6.6. ЛАБОРАТОРИЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА

Заведующий д. ф.-м. н., проф. О.А. Кабов

тел. (383) 316-51-37

Основные направления деятельности

- Двухфазные течения в микро- и миниканалах с микро-и нано покрытиями
- Теплообмен, динамика и кризисные явления в жидких пленках
- Термокапиллярная конвекция в тонких пленках жидкости
- Динамика и теплообмен в области линии контакта трех фаз
- Пленочная конденсация пара на поверхностях сложной формы
- Испарительные системы охлаждения микроэлектронного оборудования
- Физика жидкостей при микрогравитации

Результаты научно-исследовательских работ 2010 г.

Проект Ф4, III.16.1.4. **Процессы переноса в двухфазных системах с микро-нано покрытиями и структурами (Гос. рег. 01201053710).**

Выполнены эксперименты при течении пленки диэлектрической жидкости FC-72 и потока сухого газа азота при локальном нагреве от источника тепла с размером 10x10 мм^2, рис. 1. Эксперименты проводились для гладкой поверхности и двух поверхностей с микрооребрением (период структур 0.2 и 0.56 мм). Размеры канала: ширина – 30 мм, длина – 67 мм, высота – 2 мм. Кризис теплообмена определялся двумя независимыми методами: 1) по температуре нагревателя, 2) визуально при помощи оптической системы. Для визуализации течения пленки и измерения поля деформаций поверхности пленки создана и использовалась Шлирен-система с отражением.

Зависимость критического теплового потока от основных параметров эксперимента приведена на рис. 2. Критический тепловой поток растет практически линейно с ростом числа Рейнольдса газа и возростает с ростом числа Рейнольдса жидкости. Абсолютная величина критического теплового потока достигает 60 Вт/см^2 для гладкой поверхности и 100 Вт/см^2 для поверхности с микрооребрением, что примерно в четыре раза превышает критический тепловой поток при кипении в большом объеме. Такая высокая интенсивность теплообмена может быть обьяснена высокоинтенсивным процессом испарения в области контакта газа, жидкости и нагретой стенки (граница сухих пятен на вершинах структур).

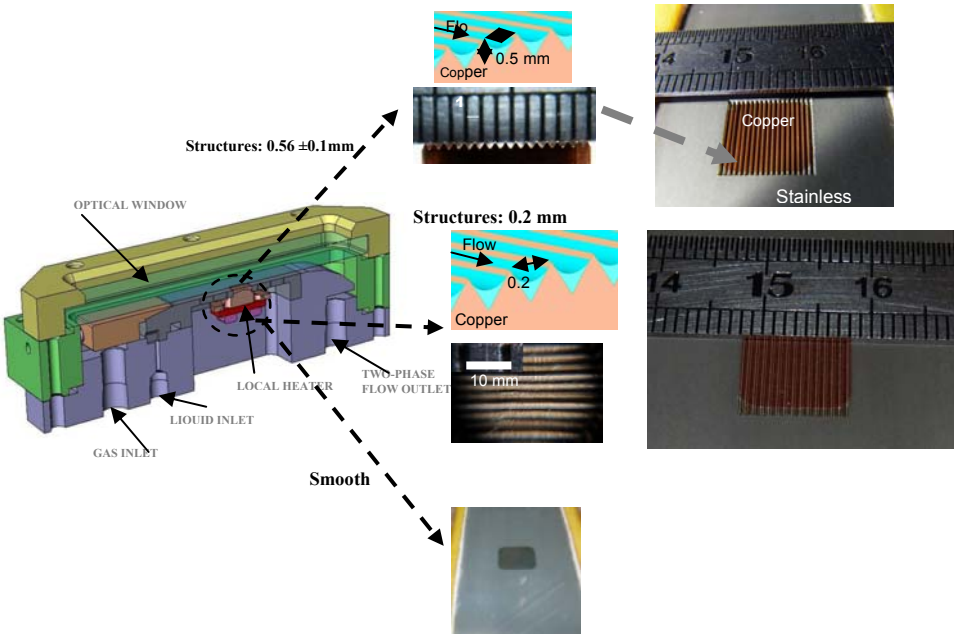


Рис. 1. Дизайн рабочего участка и поверхностей теплообмена.

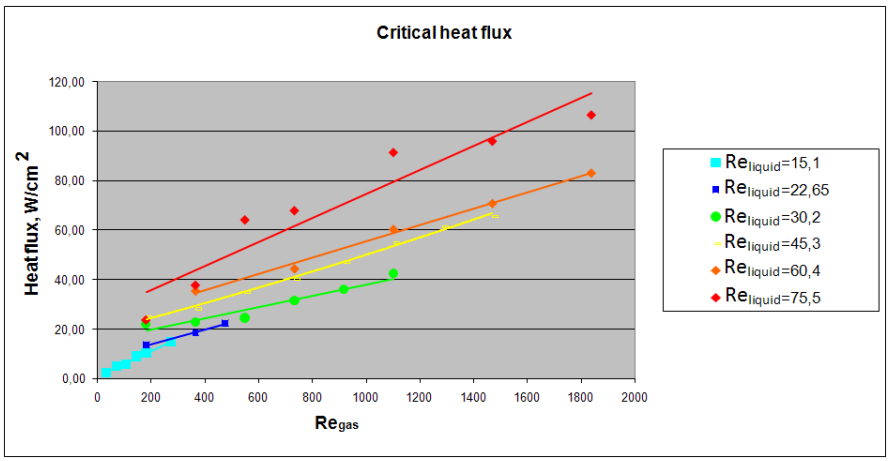


Рис. 2. Зависимость критического теплового потока от числа Рейнольдса газа для различных чисел Рейнольдса жидкости (велечины приведены на рисунке), период структур 0.56 мм.

