

**НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
ПРАВИТЕЛЬСТВО НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ**

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

**МНСК–2014**

**11–18 апреля 2014 г.**

**ФИЗИКА СПЛОШНЫХ СРЕД**

**Новосибирск  
2014**

УДК 553  
ББК 22.3

*Конференция проводится при поддержке  
Сибирского отделения Российской Академии наук,  
Российского фонда фундаментальных исследований,  
Правительства Новосибирской области,  
инновационных компаний России и мира,  
Фонда «Эндаумент НГУ»*

Материалы 52-й Международной научной студенческой конференции  
МНСК-2014: Физика сплошных сред / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск,  
2014. 75 с.

ISBN 978-5-4437-0234-6

Научный руководитель секции – д-р физ.-мат. наук, проф.,  
академик РАН А. К. Ребров  
Председатель секции – канд. физ.-мат. наук, доцент Д. Ф. Сиковский  
Ответственный секретарь секции – В. А. Минаков

**Экспертный совет секции:**  
канд. физ.-мат. наук И. А. Бедарев  
д-р физ.-мат. наук Л. Н. Вячеславов  
К. В. Зобов  
д-р физ.-мат. наук С. И. Лежнин  
д-р физ.-мат. наук К. В. Лотов  
д-р физ.-мат. наук А. В. Федоров  
канд. физ.-мат. наук А. А. Шошин  
канд. физ.-мат. наук С. И. Шторк

**УДК 553  
ББК 22.3**

ISBN 978-5-4437-0234-6

© Новосибирский государственный  
университет, 2014

**NOVOSIBIRSK NATIONAL RESEARCH STATE UNIVERSITY  
SIBERIAN BRANCH OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES  
GOVERNMENT OF THE NOVOSIBIRSK REGION**

**PROCEEDINGS  
OF THE 52<sup>nd</sup> INTERNATIONAL STUDENTS  
SCIENTIFIC CONFERENCE**

**ISSC-2014**

**April, 11–18, 2014**

**PHYSICS OF CONTINUOUS MEDIA**

**Novosibirsk, Russian Federation  
2014**

*The conference is held with the significant support of  
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,  
Russian Foundation for Basic Research,  
Novosibirsk Region Government*

Proceedings of the 52<sup>nd</sup> International Students Scientific Conference. Physics of continuous media / Novosibirsk State University. Novosibirsk, Russian Federation. 2014. 75 pp.

ISBN 978-5-4437-0234-6

Section scientific supervisor – Acad. RAS, Dr. Phys. Math., Prof. A. K. Rebrov  
Section head – Dr. Phys. Math., Assoc. Prof. D. F. Sikovski  
Responsible secretary – V. A. Minakov

**Section scientific committee:**

Cand. Phys. I. A. Bedarev  
Dr. Phys. L. N. Vjacheslavov  
K. V. Zobov  
Dr. Phys. S. I. Lezhnin  
Dr. Phys. K. V. Lotov  
Dr. Phys. A. V. Fedorov  
Cand. Phys. A. A. Shoshin  
Cand. Phys. S. I. Shtork

# ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

УДК 533.9.082.79

## ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ДЛЯ ПРЯМОЙ РЕГИСТРАЦИИ ЧАСТИЦ

М. А. Аникеев

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

При экспериментальном изучении физики высокотемпературной плазмы важными задачами являются регистрация продуктов термоядерных реакций синтеза и регистрация атомов перезарядки. Крупная экспериментальная установка газодинамическая ловушка в ИЯФ СО РАН позволяет моделировать процессы, которые помогут в будущем создать источник термоядерных нейтронов на основе открытой газодинамической ловушки.

Целью данной работы являлось изучение возможности регистрации продуктов реакции DD-синтеза, а так же атомов перезарядки на установке ГДЛ с помощью полупроводниковых детекторов. В поставленные задачи входило создание прототипа датчика на основе фотодиода с тонким мёртвым слоем для регистрации продуктов термоядерных реакций DD синтеза в установке ГДЛ, улучшение существующей многоканальной системы диагностики, исследование параметров плазмы посредством наблюдения за пространственным распределением термоядерных реакций. Другой задачей являлось исследование датчика на основе лавинного диода посредством регистрации низкоэнергетических гамма-квантов.

В результате проделанной работы получены следующие результаты:

- 1) Создан датчик на основе фотодиода с тонким мёртвым слоем. (Фотодиод разработан Институтом физики полупроводников СО РАН).
- 2) Были проведены тестовые эксперименты с источником альфа-частиц для проверки работоспособности и калибровки датчика.
- 3) Датчиком на основе лавинного диода были зарегистрированы низкоэнергетические гамма-кванты с энергиями 100-300 кэВ.
- 4) Построен амплитудный спектр сигналов с лавинного детектора при облучении различными тестовыми источниками гамма-квантов с разными энергиями.

Научный руководитель – Е. И. Пинженин.

## **ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ**

И. Д. Брюханов

Томский государственный университет

Существенное влияние на количество солнечной энергии, достигающей земной поверхности, оказывают перистые облака. Их альбедо существенно зависит от пространственной ориентации ледяных кристаллических частиц [1]. Особый интерес представляют облака с аномальным обратным рассеянием («зеркальные»), состоящие из преимущественно ориентированных кристаллов. В 2011-2013 гг. в ходе экспериментов на уникальном поляризационном лидаре ТГУ исследованы оптические и геометрические характеристики «зеркальных» перистых облаков и произведены оценки метеорологических условий их возникновения [2].

Информация о микроструктуре облака содержится в матрице обратного рассеяния света (МОРС). Зависимость её компонентов от азимутальной ориентации кристаллов льда в облаке не позволяет сопоставлять МОРС облаков между собой. Решить эту проблему позволяет операция приведения матрицы к собственному базису [1].

В настоящем докладе приводятся результаты оценок характеристик «зеркальных» перистых облаков. Кроме того, рассматриваются методики оценки параметров микроструктуры таких облаков и приведения МОРС облаков к собственному базису. Методика оценки оптических характеристик облаков базируется на использовании уравнения лазерного зондирования.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (Госзадание), РФФИ (грант №12.05-0675-а) и фонда «Династия».*

---

1. Кауль Б. В., Волков С. Н., Самохвалов И. В. Результаты исследований кристаллических облаков посредством лидарных измерений матриц обратного рассеяния света // Оптика атмосферы и океана. 2003. Т. 16. № 4. С. 354–361.

2. Samokhvalov I. V., Bryukhanov I. D. The research of the microstructure of cirrus clouds with anomalous backscattering // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56. № 10/3. С. 194-196.

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

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МОДИФИКАЦИИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАГРЕТОГО ВОЛЬФРАМА, ОБЛУЧЕННОГО МОЩНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ И ПОТОКОМ ПЛАЗМЫ**

А. А. Васильев

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

Проблема взаимодействия плазмы с материалом стенки реактора является одной из важнейших для осуществления реакции управляемого термоядерного синтеза. Внутренняя поверхность установки подвергается многочисленным нагрузкам в течение эксплуатации: бомбардировка нейтронами, термические нагрузки от потока излучения и частиц плазмы. Эти эффекты накладывают очень жесткие ограничения на возможный спектр материалов первой стенки термоядерного реактора. Для решения этой сложной задачи проводятся поисковые научные исследования различных сплавов и соединений.

Под условие низкой нейтронной активации подходят три химических элемента: углерод, вольфрам и бериллий. Последний из них ядовит и в качестве материала плазмодриемника подходит только при малых потоках энергии. Углерод при сильных тепловых нагрузках образует большое количество пыли, которая связывает тритий и накапливается внутри установки. Поэтому наиболее вероятным материалом считается вольфрам и его различные сплавы.

В данной работе исследовалось появление трещин на вольфраме при разной температуре (20 и 500°C) под воздействием мощного электронного пучка и потока плазмы. Облучение производилось на установке ГОЛ-3, которая представляет собой открытую ловушку с гофрированным магнитным полем. Плазма нагревается при помощи релятивистского электронного пучка, создаваемого ускорителем У-2. Облучение материалов производится в выходном узле установки. В экспериментах мишени подвергались нагрузке по 10 выстрелов с энергетической плотностью 1 МДж/м<sup>2</sup> в каждом выстреле. Подъем температуры осуществлялся нихромовым нагревателем и измерялся хромель-алюмелевой термопарой. Последующее изучение поверхности образцов проводилось на электронном микроскопе Jeol JCM5700.

В работе было получено, что предварительный нагрев мишени препятствует образованию крупных трещин на поверхности вольфрама, но приводит к существенному усилению образования кратеров.

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

## К ВОПРОСУ О ТОЧНОСТИ ДИАГНОСТИКИ НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЫ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ЗОНДАМИ

А. Ю. Грабовский, А. А. Страхова, К. Я. Булахова  
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»,  
г. Санкт-Петербург

Решающая роль в создании приборов плазменной энергетики нового поколения принадлежит методам диагностики сильнонеравновесной плазмы.

В работе [1] показано, что в силу своей геометрии, цилиндрический зонд позволяет восстанавливать только четные компоненты  $f_{2j}$  функции распределения электронов по скоростям (ФРЭС) и создан метод диагностики неравновесной плазмы цилиндрическими зондами, позволяющий восстанавливать полную ФРЭС и регистрировать диаграммы направленного движения электронов.

Вместе с тем, остался открытым исключительно важный вопрос о точности и достоверности метода. Для решения этой задачи исследована погрешность метода, его достоверность и устойчивость результатов по отношению к ошибкам экспериментальных измерений.

В частности, энергетические зависимости второй производной зондового тока по потенциалу зонда ( $I''$ ), зарегистрированные цилиндрическим зондом, сравнивались с данными, измеренными с помощью плоского одностороннего зонда. Установлено, что зависимости  $I''$  практически не отличаются друг от друга для соответствующих углов ориентации цилиндрического и плоского зонда.

Проведен численный эксперимент с пучком быстрых электронов в максвелловской плазме, продемонстрированы возможности метода по восстановлению заданного числа компонентов разложения ФРЭС в условиях шумов и указано минимальное количество ориентаций зонда для достижения требуемой точности определения коэффициентов разложения.

Отдельно проверена точность восстановления лежандровой компоненты  $f_l$  по совпадению экспериментально измеренного и рассчитанного значения разрядного тока. Во всех случаях, где такое сравнение было возможно, расхождение между расчетными и экспериментальными данными не превосходило 10 %.

---

1. A. Mustafaev, A. Grabovskiy, A. Strakhova. // Bulletin of the APS. Vol. 58, № 16, P. 387.

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

## **РАЗРАБОТКА ГЕЛИКОННОГО ИСТОЧНИКА ПЛАЗМЫ ДЛЯ ЛИНЕЙНОЙ УСТАНОВКИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ С МАТЕРИАЛАМИ**

В. А. Карелин

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

В ИЯФ СО РАН разрабатывается геликонный источник плазмы для линейной плазменной установки по изучению взаимодействия плазмы с материалами, которые предполагается использовать для внутренней облицовки установок термоядерного синтеза. Интерес к такому типу разряда вызван его высокой эффективностью, и он может быть использован в качестве мощного источника плазменного потока. В настоящее время в Исследовательском центре Юлих (Германия) работает установка, источником плазмы в которой является дуговой источник с накаливаемым катодом, ресурс работы которого ограничен процессами распыления. Предполагается разработать высокочастотный геликонный источник плазмы на замену источнику с накаливаемым катодом.

Водородный разряд в источнике создается с помощью антенны «Nagoya type III» на частоте 13,56 МГц. Газоразрядную камеру, изготовленную из кварцевой трубы диаметром 10 см, окружают катушки, которые создают продольное магнитное поле. Плазма в геликонном разряде в основном нарабатывается в приосевой области и распространяется вдоль силовых линий. Для исключения контакта плазмы с кварцевой стенкой установлены лимитеры, на которых заканчиваются крайние силовые линии, которые еще не контактируют с кварцевой стенкой. Источник подсоединен к вакуумному объему экспериментального стенда. Промышленный генератор COMDEL СВ-5000 мощностью до 5 кВт используется в качестве источника высокочастотной мощности. Для измерения параметров плазмы будут использоваться интерферометр, ленгмюровский и сеточные зонды.

В настоящий момент времени получена плазма и измеряются ее характеристики – плотность плазмы, которая должна быть около  $10^{12}$  см<sup>-3</sup>, и электронная температура, которая должна составлять несколько электрон-вольт.

Научный руководитель – И. В. Шиховцев.

## СОЗДАНИЕ «УМНЫХ» МИКРО-ПЛАЗМЕННЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СОСТАВА ГАЗОВОЙ СРЕДЫ

Е. Н. Максимова, Ю. В. Растворова

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»,  
г. Санкт-Петербург

Технология разработки построена на основе запатентованного метода стабилизации электрических параметров и метода CES (Collisional Electron Spectroscopy) и позволяет реализовать микро-габаритные устройства для анализа состава газовых смесей. В условиях отсутствия плазменных неустойчивостей идентификация компонентов осуществляется путем анализа энергии характеристических электронов, образующихся при ионизации атомов или молекул А при столкновениях с частицами В\* определенной энергии (фотонами и возбужденными атомами). Электроны детектируются в нелокальном режиме при пространственном ограничении длины диффузии.

Устройства на основе традиционной электронной спектроскопии (ЭС) работают только в условиях высокого вакуума и включают в себя громоздкие энерго-анализаторы и детекторы. По этой причине ЭС до сих пор не вышла из стен лабораторий.

Детектор CES, запатентованный на основных мировых рынках, может работать при атмосферном давлении, при этом расстояние между электродами должно быть порядка 0,1 мм. Общие размеры сенсора CES могут быть порядка  $10^*10^*1$  мм.

Детекторы CES могут применяться в качестве микро-габаритных газоанализаторов в промышленности, медицине и системах безопасности. Они также применимы для анализа элементного состава металлов, в газовых хроматографах, а также для контроля в режиме реального времени процессов горения в двигателях внутреннего сгорания для повышения к.п.д.

*Разработка защищена патентами РФ №2498441, Японии №4408810, КНР ZL200380106502.2, Европейским патентом (Англия, Франция и Германия) EP 1557667.*

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

## НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ДЛИННОГО ПРОТОННОГО ПУЧКА В ПЛАЗМЕННОМ КИЛЬВАТЕРНОМ УСКОРИТЕЛЕ

В. А. Минаков

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

Столкновение встречных пучков – один из способов исследования физики. Для открытия новых явлений требуются пучки большей энергии, однако их получение с помощью классических ускорителей затруднительно. Электрическое поле в них не может быть сколь угодно большим, так как оно способно вырывать электроны из металла стенок, потому линейные ускорители должны иметь колоссальные размеры для достижения высокой энергии пучка, циклические же ускорители лимитированы потерей энергии частиц на излучение вследствие движения по окружности.

Плазма, в отличие от металла, уже разрушена и потому способна выдерживать без разрушения огромные электрические поля, поэтому размеры плазменного ускорителя не будут столь ужасающими. В таком ускорителе один пучок (драйвер) возбуждает в плазме колебания, в поле которых второй пучок (витнесс), двигаясь со скоростью, равной фазовой скорости волны, ускоряется.

Коллаборация AWAKE готовит в ЦЕРНе эксперимент по ускорению пучка электронов в плазме. Планируется использование длинного протонного пучка в качестве драйвера. Проходя сквозь плазму, он самомодулируется, то есть разбивается на большое число маленьких сгустков, которые, действуя в фазе, возбуждают необходимые для ускорения витнесса поля. На начальном этапе эксперимента его важной частью является численное моделирование, целью которого является нахождение оптимальных параметров эксперимента.

Данная работа посвящена поиску параметров плазмы и драйвера, максимизирующих возбуждаемое электрическое поле. Вычисления проводились с помощью численного кода LCODE, разработанного для моделирования плазменного кильватерного ускорения в ИЯФ СО РАН К. В. Лотовым и А. П. Соседкиным. В работе было произведено варьирование восьми различных параметров и найдены направления, в которых их следует изменить для роста поля, или же наоборот было показано отсутствие необходимости менять некоторые из них.

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

## НАНОСТРУКТУРЫ УГЛЕРОДА В СОВРЕМЕННОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

А. Минибаев, С. Жигульский, П. Петров

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»,  
г. Санкт-Петербург

Фундаментальные исследования в области плазменной энергетики открыли новую возможность создания высокоэффективных термоэмиссионных преобразователей тепловой энергии в электрическую (ТЭП) с динамической подачей паров цезия [1].

В работе представлены результаты исследований элементного состава, структуры и химического состояния атомов на поверхности электродов ТЭП и их связь с уникальными энергетическими характеристиками, которые не укладываются в рамки традиционного представления о работе преобразователя энергии.

Поверхность образцов никелевого коллектора исследовалась в вакууме методом электронной оже-спектроскопии, а также на аналитической установке



японской фирмы JEOL. Получено изображение наноструктур углерода в приповерхностном слое образца коллектора.

В лабораторных прототипах цезиевых ТЭП с наноструктурами углерода на аноде достигнуто уникальное сочетание низкого значения  $T_E$  с высоким к.п.д.: снижение барьерного индекса вплоть до  $V_b=1.6$  эВ, эмиссионной работы выхода коллектора до  $\Phi_c=1.0$  эВ при к.п.д.  $\sim 25\%$ , температуре эмиттера  $T_E \sim 1600$  К и температуре коллектора  $T_C \sim 700$  К.

