

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МЕХАНИКИ
ИМ. А.Ю. ИШЛИНСКОГО РАН**

В.И. ПОЛЕЖАЕВ, В.В. САЗОНОВ

**МЕХАНИКА НЕВЕСОМОСТИ
И ГРАВИТАЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ
СИСТЕМЫ**

**Аннотации докладов
научно-исследовательского семинара**

Препринт № 898

Москва, 2009 г.

Введение

Подсекция 9.3 КНТС по механике невесомости и гравитационно-чувствительным системам была организована решением КНТС Роскосмоса и Совета по Космосу РАН в 1997 г. для рассмотрения результатов проведенных исследований, а также для экспертизы проектов космических экспериментов. Постоянно действующий межотраслевой семинар с таким же названием, являющийся ее рабочим органом и ведущий повседневную работу, был организован с самого начала работы подсекции и поддерживался активным участием представителей академических институтов – Учреждения Российской академии наук Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Института прикладной математики им. М. В. Келдыша, Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова и др., а также отраслевых институтов - ЦНИИМаш, Исследовательского центра им. М.В.Келдыша Роскосмоса и Конструкторского бюро РКК “Энергия”. В связи с 10-летием семинара по механике невесомости и гравитационно-чувствительным системам и одноименной подсекции 9.3 КНТС Роскосмоса 26 ноября 2007 г. проведено расширенное однодневное заседание семинара.

Во вступительном докладе руководителей семинара и подсекции 9.3 Д.М. Климова, В.И. Полежаева, В.В. Сазонова кратко изложены итоги деятельности семинара и подсекции, которые заняли свое место в российских и зарубежных исследованиях по микрогравитации. Их достижения легли в основу Российского симпозиума по механике невесомости и гравитационно-чувствительным системам, проведенного в 2000 г. в Москве, а также тематических подсекций на Международном (Чикаго, 2000 г.) и Российских (Пермь, 2001 г.; Нижний Новгород, 2006 г.) съездах по теоретической и прикладной механике. На юбилейном заседании семинара подведены итоги, и обсуждалось сегодняшнее состояние исследований, направленных на повышение эффективности использования космической техники для исследований в условиях микрогравитации. Материалы семинара – расширенные аннотации докладов, а также стенограмма дискуссий составляют главную часть этого препринта.

Помимо этого в препринте представлены аннотации других докладов, представлявшихся на семинаре в 2007-2008 г.г. Из них отметим обширные

доклады А.В. Зюзгина (управление, датчики, компьютерная лаборатория и др.) и Э.Е. Сона (задачи микро- и наногидродинамики). Доклад, аннотация которого завершает препринт, имеет традиционную направленность на изучение микрогравитационной среды, которая получила высокое развитие в последнем полете КА «Фотон». В приложении даны перечень всех докладов на семинаре по механике невесомости и гравитационно-чувствительным системам за 1997-2008 г.г., в том числе представлявшиеся на семинарах, объединенных с данным семинаром, а также адреса докладчиков.

В заключение отметим, что продвижение в 2008 г. в развертывании на Международной космической станции научно-исследовательских модулей «Колумбус» (ESA) и «Кибо» (JAXA), значительная часть которых состоит из оборудования для исследований гравитационно-чувствительных систем, придают особую значимость научно-координационной деятельности, которая велась семинаром и подсекцией в последнее десятилетие. Достижения участников семинара, представленные в концентрированном виде в этом препринте, составляют основу ряда интересных предложений, в особенности по мониторингу микрогравитационной среды на МКС, который могла бы выполнять специальная международная рабочая группа. Здесь у российских ученых есть значительный задел. Вместе с тем, подводя итог проделанной работы за прошедшее десятилетие, нельзя не отметить значительное сужение фронта работ, ведущихся в России в высокотехнологичной и междисциплинарной области исследований в условиях микрогравитации при наличии в России космической техники и оставшегося научного потенциала. Это обстоятельство требует существенных перемен в сфере управленческого аппарата и инвестиций.

Выпуск препринта поддержан грантом 09-08-00230 Российского фонда фундаментальных исследований и Ведущей научной школой 2496.2008.8 и посвящается 10-летию работы подсекции 9.3 Роскосмоса по механике невесомости и гравитационно-чувствительным системам и 75-летию ее председателя академика Д.М. Климова. Авторы препринта благодарят директора Учреждения Российской академии наук Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН академика Ф.Л. Черноушко за поддержку инициатив участников семинара и А.О. Руденко за помощь в оформлении препринта.

Сопредседатели семинара

В.И. Полежаев

В.В. Сазонов

*Посвящается
10-летию работы подсекции 9.3 Роскосмоса
по механике невесомости и гравитационно-чувствительным системам и
75-летию ее председателя академика Д.М. Климова*

**Аннотации докладов участников
научно-исследовательского семинара**

**«МЕХАНИКА НЕВЕСОМОСТИ И ГРАВИТАЦИОННО-
ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ»**

под руководством

В.И. ПОЛЕЖАЕВА и В.В. САЗОНОВА

**Расширенное однодневное заседание семинара 26 ноября 2007 г.,
посвященное 10-летию семинара «Механика невесомости и
гравитационно-чувствительные системы» ИПМех РАН и
подсекции 9.3 КНТС Роскосмоса**

- 1) 26. XI. 2007 г. Д.М. Климов, В.И. Полежаев (ИПМех РАН),
В.В. Сазонов (ИПМат им. М.В. Келдыша РАН)
«О деятельности подсекции 9.3 КНТС и Семинара по механике невесомости и гравитационно-чувствительным системам в 1997-2007 г.г.»

Подсекция 9.3 занимается проблемой эффективного использования состояния невесомости в космическом полете в составе секции 9 Координационного научно-технического совета Роскосмоса. В становлении этого актуального направления космических исследований значительная заслуга принадлежит выдающимся советским ученым - академиком А. Ю. Ишлинскому, основателю Института проблем механики РАН и руководителю первых советских космических программ В.С.Авдуревскому.

Основными направлениями деятельности подсекции являются:

1. Постановки задач исследования гравитационно-чувствительных процессов и систем в космическом полете.
2. Проблемы создания и эксплуатации космических аппаратов для научных исследований. Методы и приборы для измерения остаточных микроускорений. Обработка данных измерений бортовых датчиков с целью выделения квазистатической компоненты микроускорения. Виброзащита полезной нагрузки.
3. Разработка математических моделей и программного обеспечения, использующих реальные данные о микрогравитационной обстановке для анализа гравитационно-чувствительных систем и процессов. Послеполетный анализ экспериментов, выполненных в условиях микрогравитации.
4. Исследование физических механизмов гравитационной чувствительности. Использование гравитационно-чувствительных процессов для мониторинга микрогравитационной среды при проведении космических экспериментов.
5. Земные альтернативы условиям микрогравитации.

Подсекция проводит экспертизу предлагаемых проектов космических экспериментов, рассматривает результаты проведенных исследований. С

самого начала работы подсекции был организован постоянно действующий межотраслевой семинар с таким же названием, являющийся ее рабочим органом и ведущий повседневную работу. Основу подсекции и семинара составили представители академических институтов – Учреждения Российской академии наук Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Института прикладной математики им. М.В.Келдыша, Института металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова и др., а также отраслевых институтов - ЦНИИМаш, Исследовательского центра им. М.В.Келдыша Роскосмоса и Конструкторского бюро РКК “Энергия”.

Следуя этой общей программе, участниками семинара выполнен значительный объем работ по изучению микрогравитационной обстановки на российских космических аппаратах, установлены рабочие контакты с руководителями отечественных проектов, ведущихся в РКК «Энергия» – Центре управления полетами в г. Королеве, а также руководителями американских проектов PIMS (Principal Investigator’s Microgravity Service), MIPТ (Microgravity Integrated Performance Team), Mg-Mg, MEIT (Microgravity Environment Interpretation Tutorial) в Космических центрах г.Кливленда и г. Хьюстона. Свои результаты на семинаре докладывали представители НАСА, Французского, Канадского космических агентств, китайские ученые. Проведено более 200 заседаний семинара, в том числе несколько объединенных семинаров совместно с семинаром по численному моделированию процессов тепло- и массообмена, а также с другими семинарами Института проблем механики.

В рамках семинара за это время подготовлены и успешно прошли защиту в ИПМех РАН и ИПМат РАН три кандидатских диссертации. Семинар дал путевку в жизнь ряду кандидатов и докторов наук из Перми, Ростова, Санкт-Петербурга, Москвы, оказал существенное влияние на ряд экспериментов, проводимых по линии КНТС. Рассмотрены и поддержаны новые проекты «Дакон-М», «КРИТ», «Репер-Калибр», «Кулоновский кристалл», ряд проектов Украинского космического агентства и др. Основные результаты деятельности семинара и подсекции изложены в пяти препринтах ИПМех РАН, сборнике трудов 7-го симпозиума, а также нескольких специальных выпусках журнала “Космические исследования” (2001-2004 г.г.). Одним из научных достижений является разработка связанных между собой задач теоретической механики и гидромеханики, в которой к этому времени преодолен трехмерный барьер в математическом

моделировании. Это позволило продвинуться в анализе и интерпретации данных на станции «Мир» и дать обоснование новым экспериментам на МКС. На семинаре систематически рассматриваются новые предложения по постановке космических экспериментов. В 2007 г. представлены доклады с предложениями по постановке космических экспериментов с фазовыми переходами плавления/кристаллизации в эвтектических сплавах, по конвективным процессам в ферромагнитных жидкостях, вибрационным воздействиям на двухслойные системы в условиях невесомости. Обсуждались вопросы обучения элементарным механизмам конвекции, разработки практикумов по моделированию с помощью современных вычислительных комплексов и др.

Подсекция 9.3 и семинар заняли свое место в российских и зарубежных исследованиях по микрогравитации, их достижения легли в основу VII-го Российского симпозиума по механике невесомости и гравитационно-чувствительным системам (Москва, 2000 г.), а также тематических подсекций на Международном (Чикаго, 2000 г.) и Российских (Пермь, 2001 г., Нижний Новгород, 2006 г.) съездах по теоретической и прикладной механике.

Цель расширенного (юбилейного) заседания семинара – закрепить достигнутое, подвести итоги, обсудить сегодняшнее состояние и дать рекомендации по повышению эффективности использования космической техники для исследований в условиях микрогравитации. Отметим, что рассматриваемое направление активно развивается в мире, ему были посвящены недавние научные мероприятия: конференция «Космическое материаловедение» (сентябрь 2007 г., Калуга), «Interdisciplinary Transport Phenomena» (октябрь 2007 г., Банско, Болгария), «International Symposium on Physical Sciences» (октябрь 2007 г., Нара, Япония), проведенный под эгидой «International Microgravity Strategy Planning Group» (IMSPG), где участвовали некоторые докладчики юбилейного семинара, прибывшие с передового края развития этих наук.

Данное заседание семинара проводится при поддержке ведущей научной школы, которую возглавляет председатель КНТС академик Н.А.Анфимов.

Основные публикации

1. Полежаев В.И., Сазонов В.В. Механика невесомости и гравитационно-чувствительные системы. Аннотации докладов на научно-исследовательском семинаре. ИПМех РАН, Препринты № 622, 1998, 36 с.; № 653, 1999, 40 с.; № 677, 2001, 58 с., № 708, 2002, 47 с.; № 751, 2004, 54 с.

2. Сборник трудов VII Российского симпозиума "Механика невесомости. Итоги и перспективы фундаментальных исследований гравитационно-чувствительных систем" (11-14 апреля 2000 г.). М.: ИПМех РАН, 2001, с. 559.

3. Космические исследования, т. 39, № 2, 2001, с. 240 (специальный выпуск, под ред. В.С. Авдуевского, В.И. Полежаева, В.В. Сазонова). О VII-ом Российском симпозиуме по механике невесомости и гравитационно-чувствительным системам в Москве, 2000 г.

4. Космические исследования, т. 39, №4, 2001 (специальный выпуск, посвященный проблематике семинара).

5. Космические исследования, т. 42, № 2, 2004 (специальный выпуск, посвященный проблематике семинара).

6. Полежаев В.И., Глушко Г.С. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. Аннотации докладов научно-исследовательского семинара по численному моделированию процессов тепло- и массообмена. Препринт ИПМех РАН № 809. 2006, 99 с.

2) 26. XI. 2007 г. В.В. Сазонов (ИПМат им. М.В. Келдыша РАН)

«Остаточные микроускорения на российских космических аппаратах»

Приводится ретроспективный обзор результатов измерений и расчетов остаточных микроускорений на российских космических аппаратах за последние годы. Рассмотрены Орбитальная станция «Мир», Международная космическая станция и спутники «Фотон-11», «Фотон-12», «Фотон М-2» и «Фотон М-3». Микроускорения измерялись с помощью акселерометров ИМУ-128 и ВМ-09 (Россия), микроакселерометров ВЕТА (Франция), SAMS и MAMS (США), QSAM (ФРГ), TAS3 (Бельгия), а также находились расчетным путем – по результатам аппроксимации фактического вращательного и поступательного движений перечисленных космических аппаратов. Описывается совместная работа с отечественными и зарубежными партнерами в этой области. Обсуждается возможность проведения

экспериментов с гравитационно-чувствительными системами на перспективных космических аппаратах. Предлагаются режимы движения космического аппарата, обеспечивающие минимальные остаточные ускорения.



На утреннем заседании 26.11.2007. Выступает В.В.Сазонов, справа налево сидят: Д.М. Климов, В.И. Полежаев, А.А. Горбунов, О.А.Бессонов, В.Л. Левтов, М.З. Мухоян, В.С. Земсков, М.Р. Раухман, В.П. Осипов, Т.Г.Елизарова, О.Ф. Петров, В.М. Емельянов

Из стенограммы выступления.

В начале своего выступления я скажу несколько слов об истории нашего семинара. Влияние остаточных микроускорений на некоторые космические эксперименты по физике жидкости и росту кристаллов было осознано через 10 – 15 лет после начала пилотируемых полетов на долговременных орбитальных станциях. Сейчас мы называем такие эксперименты гравитационно-чувствительными. В начале 90-х годов в НАСА было создано подразделение, которое называлось «Microgravity

Science and Applications Division» (MSAD). Возможно, оно функционировало и раньше, но мы познакомились с его деятельностью именно в то время. В рамках MSAD функционировала группа, называвшаяся «Principal Investigator Microgravity services» (PIMS). Эта группа занималась измерениями и исследованиями остаточных микроускорений на шаттлах и обеспечивала экспериментаторов информацией о микроускорениях в местах установки их приборов. Кроме того, PIMS проводил большую разъяснительную работу о природе микроускорений, их влиянии на космические эксперименты, показывал, как надо пользоваться данными измерений, и т. п.

Вадим Иванович Полежаев очень хотел создать такую группу и в России (кстати, о роли микроускорений я впервые услышал от него еще в 1981 г., когда он комментировал мой доклад на съезде механиков в Алма-Ате). В 1994 г. в рамках Московского аэрокосмического конгресса была организована и очень успешно проведена секция по микрогравитации. Приехало много американцев, в частности, руководители MSAD и PIMS. С ними были установлены контакты, и мы получили исчерпывающую информацию об организации работ в PIMS. Надо сказать, что американцы пропагандировали свою деятельность по сертификации «микрогравитационной обстановки» (так дословно переводится их термин) на космических аппаратах, были доброжелательны в контактах, и мы начали активно взаимодействовать с ними по этому вопросу. Сначала мы получили данные о микроускорениях на шаттлах, затем на станции «Мир» был установлен американский акселерометр SAMS, и мы начали получать информацию оттуда. На «Мире» был еще французский акселерометр, мы начали сопоставлять данные измерений разных приборов, рассчитывать квазистатические микроускорения по телеметрической информации об ориентации станции, готовить данные для математического моделирования космических экспериментов и т. д. Началась и продолжается по сей день работа, в которой в основном участвуют три организации: РКК «Энергия», ИПМ им. Келдыша РАН и ИПМех РАН. Несколько энтузиастов из этих организаций образуют российский аналог PIMS. Эта деятельность не является неформальной. Она направляется подсекцией 9.3 КНТС и семинаром, на котором мы сегодня присутствуем.

Первой практической работой российского аналога PIMS было обеспечение экспериментов на французской установке «Alice» в 1995 г. на станции «Мир». Микроускорения во время этих экспериментов измерялись

встроенным акселерометром установки «Alice», акселерометром SAMS и рассчитывались по телеметрической информации об ориентации станции. Обработка данных этих экспериментов продолжается и сегодня. Затем примерно по той же схеме были обеспечены эксперименты на установке «Дакон» (станция «Мир», 1998-2000 г.г.) и исследование микроускорений на Международной космической станции (МКС).

На МКС установлены два американских акселерометра SAMS и MAMS. Первый акселерометр измеряет высокочастотную составляющую микроускорения, второй – низкочастотную. Измерения ранее проводились непрерывно, их данные выкладывались в Интернет. В 2002 г. мы принимали группу PIMS в ИПМех РАН. На этом семинаре представители PIMS сделали ряд докладов, посетили ЦУП. Однако в 2004 г. после трагедии с шаттлом «Колумбия», эта группа была расформирована. Во время работ по анализу микроускорений на МКС состоялись наши последние контакты с ней. В настоящее время измерения микроускорений на МКС американскими акселерометрами выполняются эпизодически.

Несмотря на приостановку работ на МКС, наша деятельность по изучению микроускорений не прекратилась. Российская «микрогравитационная наука», к счастью, ориентирована не только на МКС. Есть еще спутники «Фотон» и корабли «Прогресс». Мы пока занимаемся ими.

Дискуссия.

Вопрос (Д.М. Климов). Каков уровень остаточных микроускорений? Какие частоты в них преобладают?

Ответ. Диапазон частот и амплитуд очень широк, но не все они влияют на результаты экспериментов. Вслед за мной будет выступать проф. В.С. Земсков, который подробнее расскажет, какие из них существенно влияют на качество кристаллов, выращиваемых в условиях микрогравитации.

Вопрос (Д.М. Климов). Но, все же, нельзя ли конкретизировать амплитуды и частоты микроускорений?

Ответ. Они существенно зависят от космического аппарата и условий его полета. Например, на аппаратах «Фотон» наиболее значимы частоты несколько единиц на 10^{-3} Гц и амплитуды 10^{-5} , 10^{-6} g/g₀. Надо сказать, что эти частоты чувствует кристалл, и сейчас выступит В.С.Земсков, который об этом расскажет.

Комментарий (В.И. Полежаев). Следует обратить внимание на то, что информация о микроускорениях нужна не только для роста кристаллов (хотя здесь к ней предъявляются самые высокие требования). Она нужна также биологам, у которых в работе находится много гравитационно-чувствительных систем, имеющих рецепторы, реагирующие на микрогравитационную среду. Такая информация нужна и для проектантов космических аппаратов. Этими вопросами занимаются разные секции КНТС. Со стороны специалистов предъявляются разнообразные, зачастую противоречивые требования к уровню микроускорений на космических аппаратах. Если для роста кристаллов и исследования физических свойств материалов в невесомости нужен преимущественно диффузионный режим, т.е. невесомость, то для технических систем, например, баков длительного хранения низкотемпературных компонентов топлива, наоборот, требуется перемешивание. Здесь интенсивные микроускорения даже полезны, можно даже управлять перемешиванием в баках, подавая команду на останов или закрутку вращения топливного бака (точнее, космического аппарата) в полете. Однако при управлении космическим аппаратом решается своя задача, как правило, не имеющая ничего общего с вышеупомянутыми требованиями. Чтобы все это совместить, представляется очень важным иметь тесные контакты с ЦУП, и я хотел бы отметить, что такие связи были установлены в рамках этого семинара и подсекции 9.3.