Выполнено и экспериментальное исследование конденсации движущегося пара этилового спирта в круглой трубе диаметром 4.8 мм и длиной 200 мм. Анализировалось влияние на теплообмен различных параметров: перепада температуры, расхода пара, угла наклона трубы к горизонту. При увеличении температурного напора величина коэффициента теплоотдачи уменьшается. Зависимость коэффициента теплоотдачи от угла наклона трубы к горизонту имеет выраженный локальный максимум при 20-25°, что объясняется влиянием направления вектора гравитации на распределение сконденсированной жидкости в трубе (Рис. 3).

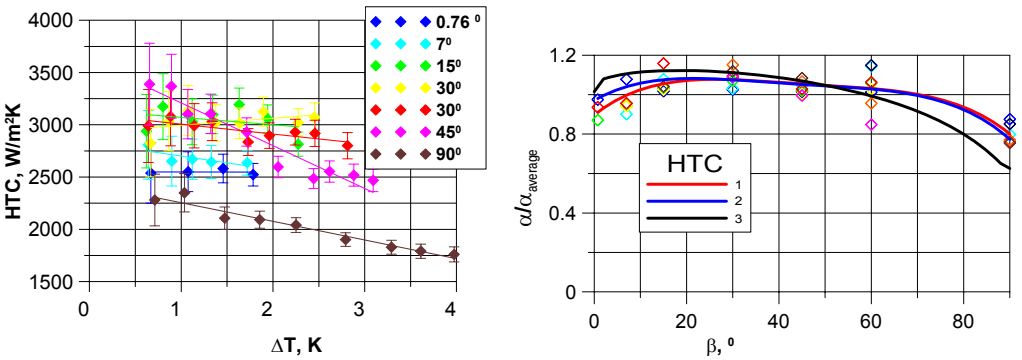


Рис. 3. Коэффициент теплоотдачи.

Проект Ф14, III.19.2.1. **Нелинейные волны, структуры и их взаимодействие в слоях жидкости (Гос. Рег. 01201053720).**

Блок 2: **Динамика развития и взаимодействия трехмерных структур при изотермическом и неизотермическом течении пленок жидкости.**

С использованием скоростной инфракрасной съемки и флуоресцентной техники измерения толщины выполнено экспериментальное исследование взаимодействия гидродинамических волновых и термокапиллярных возмущений в вертикально стекающей нагреваемой пленке воды. Показано, что температурные возмущения возникают в остаточном слое волновой пленки. На рис. 4 приведена термограмма поверхности вертикально стекающей пленки воды при дискретной градации серого цвета для числа Рейнольдса 10.5 и плотности теплового потока 0.73 Вт/см^2. Расстояние вдоль течения пленки воды отсчитывалось от верхней кромки нагревателя. В верхней части нагревателя неоднородности температуры соответствуют фронту трехмерной волны холодной жидкости, поступающей на нагреватель. Ниже по потоку происходит образование периодических структур, соответствующих формированию струй.

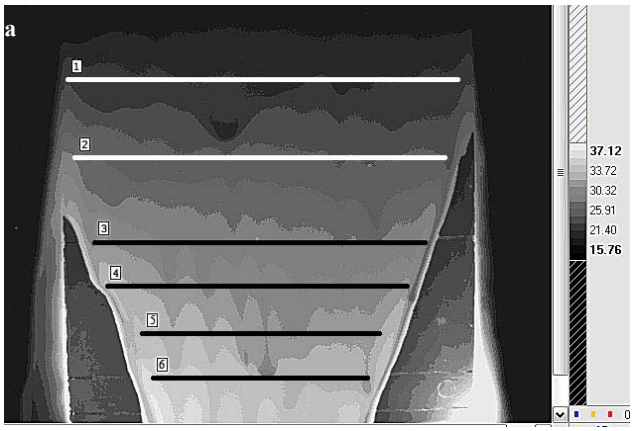


Рис. 4. Термограмма поверхности пленки воды, q=0.73 Вт/см^2. Шкала градации температуры (°C) в оттенках серого цвета указана в правой части рисунка.

Интеграционная программа СО РАН

Междисциплинарный интеграционный проект: Гидродинамика и теплообмен в микро и наносистемах (ИП-64)

Выполнены исследования влияния ширины плоских горизонтальных каналов на границы между режимами течения двухфазного потока. Основные режимы для канала высотой 1 мм приведены на рис. 5. Данные по регистрации режимов приведены для каналов шириной 10 и 29 мм, а границы между режимами для каналов шириной 10, 19, 29 и 40 мм. Видно, что с уменьшением ширины канала расширяется область пузырькового режима течения в зону более высоких значений приведенных скоростей жидкости (показано стрелкой). При этом значительно уменьшается область вспененного режима. В канале сечением 1x10 мм обнаружено только несколько точек, которые можно интерпретировать, как вспененный режим. В более высоких горизонтальных каналах этот режим не наблюдается, а в каналах с меньшей высотой область вспененного режима возрастает. С увеличением ширины канала область кольцевого режима течения расширяется в район более низких значений приведенной скорости жидкости, а снарядный режим течения становится менее выраженным.

