

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

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

**МНСК–2016**

**16–20 апреля 2016 г.**

**ФИЗИКА СПЛОШНЫХ СРЕД**

**Новосибирск  
2016**

УДК 553  
ББК 22.3

Материалы 54-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2016: Физика сплошных сред / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2016. 104 стр.

ISBN 978-5-4437-0489-0

Конференция проводится при поддержке Сибирского отделения Российской академии наук, Правительства Новосибирской области, инновационных компаний России и мира, Ассоциации выпускников «СОЮЗ НГУ».

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

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

**Ответственный секретарь секции** – Клыкова М. А.

**Экспертный совет секции**

д-р физ.-мат. наук Миронов С. Г.  
д-р физ.-мат. наук Чернов А. А.  
канд. физ.-мат. наук Верещагин А. С.  
канд. физ.-мат. наук Приходько В. В.  
канд. физ.-мат. наук Шошин А. А.

ISBN 978-5-4437-0489-0

© Новосибирский государственный  
университет, 2016

**NOVOSIBIRSK STATE UNIVERSITY  
SIBERIAN BRANCH OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES  
NOVOSIBIRSK OBLAST GOVERNMENT**

**PROCEEDINGS  
OF THE 54th INTERNATIONAL STUDENTS  
SCIENTIFIC CONFERENCE**

**ISSC-2016**

**April, 16–20, 2016**

**SOLID STATE PHYSICS**

**Novosibirsk, Russian Federation  
2016**

Proceedings of the 54<sup>th</sup> International Students Scientific Conference. Solid State Physics / Novosibirsk State University. Novosibirsk, Russian Federation. 2016. 104 pp.

ISBN 978-5-4437-0489-0

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

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

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

**Responsible secretary** – Klykova M. F.

**Section scientific committee**

Dr. Phys. Math. Mironov S. G.

Dr. Phys. Math. Chernov A. A.

Cand. Phys. Math. Vereshchagin A. S.

Cand. Phys. Math. Prikhodko V. V.

Cand. Phys. Math. Shoshin A. A.

## Flat probe method for anisotropic assymetrical plasma

Strakhova A. A., Grabovsky A. Yu.

National Mineral Resources University, St. Petersburg

Developing plasma diagnostics methods are vital for various kind of plasma applications [1]. This paper deals with further development of the probe technique for investigation of nonequilibrium anisotropic plasmas. The flat probe method [2], which allows to determine full electron velocity distribution function (EVDF) in plasmas with any degree of anisotropy, but only with axial symmetry, has been improved in direction of measurements in plasma without symmetry at all. The theoretical basis of the method has been developed. For probes of different geometries the analytical expressions, which connects the second derivative of probe current with respect to the potential with Legendre components of the EVDF has been obtained.

Method has been experimentally tested in two dramatically different types of helium discharge: positive column of glow discharge and in nonlocal plasma of beam discharge. It has been demonstrated, that proposed method provide a number of new possibilities, such as investigations near the plasma boundaries and obtaining of non-traditional information about particle escape to the walls, which could be useful for investigations of Langmuir paradox in plasma [3].

The reliability of the proposed method has been tested by comparing experimental data with results of modern theories and independent measurements.

This work was supported by Education Ministry of Russian Federation.

---

1. Lieberman M. A., Lichtenberg A. J.. Principles of Plasma Discharge and Material Processing (Wiley, New York, 2005).

2. Mustafaev A .S.. NATO Int. Sci. Session. N.Y. - London: Plenum Press. 1998. V. 367. P. 531.

3. Kudryavtsev A.A., Tsendin L. D. Technical physics. 1999. V. 44. P.1290

Scientific supervisor – Dr. Phys. Math., Prof. Mustafaev A. S.

## Исследование травления поликарбоната в плазме кислорода

Артюхов А. И., Овцын А. А.

Ивановский государственный химико-технологический университет

Одним из наиболее перспективных и современных методов модификации поверхности полимеров является воздействие низкотемпературной плазмы, которое позволяет изменить свойства поверхностей этих материалов и расширить области их использования. Целью данной работы является исследование кинетических закономерностей травления пленки поликарбоната в плазме кислорода при различной площади обрабатываемого полимера.

Образцы поликарбоната размещали по образующей на термостатируемой стенке цилиндрического стеклянного реактора диаметром 3 см в зоне положительного столба. Площадь образцов поликарбоната в реакторе изменялась в пределах от 28,5 до 84,6 см<sup>2</sup>. Доля поверхности реактора, занятой полимером достигала 26,5% от общей площади реактора в зоне горения разряда ( $S=320,2$  см<sup>2</sup>).

Увеличение давления от 50 до 300 Па при токе разряда 80 мА и площади образца в реакторе, равной 53,6 см<sup>2</sup>, напряженность электрического поля изменялась от 3,6 до 17,9 В/см, а приведенная напряженность от  $3,9 \cdot 10^{-16}$  до  $4,7 \cdot 10^{-16}$  В·см<sup>2</sup>. Температура газа уменьшается от 540 до 470 К с увеличением загрузки ректора полимером, при постоянном токе разряда 80 мА и давлении 200 Па. Интенсивности излучения линий атомарного кислорода ( $\lambda=845$  нм и  $\lambda=777$  нм) с ростом давления уменьшаются, соответственно, в 2,8 и в 2,1 раза. Интенсивность линии атомарного водорода  $H_{\alpha}$  ( $\lambda=656$  нм) увеличивается с ростом тока и уменьшается с ростом давления. Для полосы молекулярного кислорода  $O_2$  (кант  $\lambda=760$  нм) характерен рост, как с давлением так и с током.

На основании измеренных краевых углов смачивания водой и глицерином методом лежащей капли была рассчитана поверхностная энергия ( $\sigma$ ), ее полярная ( $\sigma^p$ ) и дисперсионная ( $\sigma^d$ ) компонента. Полная поверхностная энергия необработанного поликарбоната составила  $3,98 \cdot 10^{-6}$  Дж/см<sup>2</sup>. При обработке в плазме кислорода при давлении 100 Па и токе разряда 50 мА полная поверхностная энергия составила  $6,37 \cdot 10^{-6}$  Дж/см<sup>2</sup>. Изменение поверхностной энергии происходит за счет увеличения ее полярной составляющей, дисперсионная составляющая при обработке уменьшается.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-32-00404).

Научный руководитель – канд. хим. наук, доцент Смирнов С. А.

**Влияние морфологии поверхности алюминиевой фольги  
на вероятность гетерогенной рекомбинации атомов  $O(^3P)$   
в плазме кислорода**

Бекетова Е. А.

Ивановский государственный химико-технологический университет

Тонкие пленки алюминия имеют широкое технологическое применение в микроэлектронике вследствие простоты их получения и устойчивости к внешним коррозионным воздействиям, обусловленной наличием тонкой пленки естественного оксида на поверхности.

Объектом исследования являлась алюминиевая фольга марки ФГ 0,2×210 Н А5 толщиной 200 мкм, поверхность которой изменяли путем нанесения пленки алюминия толщиной 0,2 мкм термическим испарением в вакууме. Образец в форме кольца помещался по образующей стенки реактора непосредственно в зоне плазмы. Давление в системе поддерживалось постоянным 200 Па при токе разряда 50 мА. Вероятность гетерогенной рекомбинации ( $\gamma$ ) атомов кислорода на поверхности пленки и фольги из алюминия определялась при измерении относительной концентрации атомов кислорода методом электронного парамагнитного резонанса. Морфология поверхности образцов исследовалась методом атомно-силовой микроскопии.

Обработка результатов эксперимента показала, что для пленки алюминия при температуре образца 350 К  $\gamma = 5,6 \cdot 10^{-3}$ , а для фольги при этих условиях  $\gamma = 1 \cdot 10^{-2}$ .

Поверхность исследуемых образцов алюминия представляет собой морфологически неоднородную структуру, состоящую из отдельных зерен или кристаллитов. Центрами сорбции атомов на поверхности как пленки, так и фольги алюминия могут выступать сами зерна либо в сочетании с границами зерен. Ввиду того что по сравнению с поверхностью фольги среднее удельное количество зерен на поверхности пленки ниже, наблюдаемое различие в значениях вероятности гетерогенной рекомбинации для данных поверхностей оправданно.

Увеличение времени обработки образцов в плазме кислорода не приводит к резким изменениям как поверхности фольги и пленки (шероховатость), так и величины вероятности гетерогенной рекомбинации атомов кислорода.

Научные руководители – канд. хим. наук, доцент Холодкова Н. В.

## **Кинетические закономерности травления полиэтилентерефталата в плазме аргона**

Василькин Д. П.

Ивановский государственный химико-технологический университет

Целью данной работы было измерение скоростей образования газообразных продуктов при действии плазмы аргона на гетероцепные полимеры в зависимости от параметров разряда и количества обрабатываемого материала.

Объектами исследования были: ткань из полиэфирного волокна (полиэтилентерефталата) SAATILENE 120.34; пленки ПЭТФ. Площадь образцов изменялась от 18 до 120 см<sup>2</sup>.

Образцы обрабатывали в тлеющем разряде постоянного тока. Давление аргона составляло 50 – 200 Па, ток разряда – 80 мА, линейная скорость потока газа – 30 см/с. Состав газообразных продуктов травления и скорости их образования измеряли на масс-спектрометре ИПДО-2А. Скорость убыли массы определяли путем периодического взвешивания образцов на аналитических весах.

Гравиметрические измерения показали, что при фиксированном токе разряда максимальная скорость травления полимеров наблюдается при давлении аргона 50 Па. При дальнейшем увеличении давления газа скорость деструкции образца уменьшается и слабо меняется с давлением газа. Скорость убыли массы пленки выше, чем ткани той же площади.

Газообразными продуктами деструкции полимеров в плазме аргона являются молекулы СО, воды и водорода. При этом основным продуктом и для ткани, и для пленки является СО.

Зависимости скоростей образования газообразных продуктов травления от давления плазмообразующего газа для ткани и пленки качественно близки. Увеличение давления газа приводит к незначительному росту скоростей выделения водорода и СО, а скорость образования молекул Н<sub>2</sub>О изменяется слабо.

С увеличением площади обрабатываемого материала скорость убыли массы и скорость образования газообразных продуктов уменьшаются.

Объяснение наблюдаемого «эффекта загрузки» может быть сделано на основе анализа влияния летучих продуктов деструкции полимеров на электрофизические параметры плазмы, и расчета функции распределения электронов по энергиям, что позволит проанализировать влияние этих продуктов на константы скоростей процессов с участием электронов.

Научный руководитель – канд. хим. наук, доцент Шикова Т. Г.

**Теория генерации электромагнитного излучения  
пучково-плазменной антенной**

Волчок Е. П.

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

Изучение вопросов, связанных с генерацией электромагнитного излучения из плазмы, играет важную роль как для различных астрофизических явлений, так и для лабораторных экспериментов. Наш интерес к данной задаче связан с недавними экспериментами на открытой ловушке ГОЛ-3 (ИЯФ СО РАН), нацеленными на поиск эффективных режимов генерации излучения при инжекции в плазму электронных пучков гигаваттного уровня мощности.

В работе исследована возможность эффективной генерации мощного электромагнитного излучения в тонкой пучково-плазменной системе, поперечные размеры которой сравнимы с длиной излучаемых волн. Показано, что если плотность плазмы промодулирована определенным образом, то такая система может излучать электромагнитные волны как обычная антенна. Для поиска наиболее оптимальных режимов излучения в такой пучково-плазменной системе в работе построена упрощённая теоретическая модель. Рассмотрены двух- и трехмерные варианты задачи, проведено сравнение предсказаний модели с результатами численных экспериментов. На основе этого сравнения сделан вывод о том, что модель хорошо описывает положение и величину максимума излучения.

В турбулентной плазме спектр неоднородности плотности может быть очень широк. Представляя его некоторым набором возмущений известного вида и применяя полученную теорию к отдельным гармоникам, можно получить спектр излучения из такой плазмы. Это позволяет сделать оценку максимальной мощности излучения и определить его угловое распределение. Согласно таким оценкам мощность субтерагерцового излучения при экспериментальных параметрах, характерных для установки ГОЛ-3, может достигать десятков процентов от полной мощности пучка.

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

## **Отклик узкого столба плазмы на плотный ультрарелятивистский пучок заряженных частиц**

Горн А. А.

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

В настоящее время в ЦЕРНе планируется проведение эксперимента AWAKE по кильватерному ускорению. Традиционно частицы ускоряют в электрических полях, создаваемых высокочастотными резонаторами. В кильватерном же ускорении электрические поля создаются внутри плазменной ячейки с помощью пучка заряженных частиц или лазерного импульса, который называется драйвером. Эксперимент AWAKE уникален тем, что в качестве драйвера в нем впервые будет использоваться длинный протонный пучок. Плазменная ячейка в эксперименте изначально будет наполнена паром рубидия, через который затем будет пропущен короткий лазерный импульс, ионизирующий этот пар и оставляющий за собой узкий столб плазмы с резкой границей. Данная работа посвящена изучению отклика такого столба плазмы на плотный ультрарелятивистский пучок заряженных частиц. Прежде отклик был хорошо изучен лишь в случае бесконечной плазмы, в то время как в этой работе акцент делается на ограниченность плазменного столба. В работе в линейном приближении получены и проанализированы аналитические выражения для кильватерных полей и потенциала в обсуждаемой геометрии, которые согласуются с научными статьями на соответствующую тему, исследовано поведение потенциала кильватерной волны на оси плазменного столба в зависимости от плотности плазмы, исследован эффект роста потенциала при понижении плотности плазмы, а также эффект отсутствия полей за пределами плазмы. Затем с помощью программы LCODE произведено численное моделирование случая редкой плазмы, в котором линейное приближение не работает. Результаты моделирования соотнесены с аналитическими выражениями для полей и потенциала, и определена точность и область применимости последних. Исследован нелинейный отклик плазмы на гладкие пучки различной формы, и в частности, момент нарушения линейности отклика, эффект выноса потенциала кильватерной волны за пределы плазмы вылетающими электронами, колебания электронной плотности на границе плазмы, искажение структуры волны компенсирующим током.

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

## **Изучение электрической прочности отдельных изоляторов с различной формой поверхности.**

Колесников Я. А.

Новосибирский государственный университет

Нейтронная терапия благодаря высокой биологической эффективности нейтронов в лечении злокачественных новообразований в последние годы привлекает все большее внимание. Особенно перспективной представляется бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ). Клинические испытания методики, проведенные на ядерных реакторах, показали, что БНЗТ позволяет лечить опухоли, считающиеся практически неизлечимыми, применяемыми в настоящее время методами. Однако реакторы в силу разных причин не подходят для широкого внедрения методики в практику. Требуются компактные, недорогие и безопасные источники нейтронов, которые можно будет разместить в онкологических клиниках. Такие источники могут быть сделаны на основе ускорителя заряженных частиц.

В 1998 году для получения сильноточных протонных пучков в ИЯФ СО РАН был предложен новый тип ускорителя – ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией. Одним из основных элементов конструкции ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией является секционированный разборный проходной изолятор. Напряжение от высоковольтного источника распределяется по электродам с помощью резистивного делителя. Из-за малой величины тока (сотни микроампер), текущего по делителю, темновые токи, возникающие в ускоряющих зазорах, способны значительно повлиять на равномерное распределение потенциала вдоль ускорительного канала, а следовательно, и на транспортировку пучка. В связи с этим возникает необходимость изменений в конструкции проходного изолятора, которые позволят задавать потенциалы на электродах непосредственно от секций высоковольтного выпрямителя.

Целью данной работы является исследование электрической прочности отдельных изоляторов с различной формой поверхности из поликарбоната и керамики УФ-6 в соответствующих газовой-вакуумных условиях для выяснения возможности их использования в новой конструкции проходного изолятора. Для этого создается экспериментальный стенд на напряжение до 120 кВ. По результатам проведенных исследований планируется модернизация ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией и уменьшение его высоты в 1.5 раза, что повысит возможность размещения нового нейтронного источника на его основе в клинических условиях.

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

## **Исследование параметров геликонного источника плазмы**

Кузьмин Е. И.

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

Широко распространенные в наше время источники плазмы используются в различных областях науки и техники. Так, например, источники плазмы используются в термоядерных системах для поддержания температуры и плотности плазмы. Для создания плазмы используются различные методы ионизации газа: ионизация молекул газа электронным ударом, ионизации в газовом разряде и др.

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. Одна из особенностей источника такого типа - высокая эффективность разряда, что делает возможным создание плазмы высокой плотности. Генерация плазмы геликонным разрядом происходит вблизи оси плазменной камеры, что позволит сделать минимальными потери плазмы на стенки камеры, и, следовательно, снизить тепловые нагрузки и перейти к квазистационарному режиму работы.

Первостепенной задачей при изучении плазмы в геликонном источнике является измерение ее основных характеристик - температуры, плотности плазмы и исследование радиального профиля пучка. Для достижения этих целей были использованы методы зондовой диагностики. Измерения проводились тройным ленгмюровским зондом.

Геликоны являются низкочастотными волнами, распространяющимися в замагниченной плазме. В данной работе изучено влияние внешнего магнитного поля на характеристики плазмы геликонного источника, а также приведены результаты измерения радиального распределения плотности и электронной температуры плазменного пучка, генерируемого геликонным разрядом.

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

## **Развитие интерферометрической методики измерения плазмы на установке ГОЛ-NB**

Кузьмина Д. Л.

Новосибирский государственный университет

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

В ИЯФ СО РАН активно развиваются технологии удержания высокотемпературной плазмы в открытых ловушках. Новая установка ГОЛ-NB будет физическое достоинства действующих плазменных установок ГОЛ-3 и ГДЛ. Предполагается, что плазма в центральной части установки будет нагреваться пучком быстрых нейтральных атомов, подобно тому, как это осуществляется на установке ГДЛ. Улучшенное удержание плазмы будет обеспечиваться многопробочными соленоидами, как на установке ГОЛ-3.

Для новой открытой ловушки ГОЛ-NB создается новый комплекс диагностики плазмы. Целью данной работы является разработка дисперсионного интерферометра для измерения линейной плотности плазмы. Традиционные интерферометрические методы диагностики плазмы имеют значительные недостатки в связи с высоким уровнем чувствительности к механическим колебаниям, неизбежно возникающим при работе установки. Для проведения измерений с помощью таких схем необходимы массивные виброзащитные конструкции. Схема дисперсионного интерферометра подразумевает одновременное зондирование плазмы излучением двух частот: основной и второй гармоники излучения  $\text{CO}_2$  лазера, идущих по одному оптическому пути. Таким образом конструкция становится виброустойчивой.

Новый дисперсионный интерферометр разрабатывается на основе прототипа, работающего на установке ГДЛ ИЯФ СО РАН. По сравнению с базовой моделью, конструкция прибора была изменена. Составлена новая оптическая схема расположения элементов на оптическом столе. Схема была смоделирована численно в программе Zemax и оптимизирована для применения на установке ГОЛ-NB. Прибор будет использовать другой алгоритм работы электроники, что позволит повысить его быстродействие.

В докладе будут приведены результаты оптического моделирования и представлена конструкция интерферометра.

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

## **Исследование накопления изотопов водорода в металлах при имплантации быстрых ионов**

Лохонин А. Г.

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

Установка Многоцелевой имплантер, расположенная в аналитико-технологическом инновационной центре «Высокие технологии и новые материалы», представляет собой ускоритель различных ионов с энергией 40 кэВ и током 5 мА. В частности, установка может использоваться для получения пучков ионов водорода или дейтерия.

Целью работы является исследование процессов накопления изотопов водорода в различных материалах.

Для проведения экспериментов был собран держатель мишеней, позволяющий устанавливать под пучок три различных мишени без нарушения вакуума. Для измерения плотности тока пучка на мишени разработан и собран проволочный терморезистивный датчик, с помощью которого контролировались параметры пучка на мишени.

В рамках работы были проведены первые эксперименты по облучению мишеней из титана, графита и меди ионным пучком. Состояние поверхности мишеней после облучения контролировалось методами электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа. Полученные результаты позволяют судить о перспективности использования исследованных материалов в качестве нейтронгениерирующих мишеней.

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

**Первые эксперименты по поглощению мощного СВЧ излучения  
в плотной магнитоактивной плазме установки ГОЛ-3**

Миняйло М. П.

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

В настоящее время в Институте ядерной физики СО РАН продолжаются исследования возможности использования геликонных волн для нагрева плотной магнитоактивной плазмы в установке ГОЛ-3. Ранее в аналитических расчетах и прямом численном моделировании было показано, что в условиях установки ГОЛ-3, при плотности плазмы  $10^{12}$ – $10^{14}$  см<sup>-3</sup> и магнитном поле 3–5 Т возможно распространение и достаточно эффективно поглощение геликонных волн с частотой 2,45 ГГц. Следует отметить, что широко распространенные геликонные источники плазмы работают при существенно меньшей плотности частиц  $\sim 10^{10}$  см<sup>-3</sup> в магнитном поле  $\sim 100$  Гс. Соответствующая рабочая частота таких установок лежит в диапазоне от нескольких единиц до десятков мегагерц.

Для проведения экспериментов по возбуждению геликонных волн плазме установки ГОЛ-3 разработан и создан СВЧ источник на базе промышленного магнетрона. СВЧ излучение с частотой 2,45 ГГц и мощностью до 1,3 кВт передается от магнетрона к антенне, расположенной в камере установки, по волноводно-коаксиальному тракту.

В данной работе описываются особенности работы СВЧ источника в условиях установки ГОЛ-3 и рассматриваются результаты первых экспериментов. В этих экспериментах наблюдалось сильное поглощение СВЧ излучения, а также зависимость поглощения от величины магнитного поля. Обнаружены эффекты, связанные с электронно-циклотронным резонансом. Результаты этих и последующих экспериментов позволят оценить возможность создания источников плазмы с высокой плотностью на основе геликонного разряда.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (№15-02-06757 А).