К сожалению, у нас в России вопрос с измерениями микроускорений продвинут значительно меньше, чем в Западных странах. Мы не можем уговорить коллег из РКК «Энергия» и других организаций поставить на борт наши отечественные системы, но мы получаем достаточно большую информацию от наших зарубежных коллег и в какой то степени компенсируем это более интенсивной работой над расчетами микроускорений и анализом измерительной информации. Наши коллеги работают интенсивно, и это направление в рамках подсекции и семинара является наиболее важным. Далее в докладах будет показано, как мы используем эту информацию, и какие идеи еще имеются по мониторингу микрогравитационной среды с помощью приборов, измеряющих физические процессы, например конвекцию.

- 3) 26. XI. 2007 г. В.С. Земсков, М.Р. Раухман (Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН), В.П. Шалимов (ЦНИИМаш) «Закономерности в процессах сегрегации при выращивании кристаллов в условиях микрогравитации и их возможное использование для совершенствования земных технологий»

Рассмотрены результаты экспериментов по выращиванию монокристаллов антимонида индия, легированного теллуром (InSb:Te), методом бестигельной зонной плавки (БЗП) на КА «Фотон-3» и методом Бриджмена без касания стенки ампулы на КА «Фотон-М» № 2. Целью экспериментов было исследование возможности получения однородных на микроуровне монокристаллов. Показано, что методы БЗП и Бриджмена позволяют выращивать монокристаллические слитки InSb:Te. Однако образцы имеют сложную структуру слоистой примесной микронеоднородности, а также примесные макронеоднородности как по длине кристаллов, так и по диаметру. Выполнено сопоставление частот периодичностей в характере слоистого распределения легирующей примеси по длине монокристаллов с частотами изменения квазипостоянных микроускорений, действовавших на расплав в полёте КА типа «Фотон» [1-8]. Установлено практически полное совпадение этих частот. Выращиваемые монокристаллы «записывают» в виде сложной картины слоистых неоднородностей воздействия внешних сил на расплав. Выполнен анализ квазипостоянных микроускорений гравитационной и инерционной природы, действовавших на расплав при выращивании монокристаллов. Эти ускорения изменяют свою величину и/или направление с частотой не более чем $\sim 10^{-3}$ Гц, величина их составляет от 10^{-5} до 10^{-7} долей от величины земной силы тяжести. Вектор этих микроускорений, который является переменным и по величине и по направлению, не совпадает с направлением кристаллизации расплавов при выращивании монокристаллов. Несовпадение суммарного вектора с направлением кристаллизации следует рассматривать в качестве одной из важнейших причин, обусловившей появление в исследованных монокристаллах слоистой примесной микронеоднородности, а также асимметричной макронеоднородности кристаллов по диаметру.

Эти результаты не являются неожиданными. Макронеоднородности такого типа были обнаружены уже в первых экспериментах по выращиванию кристаллов в условиях полёта космических аппаратов,

например, в экспериментах по программе «Союз» - «Аполлон» [9]. В результате гидродинамических исследований [10] установлено существование ранее неизвестного гидродинамического эффекта, проявляющегося в образовании концентрационной неоднородности (ΔC) в объеме расплава. Это означает, что в расплаве в зависимости от интенсивности течения в потоке, омывающем фронт кристаллизации, существуют градиенты концентраций не только вдоль, но и поперёк направления роста кристалла. Этот эффект концентрационной неоднородности в расплаве является гидродинамическим аналогом хорошо известного явления температурной неоднородности в расплаве, проявляющегося в том, что в потоках существуют температурные неоднородности (ΔT) и, соответственно, градиенты температуры не только вдоль, но и поперёк направления роста кристалла. На рис. 1 представлена схема, отражающая соотношение эффектов концентрационной и температурной неоднородностей в расплаве полупроводников в зависимости от интенсивности конвекции, характеризуемой числом Рэлея Ra . Эта схема составлена по результатам, приведенным в [10]. В этих работах расчёты выполнялись для двумерной задачи прямоугольной области расплава (модель метода Бриджмена) с градиентами концентрации и температуры вдоль направления роста кристалла в предположении только гравитационной конвекции. На рисунке, обозначения (ΔC) и ($\Delta \theta$) - это усреднённые поперечные к направлению роста кристалла разности безразмерных значений концентрации и температуры в потоке. Из рисунка видно, что зависимости ΔC и $\Delta \theta$ от Ra имеют максимумы в разных диапазонах чисел Ra . Концентрационное расслоение проявляется при сравнительно слабых ламинарных течениях ($Ra \sim 10^2-10^4$), а температурное расслоение - при течениях, характеризующихся величинами $Ra \sim 10^2-10^6$ и выше. Обращает на себя внимание интервал значений $Ra \sim 10^2-10^4$. В этом интервале эффекты проявляются одновременно. Отметим также, что указанный интервал интенсивностей конвективных течений характерен для процессов выращивания монокристаллов в производственных условиях на Земле.

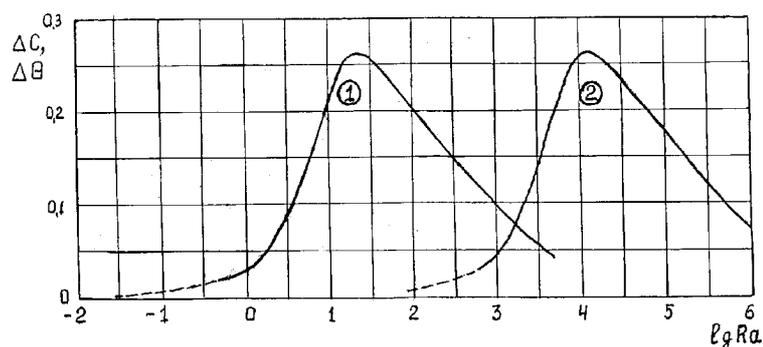


Рис. 1. Схема, отражающая соотношение концентрационной ΔC (1) и температурной $\Delta \theta$ (2) неоднородностей в расплаве

Другим важным результатом космических экспериментов является обнаружение высокой чувствительности симметрии конвективных течений расплава относительно продольной оси выращиваемого монокристалла к чрезвычайно малой по величине ортогональной к этой оси составляющей вектора остаточных микроускорений. Нарушение симметрии конвективных потоков влечёт за собой асимметрию относительно продольной оси монокристалла не только температурного поля в расплаве, но и концентрационного поля. В результате при выращивании в космическом полете монокристалл «записывает» в виде примесных полос роста все изменения величины и направления вектора остаточных микроускорений из-за асимметричности температурных и примесных полей. Тот же эффект должен наблюдаться и в наземных условиях при вращении выращиваемого кристалла.

Установленные новые фундаментальные закономерности процесса тепломассопереноса при направленной кристаллизации, как нам представляется, следует учитывать при разработке установок для выращивания монокристаллов и их эксплуатации в земных условиях с целью уменьшения полосчатой микронеоднородности в монокристаллах.

Совершенство конструкции установок для выращивания монокристаллов, качество и точность изготовления, как отдельных узлов, так и установок в целом во многом определяют качество получаемых на них монокристаллов. Сказанное относится и к установкам для выращивания методом Чохральского. В современных конструкциях промышленных установок аккумулирован огромный объём научных и практических знаний о росте и условиях выращивания монокристаллов, накопленный как в научных лабораториях, так и в производственных условиях. Однако

до настоящего времени при разработке установок и условий выращивания монокристаллов внимание главным образом обращается на оптимизацию температурных, тепловых условий процесса выращивания без учёта последствий проявления концентрационного расслоения.

Известно, что причиной возникновения слоистой неоднородности является неустановившееся состояние процесса роста монокристалла, когда температура и/или состав расплава у фронта кристаллизации непрерывно изменяются. Это происходит из-за того, что гидродинамические потоки и тепломассоперенос в расплаве непостоянны. Это непостоянство возникает как из-за сложного взаимодействия гравитационной, капиллярной и принудительной видов конвекции, так и из-за аппаратурных несовершенств установок.

К настоящему времени выявлены, казалось бы, практически все причинно-следственные связи между аппаратурными несовершенствами установок и слоистой неоднородностью, которая обусловлена этими несовершенствами. Аппаратурные причины стараются свести к минимуму при создании установок. Непостоянство гидродинамических потоков частично поддаётся регулированию, например, с помощью воздействия на расплав постоянным коаксиальным магнитным полем. Однако, несмотря на значительный прогресс в технике выращивания монокристаллов, проблема однородности монокристаллов всё ещё существует. По-видимому, не все объективно существующие закономерности тепломассопереноса при направленной кристаллизации расплавов учитываются при создании аппаратуры для выращивания монокристаллов. Этот вопрос уже рассматривался, например, в работе [11].

Чтобы исключить или значительно уменьшить микронеоднородность, обусловленную вращением монокристалла, при создании установок для выращивания по Чохральскому и при их эксплуатации необходимо выполнять требования не только по соосности узлов установки, но и по допустимым пределам отклонения общей продольной оси установки и выращиваемого монокристалла от местной вертикали. Это требует соответствующих гидродинамических расчетов, экспериментальных исследований и конструкторских разработок, что в конечном итоге позволит повысить качество выращиваемых кристаллов и даст экономическую выгоду. Задел для таких работ имеется. Необходима поддержка этого направления работ как на государственном уровне, так и инвестициями со стороны заинтересованных организаций и предприятий.

Литература

1. Земсков В.С., Раухман М.Р., Шалимов В.П. и др. Влияние расположения ростовых установок на борту КА на микрогравитационные условия проведения экспериментов (на примере БЗП InSb:Te на ИСЗ «Фотон-3») // Космические исследования. 2004. Т. 42. № 2. С. 144-154.

2. Богуславский А.А., Сазонов В.В., Соколов С.М., Земсков В.С., Раухман М.Р., Шалимов В.П. О влиянии микроускорений на распределение примеси в кристаллах InSb:Te, выращенных в орбитальном полете методом бестигельной зонной плавки // Космические исследования, 2004. Т.42. №2. С. 155-161.

3. Barmin I.V., Egorov A.V., Raukhman M.R., Sazonov V.V., Senchenkov A.S., Shalimov V.P., Zemskov V.S. Effects of variable microaccelerations in distribution of impurity inhomogeneities in the InSb:Te single crystals grown by crucibleless floating zone melting on the “Foton” satellite // 55th International Astronautical Congress. Vancouver, Canada, October 4-8, 2004. Paper IAC-04-IAF-J.3.03. CD publication, Final Papers, ZARM, 2004.

4. Земсков В.С., Раухман М.Р., Шалимов В.П., Нихезина И.Ю., Сенченков А.С., Слепцова И.В., Царицына О.И., Волошин А.Е., Сазонов В.В., Подурец К.М., Погорелый Д.К. Структура и распределение примеси в кристаллах InSb:Te, выращенных методом Бриджмена по программе полета ИСЗ «Фотон-М» №2 // Доклад на XII Национальной конференции по росту кристаллов НКРК-2006, Москва, ИКРАН, 23-27 октября 2006 г. Тезисы докладов. ИКРАН, 2006. С. 188.

5. Senchenkov A.S., Barmin I.V., Egorov A.V., Slepstova I.V., Zemskov V.S., Raukhman M.R., Shalimov V.P., Nikhezina I.J., Voloshin A.E. Experiment on indium antimonide crystal growth by detached Bridgman on board the Foton-M2 spacecraft (preliminary results) // 57th International Aeronautical Congress, Valencia, Spain, 02-06 October, 2006. Paper IAC-06-A2.3.04. DVD publication, Final Papers, ZARM, 2006.

6. Земсков В.С., Раухман М.Р., Шалимов В.П., Егоров А.В., Сенченков А.С., Сазонов В.В. Экспериментальные исследования влияния остаточных микроускорений на неоднородности состава монокристаллов полупроводников, выращиваемых направленной кристаллизацией расплавов на борту космических аппаратов // Доклад на научно-технической конференции ЦНИИМаш, 28 февраля 2007 г. Космонавтика и ракетостроение, 2007, № 4 (49), с. 18-25.

7. Земсков В.С., Раухман М.Р., Шалимов В.П., Нихезина И.Ю., Бармин И.В., Егоров А.В., Сенченков А.С., Волошин А.Е., Сазонов В.В. Итоги экспериментов по программе полета КА «Фотон-М» №2 по выращиванию кристаллов InSb:Te бесконтактным методом Бриджмена // Доклад на Российском симпозиуме «Космическое материаловедение-2007», Калуга, 10-13 сентября 2007 г. Тезисы докладов (имеется также CD-версия), НИЦ КМ ИКРАН, Калуга, 2007. С. 20.

8. Земсков В.С., Раухман М.Р., Шалимов В.П., Бармин И.В., Егоров А.В., Сенченков А.С., Сазонов В.В. Остаточные микроускорения на КА типа «Фотон» и неоднородности распределения примеси в монокристаллах InSb:Te, выращенных направленной кристаллизацией расплавов // Доклад на Российском симпозиуме «Космическое материаловедение-2007», Калуга, 10-13 сентября 2007 г. Тезисы докладов (имеется также CD-версия), НИЦ КМ ИКРАН, Калуга, 2007. С. 33.

9. Плавление, кристаллизация и фазообразование в невесомости. Авторы: Иванов Л.И., Земсков В.С., Кубасов В.Н., Пименов В.И., Белокурова И.Н., Гуров К.Н., Демина Е.В., Титков А.Н., Шульпина И.Л. М.: Наука, 1979. 256 с.

10. Полежаев В.И. и др. Конвективные процессы в невесомости. М.: Наука, 1991. 240 с.

11. Земсков В.С., Раухман М.Р., Шалимов В.П., Гончаров В.А. Проблемы неоднородностей в кристаллах, выращенных в различных гравитационных условиях // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2004. № 6. С. 13-19.

Дискуссия.

Вопрос (Д.М. Климов). Какие все же должны быть условия для выращивания качественных, удовлетворяющих всем требованиям кристаллов?

Ответ. Эти условия достаточно жесткие, то есть необходимо обеспечить отсутствие возмущений, то есть диффузионный режим роста кристаллов, вместе с тем эти кристаллы нами используются как эталонные, потому что для промышленности они слишком дороги.

Комментарий (В.И. Полежаев). То, что сказал Виктор Сергеевич, можно дополнить еще экспериментами по выращиванию арсенида галлия, которые проводил космонавт А.А. Серебров. Было показано, что условия невесомости на станции «Мир» достаточны для устранения колебаний, вызывающих полосчатую неоднородность арсенида галлия.

С тех пор прошло более 15 лет, и за это время в ИПМех проведена большая работа по развитию трехмерных математических моделей метода Чохральского. Наши расчеты по модели метода Чохральского, опирающиеся на данные наземных экспериментов В.Г. Косушкина по выращиванию арсенида галлия также показывают, что при выращивании монокристаллов диаметром до 100 мм, условий пониженной гравитации $g/g_0 = 10^{-2}$ достаточно. Но у В. С. Земского в экспериментах другое – примесная неоднородность по диаметру кристалла, и ее устранить в невесомости оказалось значительно труднее. Это следует иметь в виду. По-видимому, не все понимают, что при постановке экспериментов по росту кристаллов в невесомости, необходимо отчетливо представлять те характеристики, которые мы хотим улучшить, знать гравитационную чувствительность этих характеристик. Только тогда можно ответить на вопрос: какие условия необходимы для улучшения характеристик монокристаллов в космическом полете по сравнению с земными условиями.

Таким образом, сейчас уже имеется математический аппарат для интерпретации и анализа экспериментов и опыт такого анализа экспериментов, выполненного за несколько десятков лет разными коллективами у нас и за рубежом. Такую работу можно поставить значительно лучше, чем было раньше, в особенности при прогнозировании результатов планируемых экспериментов. В действительности Виктор Сергеевич открыл одну из важнейших закономерностей высокой гравитационной чувствительности примесной неоднородности отдельных видов полупроводниковых кристаллов, а именно германия с примесью кремния и сурьмы, антимонида индия и др. Однако, номенклатура кристаллов чрезвычайно разнообразна, имеются тройные соединения, разнообразные технологические приемы на Земле, которые позволяют получать материалы, но потребности в усовершенствовании технологии все же имеются, поэтому такие страны, как, например, Япония, которые имеют развитую технологическую базу для получения материалов электронной техники, продолжают попытки постановки технологических экспериментов в условиях космического полета, направленные на улучшение земных технологий. Принципиальные возможности здесь имеются, и они лежат в области контролируемости условий космического полета, в тщательной аппаратной базе, земной и космической технологии, применении методов адекватных математических моделей.

Все это требует достаточно большого времени. Поэтому в ряде случаев эмпирический путь, связанный с постановкой новых экспериментов по выращиванию сложных соединений, может быть эффективен, если учесть сроки и конкурентную борьбу тех компаний, которые занимаются получением коммерчески выгодных материалов.

- 4) 26. XI. 2007 г. В.Е. Фортов, О.Ф. Петров (Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва)
«Плазменные кристаллы и жидкости на Земле и в Космосе: результаты исследований»

Пылевая плазма представляет собой частично ионизованный газ, который содержит отрицательно или положительно заряженные частицы микронных размеров. Такие частицы приобретают в плазме значительный отрицательный заряд ($\sim 10^3$ - $10^5 e$) и могут формировать квазистационарные плазменно-пылевые структуры, подобные жидкости или твердому телу. На пылевую плазму оказывает влияние сила тяжести, которая, в зависимости от размеров твердых частиц, может доминировать. Такое условие выполняется для частиц с размерами, превышающими 1 мкм. В условиях микрогравитации начинают играть роль более слабые силы, и могут наблюдаться новые эффекты, недостижимые на Земле.

В данной работе представлены результаты исследований транспортных процессов, таких как диффузия макрочастиц и образование пылевых вихрей в сильнонеидеальной плазме тлеющего разряда постоянного тока и в.ч. разряда. Измерены парные корреляционные функции, спектры скоростей и коэффициенты диффузии макрочастиц. На основе экспериментальных результатов были определены концентрация и кинетическая температура частиц в областях пылевых структур, в которых отсутствует регулярное движение пылевых частиц.

Представлены результаты экспериментальных исследований диффузии пылевых частиц при их фотоэмиссионной зарядке в условиях микрогравитации. Эти данные получены при исследованиях пылевой плазмы, индуцированной солнечным излучением. Показано, что под действием интенсивного солнечного излучения частицы микронных размеров могут приобретать значительный положительный заряд. Были выполнены комплексные измерения распределений скоростей, температур, коэффициента трения и коэффициента диффузии макрочастиц в пылевой

плазме. Изучаемая пылевая система представляла собой слабокоррелированную жидкостную структуру при $\Gamma \sim 40$. В экспериментах в условиях микрогравитации также исследовалось образование упорядоченных структур в пылевой плазме тлеющего разряда постоянного тока. Полученные парные корреляционные функции, с первым максимумом при 700 мкм, показали существование ближнего порядка.

В экспериментах с пылевой плазмой высокочастотного разряда обнаружено формирование трехмерных упорядоченных структур сильнозаряженных частиц микронного размера с большим параметром неидеальности с гранецентрированной и объемно-центрированной решетками, обнаружены нелинейные волны плотности пылевой компоненты, обнаружено существование областей с конвективным движением заряженных макрочастиц в плазменной жидкости («плазменно-пылевые вихри»).

Представлены результаты использования метода интегральных уравнений в теории жидкости для нахождения из экспериментально измеренных парных корреляционных функций заряда, радиуса экранировки и потенциала взаимодействия пылевых частиц в слабокоррелированной структуре.



Утреннее заседание 26.11. 2007 г. Выступает О.Ф. Петров

Дискуссия.

Вопрос. В предшествующих экспериментах выяснено, что граничные условия в невесомости влияют очень сильно, и их нужно контролировать. Насколько велико это влияние в ваших случаях при выращивании плазменных кристаллов и как обеспечиваются эти граничные условия?

Ответ. В наших экспериментах роль этих граничных условий играют электромагнитные поля. В действительности мы обеспечиваем условия кристаллизации пылевой плазмы в некоторой центральной области электроразрядной камеры с помощью полей.