Обнаруженная возможность повышения энергетических параметров ТЭП открывает перспективы их использования в наземной энергетике и требует дальнейших исследований.

---

1. Yarygin V. I. Journal of Cluster Science. Springer, 2012.

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

## **ЗАВИСИМОСТЬ ВКЛАДА ДВУКРАТНОГО РАССЕЯНИЯ В ЛИДАРНЫЙ СИГНАЛ ОТ МОДАЛЬНОГО РАДИУСА КАПЕЛЬ ОБЛАКА**

Е. В. Ни

Томский государственный университет

Облака оказывают существенное влияние на многие атмосферные процессы и на радиационный баланс Земли. Среди множества методов исследования облаков выделяются методы лазерного зондирования (лидарные методы), позволяющие оценить микрофизические и оптические характеристики облаков в режиме реального времени с высоким пространственным разрешением практически в режиме реального времени.

Чаще всего интерпретация данных лидарных экспериментов основана на учете однократно рассеянного излучения, а вкладом многократного рассеяния в лидарный сигнал пренебрегают в силу сложности его выделения и описания. Это справедливо при зондировании образований малой оптической плотности. Лидарный сигнал от облаков, плотных дымок и т.д. обусловлен не только однократным, но и многократным рассеянием. Во многих практически значимых случаях наземного зондирования тропосферных облаков можно ограничиться приближением двукратного рассеяния [1].

Известно [2], что уровень многократного рассеяния в лидарном сигнале определяется микроструктурой облака и величиной объема, в котором формируется лидарный сигнал и который определяется дальностью облака и углом поля зрения приемной системы лидара. Достаточно часто размеры частиц облака могут быть описаны гамма-распределением, параметры которого определяются полушириной распределения, модальным радиусом и водностью облака.

В докладе приводятся результаты исследования влияния модального радиуса на уровень двукратного рассеяния в лидарном сигнале от капельных облаков нижнего яруса при различных значениях угла поля зрения приемной системы лидара.

---

1. Креков Г. М., Кавкянов С. И., Крекова М. М. Интерпретация сигналов оптического зондирования атмосферы. Н. Наука, 1987. – 185 с.

2. Зуев Е. В., Кауль Б. В., Самохвалов И. В. и др. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей. Н.: Наука, 1986. – 186 с.

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

## **БЫСТРАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ВАРИАЦИЙ НЕЙТРОНОВ**

Т. М. Никифорова

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

В 1925 году Вильсон предположил, что градиенты потенциалов внутри грозовых облаков могут оказаться достаточными для ускорения электронов, несмотря на сопротивление воздуха их движению. Он отметил, что такое «разбегание» электронов может стать источником проникающего излучения.

В результате исследования впервые были получены количественные оценки размаха вариаций потоков нейтронов и электростатического поля при грозовых условиях.

Рассмотрены экспериментальные результаты регистрации нейтронной компоненты на уровне моря (105 м) и напряженности электрического поля во время ближних гроз 2009 - 2011 гг.

Зарегистрированы кратковременные всплески потока нейтронов во время ближних (5-7 км) молниевых разрядов. Всплески наблюдались во время значительного изменения поля (до -16 кВ/м), которое скачком менялось до +18 кВ/м в момент молниевых разрядов. Увеличение потока нейтронов достигает 10% и выше от среднего уровня для данных минутного разрешения.

Установлено, что все всплески в нейтронах наблюдались во время гроз, в которых грозовые облака имели третий тип электрической структуры – с компактным положительным зарядом в основании. Всплески регистрировались, в основном, во второй половине грозы.

Обнаружено, что наземные молнии, переносящие положительные заряды, не оказывают существенного влияния на интенсивность нейтронов несмотря на то, что места удара молний могут быть ближе к нейтронному монитору по сравнению с местами ударов отрицательных грозовых разрядов, а напряженность электрического поля при этом может изменяться скачком в более широких пределах (от +10кВ/м до -30 кВ/м).

Анализ экспериментальных данных показал, что возрастание темпа счета в нейтронной компоненте во время ближних гроз носит не случайный характер, а напрямую связан с молниевыми разрядами в окрестности нейтронного монитора. В отдельных событиях темп счета возрастал до 21% (2688 нейтронов в минуту) над фоновым уровнем.

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

## ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ ГАЗА-НОСИТЕЛЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО ИОННОГО ИСТОЧНИКА С КОРОННЫМ РАЗРЯДОМ

О. О. Очиров

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

Коронный разряд широко применяется в масс-спектрометрических ионных источниках с химической ионизацией при атмосферном давлении. При разработке метода определения низких концентраций восстановленных серных соединений в воздухе установлено, что высокая эффективность их ионизации реализуется только при низкой концентрации воды в газе-носителе, а при нормальной влажности они практически не образуют ионов [1]. Это определяет необходимость использования осушенного воздуха в качестве газа-носителя. В тоже время понижение концентрации воды в области разряда может приводить к изменению его характеристик, в частности, изменять диапазон параметров стабильного горения и даже состав ионов-реагентов [2].

В работе приведены результаты изучения влияния влажности газа-носителя на характеристики коронного разряда в ионном источнике с химической ионизацией при атмосферном давлении, спроектированном для малогабаритного масс-спектрометра. Получены вольт-амперные характеристики коронного разряда в воздухе при различных значениях относительной влажности в диапазоне 0.1 ÷ 50 %. Определена область параметров стабильного горения коронного разряда. С помощью масс-спектрометрических измерений установлено, что при снижении влажности газа-носителя появляются ионы-реагенты:  $\text{NO}^+$ ,  $\text{NO}_2^+$ ,  $\text{O}_2^+$ , наличие которых меняет характер ион-молекулярных реакций и тип образующихся ионов анализируемых веществ в ионном источнике.

---

1. Kudryavtsev A. S., Makas A. L., Troshkov M. L., Grachev M. A., Pod'yachev S. P. The method for on-site determination of trace concentrations of methyl mercaptan and dimethyl sulfide in air using a mobile mass spectrometer with atmospheric pressure chemical ionization, combined with a fast enrichment/separation system; Talanta, (2014) in press, <http://dx.doi.org/10.1016/j.talanta.2014.02.024>

2. Shahin M. M. Mass spectrometric studies of corona discharges in air at atmospheric pressures, Journal of Chemical Physics. 45 (1966) 2600-2605

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

## ЛИДАРНЫЙ СИГНАЛ ОТ ОДНОРОДНОГО ОБЛАЧНОГО СЛОЯ В ПРИБЛИЖЕНИИ ДВУКРАТНОГО РАССЕЯНИЯ

Е. Р. Поскребышев

Томский государственный университет

В настоящее время весьма актуальна проблема исследования оптических свойств облаков. Это связано с тем, что облака значительно влияют на радиационный баланс атмосферы. Для исследования атмосферы наиболее широкое применение получили методы дистанционного лазерного зондирования, что объясняется высокой чувствительностью лидаров при обнаружении аэрозолей в атмосфере, хорошим пространственным разрешением и оперативностью получения данных.

Интерпретация лидарных данных, как правило, осуществляется на основе уравнения лазерного зондирования, полученного в приближении однократного рассеяния. Однако, при зондировании облачной атмосферы необходимо учитывать многократное рассеяние. Отдельный интерес представляет случай зондирования облачных слоев малой мощности в атмосфере с высокой прозрачностью. В этом случае зондирующий импульс, пройдя через облачный слой, будет распространяться дальше за пределы облака. Сигнал однократного рассеяния будет обусловлен рассеянием в дымке в случае ее наличия или вообще не будет регистрироваться при ее отсутствии, но на приемную систему лидара все еще будут поступать фотоны, претерпевшие многократное рассеяние в облачном слое. Происходить это будет с некоторым запаздыванием относительно фотонов, отраженных от верхней границы облака, т.е. будет происходить временная задержка лидарного сигнала.

Задача описания лидарного сигнала многократного рассеяния до сих пор не решена. Один из способов решения этой проблемы основан на использовании приближении двукратного рассеяния.

В данной работе представлены результаты численного исследования зависимости мощности лидарного сигнала двукратного рассеяния от однородного облачного слоя различной микроструктуры [1] от толщины облачного слоя и угла поля зрения приемной системы лидара.

---

1. Зуев Е. В. Распространение лазерного излучения в атмосфере. М.: Радио и связь, 1981. – 288 с.

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

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПЫЛЕВОГО КВАЗИАТОМА МЕТОДАМ МОНТЕ-КАРЛО

М. В. Сальников

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

В данной работе исследуется поляризация облака ионов, захваченных сильно заряженной пылевой частицей, помещённой в плазму, при наличии внешнего электрического поля. Вопрос о пространственном распределении захваченных ионов пылевой частицей изучался в [1] [2].

Полная энергия ионов, испытывающих столкновения с нейтралами вблизи пылевой частицы, может стать отрицательной, вследствие чего ионы начинают орбитировать вокруг неё, образуя вокруг частицы положительно заряженное облако. Образуется система: пылевая частица - облако ионов, так называемый пылевой квазиатом. Характерный размер такой системы порядка дебаевской длины экранирования.

Во внешнем электрическом поле облако захваченных ионов смещается вдоль поля, и у данной системы возникает дипольный момент. Целью данной работы было изучение характеристик данной системы и получение зависимостей её поляризации от величины электрического поля, заряда и радиуса пылевой частицы и длины свободного пробега ионов.

Задача решалась методом прямого статистического моделирования Монте-Карло процессов столкновения с нейтралами, пылевой частицей и движения ионов, наблюдалась эволюция ионного облака в окрестности пылевой частицы при наложении внешнего электрического поля. Положение ионов в каждый момент времени находится из системы уравнений движения, решаемой методом Рунге-Кутты 4ого порядка. В результате численного моделирования получена зависимость дипольного момента системы от внешнего электрического поля. С возрастанием напряжённости поля дипольный момент возрастает и имеет максимум. Полученный коэффициент поляризации пропорционален кубу дебаевской длины экранирования. Для полученной зависимости дипольного момента коэффициент поляризации от поля спадает. Таким образом, он зависит от поля, что связано с разрушением ионной оболочки внешним электрическим полем.

- 
1. Gennady I. Sukhinin and Alexander V. Fedoseev, IEEE Trans. on plasma sci., vol. 38, no. 9, September 2010.
  2. Sukhinin G. I., Fedoseev A. V., Antipov S. N., Petrov O. F., and Fortov V. E., Physical Review E 79, 036404 2009.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук Г. И. Сухинин.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТИНУУМА ВОДЯНОГО ПАРА В СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ 8500-12500 СМ<sup>-1</sup>**

А. А. Симонова

Томский государственный университет

Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, г. Томск

Континуальное поглощение водяного пара (или «континуум») – это слабо зависящая от частоты составляющая поглощения электромагнитного излучения в водяном паре. Континуальное поглощение водяного пара вносит значительный вклад (до 5%) в поглощение солнечной радиации и в «парниковый» эффект в атмосфере Земли.

Природа континуума водяного пара мало изучена и активно дискутируется уже более 50 лет. Широко используемая сегодня полуэмпирическая модель континуума (MT\_SKD) далеко не всегда правильно отражает новые экспериментальные данные.

Данная работа посвящена восстановлению континуума, обусловленного только взаимодействием молекул воды (так называемого «self-continuum»), из экспериментальных спектров водяного пара в полосах поглощения 0.94 и 1.13 мкм. Ранее подобные измерения в данном спектральном диапазоне не проводились. Данные исследования могут иметь большое значение для дистанционного зондирования, задач переноса радиации и климатологии.

При восстановлении, континуум водяного пара определяется как разница между полным поглощением (экспериментальный спектр) и расчетным селективным вкладом линий водяного пара. Экспериментальные данные были получены с помощью Фурье-спектрометра Bruker IFS 125HR в Лаборатории им. Резерфорда (RAL, г. Дидкот, Великобритания: <https://www.stfc.ac.uk/76.aspx>) в рамках гранта CAVIAR (<http://www.met.reading.ac.uk/caviar>).

Особенностью полученных результатов является то, что восстановленный из эксперимента континуум в полосах поглощения отличается от модели MT\_SKD наличием явно выраженных широких пиков поглощения. В серии аналогичных измерений в ближнем ИК диапазоне было показано, что подобные пики обусловлены полосами поглощения димеров воды. Для полос, исследованных в данной работе, наличие этих пиков показано впервые. Наблюдается также значительное превышение экспериментального континуума над моделью MT\_SKD-2.5 в окнах прозрачности. Этот факт уже отмечался в отдельных работах последних лет и требует дальнейших исследований.

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

## РАЗРАБОТКА ГЕЛИКОННОГО ИСТОЧНИКА ПЛАЗМЫ ДЛЯ УСТАНОВКИ ГОЛ-3

А. В. Смагина

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

В настоящее время в Институте ядерной физики СО РАН на установке ГОЛ-3 планируется проведение первых модельных экспериментов по СВЧ нагреву плотной магнитоактивной плазмы путём создания в ней геликонного разряда. Нагрев должен происходить за счёт возбуждения в плазме высокочастотных электромагнитных волн (геликонов) и последующей передачи энергии этих волн частицам плазмы. Эти эксперименты представляют большой интерес, поскольку должны послужить основой для разработки стационарного источника плазмы в перспективной установке ГДМЛ-Г.

Для геликонных источников имеется обширная экспериментальная база, показывающая их высокую эффективность и подкреплённая численными и аналитическими моделями. Особенностью установки ГОЛ-3 с точки зрения возбуждения геликонных волн является относительно сильное продольное магнитное поле (2-5 Т). При плотности плазмы  $10^{14} \text{ см}^{-3}$  в таком поле не выполняется условие  $\omega_{ce} \ll \omega_{pe}$ , используемое в большинстве аналитических моделей геликонных источников.

В данной работе рассматривается возможность возбуждения и распространения геликонных волн в условиях установки ГОЛ-3. Рассчитаны дисперсионные кривые для «быстрых» и «медленных» электромагнитных волн. В результате определены диапазоны параметров (плотности плазмы и продольного магнитного поля), в которых возможен геликонный нагрев при выбранной частоте СВЧ генератора (2,45 ГГц). Методом прямого численного моделирования определены структуры полей волн и характерные длины их затухания в плазме.

Для практической реализации геликонного нагрева в рамках данной работы были разработаны и оптимизированы элементы коаксиально-волноводного тракта, предназначенного для передачи СВЧ излучения от имеющегося источника к плазме.

Работу следует рассматривать как продолжение и развитие работы, представленной на предыдущей, 51-й конференции МНСК-2013.

Научный руководитель – П. В. Калинин.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТАЦИОНАРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ВОДОРОДА С РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ РАЗРЯДА

О. З. Сотников

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

Для создания плазмы в стационарных источниках  $H^-$  используются разряды в магнитном поле с пеннинговской или магнетронной геометрией. В пеннинговской геометрии пучок формируется из  $H^-$ , образованных на аноде вблизи эмиссионного отверстия. Геометрия магнетрона позволяет формировать пучок как из  $H^-$  образованных на аноде, так и на катоде. Для активной генерации  $H^-$  необходима пониженная работа выхода на поверхности электродов, обеспечиваемая возобновляемым (при оптимальной температуре) цезиевым покрытием электродов. В экспериментах на импульсных источниках показано, что энергетическая эффективность источников с магнетронной геометрией в 4 раза выше, чем в источниках, использующих разряд Пеннинга.

В ИЯФ разработан стационарный пеннинговский поверхностно-плазменный источник  $H^-$  с током до 15мА при токе разряда до 12 А. В данной работе исследовалась возможность применения магнетронной геометрии для генерации  $H^-$  в стационарном режиме. Для получения магнетронной конфигурации в разрядной камере катодные выступы посередине были соединены перемычкой. Для фокусировки катодных  $H^-$ , на перемычке сделана лунка напротив эмиссионного отверстия в аноде. Полупланотронная геометрия - это вариант магнетронной, в котором анод находится только напротив фокусирующей лунки. Это локализует плазму вблизи анодного отверстия, но нарушает замыкание дрейфа электронов.

В магнетронной геометрии за счёт наличия замкнутого дрейфа стабильная работа разряда достигалась при меньшей подаче водорода 0.04 лТор/с (против 0.08 лТор/с в пеннинговской и полупланотронной геометриях). Ток пучка  $H^-$  в магнетронном источнике 13мА, ниже чем в пеннинговском из-за уменьшенной плотности плазмы вблизи эмиссионного отверстия. В полупланотронной геометрии за счёт большей плотности плазмы получен пучок 10мА при токе разряда 7А, что больше, чем в пеннинговском источнике при том же токе разряда. Дальнейшее увеличение тока разряда приводит к перегреву катода полупланатрона, что разрушает цезиевое покрытие и снижает эффективность генерации  $H^-$ .