Научный руководитель – Калинин П. В.

## **Измерение параметров плазменной струи в установке ГОЛ-NB с помощью тройного зонда Ленгмюра**

Никишин А. В.

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

Установка ГОЛ-NB представляет собой открытую плазменную ловушку с гофрированными пробками. Нагрев плазмы осуществляется пучком быстрых нейтральных атомов. Идея удержания плазмы в многопробочной конфигурации магнитного поля заключается в создании искусственной диффузии посредством множества последовательно стоящих пробкотронов – небольших открытых линейных плазменных ловушек. Движущаяся вдоль магнитного поля частица при попадании в такой пробкотрон, «забывает» своё первоначальное направление движения, и с равной вероятностью может вылететь в любую из соседних ловушек. Это значительно уменьшает поток частиц, вылетающих из установки, и увеличивает время удержания плазмы. Плазма в установке создается с помощью дуговой плазменной пушки. Ожидается, что температура плазмы не превышает 10 эВ, а плотность находится в пределах  $10^{13} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Это позволяет использовать для диагностики параметров плазмы ленгмюровский зонд.

При таких параметрах плазмы функцию распределения частиц можно считать изотропной. Тогда для измерения можно использовать тройной ленгмюровский зонд, который удобен тем, что не требует измерения ВАХ и позволяет получить необходимые данные за одно измерение. Механически зонд соединен с установкой с помощью соединения Вильсона, что даёт возможность измерить параметры плазмы в разных точках по радиусу. Чтобы получить данные о плотности и температуре плазмы, необходимо измерить ионный ток насыщения и плазменный потенциал. Эти измерения проводятся с помощью АЦП, подключённого через быструю аналоговую оптическую развязку.

В работе будут представлены результаты калибровки аналоговой оптической развязки и измерения ионного тока насыщения в течение плазменного разряда.

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

**Масс-спектрометрическое исследование «короткоживущих» ионов воздуха ( $O_2^+$ ,  $NO_2^+$ ,  $NO^+$ ), образующихся в положительно заряженной плазме коронного разряда**

Очиров О. О.

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

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

Ранее было показано сильное влияние концентрации воды на ионный состав в масс-спектрометрическом ионном источнике. При достаточной концентрации воды и времени взаимодействия первичных ионов с молекулами воздуха весь заряд переходит на водные кластеры иона гидроксония [1]. В тоже время существует временная область, в которой можно регистрировать и исследовать первичные и короткоживущие ионы  $NO^+$ ,  $NO_2^+$ ,  $O_2^+$ .

В работе проведено экспериментальное исследование влияния концентрации воды в воздухе в пределах 1÷100 ppm на ионный состав в масс-спектрометрическом источнике ионов. Определены условия при которых регистрируются короткоживущие ионы  $NO^+$ ,  $NO_2^+$ ,  $O_2^+$ . Также проведено моделирование кинетики взаимодействия положительно заряженных ионов и нейтральных молекул в составе воздуха на основе имеющихся данных о константах скорости ион-молекулярных реакций [2][3]. Обсуждены сходства и различия результатов моделирования с экспериментальными данными, замечено качественное соответствие в зависимости интенсивности короткоживущих ионов от концентрации воды.

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

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

## **Моделирование изменения температуры поверхности при импульсном нагреве электронным пучком**

Попов В. А.

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

По современным представлениям в термоядерном реакторе с магнитным удержанием стенки камеры будут подвергаться постоянным и импульсным потокам плазмы, нейтронов и так далее, приводящие к разрушениям. Так в строящемся экспериментальном термоядерном реакторе ITER предполагается постоянная тепловая нагрузка на пластины дивертора около  $10 \text{ МВт/м}^2$  и импульсная тепловая нагрузка до  $10 \text{ ГВт/м}^2$  квадратный длительностью несколько миллисекунд. Импульсные тепловые нагрузки такой величины на материалы могут моделироваться электронными пучками. Данная работа направлена на теоретическое моделирование взаимодействия электронного пучка с материалами для изучения эффекта экранирования электронного пучка и наблюдаемых особенностей, при облучении электронным пучком. Моделирование проводилось для вольфрама, как перспективного материала пластин дивертора, и параметров электронного пучка ( $\sim 100 \text{ мкс}$ ,  $\text{ГВт/м}^2$ ,  $55 \text{ КэВ}$ ), достижимых на установках ИЯФ СО РАН с целью дальнейшей проверки и использования. Экранирование электронов происходит торможением в газовом облаке. Поэтому было вычислено количество испаряющегося материала в приближении испарения в вакуум. Для нахождения температуры поверхности в подповерхностном слое решалось одномерное уравнение теплопроводности с нелинейным граничным условием непрерывности теплового потока. Использованное одномерное приближение допустимо, поскольку глубина прогрева много меньше радиуса пятна. Полагая длину свободного пробега электрона в вольфраме  $5 \text{ мкм}$  получаем область параметров пучка, при которой экранирование существенно. Представленные результаты показывают, что роль экранирования не существенна при типичных режимах имеющейся в ИЯФ установки. Благодаря этому по результатам моделирования можно заключить, что достигается температура поверхности на  $\sim 3000 \text{ К}$  больше по сравнению с аналогичным случаем нагрева плазмой.

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

**Нахождение самосогласованных значений дипольного момента системы пылевая частица-ионное облако в случае малой анизотропии.**

Сальников М. В.

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

В данной работе исследуются свойства системы, состоящей из сильно заряженной пылевой частицы и облака ионов, захваченных данной частицей, помещённой в холодную бесстолкновительную плазму, при наличии слабого внешнего электростатического поля. Вопрос о свойствах пылевой частицы в холодной бесстолкновительной плазме, для модели постоянной частоты, изучался в [1], а о распределении захваченных ионов пылевой частицей, в отсутствие внешнего поля, изучался в [2].

Полная энергия ионов, испытывающих столкновения вблизи пылевой частицы, может стать отрицательной, вследствие чего ионы начинают орбитировать вокруг неё, образуя систему: пылевая частица - облако ионов. Характерный размер такой системы – ионная длина Дебая.

Целью данной работы было получение самосогласованных распределений плотности ионов и потенциала в системе, а также вычисление поляризации и дипольного момента, в зависимости от длины свободного пробега и величины внешнего поля.

Задача решалась методом прямого статистического моделирования Монте-Карло процессов захвата и движения ионов в окрестности пылевой частицы. Использовалась модель постоянной средней длины свободного пробега. Самосогласованный потенциал определялся из разложения решения уравнения Пуассона по полиномам Лежандра. В результате данного моделирования рассчитаны самосогласованные значения дипольного моментов и коэффициента поляризации. Получена зависимость дипольного момента от эффективного электростатического поля. Полученная зависимость дипольного момента от внешнего электрического поля линейна. При нормировке значений поля на среднюю длину свободного пробега, данные полученные для разных средних длин совпадают. В рассчитанном самосогласованном потенциале наблюдается положительный «колодец», в такую область будут стекаться отрицательно заряженные частицы при помещении их в данную систему.

---

1. Hutchinson I. and Patacchini L., Phys. Plasmas 14, 13505 (2007)

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 проф. Сухинин Г. И.

**Детектор углового разброса релятивистского электронного пучка**

Самцов Д. А.

Новосибирский государственный университет

Сильноточные релятивистские электронные пучки (РЭП) широко используются для возбуждения и накачки электромагнитных волн в различного рода СВЧ-генераторах миллиметрового и субмиллиметрового диапазона. Например, для работы генератора субмиллиметрового излучения по схеме двухстадийного МСЭ требуется релятивистский ленточный пучок с энергией электронов  $\sim 1$  МэВ, с плотностью тока  $\sim 1-3$  кА/см<sup>2</sup> и с малым, менее  $5^\circ$ , угловым разбросом по скоростям электронов [1].

Для этих целей был разработан датчик, который представляет собой последовательность соосных цилиндрических коллекторов с отверстиями различного радиуса. С помощью такого датчика проведены измерения, в результате которых определен не только угловой разброс электронов РЭП при их движении в продольном магнитном поле  $B \sim 0,6$  Тл, но и функция распределения электронов пучка по pitch-углам с точностью  $\sim 1-2^\circ$ .

В данном докладе приведены результаты измерений угловых характеристик электронов пучка на установке ГОЛ-3Т. Рассматривается влияние вторичных электронов на работу датчика, а также предлагаются способы его устранения.

---

1. Arzhannikov A.V., Ginzburg N.S., et al., Proc.of VI Int. Workshop «Strong microwaves in plasmas», Ed. A.G.Litvak, IAP RAS, N.Novgorod, Russia, 2005, vol.1, p.228-233

Научный руководитель – Степанов В. Д.

## Электродинамическая система планарного генератора терагерцового излучения

Сандалов Е. С.

Новосибирский государственный университет

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

В ИЯФ на установке ЭЛМИ ведутся исследования по генерации мощных импульсов мм-излучения в планарном мазере с двумерной распределенной обратной связью. В качестве источника накачки волн используются ленточные электронные пучки с характерными параметрами:  $E_e \approx 0.9$  МэВ,  $I_b \approx 1-3$  кА,  $\tau_b \approx 5$  нс. В настоящее время достигнут уровень мощности 20-30 МВт в импульсе излучения с частотой 75 ГГц при его длительности  $\sim 100$  нс [1]. В развитие исследований планируется осуществить генерацию ТГц-излучения в двухстадийной схеме. Для этого с помощью первого ленточного пучка предполагается создать мощный импульс мм-излучения в низкочастотной секции генератора, затем накопив излучение в высокочастотной секции, осуществить его рассеяние на втором ленточном пучке с преобразованием частоты в ТГц-диапазон. Основными целями данной работы являются: оптимизация электродинамической системы существующего планарного генератора мм-излучения, а также разработка, создание и тестирование волнового дефлектора для перевода мм-излучения в высокочастотную секцию ТГц-генератора. В качестве электродинамической системы в планарном мазере используется комбинированный резонатор, состоящий из входного двумерного и выходного одномерного брэгговских рефлекторов, которые обеспечивают двумерно-распределенную обратную связь. Исследования электродинамических свойств элементов ТГц-генератора осуществлялись в три этапа: вначале выполнялось 3-D моделирование, затем проводилось «холодное» тестирование, и на заключительной стадии - сравнение и анализ полученных результатов. В докладе приводятся результаты компьютерного моделирования свойств резонатора и дефлектора, численные расчеты параметров каждого элемента электродинамической системы в отдельности и системы в целом, результаты «холодных» экспериментов с использованием изготовленных отражателей.

---

1. Аржанников А. В., Синецкий С. Л., Калинин П. В., Гинзбург Н. С. и др. Письма в ЖТФ, 2013, том 39, вып. 18, с. 12-16.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Синецкий С. Л.

## **К неустойчивости одномерных состояний динамического равновесия плазмы Власова-Пуассона**

Светоносов А. И.

Новосибирский государственный университет

Модель плазмы Власова-Пуассона остается одной из базовых математических моделей физики плазмы. Это обусловлено ее простотой, наглядностью и полезностью для решения проблемы управляемого термоядерного синтеза (УТС).

Данная модель изучается уже давно. Однако для нее удалось установить лишь достаточные условия устойчивости ряда состояний динамического равновесия к возмущениям из неполных незамкнутых подклассов.

В настоящей работе прямым методом Ляпунова доказано, что одномерные равновесия плазмы Власова-Пуассона, содержащей электроны с неизотропной стационарной функцией распределения и один сорт ионов, чья функция распределения изотропна и постоянна, абсолютно неустойчивы к одномерным же малым возмущениям. При этом обращено известное достаточное условие линейной устойчивости данных равновесий и описана область его применимости. Также получены достаточные условия линейной практической неустойчивости, построена априорная экспоненциальная оценка снизу и указаны начальные данные для растущих возмущений.

Результаты настоящей работы могут пригодиться в процессе создания опытных установок для осуществления УТС.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, доцент Губарев Ю. Г.

## **Измерение профиля ионного пучка в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией**

Соколова Е. О.

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

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

Стационарный пучок отрицательных ионов водорода инжектируется в электростатический ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией. После перезарядки отрицательных ионов водорода в протоны в перезарядной мишени на выходе из тандема формируется протонный пучок, ускоренный до энергии, соответствующей удвоенному потенциалу высоковольтного электрода. При сбросе протонного пучка на литиевую мишень в результате пороговой реакции  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$  генерируется поток нейтронов. Поскольку выход нейтронов зависит от энергии и тока протонного пучка, следует контролировать пучок как в ходе его формирования, так и во время ускорения и сброса протонного пучка на литиевую мишень. Величина протонного тока зависит от условий прохождения пучка через ускоритель, в особенности от начального этапа ускорения. Таким образом, одной из важнейших задач является измерение тока, профиля и положения ионного пучка в низкоэнергетическом тракте ускорителя.

Предложено измерить профиль сгенерированного ионного пучка внутри вакуумной диагностической камеры с помощью специализированного сканера. Принцип действия сканера основан на вторичной эмиссии электронов с поверхности вольфрамовых стержней. Измерение ионного тока осуществляется непосредственным контактом вращающихся вольфрамовых проволочек с ионным потоком, для этого профилометр и пучок должны быть тщательно отъюстированы друг относительно друга. Сканер (измеритель профиля пучка) модели D-Pace OWS-30 (по лицензии научной организации TRIUMF, Канада) закуплен и получен. Для его установки модернизирован входной вакуумный объём ускорителя. Предполагается в ближайшее время установить профилометр и осуществлять постоянный мониторинг тока и положения ионного пучка.

Научный руководитель – Касатов Д. А.

## Контактная диагностика импульсной плазмы

Тажен А. Б., Рамазанов Т. С.

Научно-исследовательский институт экспериментальной  
и теоретической физики, г. Алматы, Казахстан

Импульсно-плазменный ускоритель – это установка, предназначенная для получения плазменного потока со скоростью  $10 - 10^3$  км/с. В настоящее время плазменные потоки используются для улучшения свойств материалов при их обработке и играют важную роль в термоядерных исследованиях. В отличие от других ускорителей заряженных частиц ИПУ ускоряет частицы разных сортов (электроны и ионы). Образовавшиеся ионы имеют более большую массу, чем электроны, поэтому основная часть энергии потока приходится на тяжелые ионы. А электроны в данной ситуации являются частицами, компенсирующими объемный заряд. Для выяснения характера взаимодействия плазмы с защитными материалами в данной работе много внимания уделялось определению энергетических характеристик заряженных частиц плазмы. Для получения данных о концентрации и энергии частиц плазмы было разработано и сконструировано диагностическое устройство – цилиндр Фарадея.

Цилиндр Фарадея (ЦФ) – простой и относительно легко реализуемый диагностический прибор. Если ЦФ используется в качестве коллектора ионов, то коллектор должен быть смещен под отрицательным потенциалом, чтобы удалить любые отрицательно заряженные частицы, (чаще всего электроны) противостоящие входящему в ЦФ пучку ионов. В данном эксперименте цилиндр Фарадея был установлен на расстоянии 15 см от систем электродов. Концентрация и энергия ионов рассчитывались по следующим формулам:

$$n = \frac{U}{RqAv}$$

Здесь  $n$  – концентрация,  $v$  – скорость ионов,  $U$  – напряжение на резисторе дифференцирующей цепочки,  $R$  – сопротивление резистора,  $A$  – площадь отверстия на внешнем электроде.

$$E = \frac{1}{2}M_i v^2$$

$M_i$  – атомная масса иона водорода.

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

## Рекомбинация атомов $O(^3P)$ на поверхности пленки нержавеющей стали в плазме кислорода

Ткачева А. С.

Ивановский государственный химико-технологический университет

Благодаря высокой жаропрочности и химической стойкости нержавеющей сталь является широко применяемым конструкционным материалом. Изучению процесса рекомбинации атомов на поверхности нержавеющей стали посвящено достаточно большое количество работ.

Цель работы является исследование рекомбинации атомов кислорода на поверхности тонкой пленки из нержавеющей стали в плазме кислорода.

Объектом изучения являлась тонкая пленка нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т толщиной 1 мкм, нанесенная на алюминиевую фольгу методом магнетронного распыления. Образец помещался в стеклянный реактор по образующей стенки в область положительного столба тлеющего разряда постоянного тока. Вероятность гетерогенной рекомбинации атомов ( $\gamma$ ) определялась путем измерения относительной концентрации атомов кислорода методом электронного парамагнитного резонанса.

С ростом давления плазмообразующего газа в системе наблюдается снижение значений  $\gamma$ . При токах разряда 20 и 50 мА вероятность гетерогенной рекомбинации атомов кислорода на поверхности пленки нержавеющей стали снижается от  $2 \cdot 10^{-3}$  до  $1,5 \cdot 10^{-2}$  и от  $7 \cdot 10^{-3}$  до  $3 \cdot 10^{-2}$ , соответственно, при увеличении давления от 50 до 400 Па.

В исследуемом интервале температур поверхности образца (350-400 К) над ударной рекомбинацией (механизм Или-Ридила) доминирует механизм Ленгмюра-Хиншельвуда (рекомбинация между химически и физически адсорбированными атомами кислорода), вероятность гетерогенной рекомбинации будет определяться не только взаимодействием адсорбированных атомов, но и предшествующими ему процессами физической адсорбции и миграции физически адсорбированных атомов по поверхности.

Таким образом, снижение  $\gamma$  в исследуемом диапазоне давлений может быть обусловлено как одновременным снижением интенсификации процесса очистки активных центров за счет снижения потока положительных молекулярных ионов кислорода, так и уменьшением количества свободных центров адсорбции и затруднением миграции адсорбированных атомов в результате увеличения концентрации молекул  $O_2$ .

Научные руководители – канд. физ.-мат. наук, доцент Холодков И. В.

## Оптический стенд для исследования нерезонансного накопления излучения в целях разработки фотонейтрализатора пучков отрицательных ионов

Ушкова М. Ю.

Новосибирский государственный университет

В данной работе выполнена проверка нового метода, основанного на адиабатическом удержании фотонов в системе вогнутых зеркал с целью создания фотонейтрализатора пучков отрицательных ионов. Были проведены два этапа экспериментов: в простой системе двух сферических зеркал; в сложной вытянутой системе. Последняя состояла из набора цилиндрических и сферических сегментов (см. Рис. 1).



Рис. 1. Принципиальная схема системы вогнутых зеркал

В эксперименте продемонстрирован высокий коэффициент накопления излучения, вводимого через малое отверстие. А также установлено, что эффективность накопления определяется исключительно отражательной способностью зеркал. Таким образом в отличие от резонаторов типа Фабри-Перо предложенный накопитель не требует сверхточной юстировки и стабилизации оптических элементов и высокого качества используемого излучения.

Данная ловушка весьма перспективна для создания высокоэффективных нейтрализаторов мощных пучков отрицательных ионов на основе фотоотрыва избыточного электрона.

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

## **Инициация плазмохимических реакций в сверхзвуковых кластированных струях**

Художитков В. Э.

Новосибирский государственный университет

В литературе описано множество способов практического использования процесса кластерообразования в сверхзвуковом потоке, расширяющемся в вакуум. Этот процесс используется для решения множества технологических задач: полировка поверхностей, создание тонких плёнок [1], плазмохимическая конверсия и другие. В этой работе рассмотрен вариант использования процесса кластерообразования в плазмохимической конверсии углеводородов при использовании электронного и ионного пучков.

Как известно, энергия Ван-дер-Ваальсовой связи частиц в газовых кластерах, как правило, не превышает долей эВ, тогда как энергия ионизирующих кластер электронов значительно выше. Поэтому при взаимодействии электронов или ионов с кластерами происходит частичная деструкция кластеров. При диагностике кластированных газовых потоков, прежде всего – методами масс-спектрометрии с ионизацией электронным пучком – крайне важно изучить процесс взаимодействия ионизирующих частиц, и прежде всего – электронов, с газовыми кластерами разного размера и, соответственно, структуры. Решение указанной задачи производилось на базе экспериментального газодинамического стенда ЛЭМПУС-2, оснащенного современным измерительным оборудованием и комплексом молекулярно-пучковых, электронно-пучковых и масс-спектрометрических систем.

Выполнены работы по инициации плазмохимических реакций в кластерном потоке путём ионизации кластеров в детекторном блоке масс-спектрометра и ионизации сверхзвуковой кластерной струи в камере расширения с помощью электронного пучка. В результате этих работ получены масс-спектры, продольные и поперечные профили интенсивности кластерного потока для метана, этилена, аргон-метановой и гелий-метановой смесей, а также таких модельных газов, как аргон, азот. Установлены зависимости процесса развала кластеров от их размера и энергии электронов.

Работа выполнена при поддержке гранта Правительства РФ (проект № 14.Z50.31.0019) и Министерства образования и науки РФ (базовый проект НГУ № 2292).

---

1. Orlando S., Paladini A. et al, Production of clusters and thin films of nitrides, oxides and carbides by pulsed laser ablation and deposition. // International journal of photoenergy.2004. Volume 06.Pages 23-28.

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

**Калибровочный источник ионов**

Шоколов А.Д.

Новосибирский государственный университет

В связи с бурным развитием общества остро встаёт проблема истощения запасов ископаемого топлива. Одним из перспективных направлений в разрешении этого вопроса является получение энергии путём термоядерных реакций. В настоящее время активно ведутся исследования в данной области. Различные диагностики играют большую роль в разработке методов получения энергии при помощи плазмы. Для получения достоверных результатов необходима калибровка диагностических устройств.

**Цель данной работы** – разработка калибровочного источника ионов, для калибровки датчиков нейтральных частиц, использующихся в термоядерных экспериментах. В качестве рабочих газов источника используется водород и дейтерий. Доля основной компоненты газа ионов на выходе из тракта составляет не менее 95%. Допустимый диапазон энергии частиц: от 3 до 60 кэВ. Амплитуда тока основной компоненты достигает 10 мкА

В данной работе представлены результаты численного моделирования прохождения пучка ионов через тракт источника, а также некоторые экспериментальные данные. Изучена работа первичного источника ионов – ионизационной лампы Байарда-Альперта в импульсном и стационарном режимах.

