22–27 апреля 2018 г.

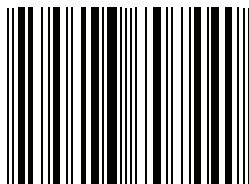
Корректор *Я. О. Козлова*  
Верстка *А. С. Терешкиной*  
Дизайн обложки *Е. В. Неклюдовой*

Подписано в печать 20.04.2018 г.  
Формат 60 × 84 1/16. Уч.-изд. л. 6,5. Усл. печ. б.  
Тираж 50 экз. Заказ № 66.  
Издательско-полиграфический центр НГУ.  
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2.



Секция  
ФИЗИКА  
СПЛОШНЫХ СРЕД

ISBN 978-5-4437-0744-0



9 785443 707440

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