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

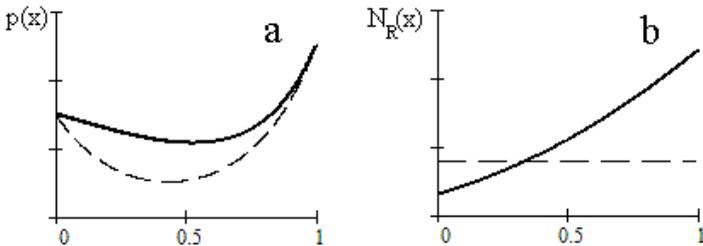
## ВЛИЯНИЕ СТЕПЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕКОМБИНИРУЮЩЕЙ ПРИМЕСИ НА ВОЛЬТ-АМПЕРНУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ p-i-n-СТРУКТУРЫ

В. Г. Стельмах

Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз,  
г. Ташкент

Если в p-i-n-структуре с достаточно длинной базой ( $d \gg L$ ,  $d$  – длина базы,  $L$  – длина пробега неравновесных носителей заряда) инжекция пропорциональна плотности тока  $J$ , текущего через p-i-n-структуру (т.е.  $p(0) = C_1 J$ ,  $C_1 = \text{const}$ ), а аккумуляция пропорциональна корню квадратному этой плотности тока (т.е.  $p(d) = C_2 J^{1/2}$ ,  $C_2 = \text{const}$ ), то вольт-амперная характеристика (ВАХ) будет вида  $J \sim U^4$  (см. [1]) при условии, что рекомбинирующая примесь  $N_R$  постоянна.

Однако, из-за технологического производства или радиационного воздействия распределение  $N_R$  вдоль базы может быть степенного вида, например, типа  $N_R(x) = a(x+b)^n$ , где  $a$ ,  $b$  и  $n$  – параметры описывающее степенное распределение, причём  $n$  необязательно целое. Численными расчётами получено, что ВАХ при таком степенном распределении будет вида  $J \sim U^{4+\delta}$  ( $-0.8 < \delta < 0.8$ ), где  $\delta$  зависит от  $a$ ,  $b$ ,  $n$  и отношения  $C_1/C_2$ . На рисунке внизу (рис.1 а) качественно показано как меняется распределение неравновесных носителей  $p(x)$  в базе p-i-n-структуры из-за степенного распределения рекомбинирующей примеси в ней (рис.1 б), пунктирные линии соответствуют  $N_R = \text{const}$ .



1. Адирович Э. И., Карагеоргий-Алкалаев П. М., Лейдерман А. Ю. Токи двойной инжекции в полупроводниках. Москва, Советское Радио, 1978

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

## ПРОХОЖДЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА ПО УЗКОМУ ВОЛНОВОДУ

П. В. Туев

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

О поведении электромагнитной (ЭМ) волны в волноводе известно многое. Считается, что топология электрического поля в волноводе со стенками из реального металла не сильно отличаются от полученной в ходе решения уравнения Гельмгольца со стенками с бесконечной проводимостью (идеальный металл), а затухание описывается теорией последовательных приближений. Вся эта теория дает хорошие приближения в большинстве ситуаций, но, как было показано в статье И. А. Котельникова [1], это не всегда так. Недавно было предложено использовать каналирование лазерного излучения в микрокапиллярных трубках для кильватерного ускорения. Это позволит достичь высоких энергий пучка на малых длинах ускорения.

В данной работе представлено количественное описание прохождения ЭМ волны через капилляр в условиях, когда характерный размер капилляра намного больше длины волны. Приведено дисперсионное соотношение для случая круглого сечения. Определен модовый состав такого капилляра, существенно отличающийся от случая волновода с идеально-проводящими стенками. Для мод вычислены декременты затухания, которые соответствуют большей длине затухания, чем предсказывает теория последовательных приближений. Произведено сравнение численного решения дисперсионного уравнения и приближенного решения из статьи И. А. Котельникова [1]. Также в рамках нашей теории и теории последовательных приближений рассчитана энергия, прошедшая сквозь капилляр. Экспериментальные данные, полученные на гелий-неоновом лазере и медном капилляре, подтверждают выводы новой теории.

---

1. Котельников И. А. «О затухании в волноводе» - Новосибирск 2003 г.

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

## **ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВО ВРЕМЯ МЕТЕЛИ**

А. О. Уварова

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

На Крайнем Севере, в Сибири и даже иногда в Крыму во время сильных метелей и снегопадов случаются зимние грозы и шаровые молнии. Особо высокие градиенты электрического потенциала наблюдаются преимущественно при сильных общих метелях, низких температурах и сухом снеге. Многие исследователи считают основной причиной этого явления трение снежинок о воздух, друг о друга, о поверхность земли. Таким образом, наблюдения метелей в Северо-Восточной Сибири только начаты и особенно актуальны.

В процессе работы проводились экспериментальные исследования по зарегистрированным данным с помощью электростатического флюксметра данным электрического поля во время метелей в городах Нерюнгри, Тикси, Якутске.

Получено, что в Якутске наблюдается в среднем 7 дней с метелью. Интенсивные метели в Якутске бывают крайне редко - раз в 3-5 лет. Число дней с метелью значительно больше в Нерюнгри, где с помощью электростатического флюксметра наблюдались вариации электрического поля до 4 кВ. В Тикси наблюдается до 100 дней с метелью. В октябре 2013 года измерили вариации электростатического поля размахом с 0 до 18 кВ, при скорости ветра до 25 м/с. Предварительные наблюдения за февраль 2014 года наблюдались электростатическое поле с размахом с 0 до -90 кВ, при ветре 15 м/с.

Дальнейшие исследования по данным зарегистрированным в Тикси позволят получить оценки вариаций электростатического поля при экстремальных метелях, при ветрах до 60 м/с.

В результате поиска отобраны наиболее эффективные технические решения, содержащие сведения о последних научно-технических достижениях в этой области.

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

## **ВЛИЯНИЕ ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОПРИЁМНИКОВ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ**

В. Э. Художитков

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

Одним из вкладов России в создание международного токамака ИТЭР является разработка диагностики диверторной плазмы методом томсоновского рассеяния. Ввиду того, что плазма в области дивертора может обладать весьма низкой плотностью, возникает необходимость регистрации слабых сигналов. Для регистрации таких сигналов критическим моментом является снижение шумов. В случае, когда основным источником шумов является собственное свечение плазмы, собственные шумы системы регистрации не играют особой роли. Однако, когда шумы вызванные свечением плазмы малы, величина собственных шумов детекторной системы становится важным фактором. Поэтому, с целью повышения точности измерений в последнем случае, был создан новый малошумящий детекторный блок.

С целью определения, преимуществ новой детекторной системы производится её сравнение в реальном плазменном эксперименте с детектором, используемым в системе регистрации томсоновского рассеяния на установке ГОЛ-3.

На данный момент мы исследовали зависимость шумовой характеристики фотоприёмников, используемых в настоящее время в системе регистрации томсоновского рассеяния, от напряжения, поданного на фотодиод при различном уровне фоновой засветки, имитирующей собственное свечение плазмы. На основе полученных экспериментальных данных производится оценка эффективности системы для различных параметров плазмы.

Далее планируется провести аналогичное исследование шумовой характеристики и эффективности работы для нового фотодетектора. Ожидается, что главным результатом работы будет представление результатов тестирования нового фотоприёмного блока в условиях реального эксперимента и уточнение, в каких условиях и насколько новая детекторная система окажется чувствительней старой.

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

## СПИРАЛЬНЫЕ МОДЫ В ЗАКРУЧЕННЫХ СТРУЯХ С ГОРЕНИЕМ

С. С. Абдуракипов

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

Как известно, интенсивная закрутка потока, приводящая к распаду вихревого ядра и образованию приосевой зоны рециркуляции, используется в горелочных устройствах для стабилизации пламени. Этот режим течения характеризуется развитием спиральной моды неустойчивости потока, имеющей форму прецессирующего вихревого ядра (ПВЯ). Информация о характеристиках течений с ПВЯ и, прежде всего, о частотах возникающих неустойчивостей необходима для разработки и совершенствования горелочных устройств. Данная работа посвящена численному исследованию устойчивости закрученных струйных течений с горением и экспериментальному исследованию динамики когерентных вихревых структур (КВС) в закрученном пламени с использованием современной методики измерения Particle Image Velocimetry (PIV), статистических подходов для анализа турбулентных потоков Proper Orthogonal Decomposition (POD) и Dynamic Mode Decomposition (DMD).

Для организации закрученного пламени пропано-воздушной смеси было использовано сопло Витошинского с выходным диаметром  $d = 15$  мм. Число Рейнольдса и среднерасходная скорость потока равнялись  $Re = 4100$ ;  $U_0 = 5$  м/с, соответственно. Закрутка потока организовывалась лопаточными завихрителями. Для измерения с частотой 770 Гц полей мгновенной скорости потока в центральной плоскости струи была использована скоростная PIV система «ПОЛИС».

Экспериментальные профили средней скорости течения и модельный профиль плотности использовались для линейного локального анализа устойчивости закрученных реагирующих потоков спектральным методом коллокаций Чебышева. Определены наиболее неустойчивые спиральные моды возмущений. Применение методов POD, DMD к данным скоростных PIV измерений в закрученном пламени позволило определить характерные частоты турбулентных пульсаций для различных областей потока и проанализировать масштабы соответствующих этим частотам пространственных когерентных структур. Трехмерная пространственная форма спиралевидных возмущений в закрученном пламени была восстановлена с помощью POD и анализа устойчивости.

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

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОЙ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ СКОРОСТНЫМ ТОМОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ В ОБЪЕМЕ ПОТОКА

М. В. Алексеенко

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

Многообразие турбулентных течений существующих как в натуральных условиях, так и в технических устройствах порождает необходимость исследования фундаментальных физических явлений присущих им. Наиболее часто в задачах механики жидкости и газа встречаются трехмерные нестационарные потоки, представляющие наибольший интерес. Соответствующей фундаментальной проблемой является определение сложной мгновенной структуры турбулентности.

Томографический метод измерения скорости в объеме потока [1] (Томо-PIV) относительно недавно реализованный бесконтактный инструмент, применяемый к диагностике потоков. В основе метода лежит процесс томографической реконструкции измеряемого объема по изображениям трассерных частиц, записанным одновременно, с нескольких камер, направленных под разными углами. Основное преимущество метода состоит в том, что он позволяет измерять мгновенные трехмерные трехкомпонентные поля скорости, что дает возможность визуализировать поток и рассчитывать его осредненные и дифференциальные характеристики. Наиболее продвинутой его модификацией является скоростной томографический метод (TR Tomo-PIV).

Целью работы является экспериментальное исследование турбулентной ( $Re \approx 10000 \div 20000$ ) затопленной струи скоростным Томографическим методом. А также идентификация крупномасштабных вихревых структур в слое смешения с помощью «Q» критерия [2].

В работе с помощью TR Tomo-PIV метода были измерены поля скорости в затопленной струе воды, вытекающей из профилированного сопла. Показана вихревая структура потока

1. G. E. Elsinga, F. Scarano, B. Wieneke, B. W. van Oudheusden. Tomographic particle image velocimetry. *Exp. Fluids* 2006 (41) pp. 933–947
2. J. Jeong, F. Hussain. On the identification of a vortex. *J. Fluid Mech.* 1995, vol. 285, pp. 69-94

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

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КВАДРАТУР ГАУССА-КРИСТОФФЕЛЯ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ $\Omega$ -ИНТЕГРАЛОВ В КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ГАЗОВ

Р. И. Алчин

Казанский технический университет им. А. Н. Туполева

В соответствии с кинетической теорией газов [1], для определения коэффициентов переноса используется понятие  $\Omega$  – интеграла, имеющего вид:

$$\Omega_{ij}^{(l,r)} = \frac{kT}{2\pi m_{ij}} \int_0^{\infty} \exp(-\gamma^2) \gamma^{2r+3} Q_{ij}^{(l)} d\gamma \quad (1)$$

Отметим, что подынтегральная функция в несобственном интеграле (1) является осциллирующей, и при значениях  $q = q_{eff}$  [2] частота осцилляций резко возрастает. В связи с этим возникает проблема создания алгоритмов вычисления интегралов с быстро осциллирующей подынтегральной функцией. Для решения этой проблемы в [2] предлагаются адаптирующие квадратуры, сплайн-квадратуры, а в [3] рассматривается использование теории ортогональных многочленов. Это позволило создать компьютерные технологии вычисления такого типа интегралов, которые используются в кинетической теории газов для вычисления коэффициентов переноса. Как показали вычислительные эксперименты, алгоритмы Гаусса-Кристоффеля [3] и сплайн – квадратуры [2] оказались наиболее эффективными для решения такого типа интегралов.

---

1. Чепмен С. Математическая теория неоднородных газов/ С. Чепмен, Т. Каулинг. – М.: ИЛ, 1960.

2. Анисимова И. В. Вычислительные технологии процессов переноса газов/ И. В. Анисимова, В. Н. Игнатьев. Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ им. А. Н. Туполева.

3. Анисимова И. В., Гиниятуллина Р. Р., Игнатьев В. Н. Об одном методе вычисления узлов и весов квадратур Гаусса-Кристоффеля. // Математическое моделирование. Изд-во Академиздатцентр "Наука". -2013. – Т. 25. -№ 3.- С. 3-13.

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

## **КАВИТАЦИОННЫЙ ИЗНОС ЛОПАТОК ПАРОВЫХ ТУРБИН Т-100/120-130**

Д. А. Амирбеков

Карагандинский государственный университет им. Е. А. Букетова

Рабочие лопатки паровых турбин в настоящее время в большей мере выбрасываются и заменяются на новые при капитальном ремонте. Восстановление лопаток турбин и продление их срока службы еще не развито в полной мере. Учитывая высокую стоимость одной лопатки, и большое число лопаток работающих по сей день, вопрос восстановления имеет большое значение.

В настоящее время серийно выпускаемые лопатки изготавливаются из коррозионностойких жаропрочных сталей 20Х13-Ш и 15Х11МФ-Ш мартенситного класса, либо из титановых сплавов типа ВТ-6 и ТС5, последние в основном используются на турбинах спроектированных для АЭС. Причиной эрозии лопаток турбин типа Т-100/120-130 в зоне фазового перехода РСД, последних ступеней РНД с лопатками наибольшей длины, является удар капель воды с относительной высокой скоростью. Присутствие воды объясняется тем, что пар расширяется в турбине, пока не станет влажным. В свою очередь не влажный пар вызывает повреждения, а капли воды, вырывающиеся из скопления воды на направляющих лопатках и на корпусе.

В данной работе рассматривались процессы износа лопаток турбин типа Т-100/120-130. Были рассмотрены причины аварий турбин в процессе работы, характер износа лопаток в зоне фазового перехода ротора среднего давления. Было приведено объяснение возможной причины возникновения кавитационного износа, которая влияет на прочность и долговечность конструктивных элементов проточной части паровых турбин. Предложены возможные меры борьбы с коррозией.

Целью работы было исследование процессов износа протекающих в паровых турбинах типа Т-100/120-130 на лопатках РСД и РНД.

Исследования проводились с применением методов неразрушающего контроля, УЗК, визуально-измерительного, МПД, растровой микроскопии.

В работе показано, что изучение износа лопаток паровых турбин от влияния кавитации, позволит сократить материальные издержки при эксплуатации паровых турбин и перейти к научно-обоснованным методам организации процесса эксплуатации, ремонтных компаний, работ по реконструкции и модернизации оборудования.

Научный руководитель – д-р техн. наук, проф. К. К. Кусаиынов.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ И СТРУКТУРУ ИМПАКТНЫХ МИКРОСТРУЙ

А. Б. Балбуцкий

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

Импактные микроструи являются одной из наиболее часто встречающихся форм организации эффективного тепломассообмена в МЕМС - технологиях. Причина с одной стороны в простоте технической реализации струйных тепломассообменных аппаратов, а с другой стороны в чрезвычайно высокой интенсивности процессов переноса, связанной с сильной неустойчивостью микроструй [1].

В докладе приведены экспериментальные результаты влияния акустического поля на устойчивость и структуру плоской и круглой импактных микроструй.

Результаты эксперимента для плоской микроструи показывают образование пары вихревых дорожек распространяющихся в плоскости перпендикулярной большей стороне сопла.

Как было показано в работе [2] в горячей микроструе пропана хорошо визуализируются структуры образованные при наложении акустического поля, в связи с активизацией перемешивания. Это свойство позволяет качественно визуализировать процессы происходящие в импактных микроструях. Этим методом была исследована круглая импактная микроструя и было показано, что при наложении акустического поля, происходит образование пары вихревых дорожек, нарушающих симметричность течения. Это свойство в корне отличает структуру импактной микроструи от импактной макроструи, когда реализуется, при наложении акустического поля, другой тип неустойчивости.

---

1. Козлов В. В., Грек Г. Р., Литвиненко Ю. А., Козлов Г. В., Литвиненко М. В. «Дозвуковые круглая и плоская макро- и микроструи в поперечном акустическом поле.», Вестник НГУ, серия: физика, 2010г., Том 5, выпуск 2, стр. 28-42.

2. Грек Г. Р., Катасонов М. М., Козлов В. В., Коробейничев О. П., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г. «Особенности горения пропана в круглой и плоской макро- микроструях в поперечном акустическом поле при низких числах Ренольдса.», Вестник НГУ, серия: физика, 2013, том 8, выпуск 3, стр. 98-120.