Научный руководитель – Колмогоров А. В.

## **Применение щелевого канала для воспламенения водорода при сверхзвуковых скоростях потока в канале камеры сгорания**

Акинин С. А., Тимофеев К. Ю.

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

Переход к сверхзвуковым скоростям в камере сгорания создает дополнительные трудности, связанные со стабилизацией процесса горения и полноты сгорания топлива. В этих условиях требуется непрерывное поджигание смеси каким-либо источником воспламенения. Для решения этой задачи была предложена оригинальная схема камеры сгорания с двумя симметрично расположенными щелевыми каналами. Высокая статическая температура потока в щелевом канале обеспечивает самовоспламенение водорода и стабилизацию горения.

Цель настоящей работы состояла в экспериментальных исследованиях предложенной конфигурации камеры сгорания при сверхзвуковой скорости потока; определении влияния чисел Маха, полной температуры на входе в канал на интенсивность горения при различных схемах распределения вдува водорода.

Испытания были проведены в импульсной трубе ИТ-302М ИТПМ СО РАН в режиме присоединенного воздухопровода при следующих параметрах на входе в основной канал:  $M=2-6$ ,  $P_0=10-270$  бар и  $T_0=1700-2900$  К и избытке водорода от 0.6 до 1.1.

В результате проведенных исследований было получено, что во всем диапазоне изменения параметров на входе в канал модели реализуется самовоспламенение водорода. Получен диапазон параметров воздушного потока на входе, в границах которого развивается процесс «розжига» по всему объему камеры сгорания. Длительность горения составила от 160 до 20 мс при изменении  $M=2-6$ . При прочих равных условиях длительность горения при работе установки с падающими параметрами свидетельствует о работе выбранных стабилизаторов горения в более широком диапазоне параметров воздушного потока на входе в канал камеры сгорания. Поэтому большая длительность горения соответствует стабилизации горения при более низких значениях температуры и давления. Было установлено, что горение продолжалось до величины статической температуры  $\sim 230$ К на входе в канал камеры сгорания.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №13-08-00860А).

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

## Расчёт электрической подвижности аэрозольных частиц, заряженных в коронном разряде

Алексеев А. В.

Новосибирский государственный университет

Технология электростатической аэрозольной фильтрации воздуха позволяет получить высокую эффективность очистки воздуха для промышленных и бытовых приложений. Загрязнённый воздух пропускается через дрейфовую зону коронного разряда, где приобретает электрический заряд. Заряженные частицы осаждаются на волокнистых фильтрах с эффективностью, намного превышающей эффективность фильтрации незаряженных частиц.

Для расчёта электрического заряда была составлена электрогидродинамическая модель зарядителя аэрозольных частиц [1]. В Comsol Multiphysics совместно решаются уравнения Максвелла, Навье-Стокса и переноса заряженной среды с учётом электрогидродинамических эффектов. Полученные траектории движения частиц и распределения объёмного заряда позволяют применить теорию диффузионной зарядки аэрозолей [2] для расчёта распределений электрической подвижности заряженных частиц.

В данной работе рассчитано распределение подвижностей аэрозольных частиц при различных параметрах зарядителя, проведено сравнение с экспериментально измеренными распределениями. Полученные результаты позволяют оценить эффективность зарядки существующих зарядителей, а также оптимизировать его параметры.

---

1. Karpov S. V., Krichtafovitch I. A. Electrohydrodynamic Flow Modeling Using FEMLAB // Proceedings of the COMSOL Multiphysics User's Conference. 2005. Boston. USA.

2. Fuchs, N. A., Geofis. Pura Appl. 56, 185 (1963).

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

## **Моделирование истечения струи газа в вакуум методом ПСМ**

Белялов С. С.

Новосибирский государственный университет

Все космические аппараты (КА) оборудованы реактивными двигателями ориентации и маневрирования. Продукты сгорания топлива могут попасть на научные приборы установленные как на самом КА так и на других КА во время их процесса стыковки или отстыковки. С целью увеличения срока службы КА необходимо правильно получать поля распределения продуктов сгорания топлива вблизи сопла (при воздействии на сам аппарат) и на достаточно большом расстоянии (при воздействии на другой аппарат).

Истечение струй двигателя в вакуум исследуется методом Прямого Статистического Моделирования (ПСМ). Метод ПСМ - это кинетический метод который моделирует разряженное течение большим числом модельных частиц которые двигаются и сталкиваются подобно молекулам газа.

С увеличением числа модельных частиц (которые необходимы для расчета течения внутри сопла) увеличивается потребляемая память и объем вычислений. Для снижения требуемых вычислительных ресурсов может использоваться многозонный подход. Вся область течения разбивается во вложенные зоны. Вычисление начинается с наименьшей а результаты расчета используются как начальные условия для расчета следующей зоны. Основной проблемой этого подхода является корректно построенный интерфейс перехода между соседними зонами.

В работе использовались различные алгоритмы выделения граничных поверхностей. Исследованы источники возникновения погрешностей моделирования при таком подходе, и предложены способы уменьшения этих погрешностей. Данный метод также использовался для стыковки решения уравнений Навье-Стокса и ПСМ. На нескольких примерах показана корректность использования данного подхода (многозонный подход с решением уравнения Навье-Стокса в части зон).

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

## **Моделирование функционально-градиентного фильтрующего материала с целью оптимизации его пылеемкости.**

Биктимиров Ш. Н.

ООО «Тион Инжиниринг», г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

На сегодняшний день проблема экологии становится все более серьезной. Увеличивают свой объем высокотехнологичные производства, для которых необходимы помещения с чистым воздухом. Соответственно, растут затраты на фильтрацию воздуха. Для создания новых конкурентоспособных продуктов на рынке высокоэффективных фильтров для воздуха необходим новый подход в разработке фильтрующих материалов, отличающийся от традиционных. В компании Тион разработан композитный фильтрующий материал с высокой эффективностью фильтрации (классы HEPA и ULPA). Данный материал состоит из двух типов волокон, крупных волокон микромасштаба (50-200 мкм) и тонких волокон диаметром 50-500 нм. Среди известной литературы нет готовых теоретических моделей фильтрации, описывающих такой тип материала, особенностью которого является фильтрация на тонких волокнах. Диаметр фильтрующих волокон такого материала порядка или меньше диаметра фильтруемых частиц, и к тому же пористость фильтрующих волокон в материале стремится к единице, что усложняет описание материала, т.к. большинство существующих моделей фильтрации этот случай не описывают. Теоретическое описание фильтрующих свойств поможет определить границы применимости такого материала и понять, каких значений основных параметров можно достичь с помощью данного подхода. Проведено сравнение рассмотренных моделей фильтрации с результатами испытания образцов волокнистых материалов, состоящих из волокон диаметром 50-200 нм. Выполнено моделирование пылеемкости фильтра по жидким частицам, в предположении, что материал частиц, при осаждении на волокна, равномерно распределяется по поверхности волокон. В результате моделирования получены функции оптимального распределения фильтрующего волокна в толще материала для различных значений эффективностей фильтрации. Таким образом, рассчитаны свойства и состав функционально-градиентного фильтрующего материала. Путем численного моделирования показано, что величина пылеемкости функционально-градиентного фильтрующего материала в 7-10 раз выше, чем у однородного фильтрующего материала при одинаковых прочих параметрах материала.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Горев В. Н.

## Анализ ударно-волновых структур в плотных газозвезях при учете столкновений частиц

Брагинский А. Л.

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

**Введение.** Для описания ударно-волновых (УВ) процессов в плотных газозвезях твердых частиц была развита модель с учетом столкновений частиц на основе молекулярно-кинетических представлений. В рамках модели установлены 2 основных типа УВ структур либо со скачком в газе, либо в дискретной фазе. Была также рассмотрена гиперболизованная приближенная модель, позволяющая применять развитые консервативные схемы. Целью работы является определение возможных типов УВ структур, условий их существования, определение границ применимости приближенной модели.

**Результаты.** Исследование проводится на задаче взаимодействия ударных волн с облаком частиц. В облаке формируются стационарные структуры. В зависимости от амплитуды падающей волны и концентрации частиц в облаке формируются УВ структуры разных типов. Также при определенных условиях существуют двухфронтные структуры со скачком сначала в одной фазе и последующим скачком во второй в зоне релаксации. Установлены следующие типы волн, дисперсионные и ударные 4 видов: I - с лидирующим скачком в газе и непрерывным распределением параметров частиц в зоне релаксации; II - лидирующий скачок в дискретной фазе и непрерывным распределением параметров газа в зоне релаксации; IID - с первым скачком в газе и последующим скачком в частицах; IID - с первым скачком в частицах и последующим скачком в газе.

Были проведены численные эксперименты по полной и упрощенной модели. Оказалось, что дисперсионные волны могут существовать при любых начальных концентрациях, волны типа I не существуют при высоких концентрациях. Ошибка для этих волн невелика. Волны типа IID существуют при больших концентрациях, и упрощенная модель для них дает довольно большую ошибку, в некоторых случаях доходящую до 50%. Для волн типов II и IID отклонения сильно различаются в структуре течения.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук Хмель Т. А.

**Методика оценки полидисперсной матрицы обратного рассеяния света облаков верхнего яруса на основе рассчитанных матриц для монодисперсных ансамблей ледяных кристаллов**

Брюханов И. Д.

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Погрешности расчёта радиационного баланса Земли обусловлены отсутствием учёта пространственной ориентации ледяных кристаллов в облаках верхнего яруса (ОВЯ) в существующих моделях атмосферы. Это связано с невозможностью инструментального определения ориентации облачных частиц без её нарушения.

Оптические характеристики ОВЯ существенно зависят от формы, размеров и ориентации кристаллов льда в них, что делает возможной оценку перечисленных параметров микроструктуры облаков на основе оптических явлений. В 2011–2016 гг. на уникальном поляризационном лидаре НИ ТГУ исследованы оптические и геометрические характеристики облаков и произведены оценки метеорологических условий их возникновения [1]. Было показано, что ОВЯ с аномальным (зеркальным) обратным рассеянием, как правило, состоят из горизонтально ориентированных гексагональных пластинок и столбиков.

Совместный анализ экспериментальных данных с результатами теоретических расчётов сделает возможным определение параметров микроструктуры ОВЯ. С этой целью ранее была разработана и программно реализована методика формирования матриц обратного рассеяния света (МОРС) полидисперсных ансамблей гексагональных ледяных пластинок на основе результатов теоретических расчётов [2]. Настоящий доклад посвящён её адаптации к новой версии базы данных Института оптики атмосферы (ИОА СО РАН, г. Томск), дополненной МОРС монодисперсных ансамблей гексагональных столбиков.

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания при финансовой поддержке Минобрнауки России (код проекта 1975).

---

1. Samokhvalov I.V., Volkov S.N., Bryukhanov I.D., et al. // Proc. of SPIE Vol. 9680, 21st International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 2015. P. 96804G-1–96804G-4; doi: 10.1117/12.2205878.

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

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

## Развитие метода определения параметров потока в импульсной аэродинамической трубе

Гавришев А. А.

Новосибирский государственный университет

Высокие параметры торможения в импульсных аэродинамических трубах, которые достигаются за счет электродуговых, а также химических источников энергии, приводят к существенному влиянию реальных свойств и эффектов колебательной релаксации рабочего газа на параметры набегающего потока. Для уточнения характеристик высокоэнтальпийных импульсных труб в существующем алгоритме расчета режима течения используется уравнение реального газа [1]. К недостаткам этого алгоритма можно отнести отсутствие учета теплообмена со стенками форкамеры, что может вносить существенные погрешности в расчет. Наличие дополнительной информации о скорости потока  $v(t)$  аэродинамической трубы позволяет скорректировать результаты расчета режима течения.

В рамках данной работы предложен усовершенствованный алгоритм расчета параметров набегающего потока импульсной аэродинамической трубы с учетом реальных свойств газа и тепловых потерь, который использует экспериментальные значения скорости потока. Для получения этих данных на установке ИТ-302М была реализована двухлучевая времяпролетная методика измерений скорости, когда поток газа с частицами просвечивается двумя параллельными лучами лазера, расположенными перпендикулярно направлению потока. По измерениям интенсивности рассеянного света определяется среднее время пролета частиц между лучами и скорость потока. Обработка сигналов реализована с помощью специального алгоритма на основе анализа корреляционной функции сигналов.

Времяпролетным методом были получены экспериментальные значения скорости потока от времени истечения газа и выполнено включение экспериментальных данных по скорости в алгоритм расчета режима течения для учета процесса теплоотвода в стенки форкамеры.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (Грант № 16-08-00674).

---

1. Громыко Ю.В., Маслов А.А., Сидоренко А.А., Поливанов П.А., Цырюльников И.С. Расчет параметров потока в гиперзвуковых аэродинамических трубах // Вестн. НГУ. Сер. Физика. - 2011. - Т.6, No.2. - С. 10-16.

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

**Численное моделирование и экспериментальное исследование механизмов транспорта влаги в пористых средах и его влияние на упругие характеристики материала в условиях реологического деформирования**

Егоров В. А.

Новосибирский государственный университет

Задача моделирования процессов структуризации и упрочнения конструкционных материалов в ходе их технологической обработки становится особенно актуальной в случае прогнозирования прочностных характеристик материалов, применяемых в сложных эксплуатационных условиях.

Одним из примеров сложных эксплуатационных условий можно отнести условия, при которых конструкционный материал помимо статической нагрузки должен дополнительно выдерживать постоянные колебания и деформации конструкции в нескольких плоскостях одновременно. Именно в таких эксплуатационных условиях находятся грузовые блоки гравитационных накопителей энергии, для которых и планируется в данной работе производить исследования и расчеты.

В работе проделано численное моделирование процессов упрочнения в пористых средах, исследовано изменение упругих и прочностных свойств материала, вызванное последствиями процессов транспорта жидкости в нем. Проанализированы режимы диффузии жидкости в многокомпонентных грунтах в зависимости от температуры и влажности окружающей среды. Спроектирована и собрана экспериментальная установка для измерения напряжений и деформаций исследуемого тела. Изучены условия устойчивости грузов в виде высоких колон в условиях продольных и поперечных колебаний. Проведены экспериментальные исследования для образцов грузов, изготовленных по различной технологии из грунта с различным числом пластичности и начальным распределением влажности. Результаты расчетов и экспериментальных исследований будут применяться при конструировании гравитационных накопителей на твердых грузах.

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

## Вторичное воспламенение

Зыкова А. И., Саморокова Н. М., Сидоров А. Д.

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Эффект вторичного догорания известен современной баллистике, как в системах старта ракетных летательных аппаратов, так и в артиллерийских системах различного назначения. Продукты сгорания метательного заряда содержат значительное количество оксида углерода СО и, возможно, водород. Газовая смесь на выходе из канала ускорителя может «вторично» воспламениться в кислороде воздуха.

Данный эффект был зафиксирован экспериментально в НИИ ПММ ТГУ. При выходе из канала ускорителя метаемый элемент движется по вакуумированному участку трассы, затем разрывает мембрану, и в данный объем поступает воздух. В ряде опытов это приводит к вторичному воспламенению пороховых газов. Процесс распространяется от мембраны на весь рассматриваемый участок трассы, и через некоторое время горение прекращается. С помощью высокоскоростной камеры Phantom v711 были получены фотограммы данного эффекта.

В опытах измерялось давление в камере сгорания (пьезокристаллический датчик 2Т6000), скорость метаемого элемента при движении по каналу ускорителя (радар ДДС 6000) и в момент вылета из него (датчик дульной скорости). Эти данные позволяют с использованием [1] провести расчет газодинамической картины выстрела.

В серии проведенных испытаний не было замечено влияние типа пороха (одноканальный, семиканальный), а также массы несгоревшей части порохового заряда на наличие эффекта вторичного воспламенения. Длина и калибр ускорителя, дульная скорость метаемого элемента (как следствие, время от выхода снаряда из ствола до разрыва вакуумной мембраны) также не являются определяющими факторами.

Расчет показал, что эффект вторичного воспламенения наблюдается в опытах с более высоким давлением на срезе ускорителя в момент вылета снаряда и, как следствие, более высокой температурой газов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № 2014/223 (код проекта 1362).

---

1 Касимов В.З. Программный комплекс для расчета внутрибаллистических процессов в ствольных системах // Известия РАН. -2005. -№1. -С. 70-76.

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

## Определение неизмеряемых параметров выстрела путем решения прямой задачи внутренней баллистики

Зыкова А. И., Саморокова Н. М., Сидоров А. Д.

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Главными характеристиками баллистического эксперимента являются максимальное давление в камере сгорания  $P_{\max}$  и скорость метаемого элемента в момент вылета из ствола  $V_{\text{д}}$ . Они являются решениями прямой задачи внутренней баллистики (ПЗВБ).

В опыте измеряются давление в камере сгорания  $P(t)$  (при помощи пьезокристаллического датчика 2Т6000), скорость метаемого элемента при движении по стволу  $V$  (при помощи радара ДДС 6000),  $V_{\text{д}}$  (при помощи датчика дульной скорости). Но для полного моделирования газодинамической картины выстрела необходимы и другие параметры: давление форсирования (давление при «страгивании» метаемого элемента), трение при движении метаемого элемента по стволу, а также температурные коэффициенты, которые нет возможности измерить. При расчете ПЗВБ такие неизмеряемые параметры являются параметрами согласования. В серии расчетов (на специальном ПО) они меняются в определенном диапазоне с целью достижения максимально возможного совпадения экспериментальных и расчетных величин  $P_{\max}$  и  $V_{\text{д}}$ , и соответственно кривых  $P(t)$  и  $V(t)$ .

Целью данной работы было определение температурного коэффициента пороха  $\theta$  с использованием серии опытов по классической схеме выстрела при различных начальных температурах. Из опытов при стандартной температуре  $T_1 = 20$  °С определялись давление форсирования и трение, которые затем использовались во всех расчетах для определения скорости горения пороха при различных начальных температурах  $U_i(T_i)$ .

Единичная скорость горения пороха  $U = U_1 \times [1 + \theta \times (T - T_1)]$ , где  $U_1$  – единичная скорость горения при стандартной температуре, а  $T$  – начальная температура пороха. Полученные зависимости  $U_i(T_i)$  строились в координатах  $(T - T_1; U/U_1)$ , а  $\theta$  определялся как коэффициент линейной аппроксимации.

С использованием полученных  $\theta$  и  $U_1$  рассогласование экспериментальных и расчетных данных по величинам максимального давления и дульной скорости не превышает 1,7 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № 2014/223 (код проекта 1362).

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

## **Исследование аэродинамики сепарационной зоны воздушно-центробежного классификатора**

Исмаилов К. К.

Национальный исследовательский Томский государственный университет

На сегодняшний день широкое использование в порошковой технологий получили воздушно-центробежные классификаторы. Ввиду их простоты, эффективности и высокого качества получаемой продукции они продолжают проектироваться и модернизироваться. Неотъемлемой частью их разработки являются построение численной модели и экспериментальное исследование. В данной работе проводилось численное исследование аэродинамики реального воздушно-центробежного классификатора, сепарационная зона которого представляет собой пространство между вращающимися дисковыми элементами. Подача несущего потока производится через кольцевой канал снизу от рассматриваемой области, и для повышения эффективности процесса фракционного разделения частиц имеет место радиальный поддув несущей среды с периферии вихревой камеры. Данная задача решалась на основе уравнений Навье-Стокса в цилиндрической системе координат в безразмерной форме. Исследование проводилось в переменных скорость-давление путем расщепления полей скорости и давления. Численное решение стационарной задачи проводилось эволюционным методом с применением обобщенного неявного метода переменных направлений. Конвективные и диффузионные слагаемые в системе уравнений аппроксимировались с помощью известной экспоненциальной схемы. В результате проведенных исследований получены распределения полей скорости и давления, а также показано влияние критерия Рейнольдса, параметров поддува и закрутки стенок на картину течения.

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

**Влияние двумерной шероховатости на процесс развития возмущений в области благоприятного градиента давления на скользящем крыле**

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

Для самолетов и беспилотных летательных аппаратов, летающих на трансзвуковых скоростях, применяются стреловидные крылья. На данном типе крыльев реализуется дополнительный механизм неустойчивости из-за наличия вторичного течения. В области благоприятного градиента давления это ведет к ламинарно-турбулентному переходу.

Современное крыло представляет собой сложную конструкцию с многочисленными элементами механизации. В роли трехмерных шероховатостей на крыле самолета выступают заклепки, снег, естественная шероховатость поверхности и насекомые, налипающие на переднюю кромку при взлете. Стык предкрылка и крыла является примером двумерной шероховатости.

Эксперимент проводился в рабочей части малотурбулентной аэродинамической трубы АТ-324 ИТПМ размером  $1000 \times 1000 \times 4000$  мм. Использовалась модель скользящего крыла с углом скольжения  $45^\circ$ . Профиль модели образован цилиндром радиусом 40 мм и двумя сходящимися плоскостями. Хорда крыла составляла 400 мм. Для реализации благоприятного градиента давления угол атаки модели был выбран  $-12.3^\circ$ . Скорость набегающего потока  $U_\infty = 10.9$  м/с. Стационарные возмущения возбуждались цилиндрической шероховатостью диаметром 1.6 мм и высотой 0.8 мм и многослойной двумерной шероховатостью длиной 120 мм, шириной 15 мм и толщиной одного слоя 0.13 мм. Суммарная толщина варьировалась от 0 мм до 1.56 мм. Высокочастотные возмущения возбуждались акустическим полем.

Получено, что двумерная шероховатость оказывает дестабилизирующее влияние на возмущения, индуцированные трёхмерной шероховатостью, находящейся выше по течению. При этом сама двумерная шероховатость способна приводить к появлению стационарных структур, а затем и вторичных возмущений, развитие которых вызывает ламинарно-турбулентный переход ниже по течению.