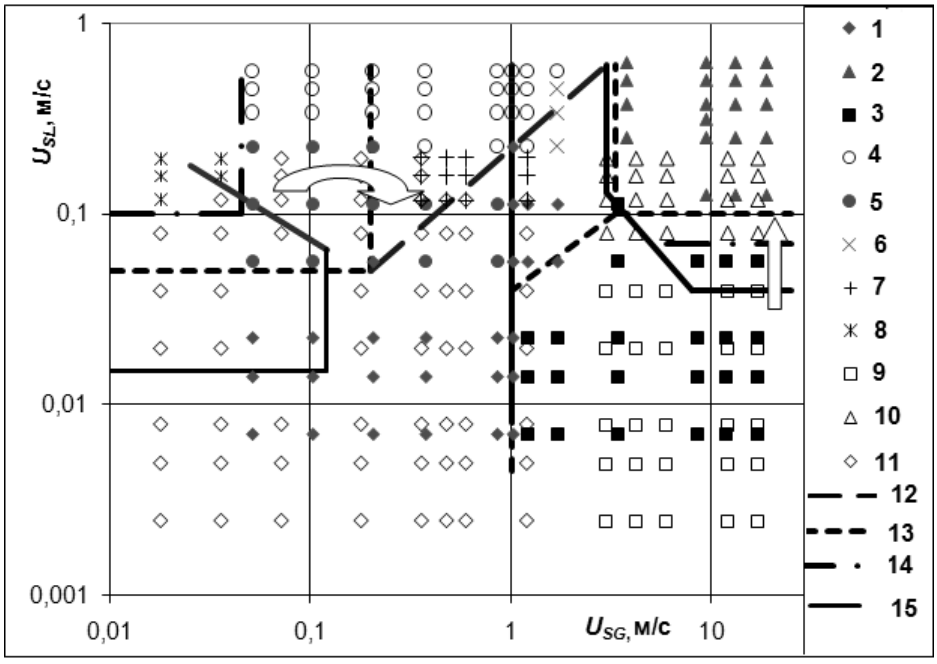


Рис. 5. Режимы течения двухфазного потока для канала высотой 1 мм. Канал шириной 10 мм: 1 – струйный, 2 – кольцевой, 3 – раздельный, 4 – пузырьковый, 5 – снарядный, 6 – вспененный; канал шириной 29 мм: 7 – вспененный, 8 – пузырьковый, 9 – раздельный, 10 – кольцевой, 11 – струйный. Границы между режимами для каналов шириной: 12 – 10 мм, 13 – 19 мм, 14 – 29 мм, 15 – 40 мм.

Российский фонд фундаментальных исследований

Исследование интенсивно испаряющихся тонких пленок жидкости, движущихся по гладким и микроструктурированным поверхностям с высоким локальным тепловыделением (09-08-01127)

Выполнены исследования течения и разрушения пленки воды, увлекаемой потоком воздуха в горизонтальном канале высотой 1.5 мм, при нагреве от локального источника тепла размером 1 × 1 см, для различных углов наклона рабочего участка к горизонту: Θ= 45, 90, 135, 180, -45, -135º. Построены карты режимов течения. На Рис. 6 представлены данные по критическому тепловому потоку для различных углов наклона. Видно, что угол наклона практически не влияет на критический тепловой поток. Исключение составляют две точки, выпадающие из обобщения, что связано со спецификой режима течения при данных параметрах.

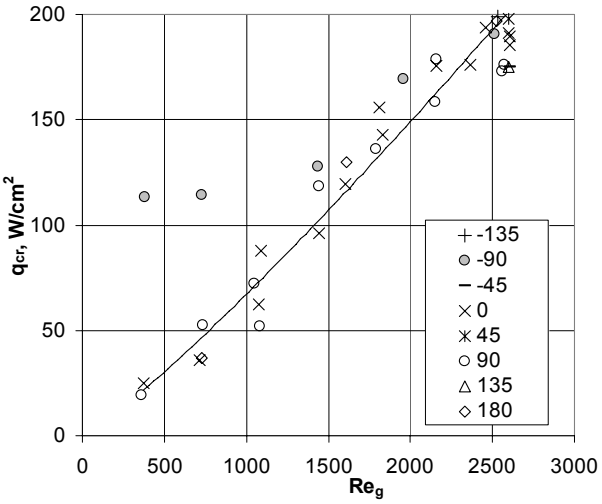


Рис. 6. . Влияние числа Рейнольдса газа на критический тепловой поток для различных углов наклона участка к горизонту (указаны в легенде), нагреватель 1x1 см, число Рейнольдса жидкости Re_l=14.

Государственный контракт № 02.740.11.5028

Проект: **Исследование динамики линии контакта трех фаз на нагреваемых поверхностях (Министерство образования и науки)**

Выполнено теоретическое исследование разрыва тонкой пленки жидкости на структурированной поверхности (Рис. 7). В построенной математической модели учитываются изменения по пространственной переменной константы Гамакера, длины проскальзывания и деформации мениска, образующегося между воздухом находящимся в канавках и жидкостью. Показано, что время, требующееся для разрыва пленки жидкости, уменьшается с увеличением соотношения констант Гамакера (Рис. 8).

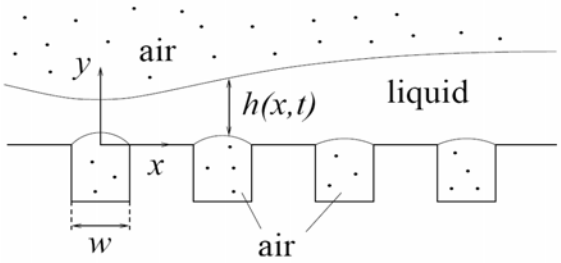


Рис. 7. Схема течения жидкости на структурированной поверхности.

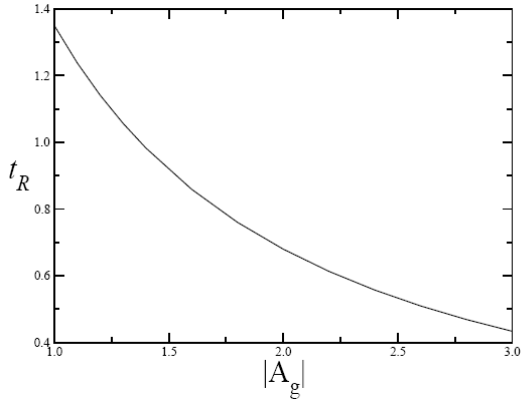


Рис. 8. Время для разрыва пленки жидкости в зависимости от соотношения констант Гамакера.

Приглашенным ученым доктором Ажаевым В.С. проведены научные семинары, на которых обсуждались как подходы к исследованию распространения сухого пятна, так и полученные в рамках проекта результаты и новые открытые задачи по тематике проекта.