Вопрос. Теперь следующий вопрос об условиях микрогравитации, требуемых в ваших экспериментах.

Насколько было видно из доклада, микроускорения $10^{-3} - 10^{-4} g/g_0$, вам, по-видимому, достаточны на этом этапе работ. Вопрос состоит в том, не получали ли вы каких либо побочных эффектов, когда проводили эксперименты в таких условиях?

Ответ. Да, если микроускорение более чем 10^{-2} , то мы наблюдаем побочные эффекты.

Вопрос. С чем это связано?

Ответ. Если микроускорение больше, чем 10^{-2} , то система ведет себя довольно странно, не упорядоченно. Это интересные вопросы и требования к поддержанию микроускорений хотелось бы более точно знать в количественной форме.

Д.М. Климов. Теперь мы должны обсудить эксперимент «Дакон», и мне кажется, нужно начать с доклада по математическому моделированию, чтобы были более ясны цели и задачи такого эксперимента. Важно поставить задачу.

5) 26. XI. 2007 г. С.А. Никитин, В.И. Полежаев (ИПМех РАН)

«Математическое моделирование конвекции и теплопереноса в датчике "Дакон-М"»

Датчик конвекции представляет собой прибор, который регистрирует изменения поля температуры в замкнутом объеме при изменении интенсивности тепловой конвекции, вызванной нестационарным, неоднородным полем микроускорений на борту КА.

Впервые идея датчика конвекции была предложена в монографии [1] (см. [1], с. 135-141), где приведены результаты математического модели-

рования конвективного теплообмена в модели датчика при различных ориентациях на станции "Салют". Данные о поле микроускорений на станции "Салют" в упрощенном виде были взяты из работы [2], где предложена методика расчета микроускорений в любой точке КА с помощью определения угловых скоростей КА по показаниям датчиков, измеряющих напряженность магнитного поля Земли и вектор положения Солнца.

Реализация идеи такого датчика успешно решена в сотрудничестве РКК "Энергия" и Пермского государственного университета в виде датчика конвекции "ДАКОН" (ДАТчик КОНвекции) для экспериментов на станции "Мир" [3, 4]. С помощью этого прибора на станции "Мир" проведена серия экспериментов при различных воздействиях на датчик, в том числе в составе других космических экспериментов [5]. Однако, из-за малых размеров и использования воздуха в качестве рабочего вещества, его чувствительности оказалось недостаточно для регистрации слабого квазистационарного поля микроускорений на станции "Мир" [6, 7].

Позже [8], в рамках японско-американского проекта JUSTSAP был реализован и успешно отработал на корабле "Space Shuttle" STS-95 аналогичный прибор, в котором в качестве рабочего вещества использовалась вода. Прибор хорошо измерял квазистационарное поле микроускорений корабля и внешние возмущения, но обладал очень большим временем отклика на воздействие.

К настоящему времени проведены наземные испытания [9] и создан полетный экземпляр нового российского датчика конвекции "Дакон-М" [10]. Вдвое увеличены размеры датчика, в качестве рабочего вещества использовался углекислый газ при повышенном давлении. Оценки показали, что это позволило поднять его чувствительность в 100 раз по сравнению с датчиком "Дакон".

Доклад посвящен математическому моделированию наземной отработки поведения полетного образца датчика "Дакон-М" при различных воздействиях, в том числе и в реальном поле микроускорений РС МКС на основе созданной 3-х мерной математической модели, численного метода и программ для исследования конвективного теплообмена в датчике.

Приведены результаты математического моделирования наземной модели датчика "Дакон-М" в горизонтальном и вертикальном положениях. Численные результаты были сопоставлены с экспериментальными данными. Получено, что чувствительность датчика, измеренная в

эксперименте, в 3 раза меньше чувствительности, рассчитанной по математической модели для больших чисел Рэлея.

На основе данных о параметрах 3-х модификаций датчика "Дакон" рассчитана чувствительность этих модификаций датчика. Показано, что благодаря увеличению размеров камеры, выбору рабочего вещества и повышению давления в камере, удалось увеличить чувствительность датчика "Дакон-М" по сравнению с датчиком "Дакон" более чем в 100 раз.

Численное исследование влияния термопары на течение в камере датчика показало, что интенсивность течения и чувствительность датчика уменьшались на 30% при наличии термопары. Таким образом, существенное расхождение в данных о чувствительности датчика, полученное в расчетах и в экспериментах, по-видимому, связано с утечками тепла по термопарам.

Проведено исследование отклика датчика "Дакон-М" на гармонические колебания различных частот в диапазоне 0 – 0.2 Гц с амплитудой 3 микро-g. На основе этих данных построена амплитудно-частотная характеристика датчика "Дакон-М", которая показывает линейность отклика датчика при частотах менее 0.01 Гц.

Рассчитан отклик датчика "Дакон-М" на кратковременный интенсивный линейный импульс, моделирующий включение двигателя или стыковку с МКС.

Литература

1. Полежаев В.И., Белло М.С., Вerezуб Н.А. и др. Конвективные процессы в невесомости. М.: Наука, 1991, 240 с.
2. Сарычев В.А., Беляев М.Ю., Сазонов В.В., Тянь Т.Н. Определение микроускорений на орбитальных комплексах "Салют-6" и "Салют-7". Препринт ИПМ АН СССР, № 100, М., 1984, 29 с.
3. Bogatyrov G.P., Putin G.F., Ermakov et al. A system for analysis and measurement of convection aboard space station: objectives, mathematical and ground-based modeling / AIAA 95-0890, 33rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Jan. 9-12, 1995, Reno, NV.
4. Путин Г.Ф., Глухов А.Ф. и др. Результаты летно-космических испытаний датчика конвекции "Дакон". Космич. исследования, 2001, т. 39, № 2.
5. Бабушкин И.А., Богатырев Г.П., Глухов А.Ф., Путин Г.Ф. и др. Изучение конвекции и низкочастотной микрогравитации на орбитальном комплексе "Мир" при помощи датчика "Дакон". Космические исследования. 2001. т. 32. № 2, с. 161–169.

6. Бессонов О.А., Полежаев В.И. Математическое моделирование конвекции в датчике «Дакон» в условиях реального космического полета // Космические исследования. 2001, т. 32. № 2, с. 170–178.

7. Никитин С.А., Полежаев В.И., Сазонов В.В. Об измерении квазистатической компоненты микроускорения на борту ИСЗ с помощью датчика конвекции // Космические исследования. 2001, т. 39. № 4, с. 419–435.

8. Naumann R.J., Haulenbeek G., Kawamura H., Matsunaga K. A New Concept for Measuring Quasi-steady Microgravity Accelerations. Proc. First Internat. Symp. on Microgravity. Research & Applications in Physical Sciences and Biotechnology. 10-15 Sept. 2000. Sorrento, Italy (ESA SP-454, January 2001), p. 835-843.

9. Глухов А.Ф., Порошин Д.В. Отчет по экспериментам с моделью датчика конвекции «Дакон-М» с целью отработки технологии и идеологии управления свойствами газовой среды в конвективной камере датчика при помощи изменения давления // ПГУ. Кафедра общей физики. Пермь. 2004. 9 с.

10. Программа космического эксперимента "Изгиб" с использованием научной аппаратуры "Дакон-М". Пермь, ПГУ, 2006, 24 с.

11. Бабкин Е.В., Беляев М.Ю., Ефимов Н.И. и др. Определение квазистатической компоненты микроускорения, возникающего на борту Международной космической станции. Космические исследования, т. 42, № 2. 2004, с. 162 – 171.

Никитин С.А. (из стенограммы выступления). Начало работ по измерению конвекции в космическом полете можно отнести к началу 70-х годов, когда американцами были проведены научно-демонстрационные эксперименты по конвекции во время полета корабля «Апполон» к Луне. После этого выполнено много технологических экспериментов, имеющих целью получение полупроводниковых материалов с лучшими качествами, чем на Земле. Однако, как показано в докладе В.С. Земскова, здесь получено очень много побочных результатов, которые показали, что гравитационная чувствительность расплавов полупроводников с легирующей примесью чрезвычайно велика, и одной из наиболее важных причин этого является конвекция, проявления которой в Космосе разнообразны и, по-видимому, более сложны, чем на Земле. Поэтому к концу 80-х годов созрела идея о проведении специальных экспериментов по измерению конвекции в условиях космического полета при строго контролируемых

условиях микрогравитационной среды и, что особенно важно, тепловых граничных условиях. Первое упоминание об идее такого прибора содержится в книге группы авторов ИПМех РАН «Конвективные процессы в невесомости», изд. Наука, 1981 г., где проведены расчеты для кубического объема, подогреваемого с одной грани при теплоизолированных остальных. Использовались квазистатические микроускорения, полученные для станции «Салют 6» в работе В.В.Сазонова, М.Ю. Беляева и Тяна. В дальнейшем прибор собирались делать в ИПМех РАН, но эта группа распалась в связи с уходом А.П. Лебедева и Ф.В. Козырева, и разработка прибора была передана на кафедру общей физики ПГУ под руководством Г.Ф. Путина. В начале на Земле модель датчика кубической формы испытывалась при наличии вибраций и силы тяжести. Результаты таких испытаний и их анализ опубликованы в МЖГ № 5 1994 г., затем была изготовлена цилиндрическая модель диаметром 45 мм. Эта модель была испытана на Земле в условиях тепловой гравитационной конвекции, был проведен математический анализ конвекции в земных и космических условиях, и было получено довольно много экспериментальных данных по измерениям конвекции в условиях космического полета на станции «Мир», как в условиях естественного фона, так и при наличии вибраций, в том числе совместно с экспериментами на установке «Алис-2» с околокритической средой, о чем еще будет говориться в дальнейших докладах. После того, как были выполнены работы с датчиком конвекции на станции «Мир», японцы и американцы провели похожий эксперимент на корабле «Спейс Шаттл», используя в качестве рабочей среды воду. Цели и задачи эксперимента были заимствованы, по-видимому, из наших работ, в особенности, что касается оценок микроускорений по данным измерений конвекции с помощью датчика, однако, в отличие от датчика «Дакон» с воздухом в качестве рабочей среды, датчик на воде отличался большой инерционностью, хотя его гравитационная чувствительность была значительно бóльшей. Модификация датчика, которая предлагается на РС МКС («Дакон-М»), представляет собой цилиндр, диаметр которого равен высоте и более чем в 2 раза больше, т.е. 100 мм, а в качестве среды используется CO_2 под давлением около 2.5 атм., перепад температуры между нагревателем и холодильником - 60 градусов, в центре цилиндра в двух диаметрально противоположных сечениях размещаются дифференциальные термопары, которые являются чувствительными элементами прибора. Предполагается, что справедливо приближение Буссинеска, и конвекция

внутри цилиндра удовлетворяет трехмерным уравнениям Навье-Стокса в приближении Буссинеска, записанным в неинерциальной системе координат, жестко связанной с бортом космической станции. Выражение для вектора микроускорений используется в форме, предложенной в упомянутой работе В.В. Сазонова с соавторами. К настоящему времени мы провели моделирование работы «Дакона-М» на МКС по данным о микроускорениях, полученных из телеметрической информации о движении станции. Также были проведены расчеты с такой моделью в земных условиях. Отличие этой модели датчика от предыдущей состоит в том, что боковые поверхности выполнены из хорошо проводящего материала, так что на этих поверхностях поддерживается линейный профиль температуры, а не условия теплоизоляции, как в предыдущей модели датчика. Рассчитанная чувствительность датчика в этих условиях оказалась в 3 раза больше, чем в эксперименте. Объяснить это пока трудно – либо это влияние утечек по термопарам, либо недостаточно точное измерение координат расположения термопар, либо еще какие-либо неконтролируемые причины. Тестовые расчеты проводились методом конечного объема, и тестовые примеры показали хорошее согласование с независимыми данными трех других программ (Н.В. Никитин – В.П.Яремчук, О.А. Бессонов, М.Н. Мякшина («Флюент»)). Одновременно были проведены сопоставления с данными эксперимента, выполненного с этой моделью датчика в земных условиях при подогреве снизу и сбоку. В экспериментах было получено критическое число Рэлея - 10700, а в расчетах - 11000, т.е. различие составляет менее 10 процентов. При подогреве сбоку имеется различие в измерениях температуры почти в 3 раза. Следует отметить, что благодаря выполненным модификациям, чувствительность датчика была увеличена в 100 раз, поэтому микроускорение в 1 микро-г будет соответствовать перепаду температур 0,2 градуса, что вполне достаточно для регистрации. Для определения искажения температурного поля, вызываемого термопарой внутри экспериментального объема, были проведены расчеты, которые показали, что это влияние может составлять 30 процентов, что не может объяснить ту большую разницу, которая имеется в настоящее время. Исследована также амплитудно-частотная характеристика датчика. Получено, что инерционность этой модели датчика увеличилась. Эта инерционность намного меньше, чем та, которая была в американско-японском эксперименте (~ 1000 сек), запаздывание сигнала датчика на одиночные

импульсы и затухание сигнала датчика составляет ~ 100 сек. Проведено математическое моделирование калибровки датчика "Дакон-М", предлагаемой к проведению в полете на МКС. Показано отсутствие фазового сдвига между внешним воздействием и откликом датчика, и подтвержден выход на режим стационарных колебаний за 2 минуты эксперимента. Однако такая калибровка не позволяет определить экспериментальную чувствительность датчика "Дакон-М" в области малых частот и амплитуд колебаний, характерных для полета на МКС.

Анализ типичного файла данных, описывающего реальные микроускорения на МКС [11], показал, что уровень квазистационарных микроускорений на Служебном Модуле (СМ) РС МКС не превосходит 3 микро-г.

Математическое моделирование отклика датчика "Дакон-М", находящегося в 2-х разных местах СМ РС МКС, показало, что в том и другом случае "Дакон-М" выдает сигнал от 0.2°C до 0.3°C в области квазистационарных микроускорений, что более чем достаточно для уверенной регистрации сигнала на борту МКС (даже если реальная чувствительность датчика и в области малых ускорений будет в 3 раза ниже теоретической).

- б) 26. XI. 2007 г. И.А. Бабушкин, Ю.П. Герцен, И.В. Глазкин, А.Ф. Глухов, Е.А. Зильберман, Г.Ф. Путин, С.Е. Пушкин (Пермский гос. университет), А.В. Агеев, К.В. Вяткин, С.В. Заклюковский, А.Ю. Пинягин, Д.В. Порошин (НПП «Системы контроля», г. Пермь), А.И. Иванов, М.М. Максимова (РКК «Энергия», г. Королев), В.И. Полежаев, С.А. Никитин (ИПМех РАН, Москва), В.В. Сазонов (ИПМат РАН, Москва)
«Эксперимент «Дакон-М» по влиянию микрогравитации на конвективные течения»

Изготовлена и испытана аппаратура «Дакон-М» для проведения экспериментов по конвекции неоднородно нагретых жидкостей и газов в условиях микрогравитации. В сравнении с аппаратурой «Дакон», эксперименты с которой выполнялись на станции «Мир» в 1998 – 2000 г.г., чувствительность датчика «Дакон-М» к квазистатическим микрогравитационным полям увеличена в 100 раз. Это достигнуто благодаря иной конструкции конвективной камеры и применению другой рабочей среды. Новая конструкция электронного блока управления

экспериментом позволяет накапливать измерения на USB Flash без использования компьютера.

Приводятся результаты лабораторного и математического моделирования конвективных течений в камере датчика.



Прибор «Дакон-М»^(*). Слева - электронно-цифровой блок, справа - термостат

Глухов А.Ф. Изложено детальное описание прибора «Дакон-М», его основные характеристики, составные части и их характеристики, время релаксации температурных возмущений, проводится демонстрация прибора в рабочем состоянии путем изменения ориентации прибора в пространстве в процессе представления доклада, при этом на табло видны показания дифференциальных термопар с течением времени. Существенной особенностью этого прибора является то, что для его испытаний и функционирования в реальных условиях полета не нужен персональный компьютер. Сохранение информации осуществляется в блоке самого прибора.

Дискуссия.

Вопрос. В прежней модификации прибора мы видели на табло процесс изменения температуры во времени. Теперь же мы видим лишь дискретные показания термопар.

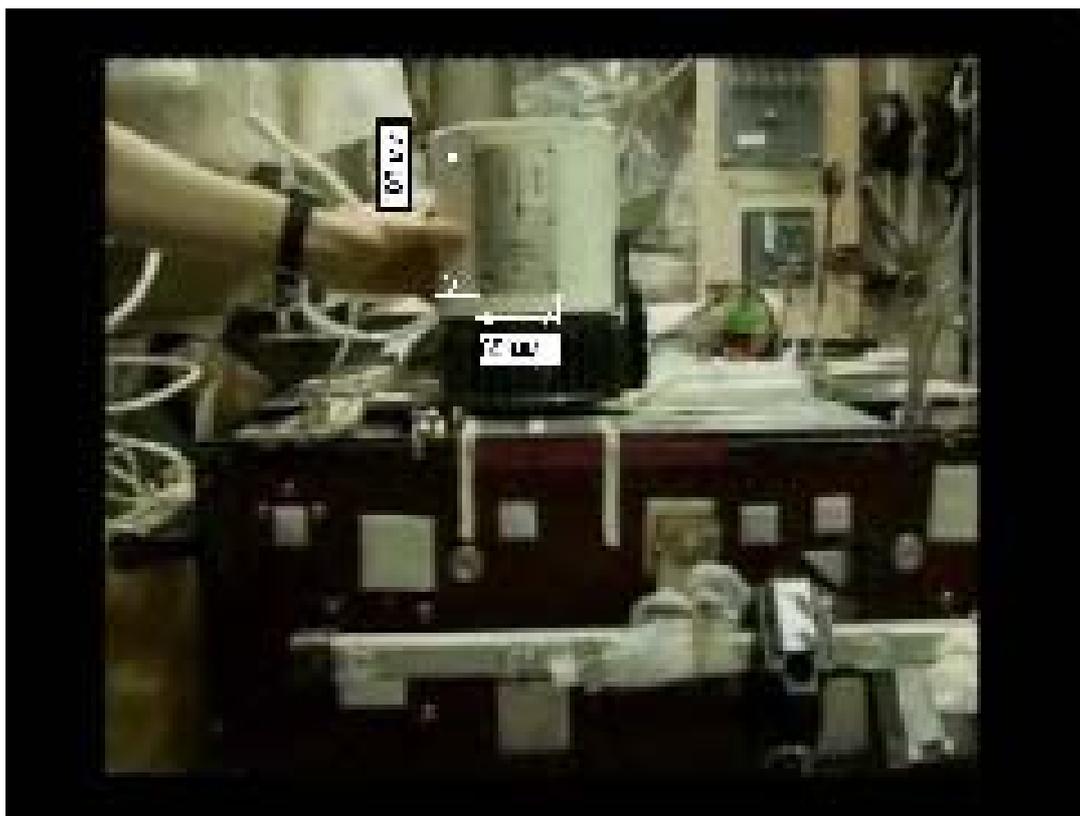
^(*) К моменту выпуска препринта прибор был доставлен на РС МКС и с ним начата работа.

Ответ. В принципе, изменения во времени можно продемонстрировать, выведя эту информацию на экран, что потребует некоторого времени.

Вопрос. Какова мощность, потребляемая прибором?

Ответ. Прибор потребляет около 20 Ватт.

Вопрос. И этого достаточно?



Прибор «Дакон-М», смонтированный на Российском сегменте
Международной космической станции (октябрь 2008 г.)

Вопрос. Какой длительности запись можно осуществить при помощи прибора?

Ответ. Ориентировочно около 70 часов, после чего нужно сбрасывать информацию на какой-либо другой носитель.

Вопрос. По поводу наземной отработки этой новой модификации прибора. В прежней модификации прибора основными были испытания его функционирования на Земле в состоянии «лежа на боку», что соответствует тепловой гравитационной конвекции при боковом подогреве. Были также измерения при подогреве снизу, которые в новой модификации

были проведены более подробно и даже сопоставлены с данными численного моделирования, однако в самой первой версии прибора кубической формы использовались качания, что наиболее важно, поскольку это один из наиболее трудных режимов для измерений и моделирования.