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

## **К нелинейному взаимодействию возмущений в 3D сверхзвуковом пограничном слое**

Колосов Г. Л.

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

Исследования ламинарно-турбулентного перехода сверхзвукового 3D пограничного слоя на модели скользящего крыла проводятся в ИТПМ СО РАН. Эксперименты с контролируемыми возмущениями позволили определить волновые характеристики линейного развития волнового поезда и провести сравнение с расчетами по линейной теории гидродинамической устойчивости. В работе [1] экспериментально и теоретически показана возможность проявления механизма трехволнового субгармонического резонанса в 3D течении на модели скользящего крыла. Ранее, для случая плоской пластины показано, что возможен наклонный переход, когда взаимодействуют бегущая и стационарная волны. Данную работу можно рассматривать как продолжение исследований [1] с акцентом на рассмотрении механизма наклонного перехода.

Эксперименты выполнены в сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-325 ИТПМ СО РАН при числе Маха  $M=2,0$ . Модель тонкого скользящего крыла с острой передней кромкой имела угол стреловидности  $45^\circ$  и была установлена при нулевом угле атаки. Возмущения в поток вводились при помощи точечного тлеющего разряда внутри модели. В пограничный слой вводились возмущения на частотах 10, 20 кГц. Измерения проводились при помощи ТПС.

Результаты экспериментов показали появление дополнительных пиков в амплитудных спектрах для основной и субгармонической частот, что может быть объяснено в терминах механизма наклонного перехода.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (№ 16-31-00290).

---

1. Колосов Г.Л., Смородский Б.В. О трехволновом резонансном взаимодействии возмущений в сверхзвуковом пограничном слое на модели скользящего крыла. XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Казань, 2015. С. 1911-1913.

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

**Измерение полей температуры по спектру флуоресценции родамина В**

Кононов Р. И.

Новосибирский государственный университет

Величина тепловых потоков является важными данными для разработки летательных аппаратов. Некоторые данные могут быть получены в ударных трубах и трубах Людвига. Однако кратковременность действия таких труб приводит к ряду трудностей при проведении эксперимента.

На данный момент в аэродинамике есть различные методы определения тепловых потоков такие как термоиндикаторы плавления, жидкие кристаллы, люминофорная термография, термомпара, тепловидение. Но каждый из данных методов имеет ряд своих недостатков при тех или иных условиях. Все эти методы, кроме тепловидения, предполагают нанесение на модель достаточно толстого слоя покрытия, что делает их малоприменимыми для труб кратковременного действия.

**Целью** данной работы является разработка метода люминесцентных преобразователей температуры в видимом диапазоне для измерения тепловых потоков в трубах кратковременного действия и других газодинамических трубах.

При использовании данного метода модель покрывается слоем люминесцентной краски, что позволяет сделать слои очень тонкими, микронными.

В данной работе исследовались свойства ЛПТ на основе родамина В и полиуретанового лака. Данный люминофор был выбран за счет хорошей температурной чувствительности ( $\sim 3\%/K$ ). Нами были исследованы такие характеристики, как температурная зависимость, зависимость спектра излучения от концентрации красителя в лаке и толщины наносимого слоя. Проведены эксперименты в аэродинамической трубе ИТ-302М для модели полого цилиндра с углом сжатия. В результате было получено поле распределения температур и тепловых потоков.

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

**Создание и калибровка трёхкомпонентного датчика-термоанемометра**

Корнев Э. В.

Новосибирский государственный университет

Область применения термоанемометрии для исследования пространственных течений и характеристик турбулентности достаточно широка. Такие приборы востребованы везде, где идет речь об изучении обтекания каких-либо объектов жидкостью или газом. К типичным областям применения термоанемометра можно отнести задачи исследования обтекания летательных аппаратов, надводной и подводной частей судов, автомобильного и железнодорожного транспорта, обтекания объектов гражданского строительства (зданий, мостов и т.д.). Как правило, такие исследования выполняются в аэродинамических трубах или на натуральных объектах. Цель работы - создание термоанемометрического комплекса, пригодного для измерения величины и направления вектора скорости в газовых и жидкостных течениях, а также характеристик турбулентного движения среды. Под комплексом понимается совокупность термоанемометра, трехкомпонентного термоанемометрического датчика, а также специализированного программного обеспечения, в котором будут реализованы новые методики калибровки, сбора и обработки данных измерений. Основным отличием разрабатываемого термоанемометрического комплекса от существующих аналогов будет использование оригинального алгоритма калибровки прибора и обработки данных. Развитие вычислительной техники к настоящему времени позволяет обрабатывать большие объемы данных в режиме реального времени, что делает возможным применение алгоритмов, основанных на многомерной интерполяции калибровочных массивов. Это позволяет в значительной мере расширить точность измерений при больших углах скоса потока (углах между вектором скорости и осью датчика). Кроме того, в случае такой калибровки становится возможным использование датчиков «неидеальной» геометрии, то есть с не полностью ортогональными нитями, а также автоматически учесть влияние поддерживающих элементов, которое проявляется при больших углах скоса.

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

## **Численное исследование горения одиночной частицы в камере сгорания и сопловом блоке ракетного двигателя**

Костюшин К. В., Богдевич Ю. Р.

Национальный исследовательский Томский государственный университет

В настоящее время, ракетные двигатели на твердом топливе с добавками порошков металлов применяются в различных силовых установках космических систем. В связи с этим проводятся работы по совершенствованию удельных характеристик двигателей, в частности, прорабатывается возможность повышения удельного импульса тяги за счет добавок порошков легких металлов, в том числе ультрадисперсных, гидридов металлов и т. д. В последнее время, в связи с определенными достижениями в порошковой технологии, появилась возможность получать порошки алюминия с меньшей дисперсностью, вплоть до наноразмеров. Разработаны технологии, позволяющие ввести их в состав смесевого топлива. Такие составы топлив с мелкодисперсными частицами в настоящее время интенсивно изучаются. Так рассматриваются вопросы по определению скорости их горения и по спектру образующихся окислов металлов. Эта информация важна для изучения газодинамической картины течения продуктов сгорания в сопле и определения уровня двухфазных потерь удельного импульса. При численном исследовании двухфазных течений в соплах необходимо задавать распределение частиц окислов на входе в сопло. Существующие экспериментальные данные как правило фиксируют спектр частиц, срываемых с поверхности горения топлива. Затем для задания спектра частиц на входе в сопло используют различные упрощенные подходы, которые как правило не учитывают изменение размеров частиц за счет их окисления в процессе движения в камере сгорания и сопловом блоке.

В данной работе разработана численная методика расчета движения одиночной жидкой частицы металла в камере сгорания и сопловом блоке с учетом изменения ее размера за счет окисления в потоке продуктов сгорания твердого топлива. Методика расчета основана решении одномерных уравнений газовой динамики и уравнений движения одиночной частицы в форме Лагранжа. Для учета горения частицы используется модель Бекстеда [1]. Уравнения одномерной газовой динамики решаются методом Годунова.

---

1. Widener, J. F., and Beckstead, M.W., "Aluminum Combustion Modeling in Solid Propellant Combustion Products" AIAA Paper 98-3824, July 1998

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

## Численное исследование нерезонансного взаимодействия лазерного излучения с газом

Кунгурцев П. В.

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

Взаимодействие газа с внешним электромагнитным полем, создаваемым за счет интерференции двух пересекающихся лазерных пучков, лежит в основе перспективных методов диагностики и управления газовыми потоками [1]. Механизм такого взаимодействия проявляется благодаря свойству поляризуемости нейтральных молекул. В работе численно исследуется как прямое влияние поля на газ, так и обратное влияние среды на излучение — брэгговское отражение волн на периодических возмущениях диэлектрической проницаемости среды [2]. Модель основывается на разбиении одномерной среды на тонкие слои с постоянным показателем преломления.

В расчетах используется модифицированный программный комплекс SMILE++ [3], основанный на методе прямого статистического моделирования (PCM) [4]. Представлена программная реализация модуля для расчета электромагнитного поля и его действия на поляризуемые молекулы в системе для моделирования газового течения на молекулярно-кинетическом уровне.

В работе проведено сравнение результатов численного моделирования эволюции плотности, нагрева и ускорения газа в движущихся оптических решетках с аналитическими результатами и численными результатами, полученными на основе более простой модели [2].

---

1. Shneider M. N., Barker P. F., Gimelshein S. F. Molecular transport in pulsed optical lattices. // *Appl. Phys. A* 89 (2007) 337–350.

2. Shneider M. N., Barker P. F. Kinetic description of the field-gas interaction in optical lattices. // *Optics Communication*, 284 (2011), 1238–1242.

3. Ivanov M. S., Kashkovsky A. V., Vashchenkov P. V. and Bondar Ye. A. Parallel Object-Oriented Software System for DSMC Modeling of High-Altitude Aerothermodynamic Problems, AIP Conference Proceedings Volume 1333, 27TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RAREFIED GAS DYNAMICS, Pacific Grove, California, (USA), 10–15 July 2010, Edited by D. A. Levin, I. J. Wysong, and A. L. Garcia, pp. 211-218 (2011).

4. Bird G. A., *Molecular Gas Dynamics and The Direct Simulation of Gas Flows*, Oxford University Press, Oxford, 1994.

Научные руководители – канд. физ.-мат. наук Гимельшейн С. Ф.,  
канд. физ.-мат. наук Бондарь Е. А.

**Исследование детонации этилена в аппарате  
с проточной подачей компонентов взрывчатой смеси  
и реализация напыления порошковых покрытий**

Лебедев А. С.

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

Проведено исследование детонации этиленокислородных смесей применительно к работе на импульсном газодетонационном аппарате с проточной подачей компонентов взрывчатой смеси. Выполнен расчет параметров детонации таких смесей и установлено, что это топливо по своим энергетическим характеристикам занимает промежуточное значение между ацетиленом и пропан\бутаном.

Был разработан экспериментальный стенд для измерения скорости детонации и регистрации ячеистой структуры детонационного фронта в канале с проточной подачей компонентов взрывчатой смеси. Детонация возбуждалась в трубе диаметром 26 мм и длиной порядка 2000 мм. Распространение детонационной волны фиксировалось датчиками давления, и методом следовых отпечатков регистрировалась ячеистая структура детонационного фронта. Реализован процесс стационарной детонации в широком диапазоне концентрационных соотношений О/С вплоть до режима спиновой детонации. Построена зависимость геометрических размеров ячейки детонационного фронта от содержания кислорода в смеси. На основе полученных результатов был определен диапазон концентрационных соотношений, пригодных для реализации технологии детонационного напыления с использованием этилена.

На детонационном комплексе CCDS2000 (Computer Controlled Detonation Spraying), разработанном в ИГиЛ СО РАН, продемонстрирована возможность напыления металлических и керамических порошков с использованием в качестве топлива этилена. Исследованы физические свойства и эксплуатационные характеристики полученных покрытий.

Научный руководитель – д-р техн. наук Ульяницкий В. Ю.

## **Численное моделирование естественной конвекции в атмосфере от крупномасштабного источника тепла**

Мартынов П. С.

Национальный исследовательский Томский государственный университет

В последние годы наблюдается увеличение количества природных пожаров. Одними из самых опасных пожаров являются верховые и торфяные, так как они наносят огромный вред окружающей среде. К этой группе также отнесём и пожары, переходящие от лесных к сельским или городским, так как они опасны не только из-за нанесения вреда хозяйственной деятельности человека, но также могут унести жизни людей.

Опасность лесных пожаров для природы связана не только с прямым действием огня, но и с выбросом большого количества аэрозольных частиц в виде сажи и пепла. Продукты горения могут привести к локальным и региональным климатическим последствиям, блокируя прохождение солнечных лучей, что может привести к длительному воздействию на климат, вплоть до угрозы образования “ядерной зимы”.

В представленной работе рассматривается численное моделирование движения нагретого воздуха в атмосфере под действием локального источника тепла. Задача решалась в осесимметричной постановке с учетом изменения параметров газа с высотой. Численное решение движения воздуха осуществлялось с использованием явной схемы Годунова.

Результаты расчета показали зависимость высоты подъема нагретого воздуха от параметров источника тепла. Было рассмотрено влияние турбулентности на высоту подъема.

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

**Математическая модель упругого композитного материала**

Мишин А. В.

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

Данная работа посвящена построению математической модели упругого композитного материала. Композитные материалы представляют собой гетерогенные смеси, характерные размеры неоднородностей которых значительно превосходят молекулярные размеры, так что внутри каждой фазы справедливы уравнения механики сплошной среды. Механическое поведение гетерогенных смесей описывается с помощью “гомогенизации” и статистических методов.

Первым этапом выступления будет отсылка к однофазовой упругой среде (в общем) с переходом к теории малых деформаций. Здесь будет определен математический тип системы уравнений, описывающих упругую среду в случае малых деформаций.

Далее будет показан математический подход к описанию двухфазового упругого материала: осреднение основных уравнений упругой сплошной среды (в общем), с переходом к теории малых деформаций.

Затем будет приведен подход, с помощью которого можно найти эффективные упругие параметры композита, также будет предложено исследование равновесного приближения.

В итоге будет предложен способ нахождения параметров деформации двухфазного тела (параллелепипеда) в случае простой малой деформации. И приведена допустимость этого способа.

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

**Влияние нагрева/охлаждения носика конической модели  
на ламинарно-турбулентный переход**

Настобурский А. С.

Новосибирский государственный университет

Известно, что притупление передней кромки конуса сдвигает ламинарно-турбулентный переход (ЛТП) вниз по потоку. Притупление является одним из способов затягивания ЛТП для реальных космических аппаратов. Также известно, что локальный нагрев или охлаждение части модели оказывает существенное влияние на развитие возмущения в пограничном слое и также могут привести к изменению положения ЛТП [1]. Целью данной работы является определение влияния нагрева или охлаждения носика конуса на положение ламинарно-турбулентного перехода в аэродинамической трубе «Транзит-М» ИТПМ СО РАН и исследование параметрической зависимости положения перехода.

Эксперименты проведены при числе Маха 5,95 в диапазоне единичных чисел Рейнольдса  $Re_1 = 5:50 \cdot 10 \text{ м}^{-1}$  на модели конуса из теплоизоляционного материала РЕЕК с углом полураствора 7 градусов и полной длиной 450 мм. Радиус притупления регулируется с помощью сменных носиков со сферическими притуплениями  $R_n = 0; 0,75; 1,5; 2 \text{ мм}$ . Положение ламинарно-турбулентного перехода фиксировалось по максимуму в распределении плотности теплового потока. В среде «MATLAB» была реализована программа, позволяющая вычислить значение нестационарного теплового потока в полубесконечное тело по алгоритму Кука-Фельдермана [2].

Получены распределения теплового потока на модели с разными параметрами нагрева/охлаждения и с разными притуплениями носика и рассмотрены влияние этих эффектов на положение ЛТП. По полученным данным построены распределения чисел Стантона и произведено сравнение с теоретическими кривыми.

---

1. A. Fedorov, V. Soudakov, I. Egorov, A. Sidorenko, Y. Gromyko, D. Bountin, P. Polivanov, A. Maslov High-Speed Boundary-Layer Stability on a Cone with Localized Wall Heating or Cooling. AIAA Journal, 2015, Vol.53: 2512-2524, 10.2514/1.J053666

2. D. L. Schultz and T. V. Jones, Heat transfer in short duration hypersonic facilities, AGARD AG 165.

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

## **Исследование газожидкостных струй пневматических форсунок**

Нестеров А. Ю.

Новосибирский государственный университет

Газожидкостные форсунки широко используются для распыления жидкости в различных технологиях, например, при обустройстве нефтяных месторождений. При этом для промышленных форсунок характерна высокая концентрация жидкости в полученном потоке. В связи с этим актуальны задачи изучения различных характеристик распыла жидкостей подобными форсунками, таких как распределение капель по размерам и скорости газа и капель в потоке.

В первую очередь была поставлена задача исследования зависимости среднего размера капель в потоке от скорости истечения газа из сопла форсунки. При этом капли, находящиеся в центре струи и на периферии, рассматривались отдельно в силу различных размеров и механизмов их формирования. Данные получены на различном расстоянии от сопла - от 200 до 1000 мм.

Важным параметром газожидкостного потока является скорость дисперсной фазы. Измерение скорости капель в потоке возможно производить с помощью лазерного доплеровского анемометра (ЛДА). Поскольку промышленные ЛДА непригодны для использования в плотных газожидкостных потоках, актуальна задача создания прибора для исследования подобных сред. Была разработана оптическая схема ЛДА и создан макет прибора, позволивший моделировать его работу и оптимизировать конструкцию. Обработка рассеянного объектом света производилась оптическим методом при помощи интерферометра Фабри - Перо. Макет был откалиброван на вращающемся диске и испытан на газожидкостной струе. На основании полученных данных была поставлена задача создания функционального ЛДА на основе промышленного  $\lambda$  – метра на основе интерферометра Физо. Особенность прибора - ввод рассеянного света через световод, для чего создан приемный коллиматор, сопряженный с оптоволоком. Приемная оптика протестирована на предмет светосилы и пространственного разрешения с параллельным и сфокусированным лазерным пучком. Проводятся испытания прибора на газожидкостной струе с целью изучения возможности применения прибора в плотных газожидкостных потоках.

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

**Коррекция измерений скорости сверхзвукового струйного течения по данным PIV-диагностики**

Пивоваров А. А.

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

В настоящее время интерес исследователей направлен на изучение структуры и особенностей течения в сверхзвуковых струях с применением оптического панорамного бесконтактного метода PIV (измерение скорости по изображению частиц). При этом следует отметить, что скорость газового течения определяется не напрямую, а косвенно по скорости трассирующих частиц в потоке. Из-за большого различия в плотностях частиц и газа их скорости могут не совпадать. Скоростное запаздывание частиц вносит ошибку в измерения скорости газа, что затрудняет количественную интерпретацию данных, полученных с помощью PIV. Для описания поля скорости газа в высокоскоростных градиентных течениях необходима коррекция экспериментальных данных с учетом релаксационных параметров трассирующих частиц [1].

В работе представлены результаты экспериментального исследования структуры течения в свободной сверхзвуковой недорасширенной газовой струе с использованием метода лазерного ножа и метода PIV. Для измерения скорости газа предложена методика коррекции данных на основе учета скоростной релаксации частиц.

Таким образом, реализован метод восстановления скорости газа по скорости частиц, основанный на оценке скоростного запаздывания трассеров как поправки к данным PIV по параметру скоростной релаксации. Показано, что в потоках с большими градиентами скорости потока (скачки уплотнения) можно существенно улучшить точность восстановления скорости газа.

---

1. Бойко В. М., Запрягаев В. И., Пивоваров А. А., Поплавский С. В. Коррекция данных PIV для восстановления скорости газа в сверхзвуковой недорасширенной струе // Физика горения и взрыва. 2015. Т. 51. № 5. С. 87–97.

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

## Сопряженный расчет взаимодействия воздушного потока с упругим стержнем квадратного сечения

Погудалина С. В.

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

Новосибирский государственный технический университет

Сопряженные физические процессы, в которых движение воздушной среды оказывает влияние на поведение деформируемых объектов (FSI) являются ключевым элементом во многих инженерных задачах. Для предотвращения нежелательных колебаний упругих конструкций, которые могут привести к их разрушению, необходимо учитывать влияние на них внешнего течения воздуха.

В работе представлены результаты численного 3D моделирования колебаний упругого стержня квадратного сечения, установленного по нормали к внешнему потоку и жестко закрепленного на подложке, обтекаемого потоком воздуха со скоростью  $U=5$  м/с. Моделирование выполнено в пакете ANSYS с использованием технологии двунаправленного сопряжения (2FSI).

Моделирование течения воздуха проводилось на основе трехмерных нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса, дополненных  $k-\omega$  SST моделью турбулентности. Процессы в твердом теле описываются нестационарными уравнениями теории упругости, условиями совместности деформаций и законом Гука. Для связывания гидродинамического и прочностного расчетов использован итерационный алгоритм сопряжения. На каждом шаге по времени отдельно решаются уравнения гидродинамики и прочности, затем через интерфейс между воздушной средой и стержнем происходит обмен данными. В качестве материала стержня использован модельный изотропный материал с плотностью  $\rho = 40$  кг/м<sup>3</sup>, модулем упругости  $E = 12.7 \times 10^6$  Па и коэффициентом Пуассона  $\nu = 0.35$ .

Анализ структуры течения воздуха вокруг абсолютно жесткой модели показал наличие отрывных зон, линии растекания и других характерных особенностей течения. Проведенный модальный расчет позволил получить собственные частоты и формы колебаний стержня.

В результате сопряженного расчета получено, что сначала стержень совершает продольные колебания, частота которых совпадает с первой собственной частотой конструкции, а амплитуда быстро затухает. В следующий временной период возбуждаются поперечные колебания, вызванные срывом вихрей в дорожке Кармана.

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

## **Исследование динамики пузырьвидного распада ограниченного вихревого течения в закрытом контейнере**

Подольская И. Ю., Шарифуллин Б. Р.

Новосибирский государственный университет

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

При разработке вихревых аппаратов в энергетических технологиях для улучшения тепло-массообменных процессов необходимо знать характеристики замкнутого вихревого течения, режимы формирования и разрушения самоорганизующихся вихревых структур. При определенных параметрах течения возникает явление пузырьвидного распада вихря (ПРВ), характеризующееся самопроизвольной сменой структуры закрученного течения и образованием зон с обратным движением жидкости. Наиболее простой моделью для исследования ПРВ является вихревое течение, генерируемое в цилиндре вращением одного из его торцов. В такой модели режимными параметрами течения являются относительное удлинение  $h$  - отношение высоты цилиндра к его радиусу и число Рейнольдса  $Re = \Omega R^2/\nu$ , где  $\Omega$  - угловая скорость вращения крышки,  $R$  - ее радиус, а  $\nu$  - кинематическая вязкость жидкости.