Государственный контракт № 14.740.11.0103

Проект: **«Интенсификация теплообмена в микроканалах для создания энергоэффективных миниатюрных теплообменников нового поколения»**

Разработана трехмерная модель пленочной конденсации пара на криволинейных поверхностях с учетом капиллярных эффектов. Получено эволюционное уравнение для толщины пленки конденсата. Данное уравнение является обобщением известных в литературе уравнений, использующихся для расчета пленочной конденсации пара на криволинейных поверхностях. С использованием разработанной модели выполнены расчеты нестационарной конденсации движущегося пара этилового спирта в круглой трубе (Рис. 9). Получены и проанализированы зависимости коэффициента теплоотдачи от режимных параметров и от времени. Показано, что времена установления стационарного режима при изменении гравитации зависят от характера этого изменения и от геометрических размеров трубы: ее длины и диаметра. Время установления при переходе от невесомости к нормальной гравитации больше, чем при переходе от нормальной гравитации к невесомости для труб диаметром больше капиллярной длины (Рис. 10).

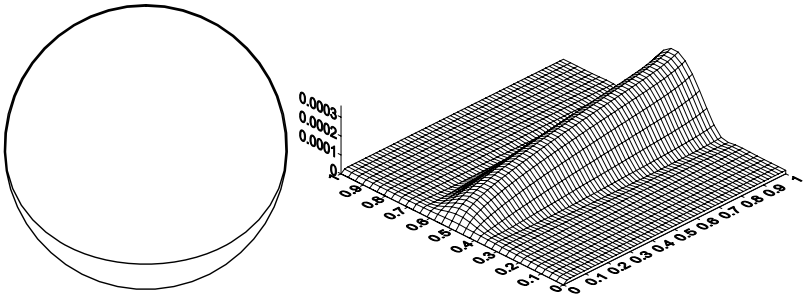


Рис. 9. Распределения конденсата в трубе и в ее сечении.

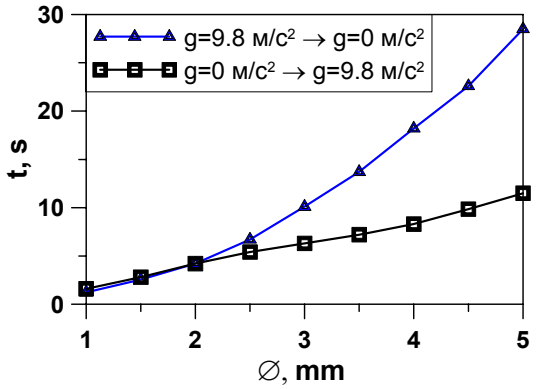
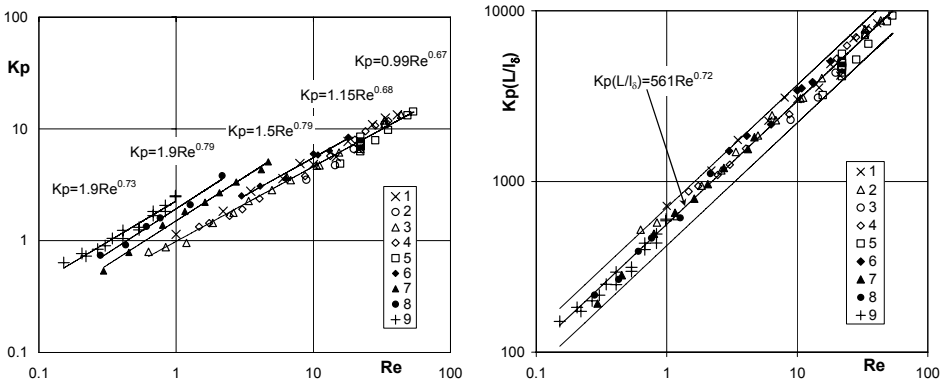


Рис. 10. Время установления стационарного режима.

Государственный контракт № П362

Проект: **Исследование термокапиллярного разрыва пленки жидкости на макро, микро и наномасштабах (Министерство образования и науки).**

Выполнены систематические экспериментальные исследования термокапиллярного разрыва стекающей пленки на нагревателе 150x150 мм в широком диапазоне изменения вязкости жидкости (вода, этиленгликоль, 50 и 60% растворы глицерина в воде).



(а) (б)

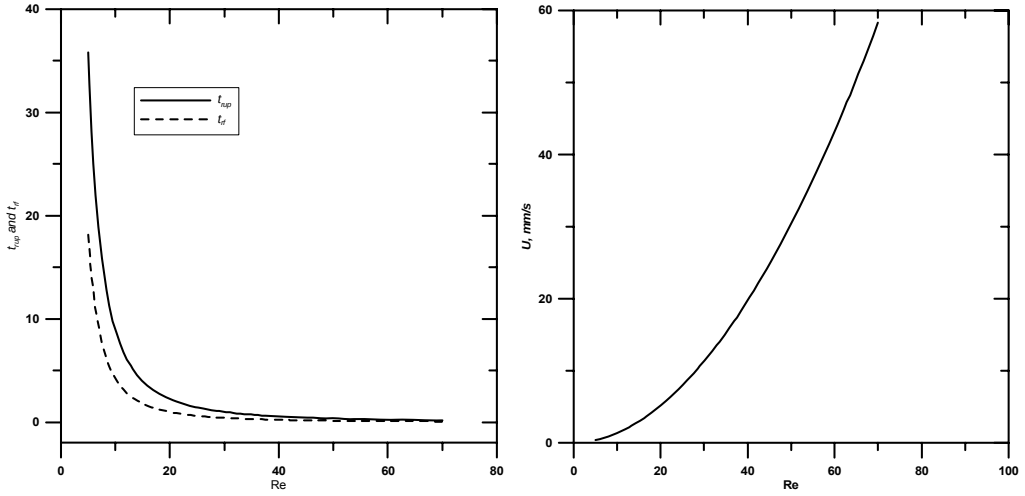
Рис. 11. Обобщение данных по разрыву пленки на нагревателе 150x150 мм для различных жидкостей с использованием традиционного (а) и модифицированного (б) критерия разрыва.

Установлено, что вязкость оказывает существенное влияние на пороговый тепловой поток, при котором происходит разрыв пленки. С использованием данных эксперимента, был модифицирован традиционный критерий разрыва пленки, что позволило адекватно учесть изменение в широком диапазоне не только свойств жидкости, но также длины нагревателя и угла наклона пластины, Рис. 11.