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

## **ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ФРОНТА ПЛАМЕНИ ПРИ ГОРЕНИИ ГЕТЕРОГЕННОЙ СРЕДЫ, СОСТОЯЩЕЙ ИЗ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПЕРЕМЕШАННОЙ ГОРЮЧЕЙ СМЕСИ С ЧАСТИЦАМИ ТОПЛИВА**

Н. С. Беляков

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

В работе исследуется процесс горения гетерогенной среды, состоящей из горючей смеси и микрокапель топлива. Такой вид топлива используется в газотурбинных установках, дизелях, двигателях внутреннего сгорания, отопительных котлах. Экспериментальные исследования [1] показали, что на поверхности расходящегося сферического пламени газочапельных смесей интенсивно развивается ячеистая структура, а в некоторых случаях наблюдаются пульсации пламени.

Данной работа посвящена теоретическому исследованию гидродинамической устойчивости плоской волны горения предварительно перемешанной смеси с частицами топлива. Модель, описывающая течение гетерогенной смеси, основана на идее двух взаимодействующих взаимопроникающих континуумов. Фронт пламени рассматривается как граница раздела между несгоревшей смесью с каплями топлива и продуктами горения. Считается, что нормальная скорость волны горения зависит от плотности капель топлива перед фронтом пламени и от локальной кривизны поверхности.

В работе было проанализировано влияние плотности капель в свежей смеси, коэффициента расширения и других характеристик газочапельной среды на устойчивость фронта пламени. Был исследован предельный переход к теории гидродинамической неустойчивости Дарье-Ландау для обычного пламени. Исследованы режимы горения, при которых наблюдаются колебания фронта пламени, обнаруженные экспериментально [1]

---

1. F. Atzler, F. X. Demoulin, M. Lawes and Y. Lee, Oscillations in the flame speed of globally homogeneous two phase mixtures // Combustion Science and Technology– Volume 178, Issue 12, 1 June 2006, Pages 2177-2198

Научный руководитель – д-р. физ.-мат. наук С. С. Минаев.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСНОЙ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ

А. П. Винокуров

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

Вихревые процессы существенно влияют на развитие современной энергетики. Закрученные потоки используются в горелочных устройствах для интенсификации процессов горения и стабилизации пламени, в скрубберах и циклонных сепараторах для очистки газов и топлив, в гидроэнергетике и т. д. [1]. Однако порой закрутка потока приводит к негативным последствиям. Так, при неоптимальных режимах работы гидроэлектростанции за рабочим колесом турбины возникают нестационарные вихревые структуры, в частности прецессирующее вихревое ядро (ПВЯ), генерирующее мощные пульсации давления. Совпадение частоты прецессии ПВЯ с одной из собственных частот конструкций ГЭС представляет собой серьезную опасность для станции. Одним из методов влияния на частоту прецессии является добавление газа в поток жидкости.

Целью работы является исследование влияния дисперсной газовой фазы на характеристики нестационарных вихревых структур в жидкости, в частности, прецессирующего вихревого ядра (ПВЯ). Для решения этой задачи построен замкнутый гидродинамический контур с регулируемым расходом жидкости и газа. Исследована зависимость параметров ПВЯ от потока массы и геометрических параметров вихревой камеры, таких как параметр крутки завихрителя и диаметра сопла. Проведено исследование влияния дисперсной газовой фазы на частоту прецессии ПВЯ, амплитуду пульсаций давления и осредненные перепады давления в камере. Помимо экспериментального моделирования проведено численное моделирование процесса в коммерческой CFD-программе Star-CCM+.

---

1. Винокуров А. П., Шторк С. И., Алексеенко С. В. Исследование нестационарных вихревых структур в осесимметричной гидродинамической камере. Вестник НГУ. Серия: Физика. 2013. Том 8, выпуск 4., стр. 76-83.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН  
С. В. Алексеенко.

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВОЛНОВЫХ ЯВЛЕНИЙ НА ВОЗМУЩЕННОЙ ВИХРЕВОЙ НИТИ

В. В. Денисюк

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

Волновые явления, связанные с турбулентными течениями интересны, как с точки зрения фундаментальных исследований, так и с точки зрения их практического применения и учёта в различных устройствах - лопастях, турбинах ГЭС, и т. д.

Особенно выделяются, в этой области знания, концентрированные вихри, и, в частности, – квазистационарная вихревая нить. В таких условиях теоретически возможно распространение солитонных волн [1, 2], которые предположительно отвечают за распад вихря. Для дальнейшего развития теории процессов в закрученных потоках необходима информация по характеристикам таких волн, которая может быть получена экспериментально.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию волн на концентрированных вихрях и их классификации на основе внешних характерных признаков. Также целью является соотнесение экспериментальных результатов с теорией и анализ, являются ли полученные волны в вихрях солитонами, а также их детальное описание.

Исследования проводились с применением методов высокоскоростной съёмки, а также применялась PIV методика для измерения мгновенных полей скоростей. При проведении эксперимента варьировались такие параметры как число Рейнольдса, менялся тип возмущения.

Были получены бегущие против течения возмущения, проведена их классификация, определены характеристики волн, амплитуда, групповая скорость, направление закрутки винтовых возмущений, характерное поведение волн при взаимодействии.

Соотнесение с теорией солитона Хасимото дает небольшое расхождение для значений групповых скоростей и их связи с амплитудой возмущения, что возможно связано с влиянием осевого течения.

---

1. Hasimoto H. A soliton on a vortex filament // J. Fluid Mech. - 1972 - Vol. 51. P. 477-485.

2. Konno K., Ichikawa Y. H. Solitons on a vortex filament with axial flow // Chaos, Solitons & Fractals, 1992, Vol. 2, N 3, pp. 237-250.

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

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ НА СКОЛЬЗЯЩЕМ КРЫЛЕ ПРИ $M=2,5$

А. Д. Дрясов

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

В последнее время исследование трехмерных пограничных слоев является актуальной задачей в аэрофизике в силу своего практического применения. Большинство теоретических и экспериментальных работ по устойчивости трехмерного пограничного слоя на скользящем крыле проводилось для случая дозвуковых скоростей потока. В этих экспериментах показано, что нелинейные процессы приводят к раннему наступлению ламинарно-турбулентного перехода

В данной работе представлены экспериментальные исследования влияния внешних вихревых возмущений на развитие пульсаций в сверхзвуковом пограничном слое на скользящем крыле.

Эксперименты выполнены в ИТПМ СО РАН в малотурбулентной сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-325 при числе Маха  $M=2,5$ . В экспериментах использовалась модель крыла с чечевицеобразным профилем и углом скольжения передней кромки  $\chi = 45^\circ$  и относительной толщиной 3%. Внешние вихревые возмущения создавались с помощью проволоки различного диаметра, натянутой перед сопловыми вставками, перпендикулярно передней кромки модели крыла. Возмущения в потоке регистрировались термоанемометром постоянного сопротивления.

Определены положения ламинарно-турбулентного перехода для всех источников внешних возмущений, получены профили пульсаций массового расхода. Для всех случаев выполнен статистический анализ экспериментальных данных, построены амплитудно-частотные спектры возмущений в критическом слое. Получено, что в линейной области развития возмущений при увеличении числа Рейнольдса до  $Re_x = 0,75 \cdot 10^6$  наблюдается рост пульсаций массового расхода только в низкочастотной части спектра (до 40 кГц). В нелинейной области происходит расширение частотного диапазона. Увеличение уровня возмущений в свободном потоке приводит к возрастанию пульсаций массового расхода в области до 10 кГц.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук Н. В. Семенов.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА НА ТРАНСЗВУКОВОЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ НА ПЛАСТИНЕ

Л. В. Иванов

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

В настоящее время для современной трансзвуковой авиации важной является задача управления ламинарно-турбулентным переходом на ламинаризованных профилях, а также управлением турбулентным течением для подавления отрыва и в частности борьбы с таким опасным явлением как бафтинг. Один из перспективных методов управления потоком основан на использовании электрических разрядов. Данные управляющие устройства являются весьма привлекательными с точки зрения их практического использования ввиду ряда причин - это простота конструкции, надёжность, возможность интеграции в поверхность летательного аппарата (ЛА), а также широкий диапазон рабочих частот.

В данной работе предприняты попытки воздействовать на турбулентный поток с помощью диэлектрического барьерного разряда (ДБР). Испытывались 3 различные конфигурации ДБР. Основной механизм воздействия ДБР на высокоскоростной поток заключается в генерации слабых ударных волн кратковременного локального нагрева. В качестве основных методов исследования были задействованы метод шпирен-визуализации, PIV метод. Также для получения данных были использованы датчики статического давления и датчики пульсаций давления, а также измерения трубой Пито.

Было изучено воздействие разных типов ДБР на пограничный слой. Воздействие происходило в зоне ламинарно-турбулентного перехода с высоким уровнем естественных пульсаций. Было показано, что используемые разряды слабо воздействуют на среднюю картину течения, но приводят к изменению уровня пульсаций. Был найден наиболее оптимальный с точки зрения возмущений тип конструкции ДБР. Тем не менее, уровень воздействия является недостаточным, что требует дальнейших исследований.

*Работа выполнена в Новосибирском государственном университете при поддержке гранта Правительства РФ (Договор № 14.Z50.31.0019)*

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

## ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТЕЧЕНИЯ ЗА ШЕРОХОВАТОСТЯМИ НА ПЕРЕДНЕЙ КРОМКЕ СКОЛЬЗЯЩЕГО КРЫЛА

В. С. Каприлевская, С. Н. Толкачев

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

Новосибирский государственный университет

В настоящее время ведущие производители самолетов ведут борьбу за проценты снижения сопротивления воздуха. Одним из способов достижения этой цели является ламинаризация несущих поверхностей, что ставит задачу исследования устойчивости течения на стреловидном крыле, модельным приближением которого является скользящее крыло.

В сценарии ламинарно-турбулентного перехода на передней кромке скользящего крыла важную роль играют стационарные вихри за шероховатостями, приводящие к снижению устойчивости течения и формированию вторичных высокочастотных возмущений, развитие которых вызывает переход.

Эксперимент проводился в малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ с рабочей частью длиной 4000 мм. и поперечным сечением 1000×1000 мм. на модели скользящего крыла, имеющей цилиндрическую переднюю кромку и угол скольжения 45°. Эксперимент опирался на методику жидкокристаллической термографии с подогревом рабочей поверхности. Для предотвращения отрыва потока на участке максимального утолщения крыла на нижней плоскости были использованы турбулизаторы. Стационарные возмущения возбуждались двумя цилиндрическими шероховатостями высотой и радиусом 0.8 мм. Для возбуждения вторичных возмущений использовался динамик громкоговорителя, соединенный со звуковым генератором. Скорость набегающего потока составляла  $U_{\infty} = 9.3$  м/с. Угол атаки модели был равен  $\alpha = -10.7^{\circ}$ .

Установлено, что при расположении шероховатостей на расстоянии  $\Delta = 3.2$  мм и меньше продольные структуры начинают взаимодействовать, что проявляется в подавлении одного из вихрей.

Акустическое воздействие приводит к усилению вторичных возмущений. На картинах визуализации это проявляется в усилении теплоотдачи от стенки, что говорит об их нелинейном характере. Кроме того, наблюдается генерация дополнительных продольных структур.

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

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДЫР ВО ФРОНТЕ ДИФфуЗИОННОГО ПЛАМЕНИ В РЕЖИМЕ ПЕРЕХОДНОМ ОТ ЛАМИНАРНОГО К ТУРБУЛЕНТНОМУ ГОРЕНИЮ

В. С. Козулин

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

В настоящее время большой практический интерес вызывает диффузионное горение в спутном потоке газа, используемое во многих технологических устройствах.

Исследования диффузионного пламени зарубежными авторами (К. М. Lyons, К. А. Watson, С. D. Carter, J. M. Donbar) показали, что во фронте пламени в режиме переходном от ламинарного к турбулентному наблюдаются «дырки». Это явление было рассмотрено многими авторами с точки зрения воздействия на устойчивость горения, а также выдвинуты предположения относительно причин возникновения и роста подобных структур.

Целью данной работы является решение фундаментальной задачи, связанной с процессами горения в режиме ламинарно-турбулентного перехода в диффузионном пламени углеводородов, находящемся в изменяющемся электрическом поле (ЭП), являющемся эффективным средством воздействия. Основная задача - выяснить влияние «дырок» на процесс перехода и интенсификацию процесса горения при наложении ЭП на пламя.

В работе рассматривался переходный режим горения метана и пропана. Регистрация собственного излучения пламени осуществлялась спектральной камерой Image Intense CCD в видимом диапазоне.

При воздействии постоянного и импульсно-периодического ЭП (и без ЭП), в области, занимающей по высоте несколько калибров от точки поджога, были замечены так называемые «дырки» в пламени (время жизни 3-4 мс). Предполагается, что причина их возникновения - вихри, развивающиеся в виде хоботообразных структур в направлении к фронту пламени.

Области локального затухания, вероятно, являются следствием большого коэффициента растяжения плоского пламени, когда происходит растяжение поверхности пламени при неизменном подводе топлива, при этом значение числа Дамкёлера уменьшается ниже критического уровня.

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

## **СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ОБТЕКАНИЕМ ЗАТУПЛЕННЫХ ТЕЛ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ПОРИСТЫМИ ГАЗОПРОНИЦАЕМЫМИ МАТЕРИАЛАМИ**

В. А. Колотилов

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

Новосибирский государственный университет

В настоящее время актуальны разработки новых подходов к управлению аэродинамическими характеристиками сверхзвуковых летательных аппаратов и, в частности, управлению волновым сопротивлением затупленных тел. Одним из перспективных подходов является использование газопроницаемых пористых материалов для управления обтеканием тел в сверхзвуковом потоке, а также использование управляемых изменений газопроводимости пористых материалов для создания продольных и поперечных аэродинамических сил.

Основной целью расчетно-экспериментального исследования является численное моделирование обтекания простой модели цилиндра с передней пористой вставкой. В качестве газопроницаемых материалов в экспериментах использовались образцы из вспененного никеля с порами ячейками различных диаметров. Для управления обтеканием было предложено выдвигать пористую вставку и изменять газопроводимость пористой вставки путем ее нагрева. Последний способ был реализован с помощью нагрева пористого материала тлеющим разрядом.

Для оптимизации воздействия на поток газопроницаемыми материалами необходимо знать зависимости перепада давления в пористом материале от скорости течения в порах. Поэтому были выполнены измерения скорости течения воздуха в вспененном никеле от величины пор, длины образца и температуры материала.

Данные эксперимента были использованы для численного моделирования. Использовался пакет ANSYS Fluent. Численный расчет проводился для определения волнового сопротивления тела с пористой вставкой впереди без учета нагрева пористого тела. Результаты численного расчета хорошо совпадают с экспериментальными данными.

Научный руководитель – д. физ.-мат. наук С. Г. Миронов.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ О ВОЛНЕ ГОРЕНИЯ В ГАЗОВЗВЕСИ МАГНИЯ

Ю. С. Корнеева

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

Мелкие частицы Mg часто встречаются в приложениях, в частности используются в аэрокосмической, химической, металлургической промышленности, где используются реагирующие дисперсные порошки.

Данная работа посвящена созданию физико-математической модели волны воспламенения и горения мелких частиц магния и разработке математической технологии для ее реализации с целью прогнозирования характеристик волн воспламенения и горения.

Рассмотрены два случая описания окисления: с учетом и без теплового торможения реакции окисления при высоких температурах. Применены методы элементарной теории катастроф, для исследования типов решения задачи Коши.

В ходе исследования, были определены дважды вырожденные критические точки, подобраны кинетические константы, произведена оценка времени релаксации и проведен ряд расчетов, для определения времени задержки воспламенения.

Исследования проводились с применением методов физико-математического моделирования в механике гетерогенных сред и численного моделирования, в рамках создания соответствующей математической технологии решения задач МГС. Предложенные математические модели были верифицированы путем сравнения данных расчетов с экспериментальными. В результате удалось добиться достижения максимальной температуры горения, соответствующей экспериментальным данным. В работе сопоставляется ширина зоны горения и воспламенения, и показывается влияние на их величину кинетических констант.

Научный руководитель – д-р. физ.-мат. наук А. В. Федоров.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГАЗОВОЙ СТРУИ С ЖИДКИМИ ЧАСТИЦАМИ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Р. З. Курмангалиев

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

Перспективным направлением в современных системах пожаротушения является использование мелкодисперсных частиц воды. Основным преимуществом применения частиц воды с размерами менее 200 мкм является развитая поверхность теплообмена и, соответственно, большая скорость поглощения тепла от горючих газов и пламени. Кроме того, газокапельный туман создает препятствие для поступления кислорода воздуха в зону горения. Технология создания и применения тонкораспыленной воды до настоящего времени остается проблемным вопросом, ограничивающим возможности применения данного направления.

В данной работе рассматривается дробление жидких частиц в стационарной газовой струе как возможный механизм создания потока тонкораспыленной воды. Создана методика прогнозирования времени и, соответственно, расстояния, необходимого для формирования газокапельного тумана в потоке воздуха. Разработанная методика проверена на эксперименте.

Работа является продолжением исследования, проведенного в [3]. Получены распределения капель по пространству, на различных расстояниях от среза сопла. Также были измерены основные параметры скорости, давления, температуры по мере расширения струи в пространстве.