В различных технических приложениях конфигурация контейнера может отличаться от цилиндрической. В работе выполнено исследование формирования и эволюции ПРВ в контейнерах с четырех, пяти, шести и восьмиугольным поперечным сечением при различных относительных удлинениях  $h$  в диапазоне от 0,5 до 4.

Проведены визуализация полиамидными частицами в лазерном «ноже» и измерения скорости течения методом ЛДА с высоким временным разрешением. Экспериментально и численно определены границы рециркуляционной зоны и числа Рейнольдса, соответствующие этим режимам.

Установлено, что размер ПРВ изменяется, а его положение смещается вдоль оси вверх по направлению к вращающейся крышке при уменьшении числа углов в поперечном сечении (от 8 до 5), при этом структура течения в области ПРВ остается осесимметричной. В кубическом контейнере область ПРВ формируется в очень узком диапазоне режимных параметров. В восьмиугольнике и цилиндре структуры течения практически не отличаются друг от друга, следовательно, влиянием большего количества углов на характер течения можно пренебречь.

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

**Воздействие газопроницаемых материалов на обтекание  
прямоугольного уступа сверхзвуковым потоком**

Пономаренко Р. А.

Новосибирский государственный университет

Рассматривается обтекание прямоугольного уступа на пластине сверхзвуковым потоком в камере Эйфеля. Перед выступом располагается пористая вставка. Эксперименты проводятся с варьированием пористости вставки. Прямой уступ моделирует плоскость управления летательным аппаратом. Особенностью течения вблизи прямой ступени является наличие отрывной зоны, которая при некоторых условиях может быть нестационарной и оказывать негативное воздействие как на распределение тепловых нагрузок, так и на аэродинамические характеристики. Эксперимент показал, что пористая вставка перед прямым уступом снижает область вихревого течения с увеличением пористости. Эксперимент сопровождается численным моделированием с использованием программного комплекса ANSYS FLUENT.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Постников Б. В.

**Исследование зарядки аэрозольных частиц в коронном разряде**

Протасов И. И.

Новосибирский государственный университет  
Технопарк Новосибирского Академгородка  
АО «ТИОН Умный Микроклимат», г. Новосибирск

«ТИОН Умный Микроклимат» выпускает электростатические фильтры, в которых аэрозольные частицы приобретают электрический заряд. Эффективность фильтрации определяется величиной электростатической подвижности частиц. Данная работа посвящена разработке прибора для измерения спектра подвижности аэрозольных частиц. Такой прибор планируется использовать в разработке новых зарядителей аэрозоля и в исследовании эффективности уже выпущенных серийных образцов.

Измерение спектра подвижности основано на эффекте дрейфа заряженных частиц в электрическом поле. Существуют два метода: дифференциальный и интегральный. В прошлом столетии ученые занимались исследованием обоих методов, но затем прекратили работу над интегральным в пользу более точного дифференциального. Однако, интегральный метод требует меньше ресурсов и проще технически, чем дифференциальный, поэтому было решено продолжить изучение интегрального метода измерения электрической подвижности аэрозольных частиц.

В результате данной работы было разработано устройство, измеряющее спектр электростатической подвижности аэрозоля интегральным методом, в том числе разработана геометрия воздушного канала с учетом требований к ламинарности потока; автоматизированы измерения с помощью программных средств; разработан метод решения обратной задачи, для получения спектра подвижности из экспериментальных данных.

Для проверки прибора было произведено сравнение спектров подвижности аэрозоля различных зарядителей «ТИОН» в зависимости от различных параметров коронного разряда с аналогичными спектрами дифференциального анализатора подвижности.

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

## **О влиянии угла атаки на интенсивность возмущений в потоке смеси колебательно возбужденных газов**

Решетова А. И.

Новосибирский государственный университет

При высоких скоростях и температурах процессы возбуждения и неравновесности колебательных степеней свободы молекул CO<sub>2</sub> оказывают существенное воздействие на характеристики среднего течения и развитие возмущений в гиперзвуковых пограничных и ударных слоях. Однако в смеси с другими газами интенсивность релаксационных процессов CO<sub>2</sub> и их влияние на характеристики течения может отличаться от процессов в чистом CO<sub>2</sub>.

Цель данной работы исследовать влияние колебательной неравновесности молекул CO<sub>2</sub> на развитие возмущений в гиперзвуковом вязком ударном слое на пластине длиной 200мм под углом атаки ( $\alpha=0\div 20^\circ$ ) при ее обтекании гиперзвуковыми потоками смесей CO<sub>2</sub> (0,44) с N<sub>2</sub> (0,56):  $M_\infty=8,42$ ,  $Re_l=1,36\times 10^6$ ,  $P_\infty=371,5$  Па,  $T_0=2430$  К,  $T_w=300$  К.

Численное моделирование проводилось с помощью пакета ANSYS Fluent на базе решения двумерных нестационарных уравнений Навье-Стокса в рамках модели термически совершенного газа. Для расчета влияния колебательной релаксации молекул CO<sub>2</sub> к уравнениям Навье-Стокса производилось добавление 4-х уравнений сохранения колебательной энергии (для каждой колебательной степени свободы молекул CO<sub>2</sub>). Учёт энергообмена между колебательными и поступательно-вращательными степенями свободы с конечным временем релаксации производился добавлением источниковых членов, рассчитываемых по уравнению Ландау-Теллера при взаимодействии молекул CO<sub>2</sub> между собой и при взаимодействии их с молекулами N<sub>2</sub>. Акустические возмущения набегающего потока моделировались заданием суперпозиции стационарного течения и плоских монохроматических акустических волн на левой и верхней границах расчётной области.

В работе получены количественные данные о влиянии колебательной релаксации молекул CO<sub>2</sub> на развитие акустических возмущений в ударном слое на пластине и проведено сравнение с имеющимися экспериментальными результатами. Показано, что с ростом угла атаки увеличивается интенсивность пульсаций давления на поверхности пластины, обтекаемой смесью колебательно возбужденных газов.

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

## **Численное моделирование течения степенной жидкости в трубе с внезапным сужением или расширением**

Рыльцева К. Е.

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Современная вычислительная гидродинамика все больше обращает свое внимание на численное моделирование течений в трубах с различными конструктивными элементами, которые реализуются в массопроводах, трубопроводах, реакторах и т. д. Для определения потерь давления при течении в подобных системах требуется информация о местных гидравлических сопротивлениях.

В данной работе рассматривается ламинарное стационарное течение степенной жидкости в цилиндрической трубе с внезапным сужением или расширением. Задача формулируется в осесимметричной постановке с использованием переменных функция тока - вихрь. Реологическое поведение среды описывается уравнением Оствальда - де Вилия. Вязкая жидкость подается в трубу через входное сечение с постоянным расходом. На твердой стенке реализуются условия прилипания, на оси симметрии трубы выполняются условия симметрии. На выходе используются мягкие граничные условия.

Получение стационарного решения основано на применении метода установления с последующей реализацией численного алгоритма на основе конечно-разностной схемы переменных направлений. Для обеспечения сходимости метода расчета течения в широком диапазоне изменения степени нелинейности жидкости проводится регуляризация реологического уравнения.

Картина течения в виде распределения линий тока вдоль трубы показывает наличие одномерного течения в окрестности входной и выходной границ и двумерного течения слева и справа от скачка сечения трубы. Исследуются зависимости безразмерных геометрических характеристик потока (длины участков двумерного течения до и после скачка сечения и длина циркуляционной зоны, образующейся в окрестности угла) от числа Рейнольдса, степени сужения/расширения трубы и показателя нелинейности жидкости. Проводятся параметрические расчеты для определения местных гидравлических сопротивлений рассматриваемых конструктивных элементов и анализ зависимостей полученных значений от определяющих параметров задачи.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №15-08-03935.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. Шрагер Г. Р.

## **Исследование взаимодействия капель субмиллиметрового размера со сверхзвуковым газовым потоком и ударной волной.**

Рябов М. Н.

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

Исследование динамики и разрушения в сверхзвуковом потоке капель жидкости имеет множество научных и практических приложений, среди которых воспламенение жидких топлив, разрушение лопаток паровых турбин, газодинамическое напыление и т.д. Разрушение капель жидкости под воздействием аэродинамических сил - сложный процесс, включающий в себя различные физические механизмы. Предполагается, что параметрами, определяющими динамику и разрушение капель, являются безразмерные комбинации параметров газочапельного течения, такие как число Вебера ( $We$ ), число Онезорге ( $Oh$ ), число Бонда ( $Bo$ ) и число Рейнольдса обтекания капли.

Большинство опубликованных работ проводились с использованием капель размером порядка 1 мм, в то время как для капель, чей размер не превышает 100 мкм, экспериментальные данные по динамике и процессам разрушения в газовом потоке практически отсутствуют. Причиной тому может служить техническая сложность в изучении капель малого размера.

В настоящей работе для исследования поведения капель воды субмиллиметрового размера в непрерывном транс-сверхзвуковом потоке с прямой ударной волной (УВ) был применен набор методов оптической диагностики: *particle-image velocimetry (PIV)*, *background-oriented schlieren (BOS)* и *shadow photography (SP)*. Конфигурация газового потока, включая распределение скорости и положение фронта УВ, определялась методами PIV и BOS, средняя скорость капель рассчитывалась с помощью алгоритмов PTV. Метод SP позволил определить скорости, размеры и форму капель, а так же визуализировать их динамику и режимы дробления.

Таким образом, было выявлено, что для промежуточных  $We$  есть соответствие в процессах дробления капель малого и большого (порядка 1 мм) размера. В первую очередь, при  $We < 25$ , что соответствует диаметру капель  $< 50$  мкм, не был обнаружен распад. При больших  $We$  наблюдалось дробление по вибрационному механизму, режиму типа «парашют» и смешанным многосоставным режимам, причем различные режимы дробления наблюдались для соразмерных капель.

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

## Модель судна на воздушной подушке

Сибиряков Н. Е.

Новосибирский государственный университет

В данной работе была рассмотрена модель судна на воздушной подушке. Она состоит из CD-диска и прикреплённого к нему сверху через сопло воздушного шарика. При малых диаметрах сопла истечение воздуха под диском происходит в вязком режиме. Для широких сопел, течение перестаёт быть вязким и давление под диском вблизи сопла становится значительно меньше атмосферного. Теоретически и экспериментально получено радиальное распределение давления под диском и время парения данного судна для различных диаметров сопел.

Для узких сопел зависимость давления воздуха под диском от радиуса логарифмическая. При увеличении диаметра сопла, скорость течения воздуха под диском так же возрастает. Как следствие, силы инерции начинают играть намного более значительную роль. Точное решение уравнение Навье-Стокса для этого случая представляется очень трудным, так как инерциальными силами теперь нельзя пренебречь, так же поток становится переходным между турбулентным и ламинарным. Поэтому к распределению давления под диском для вязкого течения прибавляется распределения давления для абсолютно невязкого течения. Так же, профиль скоростей под диском не равномерный, что вносит поправочный коэффициент в конечное выражение для распределения давления под диском. Как следствие, давление под диском логарифмически растёт при движении от края диска к центру и затем резко падает, как  $-1/r^2$ . Оба распределения давления хорошо описывают экспериментальные данные.

В данной работе посчитано время парения модели судна на воздушной подушке. Для маленьких сопел оно оказывается примерно равным времени свободного истечения воздуха из шарика в атмосферу через сопло, немного превышая его. Для широких сопел отношение времени парения ко времени свободного истечения воздуха в атмосферу растёт с увеличением диаметра сопла. Так же теоретически предсказано и экспериментально подтверждено, что время парения судна не зависит от его веса, пока вес судна достаточно мал.

Научный руководитель – Щетников А. И.

## Экспериментальное исследование структуры двумерных сверхзвуковых микроструй воздуха

Тимофеев И. В.

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

В последнее 10-летие возник большой интерес к применению газовых микроструй в различных областях техники и технологии. В частности, газовые микроструи нашли применение в микрореактивных двигателях, в микроустройствах пневмоники и для активного управления газодинамическими течениями. Основным преимуществом микроструй является локальность воздействия и возможность создания массивов микроструй высокой плотности без увеличения расхода газа.

**Целью** данной работы является определение основных характеристик сверхзвуковых плоских недорасширенных микроструй воздуха – размера первой бочки и дальнобойности микроструй.

Исследование сверхзвуковых плоских микроструй осуществлялось визуализацией течения прямотеневым методом, а также применением миниатюрной трубки Пито. Использовался воздух комнатной температуры в качестве рабочего газа. Сверхзвуковая струя истекала в атмосферу. Трубка Пито, закреплялась на державке, которая передвигалась по трем взаимно перпендикулярным направлениям с точностью  $\pm 1$  мкм. Положение микротрубки Пито контролировалось с помощью стереоскопического микроскопа Nikon SMZ1500.

Дальнобойность сверхзвуковых плоских микроструй определялась по распределению  $P_0'$  вдоль линии пересечения плоскостей симметрии струи. Дальнобойность сверхзвуковых плоских струй, истекающих из сопел высотой более 52.5 мкм хорошо совпадает друг с другом. Однако для струи, истекающей из сопла высотой 47 мкм при  $n < 1.2$ , дальнобойность выше, чем для остальных микроструй – реализуется режим большой дальнобойности струи. При  $n = 1.2$  режим большой дальнобойности заканчивается и, в дальнейшем для  $n > 1.2$ , дальнобойность струи, истекающей из сопла высотой 47 мкм, не отличается от дальнобойности струй, истекающих из сопел с большей высотой.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта Правительства РФ для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования от 04.03.2014 г. № Z50.31.0019.

Научные руководители – д-р физ.-мат. наук Анискин В.М.,  
д-р физ.-мат. наук, проф. Миронов С. Г.

## **Исследование влияния трубки Пито на структуру сверхзвукового течения во внешней части пограничного слоя**

Трубицына Л. П.

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

При измерении распределения полного давления в пограничном слое, сформировавшемся при обтекании сверхзвуковым потоком ( $M = 6$ ) пластины с острой кромкой, при помощи трубки Пито было обнаружено, что во внешней части пограничного слоя измеренное полное давление имеет небольшой пик (приблизительно 30% от измеренного значения).

Целью работы является установление структуры течения вблизи трубки Пито и объяснение физического механизма возникающего эффекта. Проведён численный расчёт течения вблизи поверхности пластины при наличии трубки Пито. Задача рассмотрена в двумерном и трёхмерном приближении.

Получено распределение измеренного полного давления вблизи носика трубки Пито, восстановлена структура течения вблизи носика трубки Пито, предложен физический механизм возникновения повышенного измеренного полного давления, связанный с влиянием микротрубки полного давления на структуру течения вблизи стенки.

Механизм возникновения исследуемого эффекта заключается в следующем. При взаимодействии скачка уплотнения, который образуется на трубке Пито, с пограничным слоем может возникать отрыв потока вблизи стенки. Линии тока, проходящие через веер волн сжатия, возникающие в начале отрывной области, имеют меньшее число Маха. Потери полного давления в прямом скачке уплотнения для этих линий тока уменьшаются, что и приводит к тому, что трубка Пито регистрирует значение полного давления в данной точке внешней части пограничного слоя больше реально существующего. Этот эффект следует учитывать при проведении экспериментов.

Автор выражает благодарность Кавуну И. Н. за помощь в проведении расчётов.

Работа поддержана грантом №16-01-00314а.

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

## **Моделирование аэродинамики натекания струи на твердую поверхность**

Турубаев Р. Р.

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Струйная технология занимает огромную область в 3D-печати. Такие процессы как напыление и натекание на твердую поверхность актуальны в настоящее время. В данной работе приводится численное решение задачи о натекании жидкости (газа) на стенку. Математическое моделирование этого процесса описывается при помощи уравнений Навье-Стокса в цилиндрической системе координат. Поставленная задача решалась в переменных «скорость-давление». Один из известных численных методов решения в переменных «скорость-давление» является способ физического расщепления полей скорости и давления. Достоверность получаемого решения подтверждается сопоставлением с данными решения той же задачи в переменных «вихрь-функция тока». В результате численного исследования были получены распределения изолиний функции тока и составляющих вектора скорости в рассматриваемой области, а также показано влияния геометрических и режимных параметров на картину течения.

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

## **Экспериментальное изучение динамики зарядки волокнистого диэлектрика в процессе производства гибридного фильтрующего материала**

Тырышкин М. И.

ООО «Тион Инжиниринг», г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Ежегодно в атмосферный воздух выбрасывается миллионы тонн загрязняющих веществ, которые способны проникать в организм человека через верхние дыхательные пути, вызывать различные болезни и поражать жизненно важные органы. На рынке существует множество систем основанных на HEPA (High Efficiency Particulate Air) фильтрах, которые способны задержать даже самые опасные частицы, размер которых составляет 0,3 мкм. В лаборатории компании был разработан гибридный фильтрующий материал, не уступающий по классу очистки фильтрам HEPA, сочетающий в себе прочность толстых полипропиленовых волокон ( $d = 50 - 200$  мкм), получаемых методом экструзии, и фильтрующие свойства нановолокон из полиамида ( $d = 50 - 500$  нм), получаемых методом электроформования волокна. Производство такого материала гораздо проще и дешевле, по сравнению с HEPA фильтрами. При производстве гибридного фильтрующего материала процесс электроформования волокна нестабилен в результате накопления заряда на фильтре.

Данная работа посвящена изучению физики процесса перезарядки фильтра коронным разрядом. В результате исследований, необходимо выяснить от каких параметров зависит перезарядка фильтрующего материала, и определить оптимальные величины этих параметров для стабильного технологического процесса. В ходе работы был спроектирован и собран стенд по изучению перезарядки пористого диэлектрика. Получены зависимости потенциала, накапливаемого на фильтре, от пористости, толщины фильтра и скорости его вращения (технологический процесс). Измерено характерное время стекания заряда.

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

## **Моделирование кристаллической структуры твердых тел методом молекулярной динамики.**

Чан Ван Туан, Тхи Ми Хуэ

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

В настоящее время, компьютерное моделирование стало важным инструментом в научном исследовании. Методы моделирования совершенствуются с развитием компьютерных технологий. Можно выделить несколько основных подходов к построению модели твердого тела – первопринципные расчеты, метод молекулярной динамики, метод Монте-Карло, модели сплошной среды. Каждый из этих методов обладает своими преимуществами и рассматривает вещество на разном масштабном уровне. В последнее время стали развиваться модели, объединяющие несколько методов – многомасштабные модели.

В методе молекулярной динамики вещество рассматривается на атомном уровне. В программе задается тип и положение всех атомов. Сила взаимодействия между любой парой атомов определяется с помощью межатомного потенциала. Сила взаимодействия определяет закон движения каждого атома. Таким образом, необходимо записать уравнение второго закона Ньютона для каждого атома, с учетом действия на него всех сил со стороны других атомов структуры. Решение системы таких уравнений для всех атомов структуры дает эволюцию структуры во времени.

В настоящее время, существует несколько мощных программных пакетов, позволяющих производить вычисления методом молекулярной динамики. В данной работе используется программа LAMMPS, разработанная в национальной лаборатории Sandia, США.

В работе построены кристаллические решетки нескольких ОЦК и ГЦК металлов – палладия, никеля, железа. Для этих металлов определены энергии связи, параметр решетки, модуль упругости, тензор коэффициентов упругости. Изучено изменение энергии решетки и параметра решетки в зависимости от температуры. Кроме того, изучены механизмы диффузии атома водорода в решетке палладия. Определены коэффициенты диффузии при разных температурах и энергия активации диффузии.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Чистякова Н. В.

## **Развитие методов анизотропной визуализации замкнутых вихревых течений**

Шарифуллин Б. Р., Подольская И. Ю.

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

Исследования кинематических характеристик вихревых структур имеют важное значение при разработке вихревых аппаратов в химических, биологических и энергетических технологиях. Сложность диагностики вихревых структур требует развития высокоточных оптических методов исследования потоков. В настоящее время популярными методами бесконтактной диагностики потоков являются методы лазерной доплеровской анемометрии и цифровой трассерной визуализации, требующие, как правило, засеивания потока специальными микроразмерными частицами с плотностью близкой к плотности рабочей жидкости. Чувствительность данных методов ограничена минимальными разрешающими особенностями движения исследуемого объекта, светорассеивающими свойствами засеивающих частиц и частотными характеристиками регистрирующей аппаратуры.

Используемый в работе метод визуализации, основанный на анизотропных свойствах наноразмерных частиц бактериофага FAG M13, обладает высокой разрешающей способностью и позволяет увидеть особенности потока невооруженным глазом. В отличие от химически синтезированных анизотропных соединений, FAG M13 является естественным природным вирусом и безопасен для людей и животных. Размер частицы FAG M13 составляет 900 нм в длину и 10 нм в толщину. Раствор с вирусом FAG M13, помещенный в стеклянную кубическую кювету (длина стороны 100 мм), освещался лазерным пучком видимого диапазона (длина волны лазерного излучения 660 нм, мощность 200 мВт). Вихревое течение генерировалось вращающимся диском, установленным в верхней крышке кюветы. Исследованы поглощающие свойства и диаграмма рассеяния анизотропных частиц FAG M13. Установлена линейная зависимость между интенсивностью лазерного пучка, деполяризованного FAG M13, и концентрацией частиц в растворе. Методика анизотропной визуализации адаптирована для диагностики пространственного распределения наночастиц в замкнутых гидротоках с рециркуляционной зоной распада вихря. Выявлены особенности самоорганизующихся вихревых структур.

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

## Спектральный анализ развития волнового пакета в сверхзвуковом пограничном слое

Яцких А. А.

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

Предсказание положения ламинарно-турбулентного перехода пограничного слоя важно при создании высокоскоростных транспортных средств. Однако до сих пор известны не все физические процессы, приводящие к турбулизации течения.

Одним из наиболее информативных методов экспериментального исследования ламинарно-турбулентного перехода в сдвиговых течениях является возбуждение искусственных пульсаций. Контролируемый ввод искусственных пульсаций позволяет изучить их развитие.