Государственный контракт №П1443

Проект: **Разработка энергоэффективной системы охлаждения, основанной на испарении тонких пленок жидкости (Министерство образования и науки).**

С помощью скоростной камеры измерена скорость распространения сухого пятна. В исследованных режимах скорость составила 0.518 мм/с. Однако, с помощью скоростной камеры было получено, что сразу же после зарождения сухого пятна скорость контактной линии намного выше: в течении первых 3 мс существования сухого пятна средняя скорость достигает 220 мм/с. Представлены аппроксимации времени разрыва и скорости распространения сухого пятна с использованием экспериментальных данных (Рис. 12). С использованием основных законов сохранения механики сплошных сред, принципов неравновесной термодинамики и действия расклинивающего давления теоретически выявлено, что поток массы для условий существования проскальзывания больше, чем при его отсутствии на нижней нагреваемой стенке.



а б

Рис. 12. а-Время разрыва и время существования остаточной пленки в зависимости от числа Рейнольдса, б-скорость распространения сухого пятна в зависимости от числа Рейнольдса, аппроксимация экспериментальных данных.

Международный проект Европейского космического агентства:

Локальные измерения в пленках жидкости при фазовых переходах (САФИР)

Международный проект SAFIR (координатор проекта проф. О.А. Кабов) выполняется в рамках международной лаборатории Института теплофизики (HTI) в сотрудничестве с центром по Микрогравитации Свободного Университета Брюсселя. Целью проекта является проведение экспериментального исследования различных аспектов пленочных течений с испарением и конденсацией (устойчивость, разрушение, теплообмен) на Международной Космической Станции. Для этого в наземных условиях была построена карта режимов для ривулетного течения жидкости FC-72 в миниканале под действием спутного потока газа, азота. Визуализация проводилась при помощи фазового шлирен-метода, позволяющего измерять деформации поверхности пленки с разрешением до 30 нм, система использовалась в режиме шлирен-визуализации. Эксперимент проведен в горизонтальном миниканале высотой 2 мм и шириной 40 мм. На Рис.13 представлена карта режимов течения для ривулета.

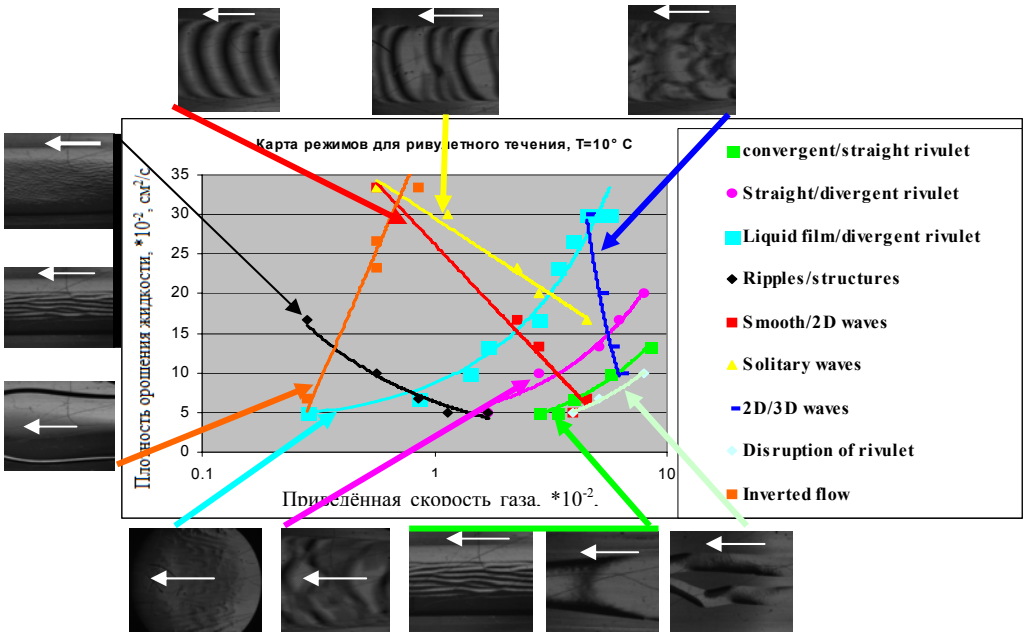


Рис. 13. Карта режимов течения для ривулета при температуре подложки 10°C.

Международный проект Европейского космического агентства:

Конвекция и межфазный массообмен (Convection and Interfacial Mass Exchange - CIMEX)

Международный проект «Конвекция и межфазный массообмен», CIMEX, (координатор проекта проф. О.А. Кабов) выполняется в рамках международной лаборатории Института теплофизики (HTI) в сотрудничестве с центром по Микрогравитации Свободного Университета Брюсселя и рядом международных

партнеров. Целью проекта является проведение экспериментального исследования особенностей конвекции жидкости со свободными границами, обусловленные касательными напряжениями со стороны газа, вызываемым им испарением с границы раздела в условиях гравитационных полей различной интенсивности на Международной Космической Станции. В рамках проекта лабораторией выполняется разработка математических моделей конвективных движений жидкостей, а также жидкости и газа в условиях тепло- и массобмена на границах раздела фаз с учетом всех действующих физических факторов. Построено и численно исследовано точное решение трехмерной, стационарной задачи конвекции двух несмешивающихся, вязких, несжимаемых жидкостей в канале с прямоугольным поперечным сечением при наличии границы раздела. Конвективное движение жидкостей описывается системой уравнений Обербека-Буссинеска. На термокапиллярной границе раздела точно выполняются кинематическое и динамические условия, а также условия непрерывности температуры и тепловых потоков. Проведен безразмерный анализ задачи. Осуществлена редукция к двумерным постановкам. При построении численного алгоритма введены новые искомые функции: вместо поперечных компонент скорости введены аналоги функции тока и завихренности. Исследованы возможности управления механизмами конвекции в условиях гравитации, микрогравитации и невесомости. Построен альбом трехмерных течений в канале в случае, когда его твердые стенки теплоизолированы. Построенное точное решение специального вида позволяет описать реальные трехмерные течения (Рис. 14, 15).

