

6.6. ЛАБОРАТОРИЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА

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

тел. (383) 316-51-37

Основные направления деятельности

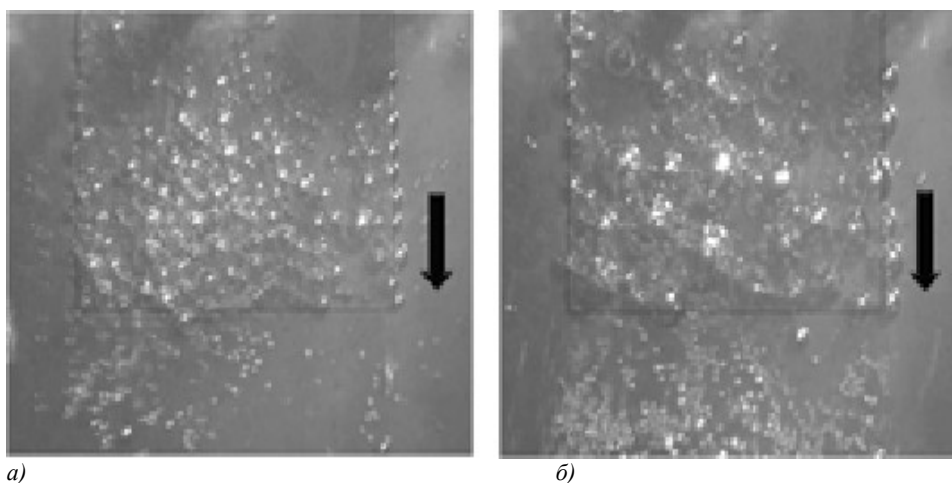
- Двухфазные течения в микро- и миниканалах с микро-и нано покрытиями
- Теплообмен, динамика и кризисные явления в жидких пленках
- Термокапиллярная конвекция в тонких пленках жидкости
- Динамика и теплообмен в области линии контакта трех фаз
- Пленочная конденсация пара на поверхностях сложной формы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

Результаты научно-исследовательских работ 2011 г.

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

Были проведены эксперименты по исследованию кипения жидкости в мини и микро каналах с молекулярным покрытием с контрастным смачиванием в условиях микро и гипер гравитации в параболических полетах. Обнаружено, что кипение жидкости в мини канале при локальном нагреве имеет существенные особенности. Специфика мини канала особенно проявляется в условиях микро гравитации, когда капиллярная постоянная жидкости значительно увеличивается и силы поверхностного натяжения становятся доминирующими над силой инерции и Архимедовой силой. Образуются пузыри пара на нагреваемой поверхности (область с покрытием) коагулируют и значительно укрупняются (Рис. 1). Пузыри цепляются за обе стенки канала. Такие пузыри не могут быть унесены потоком при малых скоростях жидкости, они не удаляются за счет всплытия, что приводит к образованию локальной сухой поверхности на нагревателе и менее эффективному теплообмену. Измерения показывают рост температуры подложки в конце зоны пониженной гравитации. В случае, когда ширина канала совпадает с шириной нагревателя. Наоборот наблюдалось снижение температуры подложки, т.е. увеличение интенсивности теплообмена. Этот факт можно объяснить ростом размера пузырей и потерей устойчивости пленки жидкости под пузырями в условиях отсутствия гравитации.

Установлено, что поверхности с контрастным смачиваем потенциально могут позволять контролировать процесс закипания жидкости и интенсифицировать теплообмен посредством регулирования плотности центров кипения. Обнаружено, что кипение жидкости в мини канале при локальном нагреве имеет существенные особенности. Стесненность течения затрудняет эвакуацию пара от наиболее тепло-напряженных участков поверхности, что может приводить к преждевременному кризису кипения.



а)

б)

Рис. 1. Кипение жидкости в области контрастной смачиваемости в условиях (а) - гипергравитация, (б) - микрогравитация.