---

1. Ципенко А. В. Теория и методы повышения эффективности противопожарных систем на воздушном транспорте. Докторская диссертация, М.: 2006.

2. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. М.: Гл. ред. физ-мат. лит., 1987. - с. 159-172.

3. Курмангалиев Р. З. Исследование распространения газовой струи с жидкими частицами в свободном пространстве. Физика сплошных сред. Материалы 51-ой международной научной студенческой конференции. Новосибирск, 2013, с. 19.

Научный руководитель – д-р. техн. наук В. И. Звегинцев.

## ДИНАМИКА ПЛАМЕНИ С ЦЕПНЫМИ РЕАКЦИЯМИ В МИКРОКАНАЛЕ С НАГРЕТЫМИ СТЕНКАМИ

Т. П. Мирошниченко

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

В работе исследуется поведение пламени в микроканале с продольным по потоку градиентом температуры, который поддерживается внешним источником тепла. В зависимости от начальных условий возможна стабилизация пламени и режимы периодического воспламенения и затухания. Интерес к изучению таких процессов вызван тем, что явление периодического воспламенения/затухания пламени в микроканале препятствует организации стабильного горения в микрогорелках и сопровождается образованием нежелательных выбросов. Кроме того, данные о структуре пламени в микроканале с контролируемой температурой стенок позволяют получить важную информацию о кинетических механизмах химических реакций при горении новых видов топлив и другие важные характеристики горючих газовых смесей [1]. В настоящее время на основе микроканала с контролируемой температурой стенок разработан метод верификации кинетических моделей горения различных углеводородных топлив.

Проводимые ранее исследования волн горения в микроканалах с продольным градиентом температуры в стенках ограничивались рассмотрением одностадийной реакции. Однако существует ряд систем, например, реакции с разветвлением цепи, волны горения с несколькими зонами реакций, для которых приближение одностадийной реакции плохо применимо.

В работе было проанализировано влияние неравномерно нагретых стенок микроканала на устойчивость волны горения с цепными реакциями в рамках двухстадийной схемы. Была построена диаграмма существования различных режимов горения в плоскости расход газа/положение фронта пламени. Положение фронта пламени определяется по координате максимального тепловыделения. Обнаружены режимы нормального пламени, осцилляций, периодического воспламенения/затухания (FREI) и слабого пламени.

---

1. Maruta K., Parc J. K., Oh K. C., Fujimori T., Minaev S. S., Fursenko R. V. Characteristics of microscale combustion in heated channel // Combustion, Explosion, and Shock Waves – 2004. – V. 40. – P. 516-523.

Научный руководитель – д-р. физ.-мат. наук С. С. Минаев.

## ВЫБОР УГЛА РАСКРЫТИЯ ДИФFUЗОРА В ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЯХ ГИДРОАППАРАТУРЫ В ЦЕЛЯХ СНИЖЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ШУМА

Ю. Г. Михайлина, М. А. Ермилов

Самарский государственный аэрокосмический университет  
им. ак. С. П. Королёва

Для эффективной работы диффузора необходимо найти оптимальный угол его раскрытия, в котором скорость потока на выходе из канала будет минимальна при безотрывном режиме течения. Это, в свою очередь, обеспечит наиболее низкий уровень гидродинамического шума.

Для расчета и сравнения с конструкцией канала постоянного сечения были смоделированы конструкции каналов с конфузуром на входе и диффузором на выходе с углами раскрытия 7°, 11°, 15°, 19°. На модели накладывалась расчётная сетка, содержащая 4-6 млн. конечных элементов.

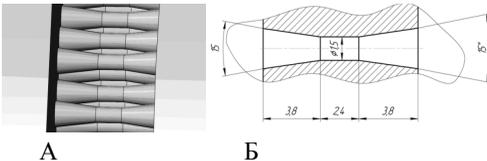


Рисунок 1. Объемная модель и схема канала с конфузуром и диффузором

Акустическая эффективность каждой конструкции (m=1-4) рассчитывалась на выходе из канала относительно канала постоянного сечения (m=0) по формуле:

$$\Delta L_m = 10 \cdot \lg W_0 / W_m, \text{ где } W_0 \text{ и}$$

$W_m$  - акустические мощности в соответствующих сечениях.

Таблица 1. Акустическая эффективность на выходе из каналов

m	Угол раскрытия диффузора	Эффективность, дБ
1	7°	26,8
2	11°	30,1
3	15°	21,6
4	19°	18,9

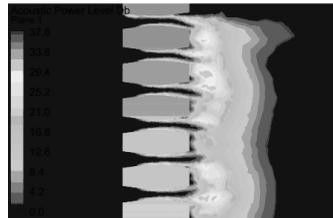


Рисунок 2. Распределение акустической мощности при  $Q=6\text{кг/с}$ ,  $P_{\text{вых}}=1\text{МПа}$

Наибольшей акустической эффективностью обладает конструкция с углом раскрытия диффузора равным 11° (30,1 дБ). Эффективность канала с диффузором 7° ниже, так как возрастает скорость на выходе из канала. Эффективность каналов с углами раскрытия диффузора 15° и 19° ниже, так как происходит срыв потока на выходе из каналов.

Научный руководитель – д-р техн. наук, проф. А. Н. Крючков.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ШУМА ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЕЙ РЕГУЛИРУЮЩЕЙ АРМАТУРЫ

Ю. Г. Михайлина, М. А. Ермилов  
Самарский государственный аэрокосмический университет  
им. ак. С. П. Королёва

Для снижения гидродинамического шума клапанов успешно применяются перфорированные втулки, рассекающие выходной поток (рисунок 1). Целью работы является выбор наименее шумной конструкции проточной перфорированной втулки клапана.

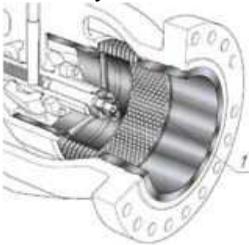
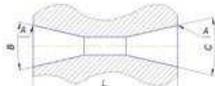


Рисунок 1 – Клапан с рас­секателем выходного по­тока (1 – перфориро­ванная шумоглушающая втулка)



Конс-я	A	B	C
п	0	0	0
д	0	0	С
к	0	В	0
к-д	0	В	С
с-к-д-с	A	В	С

Рисунок 2 - Схема моделируемых каналов

Для этого выполнено моделирование потока, проходящего через каналы различной конфигурации (рисунок 2): канал постоянного сечения (п), канал с диффузором (д), канал с конфуззором (к), канал с конфуззором и диффузором (к-д), канал с конфуззором и диффузором со скругленными кромками (с-к-д-с). Мо-

делирование проводилось в программном комплексе ANSYS Fluent. Граничные условия:  $Q=6$  кг/с,  $P_{\text{вых}}=1$  МПа.

Акустическая эффективность каждой конструкции ( $m=1-4$ ) рассчитывалась на входе ( $i=1$ ) и выходе ( $i=2$ ) относительно круглого отверстия постоянного сечения ( $m=0$ ) по формуле:  $\Delta L_m^i = 10 \cdot \lg w_0^i / w_m^i$ , где  $w_0^i, w_m^i$  - акустические мощности в соответствующих сечениях.

Таким образом, на входе в канал необходимо обеспечивать плавное, безвихревое вхождение потока, а на выходе – безотрывное истечение. Поэтому на входе необходимо выполнять конфузор со скруглениями, а на выходе - выполнять диффузор определенного угла раскрытия, зависящего от режима течения.

Таблица 1. Акустическая эффективность

m	$\Delta L_m^{\text{вх}}$ , дБ	$\Delta L_m^{\text{вых}}$ , дБ
д	-4,5	16,4
к	60,2	38,8
к-д	54,2	53,7
с-к-д-с	80,7	32,1

Научный руководитель д-р техн. наук, проф. А. Н. Крючков.

## О КОЭФФИЦИЕНТАХ ПЕРЕНОСА В ГАЗАХ НА ОСНОВЕ ПОТЕНЦИАЛА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Д. В. Мохнатов

Казанский технический университет им. А. Н. Туполева

В соответствии с кинетической теорией газов [1], для определения переносных характеристик среды используются различные потенциалы взаимодействия молекул, среди которых отметим потенциал Ленарда-Джонса. Как правило, этот потенциал удовлетворительно описывает процессы взаимодействия молекул в однокомпонентных средах. Иногда его используют при моделировании течений многокомпонентных сред. Следует отметить, что течения в приведенных выше средах существенно различаются и имеют различные переносные характеристики. Следуя теории Чепмена-Энскога [1], коэффициенты переноса зависят от  $\Omega$  – интегралов [1], подынтегральная функция в которых зависит от вида потенциала взаимодействия молекул. В связи с этим, в [2] предлагается однопараметрический потенциал взаимодействия:

$$\Phi_{eff, gener}^*(r^*) = 4 \left( \frac{AI_{gener}}{r^*} \right)^{2(n+3)} - 4 \left( \frac{AI_{gener}}{r^*} \right)^6 + \frac{(g^* \cdot b^*)^2}{(r^*)^2}, \quad r^* \in (0, \infty) \quad (1),$$

который при определенном значении параметра  $n$  ( $n=3$ ) является потенциалом Ленарда-Джонса, и как уже отмечалось, удовлетворительно моделирует переносные характеристики в простых газах. На основе анализа поведения функции (1) (см. [2]), при значениях  $n \geq 2$  потенциал (1) можно использовать для моделирования коэффициентов переноса в многокомпонентных средах с учетом многоатомной структуры газовых смесей и влияния внутренней энергии молекул на коэффициенты переноса.

- 
1. Чепмен С. Математическая теория неоднородных газов/ С. Чепмен, Т. Каулинг. – М.: ИЛ, 1960.
  2. Анисимова И. В. Вычислительные технологии процессов переноса газов/ И. В. Анисимова, В. Н. Игнатьев. Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ им. А. Н. Туполева.

Научные руководители – канд. физ.-мат. наук И. В. Анисимова, д-р физ.-мат. наук В. Н. Игнатьев.

## **ВЕРИФИКАЦИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ СХЕМ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ВОДОРОДА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДЕТОНАЦИИ**

К. В. Рылова

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

Новосибирский государственный технический университет

Использование явления детонации в новых поколениях двигателей, а также необходимость решения проблем взрыво- и пожаробезопасности позволяет рассматривать процессы горения и детонации газовых смесей как актуальную проблему. В данной работе дается обоснование некоторых детальнейших кинетических моделей процессов воспламенения и последующего сверхзвукового горения газовой смеси.

При моделировании течений, в которых сгорает водородное топливо, возникает вопрос о выборе кинетического механизма горения водорода. Широкое применение получили двухстадийные модели химического превращения, когда при помощи уравнения аррениусовского типа с начало моделируется период индукции, а после этап тепловыделения. Однако использование таких моделей не всегда возможно. Так же для моделирования реакции окисления водорода используются детальнейшие кинетические механизмы. В работе проведен анализ нескольких моделей химической кинетики горения водорода в воздухе и сравнение их с экспериментальными данными по временам задержки воспламенения и скорости детонационной волны.

Для каждой модели сделано сравнение с экспериментами по скорости детонационной волны в зависимости от разбавления смеси азотом и аргонном. Показано, что расчетные и экспериментальные данные хорошо согласуются и модель позволяет правильно воспроизвести снижение скорости детонационной волны при увеличении концентрации инертного разбавителя.

Кроме того, нами разработана и верифицирована по времени задержки воспламенения от температуры, скорости детонационной волны в зависимости от разбавления азотом использована простейшая приведенная модель кинетики для описания горения и детонации водорода в кислороде и воздухе.

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

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГИПЕРЗВУКОВОГО ВОЗДУХОЗАБОРНИКА ИЗОЭНТРОПИЧЕСКОГО СЖАТИЯ С УЧЕТОМ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ**

В. А. Сафонов

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

Новосибирский государственный университет

Гиперзвуковые воздухозаборники – перспективное направление исследований, как с точки зрения теоретического анализа, так и с точки зрения практического применения. Гиперзвуковые воздухозаборники применимы на скоростях более  $M=2,5$  и на различных высотах.

Одним из видов гиперзвуковых воздухозаборников являются воздухозаборники изоэнтропического сжатия. При использовании изоэнтропического сжатия потери давления при сжатии могут быть достаточно малыми. Несмотря на то, что изучением данного типа воздухозаборника занимались в течение многих лет, случай вязкого обтекания набегающим потоком воздухозаборника до сих пор должным образом рассмотрен не был.

Изоэнтропический воздухозаборник строится для определенного числа  $M$  и обеспечивает минимальные потери при расчетном числе  $M$ . Исследование характеристик воздухозаборника на нерасчетных режимах работы (при изменении угла атаки, высоты и скорости полета) возможно только с использованием экспериментальных или численных методов.

Целью работы было получение количественного отличия параметров в канале воздухозаборника в случае вязкого обтекания от случая идеального обтекания без учета вязкости. В работе произведен анализ параметров потока в канале воздухозаборника при нерасчетных режимах работы.

Был рассмотрен воздухозаборник изоэнтропического сжатия, построенный для  $M=3$ . Проводился его анализ при параметрах набегающего потока, соответствующих высотам  $H=0, 10$  и  $30$  км, и числах  $M=3, M=5$  и  $M=7$ .

Компьютерное моделирование показало, что параметры в канале воздухозаборника в случае вязкого обтекания отличаются от параметров в случае идеального обтекания. Причем, при вязком обтекании при расчетном числе  $M=3$  отличие минимальное. В случае обтекания при  $M=7$  отличие составляет до 55% по коэффициенту восстановления полного давления.

Научный руководитель – д-р техн. наук В. И. Звезгинцев.

## ЛОКАЛЬНАЯ УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДИАГНОСТИКА ПОТОКОВ МНОГОФАЗНЫХ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СРЕД

Р. Е. Соколов

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

Развитие атомных реакторов на быстрых нейтронах связано с повышением эффективности и надежности теплообменников, в которых, в качестве теплоносителя, используются жидкометаллические среды. Для оптимизации потока теплоносителя с точки зрения гидродинамики и теплофизики необходима экспериментальная информация о локальной скорости и режиме течения жидкометаллической среды. Одним из немногих методов локальной диагностики многофазных жидкометаллических сред является ультразвуковая диагностика потоков. В работе исследована возможность создания локального ультразвукового зонда для измерения кинематических и структурных параметров многофазных, в том числе, жидкометаллических сред.

Разработан и реализован локальный доплеровский зонд и системы генерации и обработки ультразвуковых сигналов на частоте 450 кГц. Прибор содержит непрерывный генератор возбуждения, передающий и приемный пьезопреобразователи, волоконно-акустическую схему формирования и приема доплеровского ультразвукового сигнала, квадратурный корреляционный приемник, устройство сопряжения с компьютером, и программу расчета скорости и структуры течения на основе расчета параметров спектра аналитического сигнала в локальной измерительной зоне ультразвукового зонда. Независимый контроль и юстировка акустической схемы выполнены при помощи ультразвукового медицинского диагностического прибора «Ультраскан» в режиме электронно-конвексного ультразвукового сканирования на частоте 5 МГц с пространственным разрешением 1 мм и программного пакета визуализации цифровых данных «УЗИ».

В результате опробования созданного зонда на макете жидкометаллического теплообменника достигнуто пространственное разрешение 3 мм в диапазоне скоростей  $\pm 10$  м/с с погрешностью порядка 5% и одновременной регистрацией концентрации газовой фазы. Полученные экспериментальные результаты и технические характеристики зонда подтвердили осуществимость и перспективность предложенной локальной ультразвуковой диагностики потоков многофазных жидкометаллических сред.

Научный руководитель – профессор, д-р техн. наук В. Г. Меледин.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЖИДКОСТНЫХ ЭЖЕКТОРОВ С КРИВОЛИНЕЙНЫМ НАЧАЛЬНЫМ УЧАСТКОМ

Р. Р. Халиулин

Казанский технический университет им. А. Н. Туполева

Как известно, эжекторы имеют широкое применение в аэродинамических трубах, в испытательных стендах, в паровых энергетических машинах, в пожарной отрасли.

Исследуемый эжектор представляет собой смеситель, в котором рабочим телом является вода. Принцип эжекции, используемый в данном смесителе позволяет снизить потери давления.

Основным отличием от аналогов является организация смешения активного и пассивного потоков в начальном участке камеры смешения. Криволинейная схема камеры смешения эжектора позволяет использовать закон свободного вихря, полагая, что в данном случае течение потока будет осуществляться без резких изменений вектора скорости, в силу чего потери, связанные с явлениями "удара", отрыва и вихреобразования, будут минимальны. При данной схеме максимальное значение скорости активного потока наблюдается вблизи сопла пассивного потока, таким образом, коэффициент эжекции имеет наибольшее значение.

Исследования проводились на смесителях с расходом активного потока в диапазоне 2–14 л/с. Давление на входе  $P_1$  составляло  $P=4; 6; 8$  атм. Процентное содержание пассивного потока составляло 2; 4; 6%. Также проводились исследования смесителей, в которых рабочим телом был пенообразователь. С помощью манометра, установленного на выходе из смесителя, можно определить потери давления.