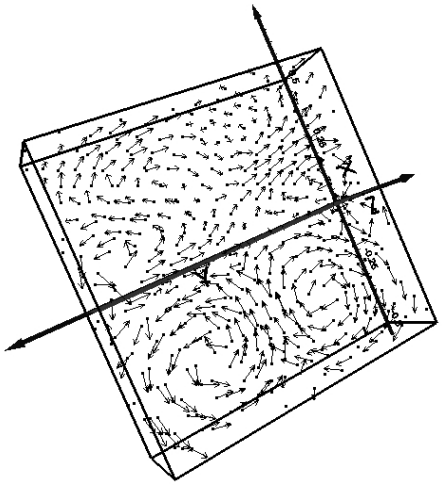


Рис. 14. Поле скоростей:
Gr = 10000 (число Грасгофа); $\widetilde{T}$ *= 10 (продольный градиент температуры);*
$\overline{u}$ *= 0.1 (отношение продольной. и поперечной характерных скоростей)*

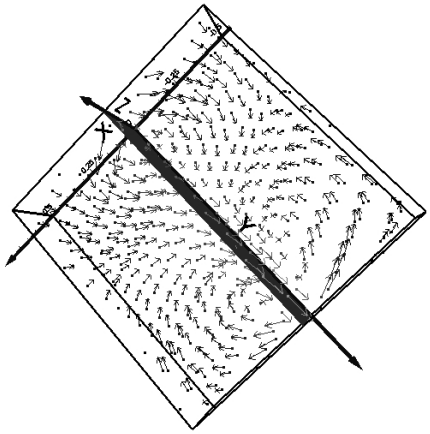


Рис. 15. Поле скоростей:
Gr = 1; $\widetilde{T}$ *= -0.5;* $\overline{u}$ *= 1*

Грант Президента Российской Федерации МК-240.2009.8

Проект: **Исследование термокапиллярного разрыва пленки жидкости: динамика линии контакта трех фаз** (к.ф.-м.н. Гатапова Е.Я.)

Исследована неустойчивость тонкой пленки жидкости и разрыв под действием расклинивающего давления. Линейная теория устойчивости показала, что структурирование поверхности является дестабилизирующим фактором. Показано также, что при заключительной стадии разрыва пленки наблюдается автомодельный характер поведения минимальной толщины пленки затухающей как $(t_R - t)^{1/6}$, где t_R – время разрыва пленки. Вычисления минимальных толщин на различных поверхностях показали, что разрыв происходит быстрее в присутствии структур на твердой поверхности, чем на плоской поверхности, а также быстрее чем на поверхности с граничным условием с эффективной длиной скольжения, т.е. осредненной по поверхности.

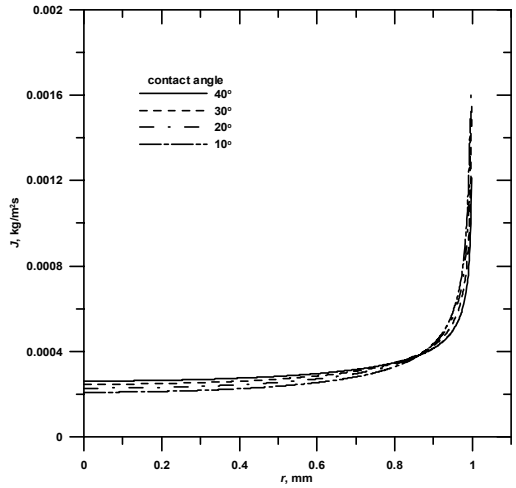


Рис. 16. Поток массы для различных краевых углов, R=1 мм.

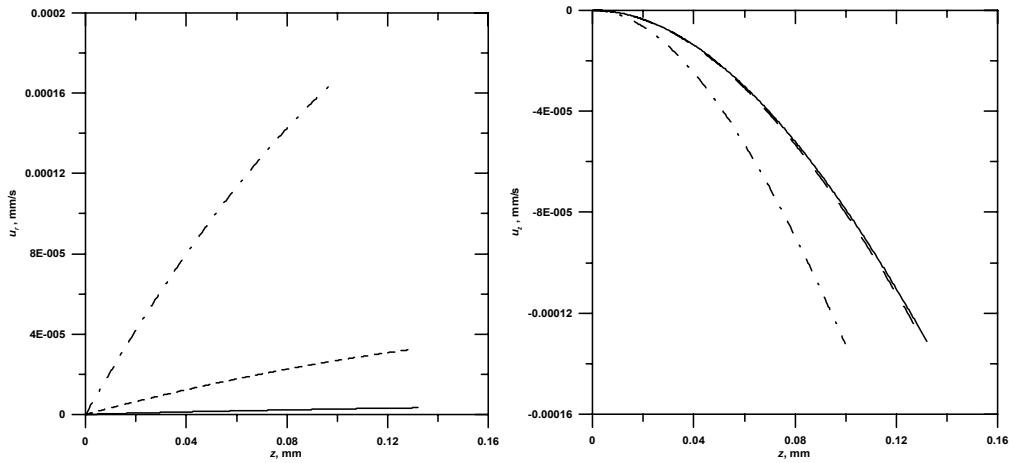


Рис. 17. Профили радиальной и вертикальной скоростей для различных r при заданном контактном угле $\theta=40^o$.

Также выполнено теоретическое исследование испаряющейся капли чистой жидкости, находящейся на твердой поверхности и имеющей постоянный контактный угол. При заданном функционально распределении потока массы (Рис. 16), зависящем от величины контактного угла и относительной влажности воздуха, вычислены поля скоростей, показывающие возрастание при приближении к периферии капли (Рис. 17).

Индивидуальный грант по программе Мария Кюри в рамках Седьмой рамочной программы Европейской комиссии «Разработка испарительной системы охлаждения с движущимися пленками жидкости», FP7-PEOPLE-IIF - No 237869, (к.ф.-м.н. Зайцев Д.В.)