Вопрос. Планируется ли это сделать для «Дакон-М»?

Ответ. В принципе, это нужно было бы сделать, однако у нас в лаборатории нет нужных платформ для реализации этой отработки.

Вопрос. Когда планируется постановка этой версии прибора на борт?

Ответ (представитель РКК «Энергии»). В 2008 г.

Вопрос. Александр Федорович, ведь вы можете чувствительность проверить для высокочастотных колебаний, частота пойдет без изменения, зато уменьшится амплитуда, и вы можете проверить чувствительность датчика в других условиях.

Комментарий (В.И. Полежаев). Эта работа ведется с 90-х годов, первый наземный вариант прибора разработан в 1994 г. Тогда же появились и первые публикации. Идея эксперимента опубликована в нашей книге 1991 года, реальные работы начались в 1992 г. Проблема контроля экспериментов в полете продолжает быть актуальной для многих фундаментальных исследований. Недавно в нашем Институте рассказывалось об американском эксперименте по проверке теории относительности (доклады академиков Д.М. Климова и Д.Ф. Журавлева). Эти эксперименты готовились около 40 лет, но проведены совсем недавно. Публикаций по итоговым результатам, анализу этих результатов и особенно по устранению побочных факторов пока не известно, и это не случайно. Хотя данный эксперимент более грубый, чем тот, относящийся скорее к метрологическому уровню фундаментальных исследований в условиях космического полета, однако здесь приходится решать те же задачи. У нас уже есть опыт измерений и понимание того, какие побочные эффекты могут быть в этих условиях. Некоторые из этой серии экспериментов (проверка принципа эквивалентности инертной и тяжелой массы, определение мировых констант теории тяготения и т.д.) готовятся на европейском и японском модулях МКС. В нашей программе измерений конвекции с помощью прибора «Дакон» в условиях космического полета решаются две задачи:

1) Мониторинг микрогравитационной среды. При этом осуществляется проверка гравитационной чувствительности и отклика испытываемого прибора на действие микроускорений, основанного на изменении физичес-

ких процессов. К этой задаче относится также седиментация, связанная с изменением положения частичек в объеме (эксперимент «Виброкон»). Деформация свободной поверхности также весьма чувствительна к микроускорениям и может быть взята за основу такого типа прибора.

2) Тесты. Рассчитывая и измеряя конвекцию, мы учитываем изменение микрогравитации, полученной и теоретически, и экспериментально. При этом мы должны быть уверены, что вычислительная модель микроускорений адекватна экспериментальным данным. С другой стороны, мы должны быть уверены в том, что измерения микроускорений достаточно точны. Все это входит в состав глобального теста, в котором проверяются отдельные звенья цепочки гравитационной чувствительности. В приборе «Дакон» важную роль играет контроль тепловых граничных условий, которые составляют одну из центральных задач экспериментов по космическому материаловедению. Этот контроль на первом этапе был выполнен недостаточно. Роль тепловых граничных условий возрастает при слабой конвекции, которая имеет место в условиях космического полета. Таким образом, этот эксперимент является принципиальным в этом классе задач. Однако, уже сейчас видно, что такие приборы и эксперименты интересно реализовать и для других гравитационно-чувствительных процессов: для околокритической среды, для расплавов полупроводников, а в будущем, возможно, и плазмы.

- 7) 26. XI. 2007 г. Н.А. Анфимов, В.И. Лукьященко, В.В. Суворов, К.С. Елкин, М.М. Цимбалюк (ЦНИИМаш)
«Планы Федеральной космической программы на период 2006-2015 гг. в отношении развития космических средств для проведения российских микрогравитационных экспериментов и исследований»

В докладе излагаются перспективы расширения исследований в области физики гравитационно-чувствительных систем, космического материаловедения, биотехнологии и биологии на основе запланированного в ФКП-2015 создания новых космических комплексов КА «Фотон-М» №4, «Бион-М», обслуживаемого в ходе периодических стыковок с МКС автоматического КА «ОКА-Т», маломассогабаритного КА нового поколения «Возврат-МКА», создания и введения в эксплуатацию новых модулей российского сегмента Международной космической станции.



Дискуссия.

Вопрос. В каком состоянии находится разработка научного лабораторного модуля (НЛМ)?

Ответ. Проект еще не завершен, однако, по предварительной информации, это серьезный проект. Здесь намного больше рабочих мест, на которые можно ставить научную аппаратуру и конечно намного больше

энергетики. Есть некоторые соображения по расположению аппаратуры на НЛМ, например, высокотемпературной печи, которую должен разрабатывать КБОМ. Не всех разработчиков такая печь устраивает, но выбрать не приходится. Ведется также работа по расширению возможностей экспериментальных работ, разработка виброзащитных платформ, поворотных виброзащитных платформ для управления ориентацией аппаратуры по отношению к вектору остаточных микроускорений. Очень важным является проект «Молекулярный экран». Работы, которые ставятся на МКС, координируются научно-техническим советом, структура которого включает 8 секций вместе с недавно образованной секцией № 8 по образованию. 17 декабря будет заседание такого КНТС. Все направлено на то, чтобы активизировать исследования, ведущиеся на МКС и направить их в русло практических приложений. К сожалению, до сих пор здесь мало чем можно похвалиться, но мы постоянно думаем о практическом применении этих экспериментов на МКС, 28 февраля 2007 г. была проведена научно-практическая конференция, направленная на обзор результатов, которые были получены. Журнал «Ракетная техника и космонавтика» будет содержать 25 статей. Наиболее привлекательными из выполненных работ были биомедицинские, биотехнологические эксперименты, а также фундаментальные исследования по программе «Плазменный кристалл». Из разрабатываемой в настоящее время космической техники, направленной на исследования в условиях микрогравитации, следует отметить, прежде всего, космический аппарат «ОКА-Т», который выводится автономно и причаливает к МКС, затем совершает полеты на МКС с экипажем и без него, возвращаясь на МКС периодически. Предполагается первый запуск в 2010 г., второй - в 2014 году.

Вопрос. Каким образом осуществляется взаимодействие «ОКА-Т» и МКС во время причаливания?

Ответ. Космонавты могут выходить в «ОКА-Т» из МКС, забирать научные результаты, обслуживать аппаратуру, готовить очередные эксперименты, однако дальнейший полет и функционирование до очередного причаливания осуществляется в автоматическом режиме.

Вопрос. Таким образом, он выполняет те функции, которые мы пытаемся реализовать в настоящее время на КА «Прогресс»?

Ответ. Да, но у «Прогресса» основная функция – это транспортная – т.е. доставка грузов на МКС, а не научная, лишь побочная, в то время, как

у «ОКА-Т» – эта функция основная.

Вопрос. Известно, что планируется запуск европейского космического модуля, а затем – японского космического модуля. Оба этих модуля в хорошей стадии подготовки, поскольку уже в 1998 г. в Японии (космический центр, Цукуба), был готов макет космического модуля на МКС. Наши модули только планируются в 2009-2011 годах, поэтому очевидно существенное отставание. У нас разрабатывается космическая техника, которая, однако, не обеспечивается необходимой аппаратурой для микрогравитационных исследований.

Ответ. Одна из основных нерешенных проблем – разработка научной аппаратуры, мы здесь пытаемся вести совместные исследования с разными странами, например, с Украиной. Можно сказать, что в недавнее время решен вопрос о поставке украинской научной аппаратуры для процесса выращивания прозрачных кристаллов из низкотемпературных растворов – эксперимент О.П. Федорова.

Вопрос. Каковы планы использования КА «Фотон» для проведения микрогравитационных экспериментов, например, «Фотон 4». Есть ли он в программе?

Ответ. Да есть.

Вопрос. А спутники типа «Бион», они в программе отсутствуют?

Ответ. Да, но, тем не менее, они планируются.

Вопрос. Занимается ли КНТС программой пилотируемых полетов?

Ответ. Да, но в программе есть и автоматические, беспилотные аппараты.

Вопрос. Известно, что на последнем микрогравитационном симпозиуме НАСА объявило о прекращении финансирования проектов на МКС. Получается, что остается всего 8 лет на проведение экспериментов, учитывая, что некоторые образцы аппаратуры появятся только к 2011 - 2012 годам. Им остается работать на МКС 3-4 года, что мало реально.

Ответ. Вопрос понятен, нам приходится встречаться с рядом документов НАСА по этому поводу. Ситуация противоречивая, т.к. с одной стороны, имеется тенденция к увеличению срока функционирования МКС, что ее ресурсы позволяют. С другой стороны, научно-техническая политика Буша сводится к сворачиванию работ на МКС до 2015 г. Конечно, это будет определяться будущей администрацией США, и нам стоит подождать. Но с другой стороны, сомнения в США и других странах понятны – пока нет результатов, окупающих столь дорогостоящие

эксперименты. Поэтому вопрос о внедрении результатов стоит очень остро.

Комментарий (В.И. Полежаев). В докладе М.М. Цымбалюка представлена широкая картина разработок российской космической техники в части использования ее для полезной нагрузки в условиях микрогравитации. Но бросается в глаза довольно большой разрыв, имеющийся между возможностями этой техники (которая, надо признать, используется зарубежными партнерами больше, чем нами), и сохранившимися российскими научными школами, которые могли бы это эффективно использовать. Вопрос о внедрении результатов космических экспериментов действительно очень важен, но и весьма сложен, так как нужно принять во внимание еще и потребности промышленности той или иной страны в использовании таких результатов. Такой вопрос ставился и рассматривался, например, на Международной стратегической планирующей группе в Японии. Там он находился в центре внимания, но представителя Роскосмоса там не было. Почему? Значит, в Роскосмосе не понимают, как нужно в принципе вести такую работу, и кто ее должен вести. На этой конференции в Японии в октябре 2007 г. были представители России В.М. Емельянов и В.Ф.Петров, они выступали с ключевыми докладами и привезли довольно много материалов.

Председатель. Для следующего доклада слово предоставляется В.Л.Левтову – доклад по разработке научной аппаратуры, в котором он, мы надеемся, осветит вопросы, которые остались неясными после предыдущего доклада.

8) 26. XI. 2007 г. В.Л. Левтов (ЦНИИМаш)

«Современное состояние, проблемы и перспективы разработки научной аппаратуры для исследования физики жидкости и гравитационно-чувствительных систем»

Лидирующие позиции в области исследований по космическому материаловедению и гидромеханике, которые СССР занимал до конца 80-х годов прошлого столетия, в значительной степени были обусловлены широким фронтом экспериментальных работ на борту космических аппаратов различного типа: ракеты-зонды «ВЗАФ-С», автоматические КА «Фотон», орбитальные пилотируемые станции «Салют», «Мир».

К созданию бортовой научной аппаратуры для реализации космических экспериментов правительственными решениями привлекались ведущие отраслевые КБ и НИИ (КБОМ, ТашКБмаш, ЦНИИМАШ, НПО «Композит», НПО «Научный центр», НПО «Ротор» и др.).

В период 1975-1990 г.г. был создан целый ряд научных приборов и исследовательских технологических установок: высокотемпературные печи «Сплав», «Зона», «Кристалл», «Магма», «Галлар», «Корунд», серия приборов типа «Пион» для исследований в области физики жидкости и др. По своим техническим характеристикам отечественная аппаратура, как правило, превосходила зарубежные аналоги.

С начала 90-х г.г. ситуация резко изменилась в худшую сторону и фактически до самого последнего времени проведение космических экспериментов в рамках национальной программы и разработка бортовой научной и технологической аппаратуры оказались заморожены. За последние 15 лет разработано и введено в эксплуатацию лишь 3-4 бортовых прибора, а проведение экспериментов носило эпизодический характер.

В настоящее время наметилась некоторая тенденция к улучшению ситуации. На ноябрь 2007 г. в различных стадиях разработки находится ~ 6-8 видов научной аппаратуры (одна высокотемпературная технологическая установка и несколько приборов по исследованию вопросов физики жидкости) со сроком завершения работ в 2009-2010 г.г.

В докладе приведены основные технические характеристики разрабатываемой научной аппаратуры. Проанализированы технические и организационные проблемы ее создания. По мнению автора на современном этапе вопросы финансирования уже не являются главной проблемой на пути развития отечественных экспериментальных исследований в области космического материаловедения и гравитационно-чувствительных систем.

Из стенограммы доклада.

В.Л. Левтов остановился на вопросе: что мы имели и что потеряли, сравнивая состояние разработки научной аппаратуры для исследований условий микрогравитации в настоящее время и то, которое мы имели в середине 70-х годов, когда у нас была мощная программа экспериментальных исследований на Космической орбитальной станции. Случившаяся затем в конце 70-х годов перестройка существенно подорвала наши возможности, затем наступила очень трудная пора, в

течение которой исследования проводились в основном зарубежными партнерами на станции «Мир» или нами совместно с ними на их оборудовании, затем была пора сборки орбитальной станции МКС, и лишь в последние 3 года ситуация начала улучшаться. Затем В.Л. Левтов показал программу принятых к выполнению на МКС экспериментов.

Вопрос. Почему «Дакона» нет в этой программе?

Ответ. Потому, что этот эксперимент представлен по технической секции, а данная программа представлена по секции № 1 и подсекции 9.3.

Одним из перспективных проектов является проект О.П. Федорова (Украинское космическое агентство) по исследованию кристаллизации на прозрачных расплавах. Здесь подготовлено оборудование, система визуализации, у нас имеется опыт совместных работ еще в советское время, и к данному моменту переговоры о проведении этой работы ведутся на межправительственном уровне.

Один из проектов посвящен поворотной платформе для проведения работ с изменением ориентации установки по отношению к оси станции, о чем уже много раз говорилось на этих семинарах. Такая платформа находится в стадии разработки, она является новой и пока еще отсутствует в каких бы то ни было агентствах. Следует отметить также работы, планируемые на КА «Прогресс». Здесь планируется две группы работ.

Вопрос. А проект проходил через нашу подсекцию? Кто-нибудь его слушал? Кто его ведет?

Ответ. Аппаратура эта ЦНИИМАШ, и головной организацией является ЦНИИМАШ.

Вопрос. А что вы собираетесь получить?

Ответ. Там запланированы эксперименты из Перми, предложенные еще в свое время В.А. Брискманом, и кюветы готовятся также в Перми по использованию концентрационно-капиллярных эффектов.

Во второй работе по виброконвекции предполагается исследование воздействия искусственных вибраций на термокапиллярные течения с целью их подавления. Математическое моделирование здесь проводилось в ИПМех РАН В.П. Яремчуком (проект «Виброкон»). Заметим, что на прежних заседаниях этого семинара еще в конце 90-х годов обсуждалась очень большая программа исследований на установке ЦНИИМАШ «Ингол», был подготовлен большой проект и подан в Совет по космосу Российской академии наук. Однако из этой большой программы только

два проекта сохранили свои позиции, как в плане исполнителей, так и в плане аппаратуры.

Вопрос. Как планируется поддержание температуры кристаллизации в условиях невесомости в одном из проектов, о которых вы рассказывали?

Дело в том, что при проведении экспериментов, например по плавлению льда, который мы проводили, оказывалась, что температура не соответствует температуре плавления $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ - в действительности она изменяется в зависимости от условий.

Ответ. Да, требуются специальные условия для поддержания теплового режима, т.е. прецизионное термостатирование. Там необходимо использование специальных условий для создания «температуры черного тела», т.е. поглощающей излучение. Все это предусмотрено в проекте.

9) 26. XI. 2007 г. М.Ю. Беляев, А.И. Иванов, А.В. Марков
(РКК «Энергия»)

«Состояние и перспективы реализации научных исследований на РС МКС в условиях микрогравитации»

Приводятся данные по ресурсам РС МКС, выделяемым для проведения научных исследований и экспериментов. Анализируются условия микрогравитации на борту и связанные с ними гравитационно-чувствительные физические и физико-химические процессы и явления. Описываются отдельные технологические процессы и бортовое оборудование, используемые в экспериментах по физике жидкости и космическому материаловедению. Даются основные результаты экспериментов, выполненных в условиях микрогравитации на орбитальных станциях «Мир», РС МКС и других аппаратах. Приводятся результаты исследований микрогравитационной обстановки на орбитальных станциях и пути снижения и управления уровнями и параметрами микроперегрузок при выполнении научных экспериментов в Космосе.

В докладе рассматриваются проблемы и перспективы разработки оборудования и космической техники для выполнения гравитационно-чувствительных экспериментов на РС МКС, ТГК «Прогресс», перспективных КА, обсуждаются перспективы проведения экспериментальных работ в условиях микрогравитации.

Дискуссия.

Вопрос. Разделение сил по проведению экспериментов на МКС

обсуждалось в Японии в октябре 2007 г. в г. Нара. Какие были приняты решения?

Вопрос. Какие наличные объемы и какие энергии потребуются для проведения этого цикла экспериментов? Кто будет проводить эти работы, ведь при стыковке российско – японско – европейского комплекса объем работы увеличится, а средства доставки останутся прежними и трех космонавтов будет недостаточно, если не начнутся полеты «Спейс Шаттла». Необходимо запланировать работу на следующий год по более внимательному просмотру запланированных экспериментов, в том числе работы на КА «Прогресс» могут быть, конечно, подняты на более высокий уровень.

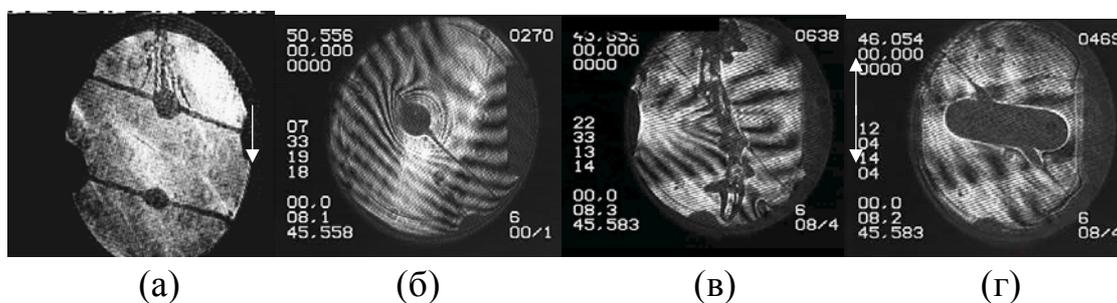
Вопрос (М.М. Цымбалюк). Приоритеты по постановке экспериментов на РС МКС вопрос довольно тонкий, например, много раз говорилось о проекте «Крит», но он не входит в состав приоритетных экспериментов.

Вопрос. Но ведь на Западе, в программе ЕКА эксперименты этого типа являются приоритетными. Однако следует заметить, что новый прибор, который разработан французским космическим агентством и в настоящее время готовится к отправке на МКС, является сложнейшим прибором, теперь он изготовлен не в самом КНЕС, а в дочерней фирме, и его эксплуатация даже на Земле является сложнейшей проблемой. В этом отношении «Крит» – значительно более простой прибор, с более простой системой управления, с модификацией подачи тепла на внешней поверхности.

Но вся совокупность этих вопросов – это предмет обсуждения на Международной стратегической планирующей группе – это приоритеты, обмен аппаратурой, космонавтами, обмен микрогравитационной обстановкой и т.д. Однако ответственного представителя Роскосмоса на этой группе не было. Наш представитель там был, и мы в курсе событий, однако нет никого, кто бы мог принимать решения и брать на себя ответственность за их осуществление. Мы писали письма с просьбой обеспечить участие представителя Роскосмоса, но они остались без ответа, вместе с тем представитель Украинского космического агентства регулярно бывает на этих совещаниях.