Выполнены эксперименты по конденсации пара FC72 на дисковидном ребре (Рис. 2). Исследовался теплообмен при различных режимных параметрах эксперимента. Зависимость коэффициента теплоотдачи от температурного напора представлена на Рис.3. Наблюдается уменьшение коэффициента теплоотдачи с ростом температурного напора. Полученные значения коэффициента теплоотдачи находятся в диапазоне значения от 900-1250 Вт/м²К. Расчитанные по разработанной математической модели значения коэффицента теплоотдачи хорошо согласуются с результатами экспериментов

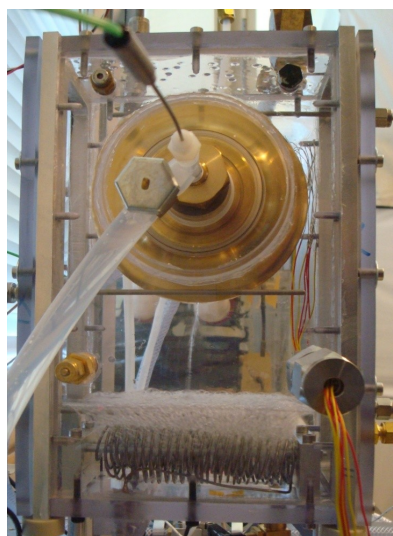
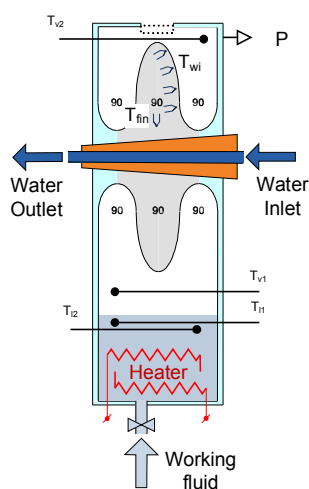


Рис. 2. Схема эксперимента и фотография экспериментальной установки для исследования конденсации на дисковидном ребре

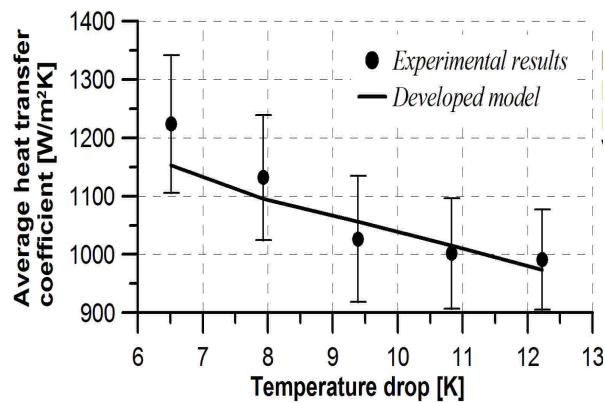


Рис. 3 Коэффициент теплоотдачи.

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.**

Влияние внешних возмущений на динамику формирования струй в пленке жидкости при малых числах Рейнольдса. Установлено, что искусственные возмущения при достаточно высоких тепловых потоках оказывают существенное влияние на формирование структур и волновое течение пленки жидкости. Показано, что в зависимости от параметров, набегающих на нагреватель волн, возможны разные сценарии их преобразования в струи.