Выполнены эксперименты по динамике контактной линии в капле жидкости в рамках 52-й и 53-й кампаний параболических полетов под эгидой Европейского Космического Агентства, состоявшихся в мае и октябре 2010 г. в г. Бордо, Франция. Схема параболических полетов представлена на Рис. 18. В экспериментах использовались 11 различных поверхностей с различной шероховатостью и разливным краевым углом смачивания. В качестве рабочей жидкости использовалась вода. Для получения изображения капли использовался теневой метод с высоким разрешением (3872×2592 пикс). На Рис. 19 представлены изображения статической капли на тефлоновой поверхности для различных уровней гравитации (нормальная гравитация – 1g, микрогравитация – μg, и гипергравитация – 1.8g). Видно, что, как высота капли, так и размер смоченного пятна, изменяются с изменением уровня гравитации, тогда как краевой угол смачивания остается практически неизменным. Имеется удовлетворительное соответствие с расчетом по существующей модели.

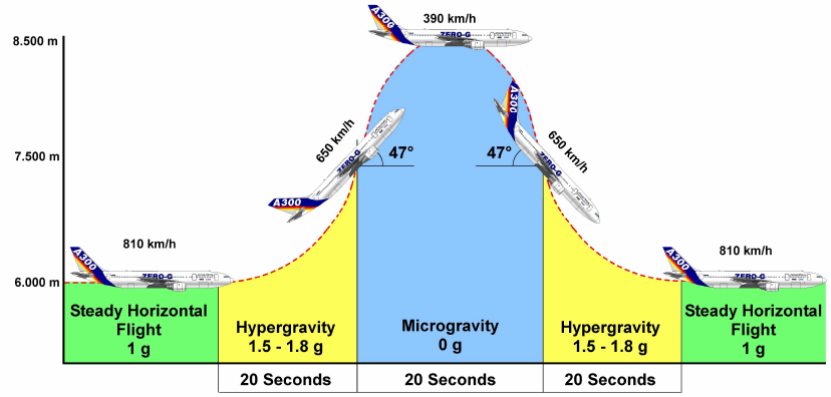


Рис. 18. Схема параболических полетов, проводимых Европейским Космическим Агентством.

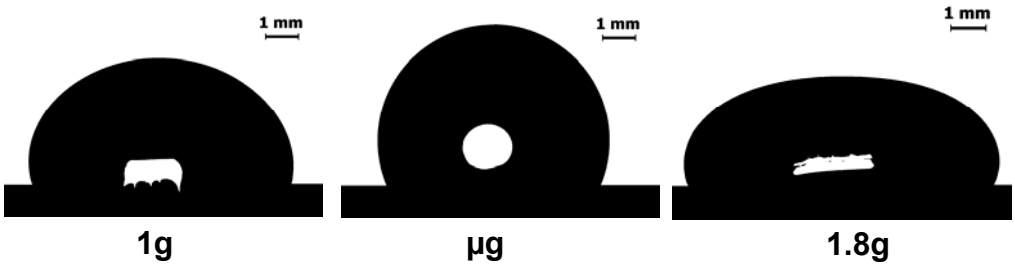


Рис. 19. Изображения статической капли воды на тефлоновой поверхности для различных уровней гравитации. Объем капли 0.146 мл. Температура 23°С. Краевой угол смачивания 109.2-119.6°.

Индивидуальный грант (Министерство Науки Бельгии) «Динамика линии контакта трех фаз газ-жидкость-твердое тело на нагреваемой поверхности» (к.ф.-м.н. Гатапова Е.Я.)

В существующих на данный момент работах с применением длинноволновой теории и экспериментальных работ, исследующих разрыв неизотермической пленки жидкости, показывали, что динамическое число Бонда может быть качественным индикатором разрушения пленки жидкости. Это означает, что критическая толщина пленки жидкости непосредственно перед разрывом должна зависеть от гравитации, а также от угла наклона нагреваемой подложки. Но эксперименты, проводимые в лаб. 6.6 ИТ СО РАН показали, что при достижении определенной критической толщины (~60 мкм), пленка между ривулетами спонтанно разрывается и впоследствии было показано, что эта критическая толщина не зависит ни от числа Рейнольдса, ни от угла наклона подложки.

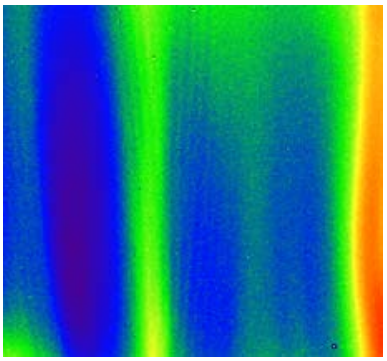


Рис. 20. Инфракрасная термограмма поверхности воды, Θ=90 градус, Re=10, q=1 Вт/см^2.

В данной работе дана гипотеза, описывающая возможный физический сценарий разрушения нагреваемой снизу пленки жидкости (воды). Предполагается появление мелко-масштабых продольных деформаций — конвективных ячеек вызванных термокапиллярной конвекцией в момент, когда устойчивая тонкая пленка формируется между ривулетами. Эти мелкомасштабные продольные конвективные ячейки видны на Рис. 20 в середине верхней части картины (в зелено-

голубом цвете). Конвекция стабилизирует распределение температуры на поверхности пленки и стремится сгладить мелкомасштабные деформации. Сделаны оценки для критических величин в рамках теории неустойчивости Пирсона. Длина волны оценивается как $\lambda_{cr} = 4\pi\sqrt{\frac{2\nu k h_{cr}}{\sigma_T c_p \Delta T_{cr}}}$, что дает для толщины пленки в h=60 мкм и разнице температур между нагреваемой стенкой и поверхностью воды ΔT=0.82 K величину для критической длины волны $\lambda_{cr} \approx 0.1$ мм. Сделаны предварительные эксперименты, дающие оценку для длины волны в 0.5 мм (Рис. 20).

Молодежный научно-исследовательский проект ИТ СО РАН «Термокапиллярные эффекты в нагреваемых плёнках жидкости» (Шатский Е. Н., Семионов В.В.)