- 10) 26. XI. 2007 г. В.М. Емельянов, А.А. Горбунов, А.К. Леднев, С.А. Никитин, В.И. Полежаев, Е.Б. Соболева (ИПМех РАН), А.И. Иванов (РКК «Энергия»), Г.Ф. Путин, А.В. Зюзгин (Пермский государственный университет)
«Эксперимент «Крит» и его подготовка на МКС: Результаты моделирования и анализ экспериментов на станции «Мир»

Представлен обзор работ, выполненных в последнее время участниками проекта «Крит» для подготовки космического эксперимента на МКС. Приведены результаты анализа космических экспериментов «Алис» - «Дакон», выполненных на станции «Мир» во время экспедиции «ЭО-20» (1995 г.) и «ЭО-27» (1999 г.), лабораторного моделирования



Распространение тепла от точечного источника. (а) - в условиях гравитации (CO_2). В условиях микрогравитации: (б) - фоновое значение микроускорений $\leq 10^{-4} g_0$, (в) - вибрации 0.3 Гц, $23 \cdot 10^{-3} g_0$ (64 mm), (г) - вибрации 1.6 Гц, $5 \cdot 10^{-3} g_0$ (0.8 mm). Стрелками указано направление силы тяжести и вибраций

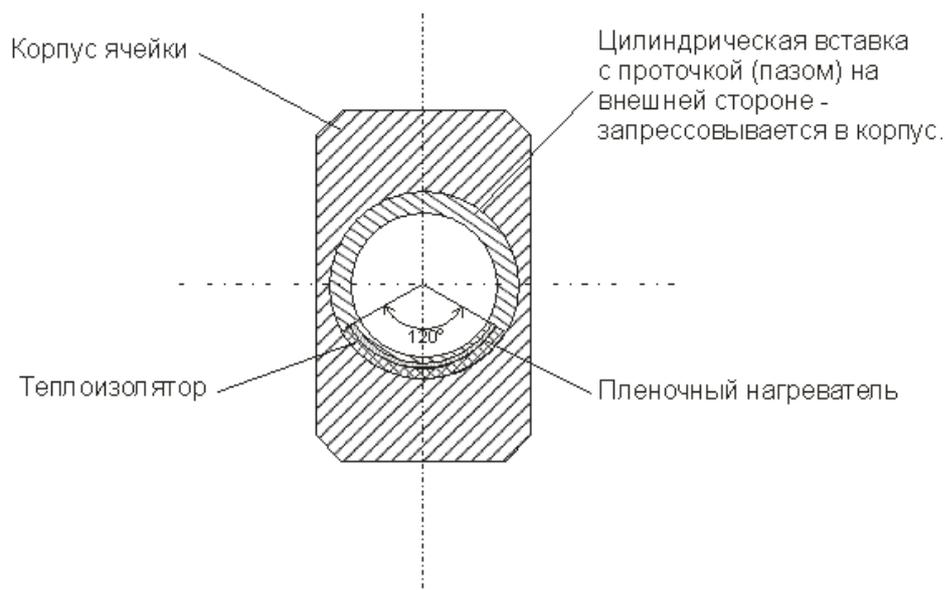
термо-вибрационной конвекции от точечного источника тепла в условиях невесомости, экспериментального моделирования условий невесомости с помощью магнитной компенсации гравитации для исследований двухфазной околокритической среды и лабораторного и численного исследований динамики температурных и плотностных неоднородностей, вызванных нагревом стенок замкнутого объема сверхкритической среды.

Выполненные работы дополняют друг друга и позволили получить новые знания, необходимые для оптимизации программы и разработки прибора для проведения космического эксперимента «Крит» на МКС.

В 2008 г. выпущено дополнение к эскизному проекту на научную аппаратуру "Алис-М" для космического эксперимента "Крит". Целью этой работы явилось уточнение обоснования КЭ, ожидаемых результатов и их практического использования, учитывающего результаты и достижения

науки и технологии в области изучения критического и околокритического состояния вещества, нанотехнологии и лазерных средств активного локального воздействия на объекты исследований, средств пространственного контроля тепловых полей в объеме исследуемых объектов, произошедшие со времени подачи проекта "Крит" в КНТС Роскосмоса в 1998 году. Проведена проработка новых вариантов исполнения аппаратуры, обеспечивающей требования по точности измерения и поддержания температуры и давления внутри прецизионных термостатов и заданных характеристик оптических средств наблюдения и измерения. ИПМех РАН и его соисполнители продолжали вести научные исследования в области теплопереноса в околокритических и сверхкритических средах с помощью наземного физического моделирования, математического моделирования и теоретически. Кроме получения новых фундаментальных результатов целью этих исследований являлась дальнейшая отработка космического эксперимента, уточнение наиболее принципиальных требований к проведению КЭ, конструктивных решений и технических характеристик КА. При помощи численных и физических экспериментов были получены новые данные об особенностях динамики и теплопереноса в околокритических и сверхкритических средах, которые докладывались на ряде российских и международных конференций и опубликованы в печати. Продолжали развиваться методы измерения и расчетов микроускорений в полете МКС, а также аналитические, численные методы и вычислительная техника. В связи с этим значительно продвинулись средства математического моделирования околокритических конвективных процессов на основе общих, в том числе трехмерных, уравнений гидродинамики. Это позволяет реализовать в настоящее время, ранее казавшееся неосуществимым, сопряжение трехмерных моделей гидродинамики для околокритических сред с микроускорениями в реальных условиях полета, что придает еще большую ценность экспериментам, планируемыми по проекту КРИТ на МКС. Новые результаты по проверке критериев возникновения конвекции в околокритической жидкости, по структуре двух- и трехмерных надкритических течений за порогом устойчивости гидростатического равновесия, дальнейшее развитие техники параллельных вычислений позволяют начать моделирование околокритических течений в реальных условиях космического полета. Стратегия исследований в рамках проекта КРИТ на РС МКС дополняется экспериментами с контролируемым

подводом тепла через границу области, постановкой глобального теста по измерениям и моделированию околокритической конвекции. Это важно и для определения требований к измерению микроускорений, для поддержания режима полета МКС при проведении экспериментов по фундаментальной физике, а также для новых технологических приложений в земных условиях, в том числе для исследований околокритических гранулированных сред с микро- и наночастицами.



Измерительная ячейка в проекте КРИТ
с подогревом части боковой поверхности

Дискуссия.

В.И. Полежаев. Вопрос о том, какие работы нужно выполнять в невесомости в сравнении с тем, что мы можем делать на Земле, возникает на всех этапах, начиная с этапов 30-летней давности. В настоящее время все большее значение придается проведению тестовых работ, поэтому особенно существенны околокритические исследования, где самая высокая гравитационная чувствительность, высокие требования к поддержанию теплового режима в непосредственной близости от критической точки. В этом докладе на транспаранте были показаны возможные приложения околокритических явлений. Зачем КНЕС тратит такие большие деньги на развитие этого направления, ведь сама установка «Алис» стоила около 10 миллионов долларов, и такие исследования на станции «Мир» велись, начиная с 1992 г.? Это связано с большим количеством приложений, в первую очередь в ракетно-космической технике. Например, хранение топлив в околокритическом состоянии, которое перспективно с точки

зрения объемов и весов. Однако были аварии, например, у американцев в одном из первых полетов на Луну. По-видимому, там были нерасчетные режимы на сверхкритических параметрах, но уровень знаний о теплообмене был тогда не высок. Если знать характеристики теплообмена, то этого можно избежать, и в настоящее время мы знаем больше.

Однако в организациях Роскосмоса сегодня нет единства в части приложений микрогравитационных исследований собственно космической техники для усовершенствования космических систем. Например, если вы зададите такой вопрос представителям ЦНИИМАШ, которые занимаются физикой жидкостей, то они скажут, что это не их дело. В то же время Европейское космическое агентство провело серию работ по гидродинамике и тепловым режимам жидкости в баках на специализированном спутнике. Эти работы удостоены премии на последнем заседании Европейской ассоциации по исследованиям в условиях пониженной гравитации (ЭЛГРА). Еще можно упомянуть направление по химическим технологиям. В этом году в Суздали был проведен Международный конгресс по химической термодинамике, в рамках которого состоялся однодневный семинар российско-французских работ по сверхкритическим флюидам со специальным девизом: «от теории – к практике». Можно посмотреть на сайте информацию о компании, занимающейся «зелеными» технологиями, т.е. экологией. Их цель - переработка отходов, использование сверхвысокой растворимости и ускорения химических реакций в непосредственной близости от критической точки.

Однако исполнитель, который занимается фундаментальным исследованием процессов и постановкой экспериментов, не в состоянии обеспечить подобную инновационную прикладную деятельность. Здесь должна работать специальная инновационная программа. Так делается во всем мире. Объем работ здесь очень велик. В этом направлении ЦНИИМаш и Роскосмос и должны действовать. Необходимо знание обстановки во всем мире, цены, т.е. нужна менеджерская деятельность. Например, американцы в лаборатории JPL планируют применение сверхкритических параметров в камерах сгорания, что существенно повышает удельный импульс.

Что сделано нами в плане фундаментальных исследований? Можно сказать, что теплофизика околокритических явлений до этого времени была эмпирической наукой. Сейчас сюда введены модели, проведены

параметрические исследования на основе исходных уравнений гидродинамики, показано, что конвекция может быть рассчитана, установлены общие закономерности теплообмена вблизи критической точки. Установлен парадокс теплообмена, согласно которому, теплообмен на Земле может быть меньше, чем при тех же условиях в невесомости, если мы находимся в непосредственной близости к критической точке, так как плотностная стратификация на Земле весьма высока, и это может препятствовать развитию конвекции. Вместе с тем, число Рэлея в этих условиях весьма велико. Если его уменьшить на 5 порядков, то есть перейти в условия микрогравитации, то, как показано в экспериментах с «Алис-1», числа Рэлея составляют порядка 10^4 . Сколько стоит то, что эта область науки так сильно преобразилась? Как можно это оценить? Это относится к косвенному воздействию космических исследований. Это же относится к проблеме роста кристаллов, когда 30 лет назад элементная база была очень отсталой, и космические исследования в области микрогравитации привели к необычайному прогрессу. Нужно сказать, что Европейское космическое агентство здесь достигло больших успехов. Это можно видеть из списка экспериментов, которые ставились, например, на борт «Фотона М-3». Он показывался нам в предшествующих докладах. Коэффициенты термодиффузии, бактерии, электроника – для всего этого нужна инновационная группа.

В заключение выступили некоторые участники заседания.

М.Ю. Беляев (РКК «Энергия»). Темы подсекции и докладов на семинаре чрезвычайно актуальны и следует поблагодарить организаторов семинара, представивших результаты 10-летней работы секции семинара. Следует казать, что результаты приводят к неожиданным выводам, они могут даже повлиять на организацию пилотируемых полетов, на управление станцией. Роль подсекции и семинара возрастает. Здесь обсуждаются вопросы о том, что надо сделать и как. Очень важно еще, что мы рассматриваем на МКС многоцелевые программы, ведь станция очень большая, управление ею весьма сложно. МКС может летать в режиме гравитационной стабилизации или при расположении оси, касательной к орбите; в первом случае она может даже несколько покачиваться. Здесь много задач, поэтому надо не только продолжать, но и ставить специализированные эксперименты, связанные с динамикой полета.

В.И. Полежаев. В заключение нужно сказать, что сегодняшнее заседание семинара поддержано Ведущей научной школой Н.А. Анфимова,

материалы размещены не только на плакатах, но и на сайтах. За эти 10 лет был сделан гигантский скачок в понимании гравитационно-чувствительных процессов и систем в условиях космического полета, а самое важное - созданы модели и методы для прогноза. За эти 10 лет наука очень изменилась. И в большинстве стран происходит переоценка целей и задач исследований, однако очевидно, что Япония и Европа сегодня лидируют в постановке космических экспериментов и в обеспечении соответствующих научных направлений.

Таким образом, вся цепочка работ, начиная от заданных микроускорений на борту, их влияния на процессы получения результатов до передачи этих данных заинтересованным лицам, благодаря деятельности семинара и подсекции 9.3, функционирует.

Но особенно важную роль играет ответ на вопрос: а зачем эти исследования должны вестись?

В заключение, по предложению зам. председателя подсекции 9.3 В.Л.Левтова, был утвержден проект экспертного заключения по космическому эксперименту (руководитель Б.Е. Фортов).

11) 29. I. 2007 г. А.И. Феонычев (Государственный научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики)

«Стоячие поверхностные волны и их воздействие на термокапиллярную конвекцию и рост кристаллов методом плавающей зоны»

Представлена аналитическая модель стоячих инерционно-капиллярных стоячих поверхностных волн, созданная по результатам численного исследования деформации свободной поверхности жидкого цилиндра под действием осевой вибрации. Модель описывает обнаруженную при численном исследовании зависимость параметров стоячих поверхностных волн от параметров приложенной вибрации и физических свойств жидкости.

Рассмотрены некоторые особенности течения, возникающего при взаимодействии стоячей поверхностной волны с термокапиллярной конвекцией:

- образование зоны слабых осцилляций между ламинарным и турбулентным течениями;

- эффект взаимной симметрии (несимметрии) конфигурации стоячей волны и термокапиллярной конвекции;

- симметризация структуры термокапиллярной осциллирующей конвекции;

- специфический резонанс.

Показана возможность управления макро- и микросегрегацией примеси в процессе выращивания кристаллов методом плавающей зоны в условиях микротяжести при использовании стоячей поверхностной волны и магнитного поля.

12) 16. IV. 2007 г. А.В. Десятов, Д.Н. Ильмов, С.Г. Черкасов

(Исследовательский центр имени М.В. Келдыша, Москва)

«Численное моделирование сжатия одиночного сферического парового пузырька в безграничной жидкости»

На основе численного моделирования исследуются процессы, протекающие при эволюции одиночного сферического парового пузырька при внезапном повышении давления в окружающей безграничной жидкости. В расчетах использована математическая модель, основанная на однородности давления и температуры внутри пузырька. Предложенная модель обеспечивает точное выполнение интегрального баланса энергии без учета кинетической энергии пара и имеет интеграл сохранения. Расчеты проводились для водяного пара в пузырьке и воды вокруг пузырька при комнатной начальной температуре. В расчетах варьировались начальный радиус пузырька и величина скачка давления в жидкости. Получены результаты по росту температуры и характеристикам теплообменных процессов. В частности, в проведенных расчетах прирост температуры в пузырьке оказался на два порядка меньше, чем при адиабатическом сжатии пузырька.

13) 14. V. 2007 г. В.М. Емельянов, А.А. Горбунов (ИПМех РАН)

«Виртуальный прибор для исследований теплопереноса в сверхкритических средах»

На основе двумерных полных уравнений Навье-Стокса с постоянными коэффициентами и уравнения состояния Ван-дер-Ваальса разработан вычислительный инструмент для исследований теплопереноса в замкнутом объеме сверхкритической среды. Проведены численные эксперименты по исследованию теплопереноса в шестифтористой сере после изменения температуры границ объема на заданную величину при

различных удалениях от критической точки в отсутствии и при наличии силы тяжести. Методика проведения и обработки численных экспериментов максимально приближена к методике проведения и обработки физических экспериментов, проводимых с помощью прибора «Алис-1» для исследований околокритических сред. Размерные параметры задачи (размеры расчетной области, термодинамические свойства и коэффициенты переноса среды) соответствуют их значениям в экспериментальной ячейке прибора. Получены временные зависимости плотности и температуры в центре расчетной области на интервалах времени, характерных для физического эксперимента (порядка 2 часов). Проведено сравнение процессов переноса тепла в газе Ван-дер-Ваальса и в совершенном газе. Приведены зависимости величины максимума плотности и характерного времени релаксации температуры и плотности в центре исследуемой области от степени приближения к критической точке. Проведено сравнение результатов численных экспериментов с результатами физических экспериментов при наличии силы тяжести. Показано, что предложенный подход способен описать особенности процесса переноса тепла в сверхкритической среде после изменения температуры границ: быстрый рост (т. н. «пистон эффект») и медленную релаксацию температуры и плотности в толще среды.

14) 4. VI. 2007 г. В.В. Сазонов (ИПМат им. М.В. Келдыша РАН)

«Влияние магнитного поля Земли на измерения угловой скорости и микроускорения, выполненные на спутниках «Фотон-12» и «Фотон М-2»

В докладе представлены результаты реконструкции вращательного движения спутников «Фотон-12» и «Фотон М-2» по измерениям бортовых датчиков. Первые решения этой задачи были получены несколько лет назад «по горячим следам». Движение обоих спутников было реконструировано по измерениям магнитного поля Земли, движение «Фотона М-2» было также реконструировано по измерениям угловой скорости. Однако большой объем ценной измерительной информации, собранной на этих спутниках, не удавалось использовать для этой цели. Указанная информация включала измерения микроускорения и угловой скорости, выполненные системой QSAM на «Фотоне-12», и измерения акселерометра TAS3 на «Фотоне М-2». Все эти данные содержат значительные низкочастотные составляющие неизвестной до недавнего

времени природы, наличие которых делало невозможным использование этих данных для реконструкции движения. Недавно было понято, что эти составляющие наведены магнитным полем Земли. Решающий вклад в это понимание внес С. Van Bavinove – один из разработчиков TAS3. Осознание этого факта позволило выполнить надлежащую коррекцию данных и затем использовать их для реконструкции. В докладе дается описание корректирующей процедуры, и приводятся результаты ее тестирования. Тестирование состояло в прямом сравнении движения, найденного по измерениям угловой скорости, или микроускорения, с движением, найденным по измерениям магнитного поля Земли. Применение корректирующей процедуры оказалось весьма успешным. В частности, использование скорректированных данных измерений акселерометра TAS3 позволило реконструировать фактическое вращательное движение «Фотона М-2» в период времени 09.06.2005 – 16.06.2005, когда магнитные измерения отсутствовали. Вообще, ситуация оказалась удивительно удачной. Каждый из указанных выше измерительных приборов помимо своих основных функций выполнял еще и функции трехосного магнитометра. Это привело к достаточно точному совпадению реконструкций движения, полученных по разным данным.