Перспективным является изучение развитие локализованных по пространству и времени контролируемых возмущений (волновых пакетов). В работах [1, 2] экспериментально исследовалось развитие контролируемых волновых пакетов в двумерном сверхзвуковом пограничном слое с помощью термоанемометрии. Полученные данные показали трехмерную структуру возбуждаемых волновых пакетов. Проведенный анализ в физическом пространстве показал, что волновые пакеты обладают трехмерной структурой.

Данная работа посвящена спектральному анализу экспериментальных данных, представленных в [2]. Определены фазовые скорости для различных частот возмущения. Показано, что наиболее неустойчивые пульсации являются наклонными, что согласуется с теорией гидродинамической неустойчивости в случае сверхзвуковых пограничных слоев.

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

---

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

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

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

## **Определение масштабов турбулентности пламенах с применением термографии при диффузионном горении некоторых топлив**

Агафонцев М. В., Матвиенко О. В., Рейно В. В.

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Одной из задач при экспериментальном исследовании характеристик пламени различных горючих материалов является определение поля температуры. Благодаря развитию ИК-термографии стало возможно, с достаточной точностью, определять температуру исследуемых процессов, при этом не внося в них возмущений. Помимо этого, данный метод позволяет получить хорошее пространственное и временное разрешение, что в свою очередь нельзя сказать о контактном способе определения температуры.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований полей температуры в пламенах с применением метода термографии. В качестве топлив применялись растительные горючие материалы, спирт, бензин, керосин, дизельное топливо. Измерения проводились тепловизором JADE J530SB с узкополосным оптическим фильтром с полосой пропускания в диапазоне длин волн 2.5-2.7 мкм. Этот выбор обеспечивал возможность измерения полей температуры в пламени по излучению маркерных газов, таких как пары воды и углекислый газ, что обеспечивало высокую детализацию термографических изображений при съемке с частотой 170 кадров в секунду.

Экспериментально были получены спектры изменения температуры в пламени. Установлено, что в них присутствуют характерные частоты, различные для разных видов топлив. На основе измерений температурных неоднородностей на термограммах и анализе спектров изменения температуры с применением математических преобразований, даются оценки масштабов турбулентности. Сравнение результатов математических оценок масштабов турбулентности в пламени с экспериментальными данными о размерах температурных неоднородностей говорит об удовлетворительном согласовании результатов.

Работа выполнена при поддержке Гранта Президента РФ № МД-5754.2015.1, грантов РФФИ № 15-01-00513\_а, 14-01-000211\_а, Программы ОФН РАН «Фундаментальные проблемы электродинамики и волновой диагностики атмосферы»

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук Лобода Е. Л.

## **Моделирование процесса распространения химической реакции в слое между разнородными материалами**

Алигожина К. А.

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Технологии получения и обработки материалов, основанные на синтезе горением, весьма разнообразны. Среди них особое место занимают технологии соединения материалов с разными свойствами, которые сопровождаются образованием различных интерметаллидных, карбидных, нитридных фаз между элементами, входящими в соединительный состав и составляющих соединяемые материалы. Существует ряд способов получения подобных материалов, однако одним из наиболее эффективных методов является самораспространяющийся высокотемпературный синтез, в частности, СВС-сварка. Достоинство самораспространяющегося высокотемпературного синтеза заключается в самом принципе – максимальное использование быстровыделяющегося тепла химических реакций вместо нагрева вещества от внешнего источника. Особое место в производстве новых материалов занимают композиционные материалы различных структур и составов. Синтез в твердой фазе применим к созданию слоевых композитов, в которых чередуются инертные слои и слои, основа которых – экзотермическая порошковая смесь металлов.

Однако, наряду с вышеизложенными преимуществами, СВС-технологии характеризуются очень высокими скоростями прогрева, быстрым протеканием реакции и большими градиентами температур, что делает проблематичным контролирование этих процессов в условиях натурального эксперимента. Поэтому особое значение приобретает математическое моделирование.

Цель настоящей работы состоит в теоретическом исследовании теплофизических процессов, протекающих в ходе распространения твердофазной химической реакции в слое между разнородными инертными материалами. 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.

Задача решена численно с использованием неявной разностной схемы.

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

## Изучение кризисных явлений при кипении и испарении тонкого горизонтального слоя жидкости

Аманбаева Д. Г.

Новосибирский государственный технический университет

При исследовании процесса испарения и кипения тонкого слоя жидкости в условиях пониженных давлений, было получено по результатам визуальных наблюдений, что в слоях жидкости образуются структуры четырех основных типов – "воронки", "кратеры", сухие пятна и полусферические пузыри. "Воронки" представляют собой углубления с полусферическим днищем в тонком слое жидкости. "Кратеры", в отличие от "воронок", имеют в центре углубления протяженный плоский остаточный слой жидкости конечных размеров. Отличие "кратеров" от "сухих пятен" состоит в том, что они покрыты тонким остаточным слоем жидкости. "Сухие пятна" образуются из "кратеров" в результате испарения тонкого остаточного слоя жидкости с их поверхности. В качестве рабочей жидкости в настоящей работе использовался додекан. При относительно низких тепловых потоках в слое образовывался массив "воронок", а затем на месте массива "воронок" образовывался "кратер". В работе выполнены расчеты тепловых потоков, которые соответствуют моменту образования "кратера" на месте массива "воронок". Расчеты проводятся с использованием модели [1], которая была несколько модернизирована.

Тепловые потоки, полученные в результате расчета, сравниваются с расчетом по формуле С.С. Кутателадзе [2], полученной для критических тепловых потоков, соответствующих переходу от режима пузырькового кипения в большом объеме к пленочному и с экспериментальными данными. Наблюдается удовлетворительное совпадение. Формула С.С. Кутателадзе [2] в данном случае позволяет рассчитывать тепловые потоки, соответствующие моменту образования "кратера" на месте массива "воронок". Образование "кратера" происходит в результате потери гидродинамической устойчивости слоя жидкости.

---

1. Zhukov V.I., Pavlenko A. N. Critical phenomena at evaporation in a thin liquid layer at reduced pressures // Journal of Engineering Thermophysics. –2013. – Vol. 22. – iss. 4. – P. 257-287.

2. Кутателадзе С.С. Гидромеханическая модель кризиса теплообмена в кипящей жидкости при свободной конвекции // Журнал технической физики. – 1950. – Т. 20. – № 11. – С. 1389–1392.

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент Жуков В. И.

## **Экспериментальное изучение детальной структуры восходящего газожидкостного течения в прямоугольном микроканале**

Барткус Г. В.

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

В данный момент значительное внимание уделяется многофазным потокам на малых масштабах. Многофазные микросистемы дают возможность для управления процессами переноса при фазовых превращениях и химических реакциях с временным масштабом порядка нескольких миллисекунд. Они используются в высокоинтенсивных системах охлаждения, микрохимических реакторах, биологических микрочипах. Это связано с тем, что большие площади поверхности фаз (при уменьшении поперечного размера канала, отношение поверхности к объему канала увеличивается обратно пропорционально диаметру канала) обеспечивают эффективный тепло- и массообмен в таких системах. Поэтому изучение структуры газожидкостных течений в микроканалах (каналах с гидравлическим диаметром много меньше капиллярной постоянной) является одной из перспективных и сложных задач, так как степень влияния гравитационных, капиллярных, инерционных и вязкостных сил в каналах микронного размера существенно изменяется по сравнению с хорошо прогнозируемым газожидкостным течением в обычных каналах.

В работе экспериментально изучена детальная структура восходящего газожидкостного течения смеси вода-азот в канале с прямоугольным сечением  $420 \times 280$  мкм. Визуализации потока и измерения проводились с помощью методов лазерно-индуцированной флуоресценции и метода высокоскоростной видеосъемки. В широком диапазоне приведенных скоростей газа и жидкости измерены скорости газовых пузырей, определена зависимость локальной толщины пленки жидкости пузыря в центральном сечении микроканала от капиллярного числа, получен профиль течения жидкости в сечении перпендикулярном направлению течения. Определено, что закон Тейлора для прямоугольного канала не выполняется в полной мере, особенно на больших расстояниях от начала пузыря, из-за деформации межфазной поверхности и его можно использовать только для оценки.

Исследование выполнено в ИТ СО РАН при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ № 15-08-07506 А).

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

## Моделирование теплопереноса в фазовом переходе методом решеточных уравнений Больцмана

Буковец А. А.

Институт гидродинамики имени М. А. Лаврентьева СО РАН  
Новосибирский государственный университет

Метод решеточных уравнений Больцмана применяется для моделирования широкого спектра явлений, однако его использование для изучения процессов теплопереноса развито слабо, хоть и имеет большой потенциал.

В данной работе метод решеточных уравнений Больцмана применялся для расчёта многофазных течений с теплопереносом. Фазовые переходы моделировались с помощью метода псевдопотенциала [1]. При учете границ раздела фаз необходимо учитывать перенос энергии, для чего был введен дополнительный набор функций распределения. Однако, ввиду большого скачка плотности на границе раздела возникает паразитная диффузия энергии, для устранения которой были введены «псевдосилы». Также была учтена скрытая теплота фазового перехода. Для расчета в качестве уравнения состояния использовалось уравнение Ван-дер-Ваальса в безразмерных переменных (нормированных на значения давления, плотности и температуры в критической точке):

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

В одномерном варианте получена зависимость скорости звука от отношения теплоемкостей среды при постоянном объеме и постоянном давлении. Также реализован двумерный вариант метода и исследована тепловая конвекция с фазовыми переходами при различных перепадах температуры и различных соотношениях теплоты испарения, ускорения свободного падения и размеров области.

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

---

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

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

**Изучение теплообмена и критического теплового потока при  
испарении горизонтальных тонких слоев жидкости в условиях  
пониженного давления**

Вайсс Д.

Новосибирский государственный технический университет

В данном исследовании представлены результаты анализа экспериментов по испарению тонких слоев жидкости на горизонтальной плоскости в широком диапазоне температур и давлений. В качестве исследуемой жидкости использовался додекан. Жидкость испаряется со стальной поверхности диаметром 120 мм. В зависимости от высоты слоя, давления и теплового потока были определены режимы теплообмена, при которых в жидкости наблюдаются сухие пятна, движущиеся сухие пятна, пузыри различных размеров, «кратеры» и «воронки». «Воронки» и «кратеры» наблюдаются, когда высота слоя больше капиллярной постоянной. В работе приведены полученные в экспериментах зависимости плотности теплового потока от разности температур. Угол наклона кривой кипения изменяется в зависимости от высоты слоя жидкости. Экспериментальные данные по критическим тепловым потокам для слоев жидкости различной высоты сравниваются с расчетами по зависимостям Ягова, Кутателадзе и Ландау. Критические тепловые потоки для режимов пузырькового кипения в слое совпадают с расчетами по формуле Кутателадзе.

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент Жуков В. И.

**Влияние коалесценции на диаметр газовых пузырей  
газожидкостного потока в наклонном плоском канале при различных  
параметрах течения**

Гореликова А. Е.

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

Широкое распространение газожидкостных течений в энергетике, химической и микробиологической промышленности ставит задачу теоретического описания их поведения. В то же время, сложность структуры течения и разнообразие режимных параметров делает невозможным теоретическое описание и моделирование потоков без привлечения эмпирических данных. Это увеличивает актуальность экспериментального изучения газожидкостных потоков.

Традиционно, основные исследования газожидкостных течений проводятся при вертикальных и горизонтальных расположениях каналов. Но в настоящее время все большее внимание уделяется исследованию двухфазных течений в наклонных трубах и каналах, так как ориентация канала оказывает существенное влияние на характеристики течения.

В работе представлено экспериментальное изучение влияния коалесценции на распределение диаметров газовых пузырей в потоке жидкости и на средний диаметр газовых пузырей при различных значениях расхода жидкости ( $Q_l=0,133\div 0,567$  л/с) и газа ( $Q_g=0,003\div 0,083$  л/с). Режимные параметры подбирались таким образом, чтобы объемное расходное газосодержание  $\beta$  не превышало 12-15% и течение оставалось пузырьковым. Угол наклона канала менялся в диапазоне  $\theta=10\div 40^\circ$  от вертикали. Данный диапазон представляет особый интерес из-за того, что этим углом наклона, как показали предыдущие исследования, соответствуют максимальные значения теплообмена на верхней стенке канала.

Полученные экспериментальные данные показывают, что максимальное влияние угла наклона канала достигается при меньших скоростях течения жидкости. Кроме того, показана эволюция средних диаметров газовых пузырей и распределений диаметров для различных расстояний от места ввода газа в поток жидкости.

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

## Численное моделирование абляции алюминия под действием одиночных наносекундных импульсов Nd:YAG-лазера

Гришин М. А.

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск  
Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск

Обработка поверхностей металлов лазерным излучением импульсами короткой (наносекундной) длительности широко используется для модификации поверхностей: при легировании, закалке, микрофрезировании, также отдельный интерес представляет изучение динамики возникновения и развития плазмы, получения наночастиц заданного размера. Теоретическое и экспериментальное исследование абляции под действием лазерного излучения, как следствие, является важной прикладной и фундаментальной задачей.

Важной характеристикой при моделировании взаимодействия излучения с веществом является спектральный коэффициент объемного поглощения  $\alpha_v$ . Для металлов  $\alpha_v$  может достигать значений  $\sim 10^6 \text{ м}^{-1}$ . Это означает, что полное поглощение падающего на поверхность металла излучения происходит в тонком приповерхностном скин-слое, содержащем большое число свободных электронов. Наличие данного эффекта позволяет, в отличие от диэлектриков, рассматривать процесс радиационно-кондуктивного теплообмена на основании простой Бугеровской модели затухания излучения [1].

Данная работа направлена на численное исследование процесса абляции с поверхности алюминия в воздухе под действием Nd:YAG-лазера ( $\lambda=1064 \text{ нм}$ ).

Численный расчет был выполнен для плоской геометрии алюминиевого образца. Учитывалось возникновение и развитие плазменного факела, приводящее к экранировке поверхности от падающего потока. Результатом моделирования являются температурные распределения в слое в различные моменты времени, а также зависимость глубины отверстия от плотности потока падающего излучения.

---

1. Булгаков А.В., Булгакова Н.М. Тепловая модель импульсной лазерной абляции в условиях образования и нагрева плазмы, поглощающей излучение // Квантовая электроника. – 1999. – Т. 27, № 2. – С. 154 - 158.

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

## **Исследование крупномасштабных вихревых структур в тангенциальной вихревой камере**

Дремов С. В., Скрипкин С. Г.

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

Исследование закрученных потоков, в частности крупномасштабных вихревых структур, представляет большой научный интерес, так как подобные структуры регулярно встречаются в природе. Также, следует отметить, что они широко используются в различных технических приложениях, например, в вихревых топках или сепараторах. Таким образом, помимо научного интереса, изучение таких структур открывает широкие возможности для решения практических задач. Недостаток экспериментальных данных о вихревых течениях является основной проблемой данной темы.

Целью работы является получение количественных данных о вихревых структурах с различной винтовой симметрией. Исследования проводились на замкнутом гидродинамическом контуре при различных входных параметрах и граничных условиях, что позволяло контролировать параметры вихревого течения в широком диапазоне. В гидродинамической камере варьировались углы тангенциальных сопел, расход жидкости, диаметр выходного отверстия.

В ходе работы были получены различные режимы вихревого течения: прецессирующий двойной вихрь, стационарный центральный вихрь, стационарный винтовой вихрь. Количественные данные, включающие в себя тангенциальную и аксиальную профили скоростей этих режимов, были получены с использованием бесконтактной ЛДА техники. Полученные данные будут полезны для верификации аналитических данных отдельных разделов теории по концентрированным вихрям. [1]

---

1. Алексеенко С. В., Куйбин П.А., Окулов В. Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. // Новосибирск, 2003 г.

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

## Теплопроводность, теплоемкость и термодинамические функции хлората натрия

Игишева А.Л.

Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского Томского политехнического университета

Галогенаты щелочных металлов представляют собой интересную для теории твердого тела группу соединений, одновременно сочетающих два типа химических связей – ионную между узлами кристаллической решетки и ковалентную между атомами, образующими комплексные анионы  $\text{XO}_3^-$ . В последние годы интерес к галогенатам натрия усилился в связи с поиском новых кристаллов для лазеров на основе комбинационного рассеяния и рамановских лазерных конверторов. Малоизученными являются его тепловые и термодинамические свойства, которые представляют, несомненно, как научный, так и практический интерес.

Целью настоящего исследования является изучение возможных особенностей поведения температурных зависимостей теплоемкости, теплопроводности и термодинамических параметров кристалла хлората натрия.

Молярная теплоёмкость  $\text{NaClO}_3$  при постоянном давлении была измерена с помощью измерителя теплоемкости ИТ-С-400 в интервале 298-520 К. Известно ограниченное число работ, посвященных теплопроводности кристаллов галогенатов натрия. Транспортную характеристику вещества по передаче тепла – теплопроводность – удобнее всего описывать в модели рассеяния фононов на других фононах, статических несовершенствах решетки или на электронах.

Путем сравнения полученных результатов по теплоемкости с дебаевскими значениями  $C_V(\theta_D/T)$  была рассчитана температурная зависимость характеристической температуры  $\theta_D(T)$ . Расчет проведен с учетом незначительного различия  $C_p$  и  $C_V$ .

Температурные зависимости изменения энтропии и энтальпии определены соответственно по формулам:

$$\begin{aligned} S_T - S_0 &= \int C_p(T)/T \, dT, \\ H_T - H_0 &= \int C_p(T) \, dT. \end{aligned}$$

Таким образом, в результате эксперимента определены температурные зависимости основных теплофизических характеристик кристалла хлората натрия.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Соболева Э. Г.

## **Теоретический анализ микроволнового нагрева угольного слоя**

Карелин В. А.

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

В процессах тепловой обработки углей используется преимущественно подвод тепла за счет теплопроводности. Это имеет ряд существенных недостатков: инерционность, неравномерность прогрева, трудность регулирования и др. Совершенно иначе обстоит ситуация с объемным поглощением СВЧ-излучения диэлектрическим материалом, в том числе углем. В этом режиме в массиве материала образуются внутренние источники тепла, которые и отвечают за качественный нагрев. Эффективность трансформации энергии электромагнитной волны в тепло прямо пропорциональна частоте и квадрату амплитуды электрического поля. В этом случае подвод тепла легко регулируется изменением частоты излучения. Бесконтактность подачи тепла с использованием микроволнового излучения позволяет получать минимальную инерционность и технологически упрощает установку по тепловой обработке углей.

Целью настоящей работы является поиск оптимальных режимов СВЧ-нагрева, определение параметров СВЧ-установок, расчет потоков тепла в процессе нагрева и др. Все это может быть получено с использованием теоретических подходов. Наибольший интерес представляют собой строгие аналитические решения.

В настоящей работе были поставлены и решены задачи о микроволновом нагреве угольного слоя при смешанных граничных условиях I, II и III родов. При постановке задач было принято постоянство электрофизических и теплофизических характеристик угля. Внутренний источник тепла от поглощения электромагнитной волны в этом случае моделировался по закону Бугера. Для каждой задачи была найдена новая переменная, позволяющая существенно упростить получение точных аналитических решений. С помощью данных решений может быть получена важная информация для широкого спектра частных случаев: распределение температуры по слою с течением времени, максимальная температура, момент зажигания, наибольший перепад температур, количество отведенного тепла, уровень терморазрушающих напряжений и другие важные параметры нагрева СВЧ-излучением угольного слоя.

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

## Экспериментальное исследование капельного кластера на нагревателе 10x10мм

Кириченко Д. П.

Новосибирский государственный университет

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

При интенсивном локальном нагреве и испарении воды и ряда других жидкостей (глицерин, бензиловый спирт, этиленгликоль) может наблюдаться явление “капельный кластер” [1]. Это гексагонально упорядоченный монослой из десятков или сотен микрокапель конденсата, левитирующих над горизонтальной межфазной поверхностью жидкость–газа на расстоянии, сопоставимом с диаметром капель. [2]. За левитацию капель ответственны силы аэродинамической природы, возникающие при обтекании капель паровоздушной струей от нагретого участка жидкой поверхности (стоксовская левитация) [3].

Целью работы является экспериментальное исследование свойств капельного кластера на нагревателе размера 10x10 мм. Эксперименты проводились при атмосферном давлении в рабочем участке и неподвижном слое жидкости толщиной от 0,3 до 3 мм.

Основой рабочего участка является пластина из нержавеющей стали с впрессованным медным сердечником размером 10 мм, который служит нагревательным элементом. Источником теплоты является нихромовая спираль, что обеспечивает тепловой поток до 100 Вт/см<sup>2</sup>. В данном исследовании в качестве рабочей жидкости использовалась вода. Экспериментально, с помощью высокоточного Шлирен метода, были измерены характерные размеры капельного кластера и микрокапель.

- 
1. Федорец А.А., Письма в ЖЭТФ 79, 457 (2004).
  2. Федорец А.А., Письма в ЖЭТФ 81, 551 (2005).
  3. Федорец А.А., И.В. Марчук, О.А. Кабов, Письма в ЖТФ 37, 45 (2011).

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

## **Исследование влияния поверхностно-активных веществ на вязкость наножидкостей**

Кистерская М. С., Пряжников М. И.  
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Уникальные свойства наножидкостей резко расширяют границу их применимости. Было показано, что наножидкости имеют коэффициент теплопроводности на десятки процентов выше, чем у их базовых жидкостей. При этом уделяется недостаточно внимания их коэффициенту вязкости. Между тем вязкость оказывает значительное влияние, в частности, на турбулентную теплоотдачу.

До сих пор исследование, связанные с добавлением в наножидкости различных поверхностно-активных веществ, сводились к изучению их влияния на стабильность наножидкости. Известно, что полимеры очень широко используются для повышения коллоидной устойчивости наножидкостей. При чем, в большинстве случаев, добавка полимера делается не контролируемо. А это может радикально изменить свойства наножидкости, в частности вязкость и реологию.