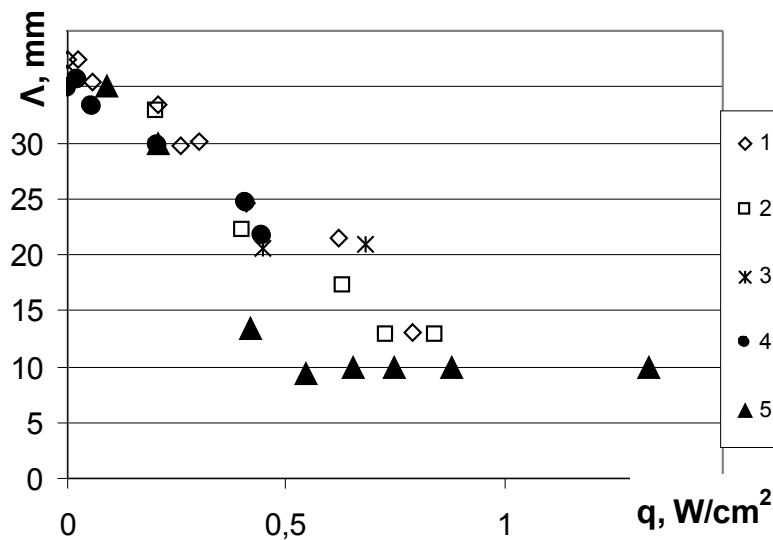


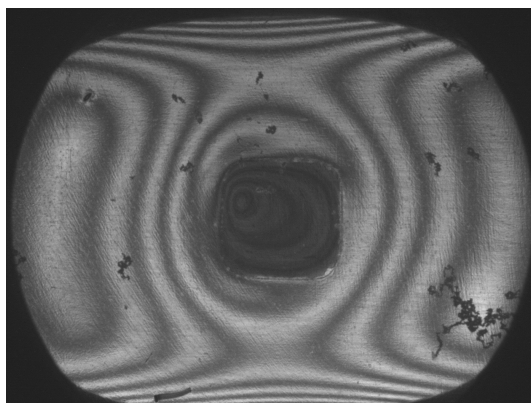
Рис. 4. Зависимость расстояния между гребнями волн или струями от плотности теплового потока, построенная по следующим данным. Без возмущений: 1 – обработки цифровых фотографий, 2 – обработки тепловизионных изображений, 3 – обработки данных флуоресцентного метода; с возмущениями: 4 – обработки данных флуоресцентного метода, 5 – обработки тепловизионных изображений.

Зависимость расстояния между струями от плотности теплового потока в нижней части нагревателя при $Re = 10$ показана на Рис. 4. В отсутствие нагрева и при малых плотностях тепловых потоков параметр Δ определялся как расстояние между гребнями волн. Воздействие внешних возмущений не проявлялось при малых тепловых потоках. Для достаточно высоких плотностей тепловых потоков при воздействии «наиболее опасных» внешних возмущений структуры формировались на всей поверхности нагревателя, а расстояние между струями уменьшалось до 10 мм.

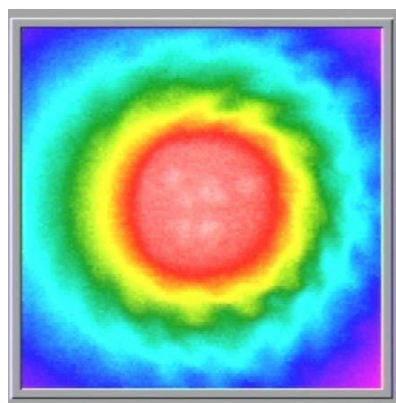
Российский фонд фундаментальных исследований

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

Выполнено экспериментальное исследование течения и разрушения локально нагреваемой пленки воды в 3-х конфигурациях течения: 1) пленка движется под действием гравитации по слабонаклоненной поверхности (угол наклона к горизонту 5.9°); 2) пленка движется под действием сил инерции и гидростатического давления по горизонтальной поверхности; 3) пленка покоится на горизонтальной поверхности. Ширина течения пленки 40 мм; размер нагревателя 10×10 мм. Для чисел Рейнольдса $Re = 1-160$ и плотностей теплового потока $q < 55$ Вт/см² построена карта режимов течения. При помощи фазового Шлирен метода исследованы термокапиллярные деформации на поверхности пленки перед ее разрывом, Рис. 5а. Определен критический тепловой поток, приводящий к разрыву пленки. Получена зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока. При помощи инфракрасного сканера измерено распределение температуры на поверхности пленки жидкости, Рис. 5б. Обнаружено, что при сравнительно небольших толщинах пленки критический тепловой для разрыва пленки в конфигурации №2 меньше, чем в конфигурации №3. Однако при больших толщинах пленки, критический тепловой в конфигурации №2 больше, чем в конфигурации №3.



(а) $Re=2.88$, $q=4.33$ Вт/см²



(б) $Re=1$, $q=2$ Вт/см²

Рис. 5. Шлирен (а) и инфракрасное (б) изображения пленки жидкости перед разрывом (конфигурация №2).

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

Выполнено экспериментальное исследование течения двухфазного потока в прямоугольном коротком горизонтальном канале высотой 200 микрон. Использование флуоресцентного метода позволило зарегистрировать и количественно определить характеристики течения жидкости в канале. Установлено существование раздельного режима течения, Рис. 6. Обнаружена особенность двухфазного течения в исследуемом канале в виде образования капель и струек жидкости, Рис. 7. Показано, что изменение высоты горизонтального канала оказывает существенное влияние на границы между режимами.