- 15) 10. XII. 2007 г. А.В. Зюзгин (Пермский государственный университет)
«Использование конвективных датчиков для обнаружения и измерения микроускорений в реальной невесомости. Управление конвекцией в реальной невесомости. Наземное моделирование. Комплексные практикумы»

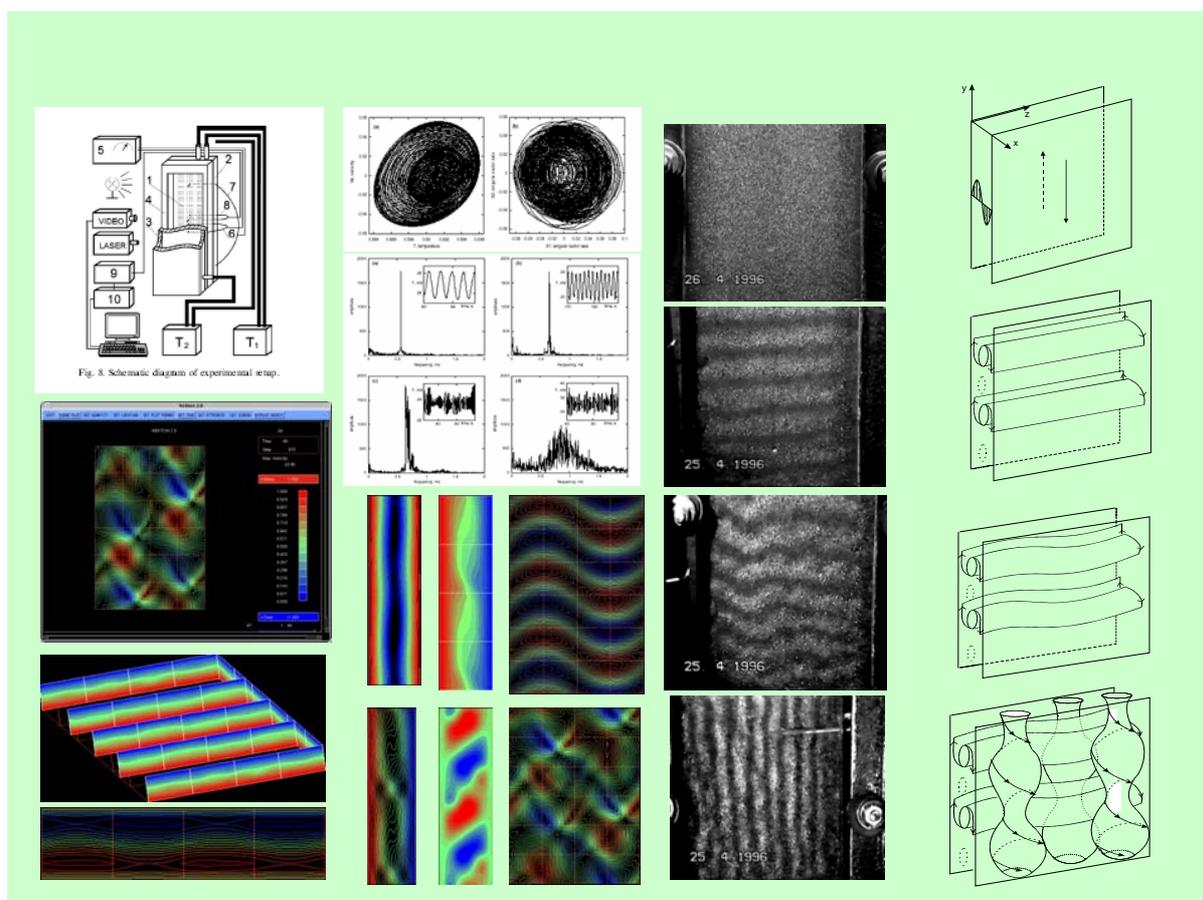
Сообщаются результаты, полученные в 1995-2000 годах на орбитальной станции «Мир» в серии российско-французских экспериментов по изучению влияния инерционных микроускорений на режимы теплообмена в сверхкритических жидкостях. Основным результатом исследований стало обнаружение термо-вибрационного и термо-инерционного конвективных движений в условиях реальной невесомости и контролируемого микрогравитационного воздействия.

Обсуждаются результаты, полученные при обработке экспериментов, выполненных с датчиком конвекции «Дакон» на орбитальной станции «Мир» в 1999 – 2000 г.г. В эксперименте датчик «Дакон» совершал колебания совместно с прибором «Alice-2». Записи сигналов и спектральный

состав откликов конвективного датчика сравниваются с данными микроакселерометров, которыми была снабжена аппаратура «Alice-2».

Изложен опыт комплексного практикума по физическому и математическому моделированию процессов конвективного тепло- и массообмена в условиях микрогравитации.

Расширенные материалы доклада даны на сайте <http://www.ipmnet.ru/~polezh/seminar.html>



16) 17. III. 2008 г. Э.Е. Сон (Московский физико-технический институт) «Микро - и наногидродинамика»

В последние годы развиваются новые направления в гидромеханике, связанные с нанотехнологиями. В традиционной гидродинамике изучается движение газов и жидкостей в макроскопических размерах. Микро- и наногидродинамика является областью механики, в которой изучается движение газа и жидкости в размерах, условно относящихся к области

нанотехнологий (менее 100 нм = 0,1 мкм). Обсуждаются некоторые направления исследований микро- и наногидродинамики.

Приложения микро- и наногидродинамики: жесткие диски РС, микро- и наноэлектронные приборы (MEMS), микро- и наносепараторы, микроканалы, микронасосы, микрозатворы, микросопла, микрогироскопы, микро- и наноспутники; приложения в медицине - движение крови и жидкостей по микрососудам глаза и др., лекарственные препараты и их доставка через микро- и нанопоры; микропористые топлива; электрогидродинамические сверхвысоко-чувствительные сенсоры для микро- и нанообластей; микрогидродинамика пористых сред; нефтяные задачи – улучшения гидроразрыва пласта, реология (микро- наноструктурные свойства жидких, вязких, пластических, упругих неньютоновских сред) и другие.

Течения в микро- и наногидродинамике: как и в обычной гидродинамике, рассматриваются однофазные течения, включающие задачи внутренней гидродинамики – течения газа и жидкости в микро- и наноканалах и трубках (в т.ч. нанотрубках), и задачи внешней гидродинамики – обтекание микро- и наночастиц. В двухфазной микро- и наногидродинамике рассматривается движение твердых или жидких микрочастиц в потоке газа или жидкости, микро- и нанопузырьковые среды, а также задачи многофазной гидро- и электродинамики. Результаты моделирования течения Пуазейля в микротрубке, когда молекулы у твердой стенки и атомы стенки при конечной температуре стенки совершают хаотическое движение, показывают, что в промежуточном интервале чисел Кнудсена наблюдается скольжение газа у стенки. Внутренняя гидродинамика описывает течения газа в микро- и наноканалах и трубках (в т.ч. нанотрубках). Трубы наименьшего диаметра в природе – это углеродные нанотрубки (УНТ). Лекарственные препараты часто доставляются в организм через микроотверстия (ионный канал грамотрицидина имеет диаметр поры 0,4 нм, длина 2,5 нм). Анализ показывает, что в микротрубке $D=50$ нм поток является непрерывным (континуальным), а в микротрубке $D=5$ нм - поток неконтинуальный, т.е. существует сильное различие взаимодействия жидкость – стенка в интервале 5-50 нм.

Особенности микро- и наногидродинамики: очень большое отношение поверхности к объему, размеры канала сравнимы с размерами молекул, движущихся по каналам, флуктуации плотности могут быть велики, в отличие от макротечений, транспортные свойства (вязкость,

диффузия, теплопроводность) могут содержать размерные факторы (как в турбулентности), взаимодействие нанопотока со стенкой может быть определяющим фактором, точной формы граничных условий нет, приближение сплошной среды может нарушаться, в микро- и нанопотоках наблюдаются явления, не существующие в макро- гидродинамике.

Течения газа при конечных числах Кнудсена. Решение уравнения Больцмана для модельного течения Куэтта с различными температурами стенок при конечных числах Кнудсена показало, что напряжение трения и поток тепла не зависят от расстояния между пластинами и от профилей скорости и температуры в потоке, а определяются разностью скоростей и температур; на стенках образуются скачки температуры и скорости (слои Кнудсена); направления вектора потока тепла и градиента температуры не совпадают; сильно выражена анизотропия переноса: под воздействием поперечной разности температур появляется поток тепла в направлении однородности всех полей (по оси x); возможно появление отрицательной теплопроводности (поток тепла направлен по градиенту температуры), т.е. нельзя использовать закон Фурье; при уменьшении длины свободного пробега (в пределе малых чисел Kn) получаются выражение Стокса для напряжения трения и закон Фурье для вертикального направления; по горизонтальному направлению поток тепла стремится к нулю, отличие продольного потока тепла от нулевого значения проявляется в следующем порядке разложения по градиентам полей. В микро- и наногидродинамике, как и в динамике разреженного газа, используются разложения по числу Кнудсена, что дает: в нулевом приближении по Kn – термодинамическое равновесие; в первом приближении по Kn - плотный газ – уравнения Навье-Стокса, Фурье и др., линейные соотношения между термодинамическими силами и потоками; во втором приближении по числу Kn – приближение Барнетта, нелинейные соотношения между потоками и силами; в высших приближениях по числу Кнудсена – сложные выражения и замыкающие соотношения; в пределе больших чисел Kn – свободномолекулярный режим (СМР); для уравнения Больцмана – численное решение (SMILE), есть точные решения; решеточное решение уравнения Больцмана (Lattice Boltzmann). Во всех случаях задачи микро- наногидродинамики (молекулярная динамика, прямое статистическое моделирование, Lattice Boltzmann) для неравновесных неоднородных систем требует суперкомпьютеров.

Микрогазовая динамика. Показано, что вследствие высокой теплопроводности и малых размеров микро- и нанотрубок, течения газов являются вязкими, а в одномерном приближении, аналогичном газовой динамике, течение ближе к изотермическому, чем адиабатическому, что приводит к особенностям, типа существования ударных волн разрежения и другим интересным явлениям.

Классическая или квантовая наногидродинамика. Следующий вопрос связан с использованием классической или квантовой гидродинамики для описания нанотечений. Квантовая гидродинамика важна там, где нарушаются законы классической физики. Вследствие малых размеров число таких задач в микро- и наногидродинамике существенно больше, чем в классической гидродинамике, в частности, в теплопередаче от жидкости к стенке (фотоны) и явлениях, где участвуют электроны (электромагнитные явления). Как правило, в нанотехнологических приложениях явления являются комплексными, т.е. важны одновременно электро-, гидро-, магнитные, оптические и др. процессы. При решении задач квантовой гидродинамики необходимо принимать во внимание процессы, в которых существенны квантовые явления (фотоны и электроны), которые имеют минимальные массы, т.к. им соответствуют наибольшие длины волн Де-Бройля, т.е. существенными являются квантовые явления в гидродинамике.

Микропузырьковые среды (газ в жидкости). Эта интересная область, имеющая большое количество приложений, требует решения следующих задач: изучение термодинамики двухфазных систем со свободной границей в применении к микро- и микропузырьковым средам; проведение расчетов и оценки энергетических затрат при получении микропузырьковых сред различными способами; кинетика роста и разрушения микропузырьков в жидкости; гидродинамика и пределы напряжений, приводящих к разрушению микропузырьков; физика простых жидкостей в применении к микропузырьковым средам; потенциалы взаимодействия у границ, корреляционные функции, классическая теория и квантовые эффекты; разработка математических моделей для описания физических свойств микро- и наноразмерных пузырьковых сред; теоретические методы и численное моделирование вязкости, плотности и седиментационной стабильности микро- и микропузырьковых сред; анализ возможностей модификации свойств жидкости в гидродинамических устройствах; проведение теоретических исследований возможных спосо-

бов получения микропузырьковых наноразмерных сред; зависимость поверхностного натяжения от радиуса кривизны; атомно-силовая микроскопия в микропузырьковых средах; микропузырьки в сонолюминесценции.

Микрогидродинамика нефти. При фильтрации нефти в пластах на глубине 1-3 км в твердых породах гидродинамика определяется законом Дарси. Проницаемость породы обычно выражается в миллидарси (мД), так типичные значения проницаемости лежат в пределах от 5 до 500 мД. Проницаемость крупнозернистых песчаников составляет $10^{-8} - 10^{-9} \text{ cm}^2$, проницаемость плотных песчаников около 10^{-10} cm^2 . Единицей измерения проницаемости пласта является постоянная Дарси, имеющая размерность площади, 1 Дарси = 1 кв.мкм. Для пластов с проницаемостью в милли Дарси размеры пор составляют доли микрон, т.е. течения в них относятся к области нанотехнологий.

Микроструктура вязкопластической жидкости. Во многих случаях жидкость меняет свои свойства вследствие необратимых процессов, происходящих на микро- и наноуровне, при этом происходит изменение реологических свойств жидкостей. В данном разделе выполнены экспериментальные и теоретические исследования нанореологии гелей, используемых при гидроразрыве пласта.

Численное моделирование микро- и нанотечений. Для задач микро-наногидродинамики газа необходимо аналитическое или численное решение уравнения Больцмана. В мире существует три основных кода прямого статистического моделирования (PCM): DS2V (скалярный код G.Bird), DAC (NASA, только для NASA), SMILE (ИТПМ СО РАН). Рассчитаны давление, напряжение трения и тепловой поток для трех кодов для сравнения. Расчеты молекулярных течений реагирующих газов могут быть использованы для течений в микро- и нанотрубках с химическими реакциями. Проведены расчеты Клипера в молекулярном режиме (на больших высотах) для коэффициента теплопередачи и поля температур $H=80$ км, моделирование выполнено на суперкомпьютере МФТИ с использованием пакета SMILE.

Плазменное управление полетом. Возможности эффективного управления движением крыла самолета или лопатками турбины, развиваемые в последние годы, связаны с «Нулевым суммарным потоком массы через поверхность». Устройства управления движением называются актуаторами. В настоящее время развиваются механические, акустические,

тепловые и плазменные актуаторы. Наиболее эффективными являются плазменные актуаторы, в которых размеры стримеров в барьерном поверхностном разряде составляют доли микрон. Экспериментальные исследования в течение последних 5 лет выполнены во многих лабораториях в России и США. Теория и численное решение уравнений Эйлера и Навье-Стокса выполнены на суперкомпьютере МФТИ с использованием параллельного кода GDT (256 процессоров) в нашей группе (AIAA-46, США, 2008).

Микро-жидкостные молекулярные сенсоры. В МФТИ на кафедре вакуумной электроники (зав. кафедрой акад. А.С. Бугаев) развиваются МЖМ сенсоры. ЭГД – ПЕНТОД состоит из: керамической трубки, электродного узла, электролита, пористых керамических перегородок, анодов и катодов. При создании ускорения возникает инерциальная сила давления в жидкости, которая меняет соотношение концентрации электролита в воде у электродов, что меняет ток в цепи “сетки” жидкого пентода, обеспечивая большой коэффициент преобразования внешнего механического сигнала в электрический ток. Отличительные особенности сенсора: высокая чувствительность и низкий уровень шума на фоне исключительно малой инерциальной массы; отсутствие прецизионных движущихся механических частей, подверженных разрушению или износу; способность измерять как линейные, так и вращательные движения в широком частотном и динамическом диапазоне; способность работать в экстремальных климатических условиях и при высокой влажности. Сенсоры могут измерять координаты в нанотехнологических приложениях.

Заключение

Микро- и наногидродинамика представляет собой новую область фундаментальной и прикладной механики, в которой фундаментальные исследования служат основой создания гидродинамических нанотехнологий, уже имеющих применение, и основой развития перспективных технологий XXI века.

Объединенный
Семинар "Механика невесомости и гравитационно-чувствительные системы" (рук. В.И. Полежаев, В.В. Сазонов) и
Семинар Ведущей научной школы НШ-3066.2006.8
академика Н.А. Анфимова в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

17) 27. X. 2008 г. Т. Бойзелинк, К. Ван Бавинхов (Redshift design and Engineering, BVBA, Belgium), В.И. Абрашкин, А.Е. Казакова, (ГНПРКЦ «ЦСКБ-«Прогресс»), В.В. Сазонов (ИПМат им. М.В. Келдыша РАН) «Вращательное движение КА «Фотон М-3» и квазистатические микроускорения на его борту»

Приводятся результаты послеполетной обработки данных измерений бортовых датчиков КА «Фотон М-3»: магнитометров и акселерометра TAS3, входящих в состав аппаратуры DIMAC, а также датчика угловой скорости системы управления движением КА. Обработка измерений магнитного поля и угловой скорости выполнялась с помощью интегральных статистических методик: данные, полученные на отрезке времени длиной несколько орбитальных витков, обрабатывались совместно методом наименьших квадратов с помощью интегрирования уравнений движения КА относительно центра масс. При обработке оценивались начальные условия движения и параметры используемой математической модели. Результаты определения движения КА по обоим видам измерений оказались хорошо согласованными друг с другом.

Полученные результаты дали полное представление о движении КА. Это движение, начавшееся с малой угловой скоростью, постепенно ускорялось и через пять суток стало близко к регулярной прецессии Эйлера осесимметричного твердого тела. В конце неуправляемого полета угловая скорость КА относительно его продольной оси составляла 0.5 град./с; проекция угловой скорости на плоскость, перпендикулярную этой оси, имела модуль около 0.18 град./с. По результатам определения движения рассчитаны микроускорения в местах расположения на борту КА научной аппаратуры для микрогравитационных исследований точки установки акселерометра TAS3. Микроускорения, рассчитанные для точки установки акселерометра TAS3, были сравнены с данными низкочастотной фильтрации его показаний. Результаты определений микроускорения обоими способами совпали со среднеквадратичной ошибкой менее 10^{-6} м/с² после уточнения положения акселерометра и внесения поправки в данные фильтрации за влияние магнитного поля Земли.

СПИСОК АВТОРОВ

- Абрашкин В.И. - 56
Агеев А.В. - 28
Анфимов Н.А. - 32
Бабушкин И.А. - 28
Бавинхов К. В. - 56
Беляев М.Ю. - 39
Бессонов О.А. - 28
Бойзелинк Т. - 56
Вяткин К.В. - 28
Герцен Ю.П. - 28
Глазкин И.В. - 28
Глухов А.Ф. - 28
Горбунов А.А. – 41, 47
Десятов А.В. - 47
Елкин К.С. - 32
Емельянов В.М. – 41, 47
Заклюковский С.В. - 28
Земсков В.С. - 13
Зильберман Е.А. - 28
Зюзгин А.В. - 41, 49
Иванов А.И. – 28, 39, 41
Ильмов Д.Н. - 47
Казакова А.Е. - 56
Климов Д.М. - 5
Левтов В.Л. - 36
Леднев А.К. - 41
Лукьященко В.И. - 32
Максимова М.М. - 28
Марков А.В. 39
Никитин С.А. – 22, 28, 41
Петров О.Ф. - 20
Пинягин А.Ю. - 28
Полежаев В.И. – 5, 22, 28, 41
Порошин Д.В. - 28
Путин Г.Ф. – 28, 41
Пушкин С.Е. - 28
Раухман М.Р. - 13
Сазонов В.В. – 5, 8, 28, 48, 56
Соболева Е.Б. - 41
Сон Э.Е. - 50
Суворов В.В. - 32
Феонычев А.И. - 46
Фортов В.Е. - 20
Цимбалюк М.М. - 32
Черкасов С.Г. - 47
Шалимов В.П. - 13

АДРЕСА АВТОРОВ

Абрашкин В.И.
ГНПРКЦ «ЦСКБ-«Прогресс»,
г. Самара, ул. Земеца, д. 18
E-mail: abrashkin@cskb1-1.ssau.ru

Агеев А.В.
НПП «Системы контроля»
614031, г. Пермь,
ул. Докучаева, д. 31

Анфимов Н.А.
ФГУП ЦНИИМаш
141070, Московская обл.,
г. Королев, ул. Пионерская, д. 4
E-mail: anfimov@mcc.rsa.ru

Бабушкин И.А.
Пермский государственный
университет
614990, г.Пермь, ул.Букирева, д.15

Бавинхов К.В.
Redshift design and Engineering,
BVBA, Engineering, Belgia,
Sint Niklaas

Беляев М.Ю.
РКК «Энергия»
141070, Московская область,
г. Королев, ул. Ленина, д. 4а
E-mail: mmsc@scsc.ru

Бессонов О.А.
ИПМех РАН
119526, г. Москва, проспект
Вернадского, д.101, к.1, Россия
Тел.: (495)434-20-70
E-mail: bess@ipmnet.ru

Бойзелинк Т.
Redshift design and Engineering,
BVBA, Engineering, Belgia,
Sint Niklaas

Вяткин К.В.
НПП «Системы контроля»
614031, г. Пермь,
ул. Докучаева, д. 31

Герцен Ю.П.
Пермский государственный
университет
614990, г.Пермь, ул.Букирева, д.15

Глазкин И.В.
Пермский государственный
университет
614990, г.Пермь, ул.Букирева, д.15

Глухов А.Ф.
Пермский государственный
университет
614990, г.Пермь, ул.Букирева, д.15

Горбунов А.А.
ИПМех РАН
119526, г. Москва, проспект
Вернадского, д.101, к.1
Тел.: (495)434-32-83
Факс: 8(499)7399531
E-mail: gorb@ipmnet.ru

Десятов А.В.
Исследовательский центр им.
М.В.Келдыша
125438, г.Москва,
ул. Онежская, д.8.