В результате исследований смесителя определены оптимальные параметры: отношение расхода пассивного и активного потоков  $n=0,06$ , при котором  $P_1=8$  при  $P_2=6$ , длина камеры смешения составляет не более 8 калибров ее входного сечения. Потери давления исследуемого смесителя составляют не более 30%, при сравнении с аналогами эта же величина составляет не менее 45–50%.

Расчетные исследования проводились в программном комплексе Ansys (Fluent). При использовании модели вязкости  $k-\epsilon$  RNG относительная погрешность величины потерь давления составила не более 5%, в сравнении с экспериментальными значениями.

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

## УПРАВЛЕНИЕ КАВИТАЦИЕЙ ПУТЕМ ИЗМЕНЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ГИДРОКРЫЛА

С. А. Чуркин

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

В настоящее время все большую актуальность приобретают задачи повышения энергоэффективности и увеличения ресурса работы гидроэнергетических систем. Известно, что основной причиной ухудшения эксплуатационных характеристик гидротехнического оборудования являются процессы кавитации. Изменение морфологии поверхности является одним из пассивных методов воздействия на структуру и динамику развития кавитационных каверн. В современной литературе представлено всего несколько работ, посвященных данной проблеме [1, 2]. Следовательно, объем количественной экспериментальной информации, необходимой также для верификации и развития современных методов численного моделирования кавитирующих течений, крайне ограничен.

В настоящей работе проведено исследование кавитационного обтекания модельных гидрокрыльев NASA0015 с различной шероховатостью поверхности при нескольких углах атаки. Шероховатость поверхности задавалась при помощи детонационного напыления, диапазон шероховатости Ra составлял 1-30 мкм. Эксперименты проводились на кавитационном гидродинамическом стенде Института теплофизики СО РАН. В ходе экспериментов были получены пространственные распределения средней скорости течений и турбулентных характеристик вблизи гидрокрыльев, а также с применением высокоскоростной визуализации зарегистрированы различные типы кавитационных каверн.

Проведенный анализ данных показал, что изменение морфологии поверхности приводит к существенной модификации пространственной структуры и динамики каверн. При увеличении шероховатости поверхности турбулизация пограничного слоя происходит при больших числах кавитации. В остальной области течений распределения полей средней скорости и флуктуационной составляющей скорости остаются неизменными.

- 
1. O. Coutier-Delgosha et al., Effect of Wall Roughness on the Dynamics of Unsteady Cavitation, *J. Fluids Eng.*, 127(4): 726-733 (2005).
  2. B. Stutz, Influence of Roughness on the Two-Phase Flow Structure of Sheet Cavitation, *ASME J. Fluids Eng.*, 125: 652-659 (2003).

Научный руководитель – член-корр. РАН Д. М. Маркович.

## ПРОСТРАСТВЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ВОЛНОВОГО ПАКЕТА В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

А. А. Яцких

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

В связи с интенсивными работами по созданию скоростных летательных аппаратов интерес к проблеме ламинарно-турбулентного перехода на сверхзвуковых скоростях сильно возрос в последние десятилетия.

В экспериментальных исследованиях устойчивости пограничных слоев часто используют различные методы введения искусственных возмущений в поток. Это позволяет изучить различные волновые параметры распространения и развития возмущений, таких как скорость, фаза, амплитуда и направление, что позволяет проверять, уточнять и развивать существующую теорию. В исследованиях сверхзвуковых течений наиболее эффективным способом введения в пограничный слой вынужденных колебаний является тлеющий разряд, зажигающийся с большой частотой. В этом случае в пограничном слое возбуждаются волновые структуры неограниченно по времени (волновые поезда).

В природе возможно существование локализованных по пространству и времени возмущений (волновые пакеты). Контролируемое возбуждение волновых пакетов в сдвиговых слоях позволило добиться значительного прогресса в изучении процессов ламинарно-турбулентного перехода при малых дозвуковых скоростях.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию возбуждения и развития одиночных волновых пакетов в сжимаемом пограничном слое.

Эксперименты выполнены в сверхзвуковой малотурбулентной аэродинамической трубе Т-325 ИТПМ СО РАН при числе Маха  $M=2$ . В качестве экспериментальной модели использовалась стальная пластина с острой передней кромкой, установленная под нулевым углом атаки. Контролируемые возмущения в пограничный слой вводились с помощью импульсного «поверхностного» тлеющего разряда. Измерения возмущений в сверхзвуковом потоке выполнялись с помощью термоанемометра постоянного сопротивления.

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

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТВЕРДОФАЗНОГО СИНТЕЗА РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

К. А. Алигожина

Томский государственный университет

В настоящее время имеется потребность в создании конструкций, обладающих различными сочетаниями противоречивых свойств, таких, как: износостойкость–прочность, жаростойкость–прочность и т.п. Существует ряд способов получения подобных материалов, однако одним из наиболее эффективных методов является самораспространяющийся высокотемпературный синтез, в частности, СВС-сварка. Преимущество технологии СВС заложено в самом принципе – максимальном использовании химической энергии реагирующих веществ для получения неразъемных соединений. В разработке и оптимизации СВС-процессов важную роль играет математическое моделирование, поскольку необходимо иметь представление о физических и механических процессах, сопровождающих химические превращения, приводящие к формированию соединительных швов.

Цель настоящей работы состоит в теоретическом исследовании теплофизических процессов, протекающих в ходе СВС-сварки разнородных инертных материалов. В математическом отношении задача состоит в отыскании изменяющихся во времени распределений температуры и степени превращения.

Математическая модель, на основе которой проводится численное исследование, представляет собой двумерную трехслойную сопряженную задачу теплопроводности с источником химического тепловыделения в промежуточной области. Химическая реакция описана простой суммарной схемой. На границах раздела материалов используется условие идеального теплового контакта. Инициирование реакции осуществляется кратковременным тепловым импульсом с поверхности с формированием волны горения и её распространения по ненагретому исходному веществу.

Задача исследуется численно с использованием неявной разностной схемы второго порядка точности по пространственным координатам и метода покординатной прогонки. Граничные условия также аппроксимированы со вторым порядком. В зависимости от соотношения теплофизических свойств соединяемых материалов и реагента наблюдаются различные температурные профили, ширина зоны реакции, скорости распространения фронта реакции, степени превращения.

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

## ИССЛЕДОВАНИЕ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТУ НА УГЛЕ МИКРОПОМОЛА

Е. Б. Бутаков

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

Одно из перспективных направлений использования механоактивированных углей микропомола в энергетических технологиях создание газотурбинных установок на угле без стадии газификации.

На первой стадии актуально исследовать воспламенение и горение угля микропомола в горелочном устройстве. Для процессов горения и перемешивания продуктов сгорания с воздухом имеется весьма ограниченное пространство, т.к. камера сгорания, как и сама ГТУ должна иметь небольшие размеры. Сопротивление камеры сгорания не должно быть высоким, чтобы не снижать общий КПД ГТУ. При этом необходимым условием является требование к устойчивой работе камеры сгорания во всем диапазоне режимов работы установок.

Форма камеры сгорания и ее расположение в схеме ГТУ имеют решающее значение во многих установках, что связано, прежде всего, с оптимизацией потерь напора. Поэтому в зависимости от типа ГТУ камеры сгорания могут быть горизонтальными или вертикальными при возможном сжигании всего топлива в одной камере, выполнять камеру прямоточной или с обратным движением воздуха. До настоящего времени в камерах сгорания ГТУ сжигается газообразное или жидкое топливо. Сжигание твердого топлива пока представляется проблематичным.

В целом успешная работа ГТУ всецело зависит от создания компактной и надежно действующей камеры сгорания.

На первом этапе целесообразно отработать режим работы горелочного устройства на высокорекреационных углях с достижением максимального выгорания топлива в горелочном устройстве минимальных размерах при стехеометрическом соотношении топливо-воздух.

Первые экспериментальные исследования в этом направлении были выполнены на стенде тепловой мощностью до 5 Мвт. Полученные данные позволяют подойти к конструированию горелочного устройства для ГТУ на угле.

Создан малый стенд по исследованию поля скоростей при различных режимах течения холодного воздуха.

Научный руководитель – д-р техн. наук А. П. Бурдуков.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОТНЫХ УСЛОВИЙ НА РАБОТУ ГТД

Т. Р. Валиев, Р. Р. Халиулин

Казанский технический университет им. А. Н. Туполева

В данной работе представлены результаты расчетных исследований стабилизации пламени в камерах сгорания ГТД в высотных условиях. Показано влияние высоты полета на устойчивость горения неоднородной смеси в камере сгорания. Проведен расчетный анализ влияния неоднородности. Предложен метод учета влияния высотности на стабилизацию пламени. Проведено сопоставление с экспериментальными данными.

При работе авиационных ГТД в высотных условиях происходит изменение параметров потока на входе в камеру сгорания. Расчеты высотно-скоростных характеристик ТРДД показывают уменьшение параметров на входе в КС ( $T_k=260\text{K}$ ;  $P_k=400000\text{Па}$ ). В связи с этим необходимо провести анализ работы камеры сгорания и определения условия устойчивого горения в ней. Так как в высотных условиях происходит снижение давления и температуры ухудшаются процессы смесеобразования в зоне горения (распыливание и испарение жидкого топлива), соответственно это влияет на границы устойчивого горения в камерах сгорания. Согласно теории стабилизации срыв пламени определяется составом смеси в зоне обратных токов (ЗОТ)  $\alpha$ -зот. Для определения состава смеси в ЗОТ необходимо определить долю испаренного топлива в ней. С этой целью проводились расчеты доли жидкого топлива в ЗОТ и состав смеси  $\alpha$ -зот для определения среднего диаметра капли топлива в факеле, доля топлива попадающих в ЗОТ. С помощью указанных зависимостей были найдены значения доли топлива в ЗОТ  $\alpha$ -зот и состав смеси. Видно что для обеспечения устойчивого горения в КС необходимо подавать больше топлива в ЗОТ.

В высотных условиях работы камеры сгорания необходимо обеспечить более богатые составы смеси в ЗОТ.

Научный руководитель – д-р техн. наук, проф. Б. Г. Мингазов.

**ФОРМИРОВАНИЕ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЕЙ В ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ**

М. А. Воробьев

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

При движении двухфазных газожидкостных смесей в трубах и каналах в зависимости от расходов фаз, геометрии канала и направления течения возникают различные режимы течения, такие как пузырьковые, снарядные, пенные, пленочные течения. Одним из наиболее интересных и практически важных является пузырьковый режим течения, когда газовая фаза присутствует в потоке в виде отдельных пузырей достаточно малого размера.

В пузырьковых течениях существенное влияние на тепло массообменные процессы оказывает не только объемное газосодержание, но и размер газовых включений. Наиболее ярко эффекты проявляются в монодисперсной смеси. Исследование формирования мелкодисперсных пузырьковых течений стимулируется возможностью управления тепловыми процессами с помощью генерации пузырей соответствующих размеров, что делает их привлекательными для использования в науке и технологиях. Данная работа посвящена систематическому экспериментальному исследованию влияния расходных параметров жидкости и газа, а так же положения точки ввода газа на размер газовых включений и величину разброса их размеров.

Эксперимент проводился на гидродинамическом стенде для изучения двухфазных потоков в лаборатории физико-химической гидромеханики Института Теплофизики СО РАН. При помощи видеокамеры были получены теневые изображения течения. В результате обработки видеоизображений, при различных положениях точки ввода газа в поток, получены зависимости размера пузырей от расходов жидкости и газа, как в восходящем так и в опускном течениях. Показано, что при одинаковых расходных параметрах жидкости и газа средний диаметр пузырей меньше в случае отрыва от капилляра, расположенного в центральной области канала. Показано, что форма гистограммы распределения пузырей по размерам качественно изменяется при превышении некоторой частоты отрыва, что связано с уменьшением расстояния между пузырями и взаимодействием их друг с другом.

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

## ВЛИЯНИЕ ПУЗЫРЕЙ НА ТЕПЛОБМЕН И ГИДРОДИНАМИКУ ТЕЧЕНИЯ В НАКЛОННОМ ПЛОСКОМ КАНАЛЕ

А. Е. Гореликова

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

Многообразие режимов течения существенно усложняет теоретическое предсказание гидродинамики двухфазных потоков, требуя использования многочисленных гипотез, предположений и приближений. Сложность структуры течения часто делает невозможным чисто теоретическое описание его поведения и требует использования эмпирических данных. Поэтому экспериментальное изучение газожидкостных потоков является актуальным.

В литературе широко представлены экспериментальные исследования восходящего газожидкостного течения в вертикальных трубах. Намного меньшее внимание было уделено пузырьковым течениям в горизонтальных и наклонных трубах и каналах, хотя именно в этом случае ориентация канала может быть очень важна.

Исследования гидродинамики течения проводилось электродиффузионным методом. В качестве датчиков температуры использовались платиновые термосопротивления. Для определения диаметра газовых пузырей производилась съемка потока на скоростную видеокамеру через оптическую секцию в канале.

В газожидкостном течении угол наклона канала по отношению к горизонту оказывает существенное влияние на трение и теплообмен. Наибольшие значения этих величин соответствуют углам наклона канала  $\theta \approx 20^\circ \div 50^\circ$ .

Зависимости относительного коэффициента теплоотдачи и относительного трения на стенке от объемного расходного газосодержания качественно похожи. Малые добавки газа (до 1%) в поток жидкости приводят к резкому увеличению показателей по сравнению с однофазным течением. Подобный характер имеет оценочная характеристика заполненности пузырькового слоя  $\varphi$ , которая является процентом площади занимаемой пузырьками на снимке.

Размер газовых пузырей исследовался при угле наклона  $\theta = 45^\circ$  и числе Рейнольдса  $Re = 12400$ . Значение диаметра пузырей, переносящих основной объем газа, растет с увеличением объемного расходного газосодержания.

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

## ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ

Н. А. Каложный, А. В. Зайковский, Д. В. Смовж  
Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Металлические наночастицы широко используются в практике. Одной из перспективных областей их применения являются каталитические технологии. Это связано с тем, что малые частицы обладают чрезвычайно развитой поверхностью, что увеличивает эффективность их использования. Кроме того, частицы катализатора нанометрового диапазона (1-10 нм) проявляют каталитическую активность, зависящую от количества атомов в частице, что позволяет использовать селективность катализа по отношению к определенным реакциям.

В настоящее время развито большое число физических и химических способов синтеза наночастиц металла. Одним из наиболее изученных методов является синтез наночастиц в газовой фазе при охлаждении паров металла в инертном буферном газе. Этот метод позволяет синтезировать наночастицы практически любого металла. Изменение параметров буферного газа и концентрации паров металла удается управлять размером синтезированных частиц. К недостаткам метода следует отнести проблему сбора и хранения материала, т. к. даже при комнатной температуре частицы металла нанометрового диапазона размеров с легкостью коагулируют. Для предотвращения агломерации частиц разрабатываются различные методы иммобилизации частиц на поверхности и/или в объеме в суспензиях.

В данной работе синтезируются наночастицы оксидов Al, Cu и Fe в результате отжига в кислородной атмосфере наноструктурированного углерод-алюминиевого материала, полученного при распылении композиционного электрода в электрической дуге в среде буферного газа. Анализ синтезированного материала проводился методами просвечивающей электронной микроскопии (ТЕМ), термогравиметрии (TGA), рентгенофазового анализа (XRS).

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

## ДИНАМИКА КОНТАКТНОЙ ЛИНИИ ИСПАРЯЮЩЕЙСЯ КАПЛИ ЖИДКОСТИ НА НАГРЕВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Е. О. Карнаухова

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

Исследование испаряющихся капель жидкости актуально не только для изучения процессов протекающих в капле, но для понимания механизмов протекающих в более сложных системах. Процесс смачивания капель жидкости сухой поверхности происходит в ряде промышленных процессов, таких как струйная печать, охлаждение распылением, нанесение покрытия центрифугированием, а также в природных явлениях, таких как дождь и роса. Не смотря на многочисленные исследования в течение последних десятилетий [1-3], точный механизм движения контактной линии на поверхности не изучен.

Задачей данной работы является экспериментальное исследование испаряющейся капли жидкости на нагреваемой поверхности при различных температурах. В экспериментах используются покрытия с различным краевым углом смачивания и различным гистерезисом краевого угла.

Для определения профиля капли в работе используется теневой метод с разрешением бкм/пиксель. Обнаружено, что в зависимости от начального краевого угла смачивания и типа подложки возможны несколько сценариев испарения капли. Установлено что скорость испарения со временем резко возрастает, особенно для капель с малым гистерезисом краевого угла. С увеличением температуры подложки скорость испарения растет.

- 
1. R. G. Picknett, and R. Bexon. "The evaporation of sessile or pendant drops in still air", J. Colloid Interface Sci. 61, pp. 336–350 (1977).
  2. H. Hu and R. G. Larson. Evaporation of a sessile droplet on a substrate. J. Phys. Chem. B 106 pp.1334–1344 (2002).
  3. Е. Ya. Gatapova, A. A. Semenov, D. V. Zaitsev, O. A. Kabov; "Evaporation of a sessile water drop on a heated surface with controlled wettability", Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 441 (2014). P. 776–785

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

## РАЗРЫВ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО СЛОЯ ЖИДКОСТИ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ НАГРЕВЕ ПОДЛОЖКИ

Д. П. Кириченко

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

В настоящее время существует множество прикладных направлений (охлаждение электроники, опреснители морской воды и т.д.), в основе которых лежат фундаментальные исследования движущихся и неподвижных пленок жидкости на нагреваемой поверхности. Анализ существующих работ [1-3] показывает, что некоторые аспекты проблемы разрыва пленки жидкости, в частности влияние смачиваемости подложки на термокапиллярный разрыв пленки остаются открытыми.