Проведено экспериментальное исследование эволюции поля температуры на поверхности нагреваемых пленок воды. Установлено, что в остаточном слое пленки жидкости после прохождения волнового фронта возникают температурные неоднородности с длиной волны неустойчивости соответствующей расстоянию между термокапиллярно-волновыми структурами, образующимися при более высоких числах Рейнольдса.

Показано, что вследствие действия термокапиллярных сил на поверхности происходит деформация трехмерных волн и переход к струйному течению. При движении крупных солитонообразных волн (Рис. 21а) деформация фронта волны начинается в области, примыкающей к наиболее нагретой зоне остаточного слоя пленки (между формирующимися струями). Далее, по мере прохождения волны вдоль нагревателя, деформация распространяется вглубь волны, разделяя ее на струи. При движении волн среднего размера (Рис. 21б) термокапиллярные силы изменяют расстояние между их гребнями, приводя в соответствие с расстоянием между формирующимися структурами в остаточном слое.

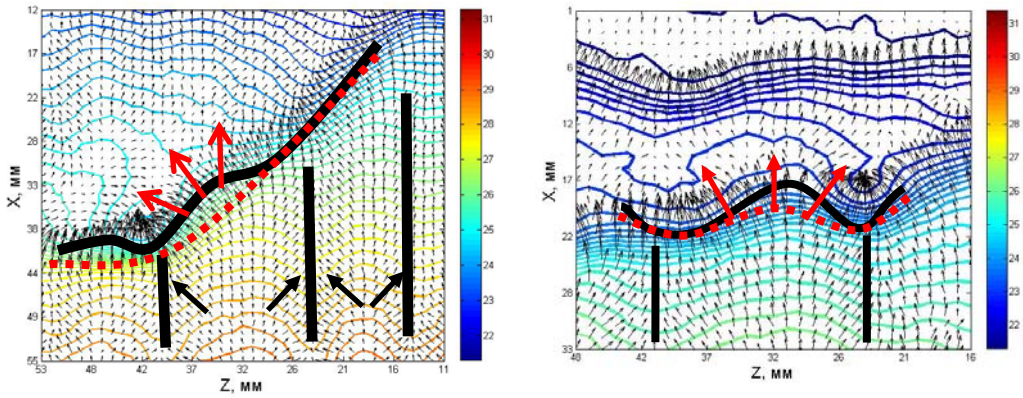


Рис. 21. Карты касательных напряжений на поверхности пленки жидкости при прохождении крупной волны (а) и волны средних размеров (б)

Международные связи

Сотрудничество с Центром по микрогравитации при Свободном университете Брюсселя (Бельгия).

Сотрудничество с Центром по Смарт интерфейсам при университете Дармштадта (Германия)

Сотрудничество с отделением механики университета штата Мериланд (США)

Сотрудничество с отделением математики Методистского университета штата Техас (США)

Зарубежные командировки – 10

Публикации

Монографии	– 0
Центральные журналы	– 6
Международные журналы	– 7
Труды международных конференций	– 7
Охранные документы	– 2

Доклады на конференциях и совещаниях

Международных		– 23
в т. ч.	пригл.	– 5
	секц.	– 15
	стенд.	– 3
Всероссийских		– 23
в т. ч.	пригл.	– 3
	секц.	– 16
	стенд.	– 4

Научно-организационная деятельность

профессор, д. ф.-м. н. Кабов О.А. –

Член национального комитета РАН по тепло-массо обмену,

Содиректор международной лаборатории «Heat Transfer International Research Institute» (HTI), созданной в 2005 году Институтом теплофизики и Свободным университетом Брюсселя,

Приглашенный профессор (Fellow), Центр по Смарт интерфейсам при университете Дармштадта (Германия),

Региональный редактор международного журнала «Enhanced Heat Transfer»,

Член редакционной коллегии международного журнала “Journal of Microgravity Science and Technology”,

Член редакционной коллегии международного журнала “International Journal of Emerging Multidisciplinary Fluid Sciences”,

Член научного комитета, International Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels,

Координатор двух международных проектов Европейского космического агентства CIMEX “Конвекция и межфазный массообмен”, и SAFIR (Single fin condensation: Film local measurements),

Сопредседатель международного семинара “Two-Phase Systems for Ground and Space Applications”;

доцент, к.ф.-м.н. Марчук И.В. –

член Ученого Совета Специализированного Учебно-Научного Центра Новосибирского Государственного Университета,

член редакционной коллегии журнала «Вестник Новосибирского государственного университета» серия Педагогика;

к. ф.-м. н. Зайцев Д.В. –

заместитель регионального редактора международного журнала «Enhanced Heat Transfer»,

секретарь международной лаборатории «Heat Transfer International Research Institute»;

к. ф.-м. н. Гатапова Е.Я. –

член Американского Физического Сообщества,

заместитель Председателя Совета научной молодежи ИТ СО РАН;

к. ф.-м. н. Кабова Ю.О. –

секретарь международного семинара Fifth Int. Topical Team Workshop on Two-Phase Systems for Ground and Space Applications, September 26-29, 2010, Kyoto, Japan.

Премии и награды

Семенов А.А. – диплом третей степени на XI Всероссийской школе-конференции молодых ученых “Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики”, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, 17-19 ноября, 2010

Шатский Е. Н. – стипендия им. С.С. Кутателадзе.

Научно-педагогическая деятельность

Спецкурс «Нелинейная динамика» (Марчук И.В.), НГУ, кафедра физики неравновесных процессов.

Научно-исследовательская работа со студентами и аспирантами

Аспирантов	– 1
Магистрантов НГУ	– 3
Студентов НГУ	– 3

Кадровый состав

Всего сотрудников		– 11
Из них научных сотрудников		– 7
в т. ч.	докторов наук	– 3
	кандидатов наук	– 4

Информационно-вычислительные ресурсы

Персональные ЭВМ:

Ноутбук	– 7
Настольный ПК	– 3

Компьютеры подключены к локальной сети Института с выходом в Internet.