Экспериментальное измерение вязкости наножидкостей проводилось с помощью ротационного вискозиметра Брукфильда DV2T. Исследования проводились на наножидкости на основе воды с добавлением частиц  $\text{TiO}_2$  диаметром 150 нм. Объемная доля частиц  $\varphi=2\%$ . В качестве ПАВ были выбраны полиакриламид и ксантановая камедь.

Установлено, что добавление ПАВ в наножидкость даже в очень малых концентрациях (начиная с 10мг/л) может значительно изменять ее вязкость. Так в частности, было показано, что концентрация полиакриламида с молекулярной массой 20МДа и анионным зарядом 20% 40мг/л повышает вязкость наножидкости с частицами  $\text{TiO}_2$  на 18%. Концентрация ксантановой камеди равная 50мг/л для той же наножидкости повышает вязкость в 2 раза. Кроме того, установлено, что при концентрациях полимера выше 100мг/л у наножидкости может изменяться реология. Наножидкость становится неньютоновской. Все это сильно затрудняет интерпретацию экспериментальных данных различных авторов, а также может являться причиной разброса данных в литературе по вязкости наножидкости. Поэтому при использовании ПАВ для стабилизации наножидкостей нужно быть крайне аккуратным.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (соглашения № 16-38-00569 и № 16-38-00580).

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, доцент Минаков А. В.

**Исследование теплопроводности наполнителя диагностического защитного модуля реактора ИТЭР**

Клименко М. В.

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

Диагностические защитные модули (ДЗМ) являются элементами конструкции диагностических портов реактора ИТЭР, необходимыми для уменьшения нейтронных потоков и радиационной нагрузки в пространстве между вакуумной камерой токамака и биологической защитой. В качестве материала наполнителя для ДЗМ выбран карбид бора. Благодаря малому атомному весу и высокому сечению поглощения тепловых нейтронов карбид бора может служить эффективным ослабителем потока как быстрых, так и тепловых нейтронов.

Предполагается, что ДЗМ будет заполняться сборками из плиток керамического карбида бора. В зависимости от технологии производства, эти плитки могут иметь существенно различные параметры, существенно влияющие на работу реактора и определяющие возможность их использования в ИТЭР. К таким параметрам, в первую очередь, относятся объемная и контактная теплопроводность плиток, а также их газоотделение и газопроницаемость.

Для определения тепловых характеристик различных образцов карбида бора создан вакуумный стенд, оборудованный нагревателем и системой измерения температуры в нескольких точках. Результаты измерений динамики температуры во время нагрева образцов сравнивались с расчетами, выполненными в программе COMSOL Multiphysics. По результатам этих экспериментов определена величина контактной и объемной теплопроводности исследуемых образцов.

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

## **Экспериментальное изучение структуры потока несмешивающихся жидкостей в прямых и серпантинных микроканалах Т-типа**

Ковалев А. В., Ягодницына А. А.

Новосибирский государственный университет

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

В настоящее время в области течений несмешивающихся жидкостей в микроканалах ведутся интенсивные исследования. Это обусловлено двумя основными факторами: большими перспективами практического применения таких микроканальных систем и недостатком знаний для их описания. Сегодня уже имеется ряд работ, в которых показана эффективность использования течения несмешивающихся жидкостей в микроканалах по сравнению с обычными технологическими процессами для проведения различных химических реакций, создания эмульсий, проведения биологических анализов. Тем не менее, до сих пор нет общей карты режимов, которая позволила бы предсказывать режим течения для любой системы с произвольными физическими свойствами. Также имеются трудности с теоретическим описанием и, соответственно, с численным моделированием указанной задачи. Так, на сегодняшний день нет моделей, которые учитывали бы все эффекты в случае избирательного смачивания.

Данная работа посвящена детальному изучению структуры потока несмешивающихся жидкостей в микроканалах с использованием прямой визуализации и метода цифровой трассерной визуализации *micro-PIV*. В рамках работы проведены эксперименты по визуализации режимов течения для трёх наборов несмешивающихся жидкостей в прямых и серпантинных микроканалах различной геометрии. Построены карты режимов, показана возможность их обобщения. Для снарядного режима течения получены поля скорости внутри снарядов, по которым была рассчитана циркуляция. Показано, что циркуляция для прямых каналов возрастает линейно с увеличением расхода жидкостей. Получены графики зависимости скорости и длины снарядов от расхода дисперсной фазы, а также измерены контактные углы смачивания для всех трёх наборов жидкостей. Выявлено существенное отличие измеренных контактных углов смачивания от их равновесных значений. Установлено качественное влияние контактного угла смачивания на форму снарядов и на зависимость скорости и длины снарядов от расхода.

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

**Исследование критического теплового потока в стекающей пленке жидкости в условиях интенсивного взаимодействия гидродинамических возмущений с термокапиллярными.**

Коэмец Ю. А.

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

Пленочные течения широко распространены в различных технологических процессах и аппаратах, а изучение механизмов тепло- и массообмена является одной из актуальных задач как с теоритической так и с практической точки зрения. В данной работе выполнено экспериментальное исследование взаимодействия гидродинамических волн [1] и термокапиллярных структур разных типов [2] в пленке стекающей по нагревателю, критического теплового потока при котором формируется первое устойчивое сухое пятно на нагревателе с граничным условием близким к  $T = \text{const}$  в диапазоне чисел  $15 < \text{Re} < 80$ .

Результаты исследования показали, что с увеличением теплового потока амплитуда волн в межструйной области увеличивается. Для малых тепловых потоков деформация пленки увеличивается с увеличением длины пробега пленки по нагревателю, что характерно для термокапиллярно-волновых структур. При достижении пороговой плотности теплового потока происходит изменения характера зависимости.

Совместное влияние данных факторов приводит к постоянному движению струй в направлении поперек потока, которое приводит к увеличению плотности теплового потока соответствующего формированию первого устойчивого сухого пятна по сравнению с известными в литературе данными.

---

1. Joo S. W., Davis S.H. Instabilities of Three-Dimensional Viscous Falling Films, J. Fluid Mech. 1992. V. 242. P. 529-547.

2. Чиннов Е.А., Кабов О.А., Формирование струйных течений при гравитационном стекании волновой нагреваемой пленки жидкости, ПМТФ, 2003, Т. 44, № 5, с.128-137.

Научный руководитель – Шатский Е. Н.

## Исследование влияния теплообмена между метано-воздушной смесью и инертными частицами на устойчивость горения газозвеси

Красницкий Е. А.

Национальный исследовательский Томский государственный университет

В работе решена задача о влиянии теплообмена метано-воздушной смеси с инертными частицами на устойчивость горения метано-воздушной смеси в цилиндрической трубке.

Рассматривается одномерное течение газозвеси метано-воздушной смеси с инертными частицами радиуса  $r_k$  в цилиндрической трубке. Трубка имеет длину  $L$  и постоянную ширину по всей длине  $h_y$ . Газ поступает в трубку слева со стороны  $x = 0$  и вытекает на границе  $x = L$ . На левой границе ставятся граничные условия третьего рода, на правой границе задаются условия свободного вытекания. В качестве начальных условий задаётся ступенька. Полагается, что в первой половине трубки  $T_{gb}$  и  $T_{kb}$ , температуры смеси и инертных частиц соответственно равны  $300\text{ K}$ , относительная массовая концентрация метана равна  $a_{CH_4} = 0.035$ . Вторая половина трубки заполнена горячими продуктами реакции ( $T_{gb} = T_{kb} = 1500\text{ K}$ ,  $a_{CH_4} = 0$ ).

Математическая постановка задачи описывается системой параболических дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка. Система уравнений содержит уравнения энергии для газа и частиц и уравнение баланса массы метана. Решение задачи выполнено численно с помощью метода конечных разностей с разностями против потока.

В расчетах варьировалась длина трубки  $L = 0.2 \div 0.4\text{ м}$ , размер частиц  $r_k = 10^{-7} \div 5 \cdot 10^{-6}$  и скорость подачи газа на входе в трубку  $U = 10^{-2} \div 3 \cdot 10^{-1}\text{ м/с}$ . Для  $L = 0.2\text{ м}$  и  $h_y = 0.01\text{ м}$  выполнены расчёты для постоянного коэффициента теплоотдачи,  $\alpha = \text{const}$ , и коэффициента теплотдачи, зависящего от скорости, как  $\alpha = \text{Nu}(\text{Re}) \cdot \lambda / h_y$ , где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности. Из расчетов определены условия устойчивого горения в зависимости от скорости подачи газа на вход в трубку и размера инертных частиц. Получено, что устойчивое горение возможно для частиц радиуса  $r_k = 10^{-6} \text{ м} \div 5 \cdot 10^{-6}\text{ м}$ . Частицы меньшего размера оказывают малое влияние на характеристики горения метано-воздушной смеси.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-38-00188 мол\_а.

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

## **Исследование конвективных течений в горизонтальном слое жидкости испаряющимся под действием потока газа**

Крета А. С.

Новосибирский государственный университет

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

Для отвода высоких тепловых потоков (до  $1000 \text{ Вт/см}^2$ ) перспективным представляется использование интенсивно испаряющегося слоя жидкости, обтекаемого потоком газа. В энергетических устройствах рассматриваемые процессы реализуются в мини- и микроканалах аппаратов типа: тепловые трубы, пленочные испарители, двухфазные системы охлаждения и др. Несмотря на повышенный интерес к такого рода задачам, экспериментальных и теоретических работ в этой области крайне недостаточно для понимания физики процессов, связанных с теплопереносом через границу раздела жидкости и газа.

**Целью** работы является экспериментальное исследование влияния характера и скорости распространения конвективных течений в слое жидкости на интенсивность испарения в условиях воздействия потока газа.

Эксперименты проводились при атмосферном давлении в рабочем участке и неподвижном слое жидкости (этанол) толщиной 3 мм. Площадь поверхности испарения, обтекаемая потоком воздуха, составляла  $100 \text{ мм}^2$ . Расход газа варьировался от 100 до 1000 мл/мин с шагом 100 мл/мин, что соответствует его средней скорости от 0,0139 м/с до 0,1382 м/с соответственно. Температура системы “жидкость-газ” поддерживалась постоянной  $20^\circ\text{C}$  с отклонением не более  $0,1^\circ\text{C}$ .

С использованием PIV метода были получены данные по визуализации конвективных течений в слое жидкости и построению двухкомпонентного поля скоростей. Обнаружено, что при увеличении скорости потока газа увеличивается скорость конвективных течений в слое жидкости и увеличивается количество таких структур. На начальной стадии контакта жидкости и газа наблюдается вихревая структура направленная против потока газа. При увеличении расхода газа, на конечном этапе соприкосновения жидкости и газа, появляется вторая вихревая структура, которая направлена против потока газа. В первом случае такое движение конвективной структуры объясняется преобладанием термокапиллярных сил, а во втором случае преобладанием сил касательных напряжений.

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

**Численное моделирование взаимодействия ультракоротких лазерных импульсов с металлами: динамическая модель отражения**

Лизунов С. А.

Новосибирский государственный университет

Фемтосекундные (фс) лазерные импульсы все шире используются для обработки материалов (микро- и наноструктурирование поверхностей, сверление микронных отверстий), поскольку они позволяют достигнуть более высокого качества обработанной поверхности в сравнении с более длинными, нано- и пикосекундными импульсами. При воздействии фс лазерных импульсов на металлы излучение поглощается свободными электронами, тогда как кристаллическая решетка остается холодной. В результате возникает сильно неравновесное состояние вещества, описываемое двухтемпературной (2Т) моделью теплопроводности. Несмотря на большое количество работ по 2Т моделированию нагрева металлов фс импульсами, до сих пор сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными затруднено. Это объясняется тем, что при резком нагреве электронов оптические свойства металла резко изменяются, а при моделировании обычно используются значения коэффициентов поглощения и отражения, относящиеся к комнатной температуре. Ситуация усложняется тем, что моделирование обычно проводится в одномерной постановке, тогда как в эксперименте отраженная часть лазерных пучков, имеющих обычно гауссов пространственный профиль, собирается со всего пятна облучения.

В данной работе впервые поставлена задача моделирования нагрева металлов фс лазерными импульсами на примере цинка *с учетом динамического изменения оптических свойств материала для реальных экспериментов* по измерению отраженной энергии от облучаемой поверхности. 2Т модель нагрева металлов лазерным излучением дополнена оптической моделью Друде с учетом переменной частоты столкновений электронов при их ультрабыстром нагреве. Для каждой плотности энергии в импульсе выполнено интегрирование отраженной энергии по неоднородно нагретому пятну облучения. Проведено сравнение с экспериментальными данными. Анализируется динамика нагрева цинка с учетом и без изменения оптических свойств.

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

## **Влияние внешних возбудений на пульсации в Т-образном микроканале**

Мешалкин Ю. Е.

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

В настоящее время в технике растет потребность в эффективных и ресурсосберегающих процессах. В этой связи разработка микрофлюидных устройств с высокой скоростью смешивания стала важнейшей областью исследования гидродинамических процессов. Процесс смешивания в микроустройствах имеет широкое применение в микрореакторах, которые приобретают все большую популярность в химико-биологическом машиностроении.

Для того чтобы смешивать жидкости, например, реагенты, необходимо использовать специальные устройства: микромиксеры. Эти устройства разделяют на два типа: пассивные и активные. В первом интенсификация смешения происходит за счет усложнения геометрии каналов. Во втором случае применяется то или иное внешнее воздействие (акустическое, электрическое), либо, как в нашем случае, путем наложения пульсаций расхода жидкости. В мировой литературе работ по систематическому изучению влияния внешних пульсаций на поток в микроканальных устройствах практически не представлено. В результате чего, исследование влияния внешнего возбуждения на процесс смешивания в микроканалах является актуальной задачей.

Целью работы является экспериментальное исследование влияния внешнего возмущения потока на структуру течения в микроканалах Т-типа и эффективность перемешивания. Воздействие на поток осуществлялось посредством системы внешнего возбуждения, встроенной в экспериментальный контур. Данная система, основанная на пьезоэлектрическом актюаторе с возможностью контроля частоты и амплитуды внешнего воздействия на поток, впервые разработана и протестирована в ходе выполнения работы. Преимуществом данной работы является использование современных оптических бесконтактных методов *micro-PIV* и *micro-LIF*, с помощью которых измерены поля мгновенной скорости и поля концентрации компонент в сечениях микроканала. На основе этих данных будут определены оптимальные режимы течения и диапазоны частот внешнего возмущения потока, при которых наблюдается наиболее и наименее интенсивное перемешивание.

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

## Исследование нестационарных процессов в элементах конструкций высоконапорных гидроэлектростанций

Мешков К. Н.

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Одной из проблем высоконапорных гидроэлектростанций является чрезмерно высокий уровень пульсаций давлений в проточном тракте высоконапорных ГЭС. Механизмом генерации низкочастотных пульсаций в гидротурбинах является прецессия вихревого жгута, образующегося за рабочим колесом гидротурбины, которая приводит к сильным вибрациям конструкции гидротурбины и в случае резонанса может привести к разрушению оборудования. Цель данной работы заключалась в том, чтобы рассчитать собственные частоты и динамические нагрузки в теле, возникающие из-за течения жидкости.

Для отработки алгоритма была решена модельная задача о нахождении собственных частот тонкого металлического стержня с одним закрепленным концом, произведен расчет деформации тонкой перфорированной пластины, нагруженной равномерным растягивающим усилием, приложенным к верхней и нижней стороне пластины, так же были рассчитаны собственные частоты данной пластины, численные решения хорошо согласуются с аналитическими.

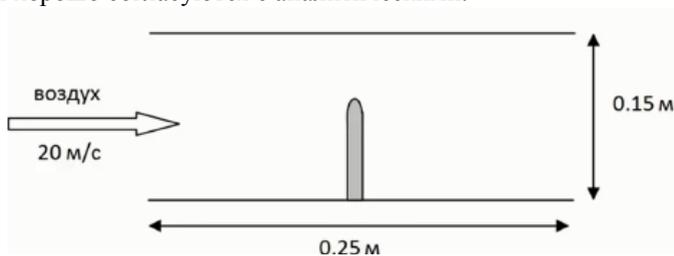


Рис.1. Геометрия задачи

В ходе работы была решена нестационарная задача об обтекании пластины в воздушном канале после начала обдува, найдены распределения напряжённостей в данной пластине, скорость потока в канале, и распределение давления в воздухе в течении первых  $0,0075\text{ с.}$ , см. Рис.1.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, доцент Минаков А. В.

## **Амплитудная и фазовая частотные характеристики акустических отборников давления**

Митряков А. С., Литвинов И. В.

Новосибирский государственный университет

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

Во многих областях технических и научных исследований измерения нестационарных величин давления важно, но может быть затруднено по ряду причин. Во – первых, среда может быть агрессивной к акустическим датчикам давления – микрофонам. Во–вторых, микрофон обладает достаточно большими размерами и вследствие этого значительно изменить структуру потока, поэтому использование малоразмерного отборника позволяет избежать подобных проблем.

Отборники обычно представляют собой металлические насадки – зонды различных геометрий. В самом простом случае это пара цилиндрических трубок, малого диаметра и диаметра микрофона, переходящих друг в друга. Наряду с ними могут использоваться мягкие и гибкие отборники, например, для проведения измерений в человеческом ухе.

Простота и удобство в использовании позволяют использовать их для проведения измерений пульсаций давления в воздушных проточных частях, в топочных камерах, в пламенах. Однако использование отборника искажает регистрируемый сигнал, а именно происходит изменение амплитуды сигнала и его сдвиг по времени. Это связано с тем, что каждый отборник имеет свои уникальные амплитудную и фазовую частотные характеристики (АФЧХ) [1]. Это делает обязательным нахождение этих характеристик, поскольку их наличие позволяет восстановить реальный сигнал, искажённый отборником.

В ходе работы удалось экспериментально определить АФЧХ отборника, был проведён теоретический расчёт АФЧХ, а также был проведён анализ корректности измерений пульсаций давления отборником.

---

1. Tijdeman H., Bergh H. Theoretical and experimental results for the dynamic response of pressure measuring systems. Amsterdam: NAARI, 1965.

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

## Исследование устойчивости горения метано-воздушной смеси в цилиндрической трубке с инертной вставкой методом Рунге-Кутты 5 порядка

Никитин П. Ю.

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Решение задач горения метано-воздушных смесей в горелочных устройствах актуальны для исследования критических условий воспламенения и позволяют с заданной точностью определить характерные режимы протекания химического процесса.

Полученные результаты могут быть использованы для повышения КПД тепловых двигателей и термостойкости горелок за счёт их конструктивных особенностей.

Целью работы являлось исследование устойчивости горения метано-воздушной смеси в зависимости от параметров расхода и теплообмена газа.

Рассматривается камера сгорания, представляющая собой цилиндрическую трубку радиуса  $R = 0.3$  м, объема  $V$ , площадью боковой поверхности  $S$ , внутри которой расположено инертное тело радиуса  $R_I = 0.1$  м, объема  $V_I$ , площадью поперечного сечения  $S_I$ , соответственно. Температура боковой поверхности трубки –  $T_s$ . Через камеру сгорания с объемной скоростью  $\omega$  протекает метано-воздушная смесь плотностью  $\rho$ . Начальная температура газа и инертного тела  $T_b$  и  $T_{Ib}$ . Полагалось, что зажигание газа происходит за счет теплообмена газа с предварительно разогретым внутренним телом.

Математическая постановка задачи описывается уравнениями теплового баланса для смеси, инертного тела и уравнением баланса массы горючей компоненты.

Решение задачи выполнено численно методом Рунге-Кутты-Мерсона 5 порядка с автоматическим выбором шага по времени.

Проведено параметрическое исследование влияния величины теплоотдачи на устойчивость горения метано-воздушной смеси. В расчетах варьировалось число Нуссельта,  $Nu = 2.04 \div 4.36$ , и объемная скорость течения газа,  $\omega = 9.9 \cdot 10^{-6} \div 6.2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ .

Результаты расчетов показали, что предельное значение числа Нуссельта при  $\omega = 9.9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  и  $\omega = 6.2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ , для которого возможно воспламенение смеси,  $Nu = 2.05$  и  $Nu = 20$ , соответственно.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-38-00188 мол\_а.

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

## Математическое моделирование фильтрации электролита в катодное устройство алюминиевого электролизера

Орлов А. С.

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск.

Одной из основных причин повышенного энергопотребления и преждевременного отключения алюминиевых электролизеров является проникновение электролита в теплоизоляционную часть футеровки катода. Попадание электролита в теплоизоляцию ведет к избыточным тепловым потерям и уменьшению срока службы электролизера.

Математическое моделирование является ценным инструментом, который может помочь в оптимизации существующей конструкции футеровки катодного устройства и позволит сэкономить время и силы при разработке новых электролизеров.

В процессе работы электролизеров происходит непрерывная фильтрация электролита в подину катода. Под действием гидростатического давления ( $\rho gh$ ) и капиллярных сил электролит вытесняет воздух из пор футеровочных материалов (См. Рис. 1).

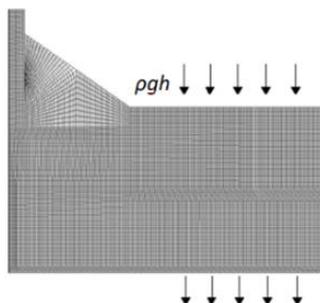


Рис 1. Фрагмент расчетной области и сетки.

Исследования позволили определить скорость проникновения расплава в подину ванны в процессе работы электролизеров. Разработанная математическая модель, позволяет моделировать процессы проникновения электролита в футеровочные материалы электролизеров, что дает возможность оптимизировать конструкцию футеровки с целью уменьшения тепловых затрат и увеличения срока службы катодного устройства.