Елкин К.С.
ФГУП ЦНИИМаш
141070, Московская обл.,
г. Королев, ул. Пионерская, д. 4
E-mail: elkin@tsniimash.ru

Емельянов В.М.
ИПМех РАН
119526, г. Москва, проспект
Вернадского, д.101, к.1, Россия
Тел.: (495)434-41-53
E-mail: emel@ipmnet.ru

Заклюковский С.В.
НПП «Системы контроля»
614031, г. Пермь,
ул. Докучаева, д. 31

Земсков В.С.
Институт металлургии и
материаловедения им.
А.А.Байкова РАН
119991, г. Москва, Ленинский
проспект, д. 49
E-mail: zemskov@ultra.imet.ac.ru

Зильберман Е.А.
Пермский государственный
университет
614990, г.Пермь, ул.Букирева, д.15

Зюзгин А.В.
Пермский государственный
университет
614990, г.Пермь, ул.Букирева, д.15
E-mail: Alexey.Zyuzgin@psu.ru

Иванов А.И.
РКК "Энергия"
141070, Московская область,
г. Королев, ул. Ленина, д. 4а
Тел.: 7(495)513-76-19
Fax: 7(495)513-61-29
E-mail: ialex5@infoline.su

Ильмов Д.Н.
Исследовательский центр им.
М.В.Келдыша
125438, г.Москва,
ул. Онежская, д.8.

Казакова А.Е.
ГНПРКЦ «ЦСКБ-«Прогресс»,
г. Самара, ул. Земеца, д. 18

Климов Д.М.
ИПМех РАН
119526, г. Москва, проспект
Вернадского, д.101, к.1.
Тел.: (495)434
Факс: 8(499)7399531
E-mail: klimov@ipmnet.ru

Левтов В.Л.
ФГУП ЦНИИМаш,
141070, Московская область,
г. Королев, ул. Пионерская, д. 4
Тел.: 7(495)513-42-65
E-mail: vallevtov@mtu-net.ru

Леднев А.К.
ИПМех РАН
119526, г. Москва, проспект
Вернадского, д.101, к.1.
Тел.: (495)434-41-53
Факс: 8(499)7399531
E-mail: lednev@ipmnet.ru

Лукьященко В.И.
ФГУП ЦНИИМаш
141070, Московская обл.,
г. Королев, ул. Пионерская, д. 4

Максимова М.М.
РКК «Энергия»
141070, Московская область,
г. Королев, ул. Ленина, д. 4а
Тел.: 7(495)513-76-19
Фах: 7(495)513-61-29

Марков А.В.
РКК "Энергия"
141070, Московская область,
г. Королев, ул. Ленина, д. 4а

Никитин С.А.
ИПМех РАН
119526, г. Москва, проспект
Вернадского, д.101, к.1.
Тел.: (495)434-32-83
Факс: 8(499)7399531
E-mail: nikitin@ipmnet.ru

Петров О.Ф.
Объединенный институт высоких
температур РАН
127412, Москва, ул. Ижорская,
д. 13/19.

Пинягин А.Ю.
НПП «Системы контроля»
614031, г. Пермь,
ул. Докучаева, д. 31

Полежаев В.И.
ИПМех РАН
119526, г. Москва, проспект
Вернадского, д.101, к.1.
Тел.: (495)434-32-83
Факс: 8(499)7399531
E-mail: polezh@ipmnet.ru

Порошин Д.В.
НПП «Системы контроля»
614031, г. Пермь,
ул. Докучаева, д. 31

Путин Г.Ф.
Пермский государственный
университет
614990, г.Пермь, ул.Букирева, д.15
E-mail: putin@psu.ru

Пушкин С.Е.
Пермский государственный
университет
614990, г.Пермь, ул.Букирева, д.15

Раухман М.Р.
Институт металлургии и
материаловедения им.
А.А.Байкова РАН
119991, г. Москва, Ленинский
проспект, д. 49

Сазонов В.В.
Институт прикладной математики
им. М.В. Келдыша РАН,
125047, Москва, Миусская пл., д. 4
Тел.: 7(495) 250-78-13
Факс: 7(495) 9720737
E-mail: sazonov@spp.keldysh.ru

Соболева Е.Б.
ИПМех РАН
119526, г. Москва, проспект
Вернадского, д.101, к.1.
Тел.: (495)434-32-83
Факс: 8(499)7399531
E-mail: sobolel@mail.cnt.ru

Сон Э.Е.
Московский физико-технический
институт
141700, Московская область,
г.Долгопрудный, Институтский
пер., д. 9
E-mail: son@mipt.ru
Тел.: (495)4086354

Суворов В.В.
ФГУП ЦНИИМаш
141070, Московская обл.,
г. Королев, ул. Пионерская, д. 4

Феонычев А.И.
Государственный научно-
исследовательский институт
прикладной механики и
электродинамики
125080, г. Москва,
Ленинградское шоссе, д. 5

Фортов В.Е.
Объединенный институт высоких
температур РАН
127412, Москва, ул. Ижорская,
д. 13/19.
Тел.: 495-79-88

Цимбалюк М.М.
ФГУП ЦНИИМаш,
141070, Московская обл.,
г. Королев, ул. Пионерская, д. 4
Тел.: 513-75-51

Черкасов С.Г.
Исследовательский центр им.
М.В.Келдыша
125438, г.Москва,
ул. Онежская, д.8.
E-mail: sergcherkasov@mtu-net.ru

Шалимов В.П.
ФГУП ЦНИИМаш,
141070, Московская область,
г. Королев, ул. Пионерская, д. 4
E-mail: shalimov@ultra.imet.ac.ru

ПРИЛОЖЕНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ ДОКЛАДОВ НА СЕМИНАРЕ ПО МЕХАНИКЕ НЕВЕСОМОСТИ И ГРАВИТАЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ СИСТЕМАМ ЗА 1997-2008 г.^(*)

- 1) 20. X. 1997 г. В.Л. Левтов, В.В. Романов (ОАО "НПО "Композит", г.Королев) «Бортовой комплекс для фундаментальных исследований в области физики жидкости и материаловедения в условиях космического полета».
- 2) 27. X. 1997 г. А.Н. Курилов (Институт "Неметаллы" ОАО "НПО "Композит", г. Королев) «Исследование процессов разделения фаз в критической точке "жидкость-пар" и окологкритической смеси».
- 3) 10. XI. 1997 г. А.П. Крюков, С.Б. Нестеров (ИПМех РАН, Москва) «Исследование особенностей процессов теплопереноса в жидком и газообразном гелии при пониженной гравитации».
- 4) 17. XI. 1997 г. Е.В. Жариков (РХТУ им. Менделеева, г. Москва) «Эффекты и механизмы воздействия контролируемых вибраций на теплоперенос в жидкости и рост монокристаллов».
- 5) 24. XI. 1997 г. В.В. Сазонов (ИПМат им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва) «Микроускорения на борту ИСЗ».
- 6) 15. XII. 1997 г. В.И. Полежаев (ИПМех РАН, г. Москва) «Основные подходы и результаты исследований по моделированию процессов конвективного тепло- и массообмена в условиях микрогравитации».
- 7) 15. XII. 1997 г. О.А. Бессонов (ИПМех РАН, г. Москва) «Математическое моделирование датчика конвекции "Дакон" в условиях реального космического полета».
- 8) 22. XII. 1997 г. В.М. Емельянов (ИПМех РАН, г. Москва) «Измерительно-вычислительный комплекс для исследований динамики околокритической жидкости (состояние и основные направления работ)».
- 9) 22. XII. 1997 г. А.А. Горбунов (ИПМех РАН, г. Москва) «Численное моделирование течений сжимаемого вязкого теплопроводного газа на основе полных уравнений Навье – Стокса».

^(*) Некоторые из докладов представлялись на объединенном заседании с семинаром по математическому моделированию в задачах тепло- и массообмена.

- 10) 12. I. 1998 г. М.К. Ермаков (ИПМех РАН, г. Москва) «Разработка численных методик и исследование задач конвекции на основе компьютерной лаборатории».
- 11) 12. I. 1998 г. Е.Б. Соболева (ИПМех РАН, г. Москва) «Моделирование естественной конвекции в приближении дозвукового течения».
- 12) 19. I. 1998 г. В.Г. Козлов (ПГУ, г. Пермь) «Динамика фазовых неоднородностей в полости с несжимаемой жидкостью, совершающей непоступательные вибрации в условиях микрогравитации».
- 13) 26. I. 1998 г. В.С. Юферев (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт - Петербург) «Тепловая конвекция и перенос примеси, вызываемые вращением космического корабля при его движении по орбите».
- 14) 2. II. 1998 г. А.И. Федюшкин (ИПМех РАН, г. Москва) «Математическое моделирование конвективного теплообмена при выращивании кристаллов (обзор работ автора)».
- 15) 9. II. 1998 г. Н. Г. Бураго (ИПМех РАН, г. Москва) «Программа АСТРА для расчета нелинейных процессов в сплошных средах».
- 16) 12. II. 1998 г. А.В. Гудзовский (Институт автоматизации проектирования РАН, г. Москва) «О зависимости стационарных режимов свободной конвекции от начальной температуры».
- 17) 2. III. 1998 г. В.Д. Голышев (ВНИИ СИМС, г. Александров) «Особенности переноса массы при выращивании монокристаллов Ge в условиях подавленной естественной конвекции методом ОТФ».
- 18) 16. III. 1998 г. В.Г. Косушкин (НИИ материалов электронной техники, г. Калуга) «Низкоэнергетические воздействия в технологии выращивания монокристаллов полупроводников».
- 19) 13. IV. 1998 г. А.И. Простомолотов, Н.А. Вerezуб, А.К. Леднев, А.З.Мяльдун, С.А. Никитин (ИПМех РАН, г. Москва) «Моделирование конвекции расплава в методе Чохральского».
- 20) 20. IV. 1998 г. В.И. Полежаев (ИПМех РАН, г. Москва) «Температурные колебания в методе Чохральского и наземные альтернативы микрогравитации».
- 21) 27. IV. 1998 г. В.С. Земсков, М.Р. Раухман, В.П. Шалимов (Институт металлургии им. А.А. Байкова РАН, г. Москва) «Экспериментально наблюдаемые эффекты влияния микроускорений на распределение компонентов в монокристаллах полупроводников, выращенных из расплавов на космических аппаратах».

- 22) 12. V. 1998 г. В.А. Гончаров, Е.В. Марков (НИИ Научный Центр, г.Зеленоград) «Численная модель роста кристаллов арсенида галлия методом направленной кристаллизации в условиях микрогравитации».
- 23) 23. XI. 1998 г. В.Л. Левтов, В.В. Романов (ОАО НПО «Композит» г.Королев), А.И. Иванов, С.Б. Рябуха (РКК «Энергия», г. Королев), В.Ю. Антропов (НИИ «Научный центр», Зеленоград, Москва) «Предварительные результаты экспериментальной отработки виброзащитной платформы ВЗП-1К в условиях контролируемых динамических воздействий».
- 24) 24. XI. 1998 г. В.К. Артемьев (ГНЦ РФ ФЭИ, г. Обнинск) «Некоторые вопросы и приложения численных методов динамики вязкой жидкости»
- 25) 1. XII. 1998 г. И.М. Дергунов, А.П. Крюков (МЭИ, г. Москва) А.А.Горбунов (ИПМех РАН, г. Москва) «Эволюция паровой полости при кипении сверхтекучего гелия в условиях невесомости».
- 26) 7. XII. 1998 г. В.И. Полежаев (ИПМех РАН, г. Москва) «17-я Международная рабочая группа по измерениям микрогравитации».
- 27) 11. XII. 1998 г. В.К. Голов (Институт медико-биологических проблем, г. Москва) «Результаты исследований теплообмена на биоспутниках "Космос"».
- 28) 15. XII. 1998 г. М.К. Ермаков, С.А. Никитин, В.И. Полежаев, В.П.Яремчук (ИПМех РАН, г. Москва) «Компьютерная лаборатория для моделирования конвективного тепло- и массообмена и ее применение в учебном процессе».
- 29) 21. XII. 1998 г. Н.А. Анфимов (ЦНИИМАШ, г. Королев) «Научно-технические проблемы при создании Международной космической станции (МКС)».
- 30) 18. I. 1999 г. М.Г. Таирбеков (ГНЦ РФ ИМБП, г.Москва) «Гравитационная чувствительность микробиомеханических систем (клеток)».
- 31) 26. I. 1999 г. И.А. Бабушкин, Г.П. Богатырев, А.Ф. Глухов, Г.Ф. Путин (ПГУ, г. Пермь), А.И. Иванов (РКК «Энергия», г. Королев), О.А.Бессонов, В.И. Полежаев, С.А. Никитин (ИПМех РАН, г. Москва) «Система для измерения, оперативного расчета и тестов тепловой конвекции в космическом полете».
- 32) 26. I. 1999 г. И.А. Бабушкин, Г.П. Богатырев, А.Ф. Глухов, Е.А.Зильберман, Г.Ф. Путин (ПГУ, г. Пермь), С.Е. Пушкин, А.И.Иванов, М.М. Максимова (РКК «Энергия», г. Королев) «Аппаратура ДАКОН для изучения тепловой конвекции на космических аппаратах: устройство и наземная отработка».

- 33) 26. I. 1999 г. О.А. Бессонов, С.А. Никитин, В.И. Полежаев (ИПМех РАН, г. Москва) «Теоретическая модель и численный расчет пространственной нестационарной конвекции в цилиндрической области применительно к аппаратуре ДАКОН в наземных условиях и в космическом эксперименте».
- 34) 26. I. 1999 г. С.В. Авдеев, А.В. Калмыков, А.И. Иванов (РКК «Энергия», г. Королев), А.А. Горбунов, В.М. Емельянов, В.И. Полежаев (ИПМех РАН, г. Москва), А.В. Зюзгин, Г.Ф. Путин (ПГУ, г. Пермь) «О конвекции околокритической жидкости в условиях микроускорений при орбитальном полете станции "Мир"».
- 35) 26. IV. 1999 г. Л.А. Моисеева (ИЦ им. М.В. Келдыша, г. Москва) «Естественная конвекция в цилиндрическом баке в условиях микрогравитации при сложных тепловых граничных условиях».
- 36) 11. V. 1999 г. Ю.В. Шеретов «Теоретическое и численное исследование квазигазодинамических и квазигидродинамических уравнений».
- 37) 31. V. 1999 г. Г.С. Глушко, И.А. Крюков (ИПМех РАН, г. Москва) «Исследование особенностей процесса горения в потоке газа в замкнутых областях при микрогравитации».
- 38) 7. VI. 1999 г. В.А. Мелик-Шахназаров, Б.Г. Захаров (НИЦ «Космическое материаловедение» ИК РАН, г. Калуга) «О результатах работ по созданию активного шестимодового подвеса для защиты от микроускорений».
- 39) 15. VI. 1999 г. Презентация стенда и видеофильма «Механика невесомости и гравитационно-чувствительные системы» на выставке, посвященной 275-летию РАН.
- 40) 22. VI. 1999 г. А.А. Горбунов (ИПМех РАН, г. Москва) «Оценка ускорения вычислений на многопроцессорных ПВС в задачах теплообмена».
- 41) 13. IX. 1999 г. В.И. Полежаев, В.М. Емельянов (ИПМех РАН, Москва), Г.Ф. Путин, А.В. Зюзгин (ПГУ, г. Пермь), А.И. Иванов, А.В. Калмыков (РКК "Энергия", г. Королев), В.В. Сазонов (ИПМат РАН, г. Москва), В.Л. Левтов, В.В. Романов (НПО "Композит", г. Королев) «Влияние вибраций на теплоперенос в околокритической жидкости в условиях невесомости (постановка и предварительные результаты эксперимента "Алис-2-Вибро", станция Мир, февраль-март 1999 года)».
- 42) 4. X. 1999 г. А.В. Калиновский, С.Б. Нестеров (МЭИ, г. Москва) «Роль неизотермичности, обусловленной гравитацией, при проведении экспериментов по криосорбции изотопов гелия вблизи лямбда-точки».

- 43) 15. XI. 1999 г. В.Н. Попов (МГУ, Москва) «Надкритические режимы тепло-солевой конвекции при изменении силы тяжести».
- 44) 24. I. 2000 г. И.Н. Цыганник (Институт биоорганической химии им. М.М. Шемякина и Ю.А.Овчинникова РАН, г. Москва) «Кристаллизация белков в условиях микрогравитации».
- 45) 31. I. 2000 г. А. Н. Пестунов, С.Н. Сидоров (ЦНИИМАШ, г.Королев) «Миниатюрный блок акселерометров малых ускорений».
- 46) 7. II. 2000 г. С.В. Симаков (РКК "Энергия", г. Королев) «Зарубежные системы измерения микровиброускорений на борту пилотируемой орбитальной станции "Мир"».
- 47) 21. II. 2000 г. М.Ю. Жуков (Ростовский государственный университет, г. Ростов-на-Дону) «Перспективы применения методов электрофореза в условиях микрогравитации».
- 48) 13. III. 2000 г. А.А. Горбунов (ИПМех РАН, Москва) «Моделирование течения околокритической жидкости в замкнутой области под действием внутреннего источника тепла в земных условиях и в невесомости».
- 49) 26. V. 2000 г. А.С. Савин (МГТУ им. Баумана) «Прямые и обратные задачи взаимодействия гидродинамических особенностей со свободной поверхностью весомой жидкости».
- 50) 31. V. 2000 г. А. А. Иванова (ПГУ, г. Пермь) «Об эффективности вибраций для управления неоднородными гидродинамическими системами в условиях микрогравитации».
- 51) 5. VI. 2000 г. И.А. Крюков, Е.Б. Соболева (ИПМех РАН, Москва) «Об особенностях расчета сжимаемых течений при малых числах Маха».
- 52) 21. VIII. 2000 г. А. I. Fedoseyev (Center for Microgravity and Materials Research, University of Alabama in Huntsville, USA), J.I.D. Alexander (Department of Mechanical and Aerospace Engineering and National Center for Microgravity Research, Case Western Reserve University, Cleveland, Ohio, USA), R.S. Feigelson (Material Research Center, Stanford University, California, USA), E.V.Zharikov (General Physics Institute, RAS, Moscow) «Investigation of thermo-vibrational flows in Bridgman melt growth: numerical modelling and experiments».
- 53) 25. IX. 2000 г. В.И. Полежаев (ИПМех РАН, Москва) «Механика микрогравитации на XX-ом Международном конгрессе по теоретической и прикладной механике».

- 54) 13. XII. 2000 г. О. П. Федоров, Е. И. Берсудский, Е.Л. Живолуб (Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, г. Киев) «Исследования in-situ направленного затвердевания прозрачных органических материалов».
- 55) 14. XII. 2000 г. Г.Ф. Путин (ПГУ, г. Пермь) «Экспериментальное исследование условий возникновения и структуры свободноконвективных течений».
- 56) 12. II. 2001 г. Ермаков М.К., Полежаев В.И. (ИПМех РАН, г. Москва), Яремчук В.П. (МФТИ, г. Долгопрудный) «Компьютерная лаборатория по конвективному тепло и массообмену. Компьютерный практикум».
- 57) 22. II. 2001 г. И.А. Крюков, Е.Б. Соболева (ИПМех РАН, г. Москва) «Об особенностях расчета течений при малых числах Маха. Моделирование тепломассопереноса в околокритических жидкостях».
- 58) 16. IV. 2001 г. А. А. Горбунов (ИПМех РАН, г. Москва) «Устойчивость изоэнтропического равновесия совершенного газа в невесомости».
- 59) 21. V. 2001 г. С.Ф. Савин (РКК "Энергия", г. Королев) «Кулоновские кристаллы, формируемые заряженными диамагнитными частицами в неоднородном стационарном магнитном поле».
- 60) 13. IX. 2001 г. Wen-Rui Hu (Space Science Committee CAS, National Microgravity Laboratory CAS, China) «Microgravity fluid mechanics research in China».
- 61) 1. X. 2001 г. А.А. Горбунов (ИПМех РАН, г. Москва) «Устойчивость изоэнтропического равновесия околокритических сред в невесомости».
- 62) 22. X. 2001 г. В.И. Полежаев, со-исполнители: А.А. Горбунов, В.М.Емельянов, А.К. Леднев, Е.Б. Соболева (ИПМех РАН, г. Москва), И.А. Бабушкин, А.Ф. Глухов, Г.Ф. Путин, Е.А. Зильберман, А.В. Зюзгин (ПГУ, г. Пермь), В.В. Сазонов (ИПМат им. М.В. Келдыша РАН, г.Москва), А.И. Иванов, А.В. Калмыков (РКК «Энергия», г. Королев) «Состояние исследований конвекции и процессов теплопереноса в околокритической жидкости и уточнение требований к аппаратуре для экспериментов, планируемых по проекту "КРИТ", на Российском Сегменте Международной Космической Станции».
- 63) 3. VI. 2002 г. С.А. Никитин, В.И. Полежаев (ИПМех РАН, г. Москва), В.В. Сазонов (ИПМат им. М.В. Келдыша, г. Москва) «Влияние микроускорений на распределение примеси в расплаве полупроводника в космическом полете».