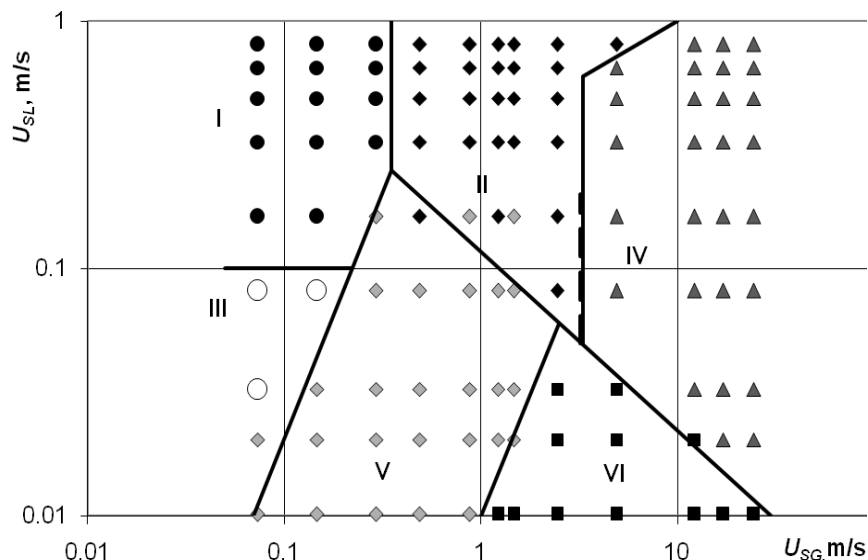


Рис. 6. Основные режимы течения двухфазной смеси в канале высотой 200 мкм: I – пузырьковый, II – вспененный, III – снарядный, IV – кольцевой, V – струйный, VI – раздельный.

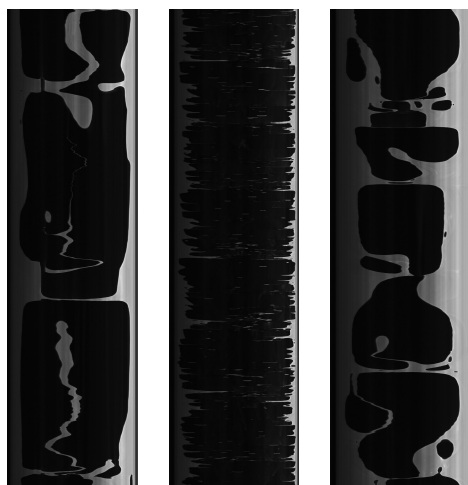


Рис. 7. Образцы характерных режимов двухфазного течения в канале высотой 200 мкм. а – переход от раздельного режима к вспененному $U_{SG}=2.45 \text{ м/с}$, $U_{SL}=0.033 \text{ м/с}$, б – кольцевой режим $U_{SG}=12.3 \text{ м/с}$, $U_{SL}=0.163 \text{ м/с}$, в – вспененный режим $U_{SG}=2.45 \text{ м/с}$, $U_{SL}=0.081 \text{ м/с}$.

а

б

в

(Министерство образования и науки)

Выполнены исследования зависимости критической плотности теплового потока от режимных параметров эксперимента для локально нагреваемой пленки воды движущихся в мини каналах под действием потока газа. Результаты экспериментов с гладким нагревателем представлены на Рис.8. С увеличением расхода жидкости и газа, критический тепловой поток значительно возрастает. Плотность теплового потока составляет 80 Вт/см^2 для относительно не больших чисел Рейнольдса пленки. На Рис.9 приведены примеры последовательных фотографий разрыва пленки и полного осушения гладкого локального нагревателя для волнового режима течения жидкости.

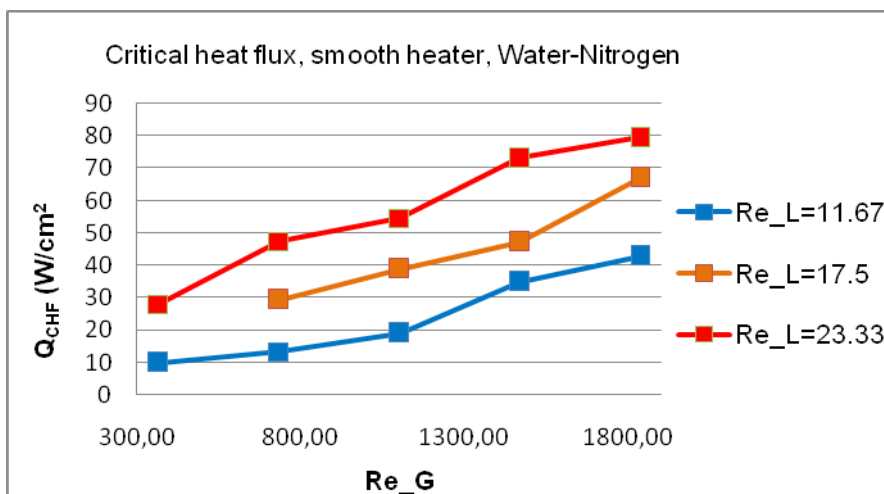


Рис. 8. Критический тепловой поток на гладком нагревателе, в зависимости от расходов жидкости и газа.