В предложенной работе проведены исследования деформации поверхности и разрыва горизонтальной, локально нагреваемой плёнки жидкости. Основой рабочего участка является пластина из нержавеющей стали с впрессованным медным сердечником диаметром 10 мм, который служит нагревательным элементом. Источником теплоты является нихромовая спираль, что обеспечивает тепловой поток до  $500 \text{ Вт/см}^2$ . В данном исследовании в качестве рабочей жидкости использовалась вода. Рабочие поверхности были различной шероховатости, с разным краевым углом смачивания и разным гистерезисом краевого угла. Экспериментально, с помощью Шлирен метода, были измерены деформации поверхности пленки жидкости при увеличении теплового потока. При помощи скоростной камеры (50000 кадров/сек) была изучена динамика образования сухого пятна. Измерение температуры поверхности пленки перед разрывом проводилось с помощью ИК камеры.

---

1. D. V. Zaitcev, O. A. Kabov; "An experimental modeling of gravity effect on rupture of a locally heated liquid film", *Microgravity sci. technol.*, XIX-3/4, pp. 174-177, 2007.

2. J. P. Buelbach, S. G. Bankoff, S. H. Davis; "Steady thermocapillary flows of thin liquid layers. II. Experiment", *Phys. Fluids A* 2, 321-333, 1990.

3. Д. В. Зайцев, О. А. Кабов, В. В. Чеверда., Н. С. Буфетов; "Влияние волнообразования и краевого угла смачивания на термокапиллярный разрыв стекающей пленки жидкости", *Теплофизика высоких температур*, Т. 42, №3, стр. 449-455, 2004.

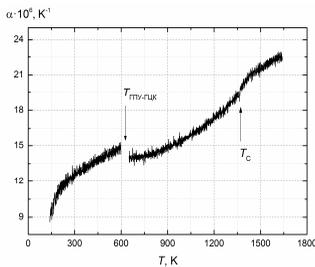
Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Д. В. Зайцев.

## КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ ВЫСОКОЧИСТЫХ КОБАЛЬТА И НИКЕЛЯ В ШИРОКОМ ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР

Ю. М. Козловский

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

Дилатометрическим методом подробно исследовано тепловое расширение высокочистых кобальта (99,99 %) в интервале температур 133 – 1653 К и никеля (99,99 %) в интервале температур 133 – 1673 К. Исследования выполнены в два этапа. На первом этапе, при высоких температурах, использовался держатель и толкатель, изготовленный из спеченного корунда, а сами измерения выполнены в инертной атмосфере аргона (99,998 %). На втором этапе, при низких температурах, применялся кварцевый держатель и толкатель, а в качестве инертной атмосферы использовался гелий (99,995 %). Оцениваемая погрешность выполненных измерений не превышает 3 %.



На рисунке представлены некоторые результаты по истинному коэффициенту теплового расширения ( $\alpha$ ) высокочистого кобальта. Видны две области аномального изменения  $\alpha$ . Первая, при 598 – 652 К, связана со структурным ГПУ-ГЦК превращением, которое протекало с заметным гистерезисом (46 К) в цикле нагрева-охлаждения образца и сопровождалась незначительным скачком плотности. Во второй, при 1360 К, ферромагнитный кобальт переходит в парамагнитное состояние.

Для обоих материалов разработаны справочные таблицы температурных зависимостей термических свойств, а также подробно изучено изменение  $\alpha$  в окрестности точки Кюри.

*Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 2*

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

## СЖИГАНИЕ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ С ПОДАЧЕЙ ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА

Е. П. Копьев

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

Дефицит качественных энергоносителей актуализирует задачи разработки эффективных, экологически безопасных технологий производства энергии с использованием доступных низкокачественных топлив и производственных отходов. Решение подобных задач требует проведения комплекса исследований. Одно из перспективных направлений связано с изучением режима горения жидких углеводородов в атмосфере с высокой концентрацией водяного пара. Предыдущие исследования показали, что при подаче в зону горения струи перегретого водяного пара, процесс горения жидких углеводородов резко интенсифицируется. Это позволяет утилизировать низкокачественные виды топлив и отходы. Для создания высокоэффективных горелочных устройств, работающих в таком режиме, необходимы исследования процессов переноса и механизмов реакций, определяющих условия газификации продуктов разложения топлива и состав продуктов горения в модельных устройствах. При сжигании дизельного топлива в исследуемом горелочном устройстве формируется зона горения продуктов пиролиза, в которую под давлением ~5 атм подается струя перегретого водяного пара. Горелочное устройство работает в автономном режиме: производство пара обеспечивается за счет части тепла, выделяющегося при сжигании топлива. Синтез-газ, образующийся в результате паровой газификации, сгорает в высокотемпературном факеле. В данной работе исследовано поле температуры в факеле, а также проведены предварительные измерения тепловыделения. Экспериментальный стенд был оснащен системой, состоящей из координатно-перемещающего устройства с установленной на него платинородиевой-платинородиевой термопарой, данные с которой через АЦП поступали и обрабатывались на компьютере. Полученные результаты показывают, что область максимальной температуры (~1500°C) находится на расстоянии ~0.1 м от среза горелки. Для измерения тепловыделения был создан проточный калориметр, оснащенный необходимыми контрольно-измерительными приборами. Предварительные результаты показали, что нагрев теплоносителя соответствует мощности ~10 кВт и согласуется с известным значением высшей теплотворной способности дизельного топлива ~46 МДж/кг (согласно ГОСТ 21261-91), что свидетельствует о высокой полноте сгорания топлива и низком уровне теплопотерь (суммарно в пределах 3 %).

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

## НЕУСТОЙЧИВОСТЬ МЕЖФАЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ САМОПОДДЕРЖИВАЮЩЕГОСЯ ФРОНТА ИСПАРЕНИЯ ВО ФРЕОНЕ R21

Д. В. Кузнецов

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

Многими авторами отмечалось формирование мелкомасштабных возмущений на межфазной поверхности самоподдерживающегося фронта испарения, но были лишь единичные попытки установления связи между интенсивностью, линейными масштабами возмущений и скоростью распространения фронта испарения. Целью работы является изучение динамики распространения фронта испарения в условиях нормальной и уменьшенной гравитации, а также анализ полученных результатов с позиций развития неустойчивостей Ландау и Кельвина-Гельмгольца.

Эксперименты проводились на фреоне-R21. Жидкость в данных опытах находилась на линии равновесия с паром при приведенном давлении  $P/P_{cr} = 0.037$  (0.193 МПа). В качестве рабочего участка использовалась трубка из нержавеющей стали внешним диаметром 3 мм.

На нагреватель подавался импульс тока, обеспечивающий темп разогрева стенки 2180 К/с. В условиях нормальной и уменьшенной гравитации зависимость скорости фронта от перегрева теплоотдающей поверхности практически одинаковая. Наблюдаются две области с различным темпом изменения скорости от перегрева стенки. В первой области ( $\Delta T < 65$  К) фронт испарения распространяется с ускорением порядка 20 м/с<sup>2</sup> (среднее ускорение без учета пульсации мгновенной скорости фронта). Во второй области ускорение фронта постоянно увеличивается, возрастая более чем на порядок. Макровидеосъемка распространения фронта при освещении объекта показала, что фронт испарения проникал в тепловой слой примерно на две трети толщины без деформации теплового слоя. Далее наблюдался рост толщины парового слоя с одновременным оттеснением слоя перегретой жидкости. На этом участке наблюдалась потеря устойчивости межфазной поверхности.

Оценочный анализ развития неустойчивости по типу Ландау и Кельвина-Геймгольца показал, что в условиях ускоряющегося фронта возможно развитие неустойчивости межфазной поверхности при скоростях пара на межфазной поверхности меньших, чем следует из условий барокапиллярной неустойчивости.

Научный руководитель – канд. техн. наук В. Е. Жуков.

## ИССЛЕДОВАНИЕ КРИЗИСА ТЕПЛООБМЕНА В ЛОКАЛЬНО НАГРЕВАЕМОЙ ПЛЕНКЕ ЖИДКОСТИ, ДВИЖУЩЕЙСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СПУТНОГО ПОТОКА ГАЗА В МИКРОКАНАЛЕ

П. В. Кунгурцев

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

Тонкие пленки жидкости, движущиеся в микро- и миниканалах под действием спутного потока газа, позволяют обеспечить теплоотвод с поверхности высокоинтенсивных локальных источников тепла [1]. Одним из наиболее перспективных приложений является использование таких пленок в системах охлаждения процессоров высокопроизводительной микроэлектроники. Задачей данной работы является исследование динамики, теплообмена и кризисных явлений в широком диапазоне параметров эксперимента и сравнение с имеющимися теоретическими моделями [2].

Построение карты режимов течения проводится с использованием Шлирен метода. Температура поверхности пленки измеряется с помощью ИК сканера. Исследование динамики образования сухих пятен производится с использованием скоростной камеры, с частотой до 50 000 кадр/сек. Эксперименты проводятся при числах Рейнольдса жидкости и газа  $Re_l = 0 \dots 200$  и  $Re_g = 0 \dots 3000$ , соответственно. Высота канала варьируется от 0.2 до 2 мм. Наклон рабочего участка к горизонту изменяется в пределах  $\pm 180^\circ$ . С использованием микрооробрения на нагревателе планируется достичь величины критического теплового потока  $1 \text{ кВт/см}^2$  и более.

---

1. Kabov O. A., Zaitsev D. V., Cheverda V. V., Bar-Cohen A., Evaporation and flow dynamics of thin, shear-driven liquid films in microgap channels.// Experimental Thermal and Fluid Science, 2010.

2. Kabova Yu. O., Kuznetsov V. V., Kabov O. A., Evaporation of a thin viscous liquid film sheared by gas in a microchannel.// International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013.

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

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВПРЫСКА ЖИДКОГО АЗОТА В ВОДУ

А. В. Мелешкин

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

Целью данной работы было экспериментальное исследование процесса взрывного вскипания жидкого азота инжескированного в воду.

В результате экспериментальных исследований было получено, что струя жидкого азота, достаточно быстро введенная в толщу воды, вскипает взрывным образом, видимо, по типу вскипания при метастабильном перегреве. Максимальное давление, которое было зарегистрировано нами при взрывном вскипании жидкого азота (как модельной жидкости), инжескированного в воду, составило 5,3 МПа. При этом скорость нарастания давления была равна 56,7 МПа/с (рис.1). Эти результаты получены в рамках работ по программе разработки новых методов получения газогидратов метана, основанных на ударно-волновом способе.

В наших экспериментах также менялась температура воды в рабочем участке, измерения проводились при температурах 20°C и 60°C, темп роста давления при этом также менялся. Максимальная амплитуда скачка давления при температуре 60°C составила 17,4 бар. На величину давления также оказывает влияние наличие свободного объема. Данные эксперименты проводились при температуре воды 20°C. При заполнении водой на 84% от объема рабочего участка давление достигает 0,8 МПа. При заполнении водой на 92% рост давления составляет 1.3 МПа. Эти опыты проводились при наибольшем внутреннем диаметре шайбы (4,5 мм), и носят сравнительный характер.

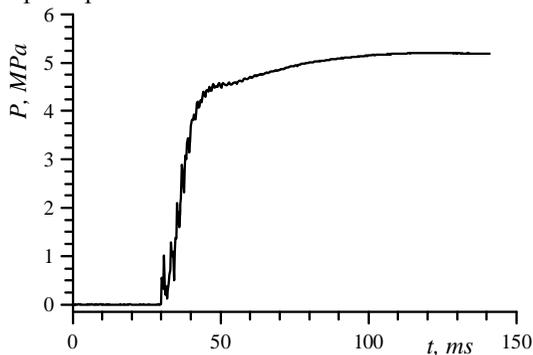


Рис. 1. Профиль волны давления в процессе инжескирования жидкого азота при расположении датчика давления на расстоянии 4 см от места ввода азота.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук акад. РАН В. Е. Накоряков.

## ЛИНЕЙНЫЙ АНАЛИЗ ДИФФУЗИОННО-ТЕПЛОВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РАСТЯЖЕННЫХ ПЛАМЕН ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПЕРЕМЕШАННОЙ СМЕСИ ГАЗОВ

С. Н. Мокрин

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

Исследования устойчивости и пределов существования пламени предварительно перемешанной смеси газов важны не только для получения фундаментальных знаний о процессах горения, но и для создания новых технологий сжигания запределно бедных смесей газов с низким выбросом  $\text{NO}_x$ .

Недавние экспериментальные и теоретические исследования двойных пламен во встречных потоках газа в условиях микрогравитации показали, что в такой системе возможно горение запределно бедных предварительно перемешанных смесей газов [1]. Теоретический анализ стационарных решений показал возможность существования нескольких режимов горения при одних и тех же параметрах задачи. Несмотря на то, что исследования одномерной устойчивости позволили выделить устойчивые стационарные режимы горения, вопрос о двухмерной неустойчивости этих режимов оставался открытым. В данной работе в рамках диффузионно-тепловой модели выполнен линейный анализ двухмерной устойчивости системы из двух симметрично расположенных пламен, стабилизированных во встречных потоках газа. Описаны различные стационарные режимы горения запределно бедных и околопределных газовых смесей при различных числах Льюиса.

Получено дисперсионное уравнение для скорости роста малых возмущений (включая случаи симметричных и антисимметричных возмущений), и впервые исследована двумерная устойчивость различных режимов горения растяженного пламени с радиационными теплотерьями.

Аналитические результаты согласуются с результатами численного моделирования и позволяют объяснить экспериментальные данные, полученные в условиях микрогравитации [1].

- 
1. R. Fursenko, et.al., Cellular and sporadic flame regimes of low-Lewis-number stretched premixed flames// Proceedings of Combustion Institute 34/1 (2013), pp. 981–988.

Научный руководитель – д-р. физ.-мат. наук С. С. Минаев.

## РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ДИОДНОЙ ЛИНЕЙКИ

М. В. Морев

Тюменский государственный университет

Лазерная техника за 50 летнюю историю развития нашла достаточно широкое применение в промышленной технологии, медицине, военном деле, научных исследованиях. Твердотельные лазеры (ТТЛ) в настоящее время занимают лидирующее место по объему производства и сфере применения.

Производство мощных твердотельных лазеров нового поколения, прежде всего, связано с решением проблемы эффективности накачки лазерных кристаллов. Современный подход к этой проблеме основывается на использовании охлаждаемых водой модулей накачки на основе сборок мощных непрерывных или импульсных лазерных диодных линеек. При стандартном КПД  $\sim 40\%$  теплообменник должен отводить от сборки тепловой поток плотностью  $\sim 2 \text{ МВт/м}^2$ .

Чтобы обеспечить требуемый температурный режим диодов, необходимо иметь эффективные теплообменники с низким термическим сопротивлением, которое в основном определяется интенсивностью теплообмена на границе «стенка-вода».

В данной работе была разработана методика расчета термического сопротивления микроканальной структуры выполненной из медной гофрированной фольги, отличающаяся тем, что гофры фольги имеют петлеобразную форму, эффективный размер которых имеет порядок  $\sim 100 \text{ мкм}$ .

С помощью электронного микроскопа была изучена микроканальная структура исследуемого образца. Так же были измерены основные геометрические параметры, что позволило выполнить расчет систем охлаждения лазерной диодной линейки.

Анализ полученных зависимостей термического сопротивления и коэффициента теплообмена от толщины стенки микроканалов показал, что существует оптимальное значение, при которой достигаются наилучшие условия охлаждения для заданной геометрии канала, так как термическое сопротивление не монотонно зависит от толщины фольги.

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

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ  
РАДИАЦИОННОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА НА ПРОЦЕСС  
СТАБИЛИЗАЦИИ ПЛАМЕНИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ  
ПОРИСТОЙ ГОРЕЛКЕ**

Ф. С. Палесский

Институт теоретической и прикладной механики  
им. С. А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск  
Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

В настоящее время актуальным является исследование и разработка высокоэффективных тепловых источников на основе горения газов с регулируемыми температурными и мощностными характеристиками. Тепловые источники на основе сжигания газовых топлив являются более экономически и экологически выгодными, чем электрические источники тепла. В частности радиационные пористые горелки позволяют значительно увеличить эффективность сжигания газовых смесей и уменьшить выброс экологически вредных веществ за счёт эффективной рециркуляции тепла, обеспечиваемой пористым каркасом, а также за счёт мощного теплового потока излучения от разогретого до высоких температур твердого тела

В настоящей работе была рассмотрена стационарная задача горения предварительно перемешанной газовой смеси в цилиндрической пористой горелке с учётом радиационного теплообмена. Задача была решена в рамках двухтемпературной диффузионно-тепловой модели с учётом лучистого теплопереноса, который описывался в рамках модели Эддингтона. Численно были исследованы спектральные и мощностные характеристики теплового излучения из радиационной пористой горелки в зависимости расхода свежей смеси и позиции стабилизации фронта пламени.