- 64) 3. VI. 2002 г. Н.В. Никитин (Институт механики МГУ, г. Москва), В.И.Полежаев, В.П. Яремчук (ИПМех РАН, г. Москва) «Численное исследование концентрационной неоднородности в цилиндрической области в условиях микрогравитации на КА "Фотон"».
- 65) 3. VI. 2002 г. М.К. Ермаков, С.А. Никитин, В.И. Полежаев, В.П.Яремчук (ИПМех РАН, г. Москва) «Образование и практикум по гидромеханике невесомости на основе компьютерной лаборатории».
- 66) 3. X. 2002 г. Э. Кешок (Кливлендский университет, г. Кливленд, Огайо, США) «Двухфазные течения и теплообмен при кипении в условиях микрогравитации».
- 67) 7. X. 2002 г. Э. Кешок (Кливлендский университет, г. Кливленд, Огайо, США) «Обзор эффектов влияния сильных центробежных полей и ускорений на теплообмен при кипении».
- 68) 11. XI. 2002 г. Kevin McPherson (NASA, Glenn Research Center, Cleveland, USA) «PIMS Microgravity Acceleration Software System (MASS)».
- 69) 11. XI. 2002 г. Kenol Jules (NASA, Glenn Research Center, Cleveland, USA) «ISS Characterization Results; Quasi-steady and Vibratory».
- 70) 17. III. 2003 г. М.В. Волков, А.В. Егоров (ФГУП «КБОМ им. В.П.Бармина», г. Москва) «Методы и средства диагностики технологических установок на борту космических аппаратов "Фотон"».
- 71) 28. IV. 2003 г. А.М. Воробьев (ПГУ, г. Пермь) «Поведение околоскритической жидкости в высокочастотном вибрационном поле».
- 72) 26. V. 2003 г. С.Г. Черкасов, А.С. Черкасова (ИЦ им. М.В. Келдыша, г.Москва) «Влияние теплового расширения на перенос тепла в газе».
- 73) 2. VI. 2003 г. М.Н. Коган, О.Г. Фридендер, В.Ю. Александров, Ю.В.Никольский (ЦАГИ, г. Жуковский) «Конвекция и другие явления, вызываемые неоднородностью полей температуры и концентрации в медленных течениях газа».
- 74) 23. VI. 2003 г. М.К. Ермаков (ИПМех РАН, г. Москва), М.С. Ермакова (МГУ, г. Москва) «Исследование устойчивости термокапиллярного течения в криволинейном жидком мосте».
- 75) 8. X. 2003 г. Иванов А.И. (РКК "Энергия", г. Королев) «Экспериментальные исследования конвективных процессов в газовых и сверхкритических средах на орбитальном комплексе "Мир"».
- 76) 26. XI. 2003 г. R. Monti, R. Savino, D. Paterna (Dipartimento di Scienza e Ingegneria dello Spazio Università degli Studi di Napoli Federico II) «Gershuni methodology for the evaluation on the disturbances on board the International Space Station».

- 77) 26. XI. 2003 г. W.R. Hu (Space Science Committee CAS, National Microgravity Laboratory CAS, China), Z.M. Tang, Y. Aa, Z.H. Cao (National Microgravity Laboratory CAS, Institute of Mechanics CAS, Beijing, China) «Bifurcation transitions for onset of oscillatory thermocapillary convection in a half floating zone».
- 78) 26. XI. 2003 г. А.В.Зюзгин, Г.Ф.Путин, А.Ф.Харисов (ПГУ, г. Пермь) «Наземное моделирование термовибрационной конвекции в условиях микрогравитации».
- 79) 26. XI. 2003 г. В.П. Яремчук (ИПМех РАН, г. Москва) «Трехмерные конвективные течения, тепло- и массообмен в цилиндрической области в условиях микрогравитации».
- 80) 9. II. 2004 г. А.М. Пылаев (МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва) «Задача о возникновении естественной конвекции в замкнутых полостях».
- 81) 1. III. 2004 г. О.Ф. Петров (Институт теплофизики экстремальных состояний Объединённого института высоких температур РАН, г.Москва), С.Ф. Савин (РКК "Энергия" им. С.П. Королёва, г. Королёв) «Проект "Кулоновский кристалл" - демонстрационно-образовательные и научные эксперименты с использованием электромагнита на борту РС МКС».
- 82) 29. III. 2004 г. А. Д. Орлов (ИФТТ РАН, г. Черноголовка) «Исследование процесса направленной кристаллизации сплавов эвтектического состава».
- 83) 15. IV. 2004 г. В.И. Полежаев (ИПМех РАН, г. Москва) «Гидромеханика и процессы тепломассообмена в условиях микрогравитации: история, этапы развития и направления современных фундаментальных и прикладных исследований».
- 84) 26. IV. 2004 г. А. В. Мясников (ИПМех РАН, г. Москва) «Сверхзвуковые источники в космической газовой динамике: модели и интерпретация наблюдений некоторых объектов».
- 85) 17. V. 2004 г. А.И. Простомолотов (ИПМех РАН, г. Москва) «Разработка и применение методов моделирования в технологиях выращивания монокристаллов из расплава».
- 86) 7. VI. 2004 г. В.Л. Левтов (ЦНИИМАШ, г. Королев), В.П. Яремчук (ИПМех РАН) «Физическое и математическое моделирование конвекции в экспериментах с расплавами полупроводника в условиях микрогравитации».

- 87) 17. VI. 2004 г. В. Jernstrom, M. Lopatin, S. Bostrom (Process Flow Ltd, Turku, Finland), Д. Ворошнин (Process Flow Ltd Оу, г. Санкт-Петербург, Россия) «CFD – программа FLUENT Inc.».
- 88) 21. VI. 2004 г. В.М. Емельянов, В.И. Полежаев (ИПМех РАН, г.Москва), А.И. Иванов (РКК "Энергия", г.Королев) «Итоги Международного симпозиума по физическим наукам в космосе (ISPS-2004, Toronto, May 23-27)».
- 89) 5. VIII. 2004 г. В.С. Бердников (Институт теплофизики СО РАН, г.Новосибирск) «Результаты теоретических и экспериментальных исследований конвекции в моделях метода Чохральского и в плоских слоях различной ориентации».
- 90) 9. VIII. 2004 г. В.И. Полежаев, С.А. Никитин, М.Н. Мякшина (ИПМех РАН, г. Москва), Н.В.Никитин (Институт механики МГУ, г. Москва) «Конвективные неустойчивости в гидродинамической модели метода Чохральского».
- 91) 13. IX. 2004 г. А.И. Федюшкин (ИПМех РАН, г. Москва) «Конвективные процессы и различные управляющие факторы (гравитация, вращение, вибрация) при выращивании кристаллов. Краткий обзор итогов Международных конференций 2004 года: IMA-2, COSPAR, ICCG-14».
- 92) 15. IX. 2004 г. В. Tryggvason (Astronaut Canadian Space Agency, Canada) «The Acceleration Environment on Manned Spacecraft and its Effect on Diffusion».
- 93) 11. X. 2004 г. В.И. Полежаев, В.П. Яремчук (ИПМех РАН, г. Москва) «Численное моделирование конвекции в датчике ДАКОН И ДАКОН-М: анализ и интерпретация экспериментальных данных».
- 94) 15. XI. 2004 г. В.П. Яремчук (МФТИ, ИПМех РАН, г. Москва) «Численное моделирование пространственных конвективных процессов в условиях космического полета».
- 95) 21. II. 2005 г. А.И. Федюшкин (ИПМех РАН, г. Москва) «Примеры тестовых расчетов программы FLUENT».
- 96) 21. III. 2005 г. М.К. Ермаков (ИПМех РАН, г. Москва) «Исследование потери устойчивости осесимметричных нелинейных течений».
- 97) 23. V. 2005 г. А.Ф. Поляков (ИВТ РАН, г. Москва) «Теплообмен в трубах при сверхкритических давлениях теплоносителя».

- 98) 12. IX. 2005 г. Жуков М. Ю. (РГУ, г. Ростов-на-Дону) «Математическое моделирование массопереноса электрическим полем в многокомпонентных химически активных средах».
- 99) 17. X. 2005 г. С.О. Макаров (ПГУ, г. Пермь) «Гидродинамические явления на межфазных границах».
- 100) 24. X. 2005 г. И.И. Юрченко (ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, г. Москва) «Экспериментально-аналитическая методика определения тепловых потоков на космических головных частях в полете».
- 101) 7. XI. 2005 г. М. Ю. Бражников (ИФТТ, г. Черноголовка) «Капиллярная турбулентность на поверхности жидкого водорода».
- 102) 19. XI. 2005 г. Qiusheng Liu (China) «Recent Research in the National Microgravity Laboratory of the Chinese Academy of Sciences».
- 103) 19. XI. 2005 г. Jingchang Xie (China) «Space experiment on thermocapillary drop migration on board the Chinese Spacecraft SZ-4».
- 104) 19. XI. 2005 г. A. Fedyushkin (IPMech RAS, Moscow) «The Simulation of convective flows for crystal growth processes in low and normal gravity environments».
- 105) 19. XI. 2005 г. V.P. Yaremchuk, V.I. Polezhaev (IPMech RAS, Moscow) «Direct numerical modeling of the vibration's impact on Marangoni convection in one layer system».
- 106) 21. XI. 2005 г. А.А. Горбунов (ИПМех РАН, г. Москва) «Стационарные течения сжимаемого вязкого газа в поле силы тяжести, обусловленные малыми возмущениями равновесия».
- 107) 21. XI. 2005 г. А.А. Gorbunov, S.A. Nikitin, V.I. Polezhaev (IPMech RAS, Moscow) «Steady flows of compressible viscous gas, induced by small perturbations in the gravity field and idea of experiment on board of ISS».
- 108) 12. XII. 2005 г. Н.В. Селин (ПГПУ, г. Пермь) «Экспериментальное исследование вибрационной тепловой конвекции при комбинированных поступательно – вращательных вибрациях».
- 109) 6. III. 2006 г. А.А. Горбунов (ИПМех РАН, г. Москва) «Структура течений несжимаемой вязкой жидкости, возникающих вследствие малых возмущений равновесия в поле силы тяжести».
- 110) 13. III. 2006 г. В.В. Колмычков (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва) «Численное исследование конвекции Релея-Бенара в задачах жидкофазовой эпитаксии».

- 111) 17. IV. 2006 г. А.С. Шамаев (ИПМех РАН, г. Москва) «Некоторые теоретические и прикладные вопросы радиотомографии поверхности океана».
- 112) 22. V. 2006 г. D. Morvan (Université de la Méditerranée, Marseill, France) «A physical based model to study the behaviour of wildfires».
- 113) 22. V. 2006 г. О.А. Бессонов (ИПМех РАН, г. Москва) «Численное моделирование тепловой и термокапиллярной конвекции в гидродинамической модели Чохральского с использованием последовательных и параллельных компьютеров».
- 114) 19. VI. 2006 г. В.А. Новосядлый (РГУ, Ростов-на-Дону) «Параметрическое возбуждение волн на границе раздела двух вязких несмешивающихся жидкостей».
- 115) 27. XI. 2006 г. А.С.Овчарова, В.В.Пухначёв (Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН) «Равновесие и динамика свободных неизотермических пленок жидкости».
- 116) 21. XII. 2006 г. Qiu-Sheng Liu, Rong Liu, Zhi-Qiang Zhu, Jia-Ping Yan (Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China), Shu-Ling Chen (Beijing Jiaotong University, Beijing, China) «Evaporative and Convective Instability in the Two-layer Marangoni-Bénard System of Vapor-liquid».
- 117) 19. XII. 2006 г. Qiang Yu (Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, P. R. China) «A New Kind of Space Materials Processing Facility in China».
- 118) 19. XII. 2006 г. Полежаев В.И., Яремчук В.П., Мякшина М.Н., Федюшкин А.И. (ИПМех РАН, г. Москва) «Итог исследований конвективных процессов в одно- и двухслойных средах в условиях микрогравитации по гранту РФФИ 04-01-39021».
- 119) 29. I. 2007 г. А.И. Феонычев (Государственный научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики) «Стоячие поверхностные волны и их воздействие на термокапиллярную конвекцию и рост кристаллов методом плавающей зоны».
- 120) 16. IV. 2007 г. А.В. Десятов, Д.Н. Ильмов, С.Г. Черкасов (Исследовательский центр имени М.В.Келдыша, Москва) «Численное моделирование сжатия одиночного сферического парового пузырька в безграничной жидкости».

- 121) 23. IV. 2007 г. С.Т. Суржиков (ИПМех РАН, г. Москва) «Метод нестационарных динамических переменных для расчета дозвуковых течений локально нагретого газа».
- 122) 14. V. 2007 г. В.М. Емельянов, А.А. Горбунов (ИПМех РАН, Москва) «Виртуальный прибор для исследований теплопереноса в сверхкритических средах».
- 123) 28. V. 2007 г. И.А. Крюков (ИПМех РАН, г. Москва) «Численное моделирование двумерных и трехмерных МГД течений на структурированных блочно-адаптивных сетках».
- 124) 4. VI. 2007 г. В.В. Сазонов (ИПМат им. М.В. Келдыша РАН, г.Москва) «Влияние магнитного поля Земли на измерения угловой скорости и микроускорения, выполненные на спутниках «Фотон-12» и «Фотон М-2».
- 125) 22. X. 2007 г. В.А. Новосядлый (Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону) «Конвекция Марангони в двухслойной системе при действии вибрации».
- 126) 12. XI. 2007 г. О.А. Бессонов (ИПМех РАН, г. Москва) «Распараллеливание задачи моделирования процессов при лесных пожарах для вычислительных систем с общей памятью».
- 127) 10. XII. 2007 г. А.В. Зюзгин (Пермский госуниверситет, г. Пермь) «Использование конвективных датчиков для обнаружения и измерения микроускорений в реальной невесомости. Управление конвекцией в реальной невесомости. Наземное моделирование. Комплексные практикумы».
- 128) 17. III. 2008 г. Э.Е. Сон (Московский физико-технический институт) «Микро - и наногидродинамика».
- 129) 27. X. 2008 г. Т. Бойзелинк, К. Ван Бавинхов (Redshift design and Engineering, BVBA, Belgium), В.И. Абрашкин, А.Е. Казакова (ГНПРКЦ «ЦСКБ-«Прогресс»), В.В. Сазонов (ИПМат им. М.В. Келдыша РАН) «Вращательное движение КА «Фотон М-3» и квазистатические микроускорения на его борту».

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Введение.....	2
Аннотации докладов:	
Расширенное однодневное заседание семинара 26 ноября 2007 г., посвященное 10-летию семинара «Механика невесомости и гравитационно-чувствительные системы» ИПМех РАН и подсекции 9.3 КНТС Роскосмоса:	
1) Д.М. Климов, В.И. Полежаев, В.В. Сазонов «О деятельности подсекции 9.3 КНТС Роскосмоса и Семинара по механике невесомости и гравитационно-чувствительным системам в 1997-2007 г.г.».....	5
2) В.В. Сазонов «Остаточные микроускорения на российских космических аппаратах».....	8
3) В.С. Земсков, М.Р. Раухман, В.П. Шалимов «Закономерности в процессах сегрегации при выращивании кристаллов в условиях микрогравитации и их возможное использование для совершенствования земных технологий».....	13
4) В.Е. Фортов, О.Ф. Петров «Плазменные кристаллы и жидкости на Земле и в Космосе: результаты исследований».....	20
5) С.А. Никитин, В.И. Полежаев «Математическое моделирование конвекции и теплопереноса в датчике "Дакон-М"».....	22
6) И.А. Бабушкин, Ю.П. Герцен, И.В. Глазкин, А.Ф. Глухов, Е.А. Зильберман, Г.Ф. Путин, С.Е. Пушкин, А.В. Агеев, К.В. Вяткин, С.В. Заклюковский, А.Ю. Пинягин, Д.В. Порошин, А.И. Иванов, М.М. Максимова, В.И. Полежаев, О.А. Бессонов, С.А. Никитин, В.В. Сазонов «Эксперимент «Дакон-М» по влиянию микрогравитации на конвективные течения».....	28
7) Н.А. Анфимов, В.И. Лукьященко, В.В. Суворов, К.С. Елкин, М.М. Цимбалюк «Планы Федеральной космической программы на период 2006-2015 гг. в отношении развития космических средств для проведения российских микрогравитационных экспериментов и исследований».....	32
8) В.Л. Левтов «Современное состояние, проблемы и перспективы разработки научной аппаратуры для исследования физики жидкости и гравитационно-чувствительных систем».....	36

9) М.Ю. Беляев, А.И. Иванов, А.В. Марков «Состояние и перспективы реализации научных исследований на РС МКС в условиях микрогравитации».....	39
10) В.М. Емельянов, А.А. Горбунов, А.К. Леднев, С.А. Никитин, В.И. Полежаев, Е.Б. Соболева, А.И. Иванов, Г.Ф. Путин, А.В. Зюзгин «Эксперимент «Крит» и его подготовка на МКС. Результаты моделирования и анализ экспериментов на станции «Мир».....	41
11) А.И. Феонычев «Стоячие поверхностные волны и их воздействие на термокапиллярную конвекцию и рост кристаллов методом плавающей зоны».....	46
12) А.В. Десятов, Д.Н. Ильмов, С.Г. Черкасов «Численное моделирование сжатия одиночного сферического парового пузырька в безграничной жидкости».....	47
13) В.М. Емельянов, А.А. Горбунов «Виртуальный прибор для исследований теплопереноса в сверхкритических средах».....	47
14) В.В. Сазонов «Влияние магнитного поля Земли на измерения угловой скорости и микроускорения, выполненные на спутниках «ФОТОН-12» и «ФОТОН М-2».....	48
15) А.В. Зюзгин «Использование конвективных датчиков для обнаружения и измерения микроускорений в реальной невесомости. Управление конвекцией в реальной невесомости. Наземное моделирование. Комплексные практикумы».....	49
16) Э.Е. Сон «Микро- и наногидродинамика»	50
17) Т. Бойзелинк, К. Ван Бавинхов, В.И. Абрашкин, А.Е. Казакова, В.В. Сазонов «Вращательное движение КА «Фотон М-3» и квазистатические микроускорения на его борту».....	56
Список авторов.....	57
Адреса авторов.....	58
ПРИЛОЖЕНИЕ	
Перечень докладов за 1997 - 2008 годы.....	62

«МЕХАНИКА НЕВЕСОМОСТИ И ГРАВИТАЦИОННО-
ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ»

Аннотации докладов научно-исследовательского семинара

В.И. ПОЛЕЖАЕВ, В.В. САЗОНОВ

Подписано к печати 16.02.2009 Заказ № 1-2009 Тираж - 150 экз.

Отпечатано на ризографе
Института проблем механики Российской академии наук
119526, Москва, пр-т Вернадского 101, к.1