Научный руководитель – д-р техн. наук, проф. Прошкин А. В.

## Экспериментальное исследование интенсивных потоков ван-дер-ваальсовых кластеров

Роевко М. А.

Новосибирский государственный университет

На сегодняшний день газовые кластеры нашли применение во многих областях науки и техники: ионно-кластерная полировка поверхностей, осаждение пленок, масс-спектрометрия на вторичных кластерных ионах, генерация рентгеновского излучения с помощью кластерных пучков и т.д. Для всех этих процессов необходимы максимальные значения интенсивности кластерного потока при различных размерах кластеров (от  $10^2$  до  $10^4$  частиц на кластер).

Существуют различные экспериментальные способы определения размеров кластеров: прямые методы – масс-спектрометрические и косвенные – методы, основанные на рассеянии либо кластерного пучка, либо на кластерном пучке. Каждый из этих методов обладает своими преимуществами и недостатками, но всех их объединяет тот факт, что в них измеряется локальная плотность кластеров, следовательно, для их реализации необходима высокочувствительная детектирующая аппаратура.

В данной работе предлагается иной метод определения размеров кластеров из анализа поперечных профилей интенсивности кластерных пучков. Метод основан на измерении отношения полуширины профилей кластерной и мономерной компонент потока, различие которых обусловлено разностью значений скоростных отношений  $S_N = S_1 \cdot (N)^{1/2}$ . Здесь  $S_N$  – скоростное отношение кластеров,  $S_1$  – скоростное отношение мономеров,  $N$  – средний размер кластеров. Определены средние размеры кластеров в потоках  $Ar$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ , истекающих из конических сверхзвуковых сопел различной геометрии.

Также в данной работе, проведено сравнение двухскиммерной и односкиммерной конфигураций при условии достижения определенного размера кластеров и наибольшей интенсивности, определены оптимальные геометрические параметры системы формирования пучка.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Министерства образования и науки РФ (базовый проект НГУ № 2292) и Правительства РФ (проект № 14.Z50.31.0019).

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

**Экспериментальное исследование удельной теплоемкости  
магнитомягких материалов на основе Nd-Fe-B  
в широком интервале температур методом ДСК**

Самошкин Д. А., Агажанов А. Ш.

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

В настоящее время одним из самых интересных и перспективных классов магнитных материалов являются кристаллические, нанокристаллические и аморфные сплавы на основе редкоземельных металлов (РЗМ), в том числе сплавы РЗМ с 3d-переходными металлами. Важной отраслью применения таких сплавов являются постоянные магниты. Наиболее высокие характеристики (коэрцитивная сила, остаточная индукция и максимальное энергетическое произведение) сегодня имеют постоянные магниты на основе сплавов Nd-Fe-B. Исследователи проявляют высокий интерес к магнитным свойствам данных магнетиков, а также магнитотепловым, магнитокристаллическим и магнитоупругим эффектам. Однако было замечено, что в литературе практически отсутствуют достоверные данные по теплофизическим свойствам магнитных материалов, в частности по удельной теплоемкости. В этой связи целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование удельной теплоемкости магнитомягких материалов на основе Nd-Fe-B в широком интервале температур твердого состояния, включая область магнитного фазового перехода.

Впервые были проведены измерения удельной теплоемкости магнитотвердых материалов марок N35M, N35H и N35SH, содержащих в качестве основного компонента кристаллическую фазу типа Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B, в интервале температур 190 – 800 К методом дифференциальной сканирующей калориметрии. Подробно исследовано поведение температурной зависимости удельной теплоемкости в области магнитного фазового перехода. Разработаны аппроксимационные уравнения и таблицы справочных данных для научного и практического использования.

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

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

## **Исследование динамики разрыва испаряющегося горизонтального слоя жидкости с точечным нагревом**

Спесивцев С. Е.

Новосибирский государственный университет

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

Эксперименты проводились при атмосферном давлении и комнатной температуре. Высота слоя жидкости (этанол) изменялась от 300 до 700 мкм. Диапазон температур нагревателя составлял 20–82°C. Плотность теплового потока изменялась от 0 до 120 Вт/см<sup>2</sup>, диаметр нагревателя составлял 1.6 мм. Изучено влияние толщины слоя жидкости, интенсивности нагрева и свойств подложки на динамику разрыва. Визуализация и контроль слоя жидкости осуществлялись с помощью шпирен и теневого методов.

Обнаружено, что разрыв слоя жидкости происходит в несколько этапов. Вначале происходит утончение слоя жидкости над областью локального нагрева за счет действия термокапиллярных сил и испарения. Дальнейшее утончение приводит к образованию остаточного слоя жидкости в области локального нагрева подложки. Далее остаточный слой жидкости испаряется до критической величины, при которой возникает разрыв слоя жидкости. После разрыва вся область локального нагрева интенсивно осушается и формируется достаточно симметричное круглое сухое пятно. Скорость формирования сухого пятна увеличивается с ростом интенсивности локального нагрева. Обнаружено, что при увеличении толщины слоя жидкости плотность критического теплового потока увеличивается.

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

## **Исследование структуры течения пропано-воздушной импактной струи с горением**

Толстогузов Р. В.

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

Сжигание бедных смесей является эффективным способом снижения выбросов загрязняющих веществ. Однако, бедные режимы горения подвержены термо-акустическим пульсациям, которые могут приводить к уносу и погасанию пламени, что ограничивает их эксплуатационную надежность. Удобной модельной системой для исследования условий возникновения термо-акустического резонанса являются струйные пламена, ограниченные импактной поверхностью.

В работах, посвященных изучению импактных струй с горением, используется следующая классификация режимов горения: пламена, которые стабилизируются на сопле и пламена, стабилизирующиеся на некотором расстоянии от импактной поверхности. Объектом данного исследования являются различные режимы горения импактной струи, которые можно наблюдать при варьировании расстояния от сопла до импактной поверхности, числа Рейнольдса и стехиометрического коэффициента.

Данная работа посвящена исследованию влияния крупномасштабных вихревых структур, присутствующих в потоке, на стабилизацию импактной струи с горением. Экспериментальная установка включает горелочное устройство с системой подачи пропано-воздушной смеси и расположенную нормально к оси горелки термостатированную импактную поверхность. Измерение полей мгновенной скорости проводилось методом анемометрии по изображениям частиц в стереоскопической конфигурации (Stereo-PIV).

Метод Stereo-PIV позволяет измерять трехкомпонентные поля скорости в выбранном сечении потока (освещенном лазерным ножом). Изображения частиц, добавленных в поток, регистрируются двумя камерами, расположенным под углом к плоскости измерения. Использование процедуры предварительной калибровки позволяет провести реконструкцию реального трехкомпонентного смещения частиц в толщине лазерного ножа.

В работе построена карта режимов и линии уноса пламени для пропано-воздушных пламен, методом Stereo-PIV были измерены ансамбли полей мгновенной скорости.

Научный руководитель – Чикишев Л. М.

## **Экспериментальное исследование температурного поля на границе раздела жидкость-газ**

Филипенко М. А.

Новосибирский государственный университет

Процессы при фазовом переходе на границе жидкость-пар/газ по-прежнему до конца не изучены, особенно это важно для микросистем, где сама граница раздела трудно определима, а эффекты, возникающие в области слоя Кнудсена, становятся существенными. Подход к описанию тепломассообмена в двухфазной системе, основанный на полном уравнении Навье-Стокса с граничными условиями со скачками температуры и давления был предложен ранее. Анализ показал хорошее совпадение предлагаемых решений и профилей температуры и давления, полученных из решения уравнений Больцмана. Тем не менее, существует недостаток экспериментальных данных по скачку давления и температуры на границе раздела жидкость-газ.

В данной работе представлено экспериментальное исследование температурного поля через границу жидкость-газ в двухслойной системе. Жидкий слой локально нагревается и наблюдается интенсивное испарение. В качестве рабочей жидкости используется сверхчистая вода. Для измерения температурного профиля через оба слоя используется уникальная микротермопара, толщина королька которой приблизительно 4 мкм. Калибровка микротермопары осуществлялась в диапазоне температур от 5 - 100°C с использованием двух тарированных термометров ЭТС-100 с ошибкой измерений 0,05°C. Сбор данных осуществляется посредством контроля температуры нагревателя и системы измерения, состоящей из терминала сбора данных (NI 9214) и программного обеспечения. Прецизионная подвижка (Zaber T-LSM025A) перемещает микротермопару и определяет её положение. Диапазон движения подвижки составляет 25 мм с минимальным шагом 0,05 мкм. Микроподвижка подключена к персональному компьютеру и управляется специально разработанным программным обеспечением.

Измерения позволили получить подробную картину температурного профиля. Было установлено существование скачка температуры на границе раздела жидкость-газ, величина которого растет с ростом температуры.

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

## **Расчет задач с переносом продуктов истечения при разгерметизации парогенератора в перспективных реакторах с ТЖМТ**

Чухно В. И.

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

Проектирование реакторной установки с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ) является актуальной задачей в ближайшие несколько лет из-за присущих такой установке свойств “естественной” безопасности. Для подтверждения заявленных свойств реакторной установки должны быть выполнены расчетно-теоретические исследования в обоснование ее самозащищенности.

В качестве одного из базовых сценариев аварии рассматривается течь воды в жидкий металл при разуплотнении трубки парогенератора. Цель исследования подобного рода аварий состоит в том, чтобы получить ответы на вопросы, куда и как будут двигаться образующиеся пароводяные пузыри, к образованию импульсов давления какой величины приведут.

Для моделирования транспорта пароводяных образований (пузырьков, снарядов) по контуру и для расчета всплесков давления внутри корпуса парогенератора от момента разрыва теплообменных трубок до прекращения истечения пароводяной смеси в ТЖМТ предлагается использовать двухжидкостную модель, учитывающую гетерогенность, скоростную и температурную неравновесность. Межфазные взаимодействия в используемой модели учитывают деформацию пароводяных образований и имеют специфические замыкающие соотношения в зависимости от режима течения.

В работе представлено краткое описание используемых подходов и соотношений для моделирования транспорта пароводяных образований. Используемые подходы были верифицированы на базе экспериментов поставленных в ИТ СО РАН по впрыску аргона в ТЖМТ.

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

**Экспериментальное и численное исследование нестационарной структуры сильнозакрученного потока в гидродинамической вихревой камере.**

Юсупов Р. Р.

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

Исследование вихревой структуры течений составляет значительную часть современной гидрогазодинамики. Вихревые структуры вносят существенный вклад в процессы переноса и могут служить источником шума. Особо важно знать вихревую структуру потока при создании и эксплуатации технических устройств, использующих закрутку потока. В настоящее время закрученные потоки нашли своё применение в скрубберах и циклонных сепараторах, для очистки газов и топлив, в горелочных устройствах для стабилизации пламён, в расходомерии. Чтобы оптимизировать процесс смешения потоков в данных устройствах, необходимо понимание структуры потока и механизмов смешения. Структура таких течений, как с экспериментальной, так и с теоретической точки зрения, изучена недостаточно. Поэтому исследование сильнозакрученных потоков является актуальной задачей.

Целью данной работы является экспериментальное и численное исследование нестационарной структуры сильнозакрученного потока в гидродинамической вихревой камере. В данном рабочем участке реализована подача потока жидкости при помощи двух последовательно соединённых тангенциальных завихрителей. В зависимости от способа подачи на второй завихритель может реализоваться как созакрутка, так и противозакрутка двух потоков. В ходе работы было исследовано влияние способа закрутки потока на результирующую структуру течения. Проведена визуализация вихревого потока как при созакрутке, так и при противозакрутке потоков. С использованием измерительной ЛДА системы измерены профили аксиальной и тангенциальной компонент скорости. Выполнено численное моделирование потока. Получены расчётные профили скоростей.

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

## **Расчетно-экспериментальное исследование процессов протаивания и систем термостабилизации мерзлого грунта под резервуаром для хранения нефтепродуктов**

Янбикова Ю. Ф.

Тюменский государственный университет

Север Тюменской области – это территории с низкими среднегодовыми температурами и широко простирающимися вечномерзлыми грунтами. Особенностью проектирования и эксплуатации сооружений для хранения горячих нефтепродуктов на территориях, занятых такими грунтами, является учет и регулирование сложного теплообмена в системе мерзлый грунт – горячий резервуар – окружающая среда.

Ошибки в расчетах могут привести к потере грунтом несущей способности, что впоследствии может стать причиной аварии и разрушения инженерного сооружения. Поэтому изучение процессов, сопровождающих замерзание и оттаивание вечномерзлых грунтов, для анализа и предупреждения негативных последствий находит востребованность в инженерных и научных изысканиях.

Целью работы является оптимизация системы хранения нефтепродуктов в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов.

Для поддержания устойчивого состояния мерзлого грунта под сооружениями широкое применение получили системы термостабилизации. В представленной работе было получено уравнение теплового баланса, которое позволяет определить оптимальные параметры такой системы.

Оценка эффективности работы системы термостабилизации грунта осуществляется посредством численного расчета по разработанной физико-математической модели, позволяющей также проводить расчеты рабочих режимов резервуара и температурного поля грунта под ним.

В целях проверки результатов численных расчетов была создана экспериментальная установка, включающая в себя следующие элементы: морозильную камеру, деревянный лоток, модель нефтехранилища, систему нагрева, систему охлаждающих труб, криостат и автоматизированную систему измерения температуры в грунте и резервуаре.

Был проведен эксперимент по исследованию процесса протаивания и работы системы термостабилизации мерзлого грунта под резервуаром с горячей нефтью. Полученное по разработанной модели решение дает удовлетворительное согласие с экспериментальными данными.

Научный руководитель – Шастунова У. Ю.

## АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Grabovsky A. Yu.....	5	Крета А. С.....	84
Strakhova A. A.....	5	Кузьмин Е. И. ....	12
Агажанов А. Ш.....	92	Кузьмина Д. Л.....	13
Агафонцев М. В.....	67	Кунгурцев П. В. ....	45
Акинин С. А.....	29	Лебедев А. С.....	46
Алексеев А. В. ....	30	Лизунов С. А.....	85
Алигожина К. А.....	68	Литвинов И. В. ....	88
Аманбаева Д. Г. ....	69	Лохонин А. Г. ....	14
Артюхов А. И. ....	6	Мартынов П. С. ....	47
Баркус Г. В. ....	70	Матвиенко О. В. ....	67
Бекетова Е. А. ....	7	Мешалкин Ю. Е.....	86
Белялов С. С. ....	31	Мешков К. Н.....	87
Биктимиров Ш. Н. ....	32	Миняйло М. П. ....	15
Богдевич Ю. Р.....	44	Митряков А. С.....	88
Брагинский А. Л. ....	33	Мишин А. В. ....	48
Брюханов И. Д.....	34	Настобурский А. С. ....	49
Буковец А. А.....	71	Нестеров А. Ю.....	50
Вайсс Д. ....	72	Никитин П. Ю.....	89
Василькин Д. П.....	8	Никишин А. В.....	16
Волчок Е. П. ....	9	Овцын А. А.....	6
Гавришев А. А.....	35	Орлов А. С.....	90
Гореликова А. Е.....	73	Очиров О. О.....	17
Горн А. А. ....	10	Пивоваров А. А.....	51
Гришин М. А. ....	74	Погудалина С. В. ....	52
Дремов С. В. ....	75	Подольская И. Ю.....	53, 65
Егоров В. А.....	36	Пономаренко Р. А.....	54
Зыкова А. И. ....	37, 38	Попов В. А. ....	18
Игишева А.Л.....	76	Протасов И. И.....	55
Исмаилов К. К. ....	39	Пряжников М. И.....	79
Каприлевская В. С.....	40	Рамазанов Т. С.....	24
Карелин В. А. ....	77	Рейно В. В.....	67
Кириченко Д. П. ....	78	Решетова А. И.....	56
Кистерская М. С. ....	79	Роенко М. А.....	91
Клименко М. В. ....	80	Рыльцева К. Е. ....	57
Ковалев А. В.....	81	Рябов М. Н. ....	58
Колесников Я. А. ....	11	Сальников М. В. ....	19
Колосов Г. Л. ....	41	Саморокова Н. М.....	37, 38
Кононов Р. И.....	42	Самошкин Д. А.....	92
Корнев Э. В.....	43	Самцов Д. А.....	20
Костюшин К. В.....	44	Сандалов Е. С. ....	21
Коэмец Ю. А.....	82	Светоносов А. И. ....	22
Красницкий Е. А.....	83	Сибиряков Н. Е.....	59

Сидоров А. Д. ....	37, 38	Тырышкин М. И. ....	63
Скрипкин С. Г. ....	75	Ушкова М. Ю. ....	26
Соколова Е. О. ....	23	Филипенко М. А. ....	95
Спесивцев С. Е. ....	93	Художитков В. Э. ....	27
Тажен А. Б. ....	24	Чан Ван Туан ....	64
Тимофеев И. В. ....	60	Чухно В. И. ....	96
Тимофеев К. Ю. ....	29	Шарифуллин Б. Р. ....	53, 65
Ткачева А. С. ....	25	Шоколов А.Д. ....	28
Толкачев С. Н. ....	40	Юсупов Р. Р. ....	97
Толстогозов Р. В. ....	94	Ягодницына А. А. ....	81
Трубицына Л. П. ....	61	Янбикова Ю. Ф. ....	98
Турубаев Р. Р. ....	62	Яцких А. А. ....	66
Тхи Ми Хуэ ....	64		

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ФИЗИКА ПЛАЗМЫ.....</b>	<b>5</b>
Strakhova A. A., Grabovsky A. Yu.....	5
Артюхов А. И., Овцын А. А.....	6
Бекетова Е. А.....	7
Василькин Д. П. ....	8
Волчок Е. П. ....	9
Горн А. А.....	10
Колесников Я. А.....	11
Кузьмин Е. И. ....	12
Кузьмина Д. Л. ....	13
Лохонин А. Г.....	14
Миняйло М. П. ....	15
Никишин А. В. ....	16
Очиров О. О. ....	17
Попов В. А.....	18
Сальников М. В.....	19
Самцов Д. А. ....	20
Сандалов Е. С.....	21
Светоносков А. И.....	22
Соколова Е. О.....	23
Тажен А. Б., Рамазанов Т. С.....	24
Ткачева А. С.....	25
Ушкова М. Ю. ....	26
Художитков В. Э.....	27
Шоколов А.Д.....	28
<b>АЭРОФИЗИКА.....</b>	<b>29</b>
Акинин С. А., Тимофеев К. Ю.....	29
Алексеевко А. В.....	30
Белялов С. С.....	31
Биктимиров Ш. Н.....	32
Брагинский А. Л.....	33
Брюханов И. Д.....	34
Гавришев А. А.....	35
Егоров В. А.....	36
Зыкова А. И., Саморокова Н. М., Сидоров А. Д.....	37
Зыкова А. И., Саморокова Н. М., Сидоров А. Д.....	38
Исмаилов К. К.....	39
Каприлевская В. С., Толкачев С. Н.....	40
Колосов Г. Л.....	41
Кононов Р. И. ....	42
Корнев Э. В. ....	43

Костюшин К. В., Богдевич Ю. Р. ....	44
Кунгурцев П. В. ....	45
Лебедев А. С. ....	46
Мартынов П. С. ....	47
Мишин А. В. ....	48
Настобурский А. С. ....	49
Нестеров А. Ю. ....	50
Пивоваров А. А. ....	51
Погудалина С. В. ....	52
Подольская И. Ю., Шарифуллин Б. Р. ....	53
Пономаренко Р. А. ....	54
Протасов И. И. ....	55
Решетова А. И. ....	56
Рыльцева К. Е. ....	57
Рябов М. Н. ....	58
Сибиряков Н. Е. ....	59
Тимофеев И. В. ....	60
Трубицына Л. П. ....	61
Турубаев Р. Р. ....	62
Тырышкин М. И. ....	63
Чан Ван Туан, Тхи Ми Хуэ ....	64
Шарифуллин Б. Р., Подольская И. Ю. ....	65
Яцких А. А. ....	66
<b>ТЕПЛОФИЗИКА.....</b>	<b>67</b>
Агафонцев М. В., Матвиенко О. В. , Рейно В. В. ....	67
Алигожина К. А. ....	68
Аманбаева Д. Г. ....	69
Барткус Г. В. ....	70
Буковец А. А. ....	71
Вайсс Д. ....	72
Гореликова А. Е. ....	73
Гришин М. А. ....	74
Дремов С. В., Скрипкин С. Г. ....	75
Игишева А.Л. ....	76
Карелин В. А. ....	77
Кириченко Д. П. ....	78
Кистерская М. С., Пряжников М. И. ....	79
Клименко М. В. ....	80
Ковалев А. В., Ягодницына А. А. ....	81
Коэмец Ю. А. ....	82
Красницкий Е. А. ....	83
Крета А. С. ....	84

Лизунов С. А. ....	85
Мешалкин Ю. Е. ....	86
Мешков К. Н. ....	87
Митряков А. С., Литвинов И. В. ....	88
Никитин П. Ю. ....	89
Орлов А. С. ....	90
Роевко М. А. ....	91
Самошкин Д. А., Агажанов А. Ш. ....	92
Спесивцев С. Е. ....	93
Толстогозов Р. В. ....	94
Филипенко М. А. ....	95
Чухно В. И. ....	96
Юсупов Р. Р. ....	97
Янбикова Ю. Ф. ....	98
<b>АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ.....</b>	<b>99</b>
<b>ОГЛАВЛЕНИЕ .....</b>	<b>101</b>

МАТЕРИАЛЫ  
54-Й МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ  
СТУДЕНЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
МНСК–2016

ФИЗИКА СПЛОШНЫХ СРЕД

*Материалы конференции публикуются в авторской редакции*

---

Подписано в печать 31.03.2016

Офсетная печать

Заказ № \_\_\_\_\_

Формат 60x84/16

Уч.-изд. л. 4,2. Усл. печ. л. 5,6.

Тираж 90 экз.

---

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