Было показано, что радиационный теплоперенос существенно влияет на распределение температуры газа и твердой фазы, нормальную скорость пламени и положение фронта химической реакции внутри пористого тела. Численные исследования показали, что радиационный тепловой поток из внутренних объёмов пористого тела вносит существенный вклад в общий поток теплового излучения от пористой горелки в окружающую среду.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук С. С. Минаев.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ХЛАДАГЕНТА R-415A В ПАРОВОЙ ФАЗЕ

Е. П. Расчектаева

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

Смесевой хладагент R-415A (50 мас.%  $\text{CHF}_2\text{CH}_3$  (R-152a) и 50 мас. %  $\text{CHClF}_2$  (R-22)) является эффективным заменителем для фреона R-12 с точки зрения простоты и быстроты замены, а также низкой стоимости и улучшения рабочих характеристик. К сожалению, в литературе не удалось обнаружить справочных данных по теплофизическим свойствам R-415A в газообразном состоянии.

В работе представлены результаты измерений теплопроводности ( $\lambda$ ) пара R-415A в интервале температур 308 - 415 К и давлений 0,12 - 1,68 МПа, а также их обработки и статистического анализа. Эксперименты были выполнены стационарным методом коаксиальных цилиндров [1]. Погрешность экспериментальных данных составляла 1,5 - 2,5% (погрешность измерения температуры - 0,05 К, давления - не более 4 кПа). Результаты измерений обрабатывались эмпирической зависимостью:

$$\lambda(T, p) = a_0 + a_{10} \cdot \frac{T}{100} + a_{20} \cdot \frac{100}{T} + p \cdot (a_{11} \cdot \frac{T}{100} + a_{21} \cdot \frac{100}{T}) + p^2 \cdot (a_{12} \cdot \frac{T}{100} + a_{22} \cdot \frac{100}{T}), \quad (1)$$

где  $T$  – в К,  $p$  – в бар,  $\lambda$  – в мВт/(м·К). Среднеквадратичное отклонение полученных экспериментальных значений от сглаженных по (1) не превышает 0,7%. В работе показано, что зависимость (1) можно применить в широкой области параметров от атмосферного давления ( $\lambda_0$ ) до давления на линии конденсации ( $\lambda_d$ ). Получены температурные зависимости для  $\lambda_0$  и  $\lambda_d$ . Установлено, что в идеально-газовом состоянии теплопроводность трехкомпонентной смеси можно рассчитать по правилу аддитивности. Используя (1) рассчитаны справочные таблицы температурных и барических зависимостей теплопроводности хладагента R-415 A и определены их погрешности.

---

1. Верба О. И., Груздев В. А. Теплопроводность гептафторпропана HFC - 227ea // Теплофизика и аэромеханика. – 2002. – Т. 9, № 3. – С. 467.

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

## ДВУХФАЗНОЕ ТЕЧЕНИЕ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ПРЯМОУГОЛЬНОМ МИКРОКАНАЛЕ

Ф. В. Роньшин

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

В настоящее время происходит революционное развитие теплообменных систем с микро и нано размерами, которые оказываются гораздо более энергоэффективными, чем макросистемы с размерами каналов 3-100 мкм. При уменьшении толщин плоских каналов, отношение поверхности к объему канала увеличивается обратно пропорционально его минимальному поперечному размеру, что обуславливает высокую интенсивность теплообмена в микросистемах. Такие системы получают все более широкое распространение в микроэлектронике, в аэрокосмической промышленности, транспорте и энергетике.

Обзор работ по режимам двухфазных течений в каналах различной геометрии содержится в [1]. Показано, что в большинстве публикаций рассматриваются относительно длинные каналы, в которых условия ввода жидкости и газа в канал не оказывают существенного влияния на структуру двухфазного потока. Короткие каналы имеют более широкие перспективы использования в технических приложениях, например, в биочипах и устройствах охлаждения микроэлектроники. Изучение газожидкостных течений в коротких горизонтальных микрочаналах выполнено в [2, 3].

В данной работе выполнено экспериментальное исследование течения двухфазного потока в прямоугольных коротких горизонтальных каналах сечением 0,2x34, 0,1x20 и 0,1x30 мм с использованием флуоресцентного и Шлирен - метода. Установлено существование раздельного режима течения. Показано, что изменение высоты горизонтального канала и ширины оказывает существенное влияние на границы между режимами.

- 
1. Чиннов Е. А., Кабов О. А. Двухфазные течения в трубах и капиллярных каналах // ТВТ. 2006. Т. 44. № 5. С. 777.
  2. Kabov O. A., Chinnov E. A., Cheverda V. Two-Phase Flow in Short Rectangular Mini-Channel // Microgravity Sci. Technol. 2007. V. 19. N 3/4, P. 44.
  3. Chinnov E. A., Guzanov V. V., Cheverda V. et al. Regimes of Two-phase Flow in Short Rectangular Channel // Microgravity Sci. Technol. 2009. V. 21. S Issue 1, P. 199.

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

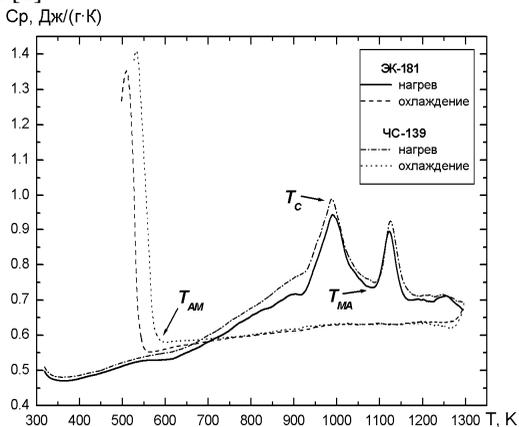
## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ ЭК-181 И ЧС-139 В ШИРОКОМ ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР МЕТОДОМ ДСК

Д. А. Самошкин, А. Ш. Агажанов

Новосибирский государственный университет

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

Методом дифференциальной сканирующей калориметрии проведены измерения удельной теплоемкости образцов ферритно-мартенситных сталей ЭК-181 и ЧС-139 в интервале температур 318–1300 К. Исследовались жаропрочные комплексно-легированные 12%-ые хромистые стали нового поколения, которые рассматриваются в качестве перспективных конструкционных материалов для ТВЭЛов ядерных реакторов на быстрых нейтронах [1].



*Рис.1.* Результаты измерения удельной теплоемкости сталей.

Определены изменения теплоемкости в области точки Кюри и при взаимных твердофазных превращениях мартенсит-аустенит. Разработаны таблицы справочных данных для научного и практического использования.

1. Леонтьева-Смирнова М. В., Агафонов А. Н., Можанов Е. М., Чернов В. М. Свариваемость жаропрочных 12%-ных хромистых сталей ЭК-181 и ЧС-139 // Вопросы атомной науки и техники. – 2011. – № 4. – С. 14 – 21.

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

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПАРООБРАЗОВАНИЯ ПРИ КИПЕНИИ В СТЕКАЮЩИХ НЕДОГРЕТЫХ ПЛЕНКАХ ВОДЫ

В. С. Сердюков

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

Пленочные течения жидкости в настоящее время широко используются в различных технологических процессах. Режимы испарения и кипения в тонких пленках обеспечивают при малых расходах жидкости и низких температурных напорах высокую интенсивность теплообмена. Компактные испарители с пленочным течением жидкости находят применение в дистилляционных установках, системах охлаждения и термостабилизации, в аппаратах по ожижению природного газа, в пищевой промышленности и т.д.

Данная работа посвящена исследованию особенностей динамики парообразования при кипении в стекающих пленках воды при варьировании степени недогрева жидкости, числа Рейнольдса и плотности теплового потока. Работа выполнялась на экспериментальной установке для исследования пленочных течений жидкости, подробное описание которой представлено в [1]. С использованием синхронизированных высокоскоростных термографической и цифровой видеосъемок получены экспериментальные данные по локальным характеристикам при кипении в пленке жидкости (максимальный размер паровых пузырей, частота зародышеобразования и перегрев тепловыделяющей поверхности, соответствующий появлению паровых пузырей).

Анализ полученных данных показал, что размер паровых пузырей перед конденсацией существенным образом зависит от недогрева жидкости на входе и увеличивается с ростом плотности теплового потока. Наибольшее влияние на частоту зародышеобразования оказывает изменение плотности теплового потока. При этом опытные данные, полученные в настоящей работе, близки к данным по частотам зародышеобразования, полученным при кипении насыщенной жидкости в условиях большого объема.

- 
1. Surtaev A. S., Pavlenko A. N., Tsoi A. N. Development of heat transfer at boiling and crisis phenomena in falling liquid film at stepwise heat generation // Proc. of the 8th World Conference "ExHFT- 8", Lisbon, Portugal. – June 16–20, – 2013. – 8 p.

Научный руководитель – д-р. физ.-мат. наук А. Н. Павленко.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА В МОДЕЛИ ОТСАСЫВАЮЩЕЙ ТРУБЫ ГИДРОТУРБИНЫ

С. Г. Скрипкин

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

Нестационарные явления в отсасывающих трубах гидротурбин, такие как прецессия вихревого жгута, оказывают значительное влияние на их энергетические показатели и безопасность работы. Явление распада вихря имеет место, когда гидротурбина работает в неоптимальных режимах. Поток, сходящий с рабочего колеса, имеет остаточную закрутку и, попадая в область расширения в отсасывающей трубе, замедляется, образуя прецессирующую вихревую структуру, которая является причиной значительных пульсаций давления и как следствие нежелательных вибраций гидрооборудования. Т. е. задача изучения нестационарных вихревых структур связана с проблемами повышения эффективности работы и безопасности гидротурбин.

Целью работы является получение экспериментальных данных о потоке в лабораторной модели отсасывающей трубы. Исследования проводились на замкнутом гидродинамическом контуре с рабочим участком, выполненным по геометрии TURBINE-99 [1]. Измерения проводились при использовании стационарных завихрителей с различными параметрами закрутки потока, что соответствует разным режимам работы гидротурбин. Важной частью данного исследования являются эксперименты по добавлению газовой фазы в поток.

В ходе работы были получены экспериментальные данные, включающие в себя перепады давления, частоты и амплитуды пульсаций. Анализ данных выявил автомодельность зависимости числа  $Str$  от  $Re$ , что говорит о возможности перенесения полученных результатов на большие масштабы. Добавление газовой фазы позволило уменьшить амплитуды пульсаций давления в среднем на 18%. Полученные результаты будут полезны для верификации численных кодов и разработки рекомендаций по оптимизации гидродинамического оборудования.

---

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

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

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ЖИДКОСТЬ-ПАР

Р. А. Филипенко

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

Целью данных экспериментальных исследований, является измерение профиля температуры, вблизи границы раздела жидкость-газ, а также определение профиля теплового потока поперек слоя жидкости. Исследования ведутся на рабочем участке, где формируется горизонтальный слой жидкости. Толщина слоя которого варьируется в зависимости от режимных параметров эксперимента и составляет не более 2.5 мм. Слой жидкости открыт в атмосферу. По центру горизонтального слоя жидкости со стороны подложки осуществляется локальный нагрев с помощью медного нагревателя. Мощность нагревательного элемента контролируется посредством источника питания. Температура нагревателя, жидкости и окружающей среды измеряется с помощью термопар. Сбор данных температур осуществляется с помощью контрольно-измерительной системы, состоящей из системы сбора данных (АЦП) и программного обеспечения. Точность измерения температур составляет 0,1 °С. Положение микро-термопары определяется, посредством прецизионной подвижки, которая управляется с помощью специального программного обеспечения. Диапазон передвижения микро-термопары составляет 50 мм с шагом 1 микронметр. Наблюдение и запись изображения осуществляются с помощью видеокамеры с разрешением 640x480 пикселей.

В работе представлены экспериментальные исследования по измерению температуры в парогазовой смеси вблизи границы раздела жидкость-пар в условиях интенсивного испарения жидкости. Измерен профиль температуры, вблизи границы раздела жидкость-газ для различных типов жидкости и температур. Получено, что на границе раздела жидкость-газ, существует перепад температуры, который составляет 4-5 °С для данных режимных параметров эксперимента. Определен профиль теплового потока с учетом температурной зависимости коэффициента теплопроводности.

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

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ТУРБУЛЕНТНОГО ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПОТОКА В МОДЕЛЯХ ВИХРЕВОЙ ТОПКИ**

Е. Ю. Шадрин

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

Одной из перспективных технологий производства энергии является факельное сжигание пылеугольного топлива в вихревом потоке. Исследование в лабораторных условиях моделей топочных устройств является необходимым этапом научного обоснования разработки новых конструктивных решений и выбора режимных параметров для повышения эффективности и безопасности технологий теплоэнергетики.

В данной работе на основе бесконтактных оптических методов ЛДА и PIV экспериментально исследована структура закрученного потока в двух изотермических лабораторных моделях вихревого топочного устройства. Измерены распределения осредненной скорости и турбулентных пульсаций. Основными элементами вихревой топки являются: камера горения с горизонтальной осью вращения потока, диффузор и камера охлаждения, заканчивающаяся горизонтальным газоходом. Общей отличительной особенностью исследуемых устройств является дополнительный тангенциальный ввод пылевоздушных струй через горелки, расположенные в нижней части камеры горения. При этом модели различаются расположением верхних горелок.

Измерения поля скорости были выполнены в ряде сечений моделей. В качестве рабочей среды использовался сжатый воздух. Для анализа влияния распределенного ввода воздушных струй на характер течения варьировалось отношение объемного расхода воздуха через верхние и нижние горелки. Обоснован способ управления структурой потока, обеспечивающий необходимое отклонение верхних горелочных струй от горловины диффузора и достаточное время пребывания топливных частиц в объеме камеры горения.

Анализ результатов показывает, что течение в обеих моделях имеет сложную пространственную структуру. Проведено сопоставление моделей, выявившее их достоинства и недостатки. Показано, что изменение расположения верхних горелок приводит к существенным различиям в циркуляции потока, что может на практике негативно влиять на полноту сгорания топлива.

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

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ.....	5
М. А. Аникеев.....	5
И. Д. Брюханов.....	6
А. А. Васильев.....	7
А. Ю. Грабовский, А. А. Страхова, К. Я. Булахова.....	8
В. А. Карелин.....	9
Е. Н. Максимова, Ю. В. Растворова.....	10
В. А. Минаков.....	11
А. Минибаев, С. Жигульский, П. Петров.....	12
Е. В. Ни.....	13
Т. М. Никифорова.....	14
О. О. Очиров.....	15
Е. Р. Поскребышев.....	16
М. В. Сальников.....	17
А. А. Симонова.....	18
А. В. Смагина.....	19
О. З. Сотников.....	20
В. Г. Стельмах.....	21
П. В. Туев.....	22
А. О. Уварова.....	23
В. Э. Художитков.....	24
АЭРОФИЗИКА.....	25
С. С. Абдуракипов.....	25
М. В. Алексеенко.....	26
Р. И. Алчин.....	27
Д. А. Амирбеков.....	28
А. Б. Балбуцкий.....	29
Н. С. Беляков.....	30
А. П. Винокуров.....	31
В. В. Денисюк.....	32
А. Д. Дрясов.....	33
Л. В. Иванов.....	34
В. С. Каприлевская, С. Н. Толкачев.....	35
В. С. Козулин.....	36
В. А. Колотилов.....	37
Ю. С. Корнеева.....	38
Р. З. Курмангалиев.....	39
Т. П. Мирошниченко.....	40
Ю. Г. Михайлина, М. А. Ермилов.....	41
Ю. Г. Михайлина, М. А. Ермилов.....	42

Д. В. Мохнатов .....	43
К. В. Рылова .....	44
В. А. Сафонов .....	45
Р. Е. Соколов.....	46
Р. Р. Халиулин .....	47
С. А. Чуркин .....	48
А. А. Яцких .....	49
ТЕПЛОФИЗИКА.....	50
К. А. Алигожина.....	50
Е. Б. Бутаков .....	51
Т. Р. Валиев, Р. Р. Халиулин.....	52
М. А. Воробьев .....	53
А. Е. Гореликова.....	54
Н. А. Калюжный, А. В. Зайковский, Д. В. Смовж.....	55
Е. О. Карнаухова .....	56
Д. П. Кириченко .....	57
Ю. М. Козловский .....	58
Е. П. Копьев .....	59
Д. В. Кузнецов .....	60
П. В. Кунгурцев .....	61
А. В. Мелешкин.....	62
С. Н. Мокрин .....	63
М. В. Морев .....	64
Ф. С. Палесский.....	65
Е. П. Расчектаева .....	66
Ф. В. Роньшин .....	67
Д. А. Самошкин, А. Ш. Агажанов .....	68
В. С. Сердюков .....	69
С. Г. Скрипкин.....	70
Р. А. Филипенко .....	71
Е. Ю. Шадрин .....	72

Научное издание

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

**МНСК–2014**

**ФИЗИКА СПЛОШНЫХ СРЕД**

*Материалы конференции публикуются в авторской редакции*

Подписано в печать 02.04.2014 г.  
Формат 60x84/16. Уч.-изд. л. 4,7. Усл. печ. л. 4,4.  
Тираж 130 экз. Заказ №

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