Рис. 9. Кризис на гладком нагревателе ($Re_L=15$, $Re_G=200$, $Q_{CHF}=15.7 \text{ Вт/см}^2$)

Эксперименты с оребренным нагревателем проводились с характерным размером структур 0.3 мм высотой. Рис. 10 показывает критический тепловой поток в зависимости от основных параметров течения. Из графика видно, что так же как и для гладкого нагревателя критический тепловой поток растёт с ростом расхода жидкости и газа. На структурированном нагревателе происходит “затягивание” осушения нагревателя вследствие действия капиллярных сил. При дальнейшем

увеличении теплового потока, происходит полное осушение нагревателя. Из графика видно что для структурированного нагревателя плотность теплового потока составляет 225 Вт/см^2 при примерно тех же условиях как и на Рис. 8. На структурированном нагревателе критический тепловой поток может превосходить более чем в 2 раза критически тепловой поток на гладком нагревателе

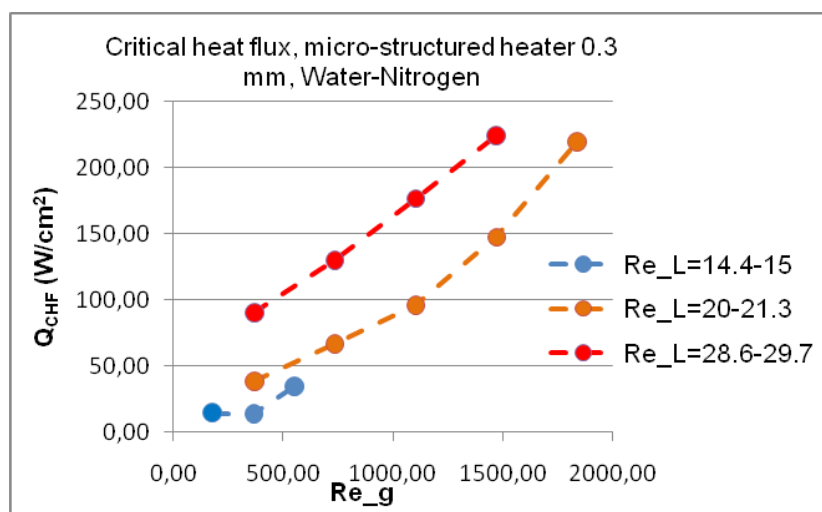


Рис. 10. Критический тепловой поток на оребрѐнном нагревателе в зависимости от расходов жидкости и газа.

Государственный контракт № П362

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

Проведены измерения статического и динамического краевого угла смачивания в капле жидкости на нагреваемой поверхности. Варьировался объем капли жидкости (от 0.01 до 5 мл), скорость накачки (от 0.1 до 6 мл/мин.) и температура подложки (от 23 до 64°C). Исследования проводились с использованием нанофильтрованной деионизированной воды для подложек с различным краевым углом смачивания (от 65 до 120°) и различным гистерезисом краевого угла смачивания (от 10 до 90°).

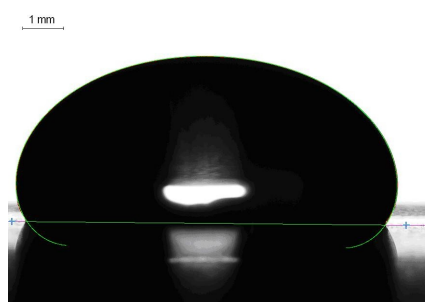


Рис. 11. Изображение капли, обработанное с использованием DSA.

Для измерения краевого угла использовался теневой метод, состоящий из коллимированного источника света и фотоаппарата Nikon D300S с объективом AF-S VR Micro-NIKKOR 105mm f/2.8G IF-ED. Полученные фотографии обрабатывались с использованием программного обеспечения Drop Shape Analysis (DSA) компании KRUSS, которое позволяло определять краевой угол, объем, высоту и некоторые другие параметры капли жидкости, Рис.11. Обнаружено, что в случае подложки с малым гистерезисом краевого угла смачивания, интенсивность испарения капли резко возрастает непосредственно перед ее полным испарением.

Государственный контракт №П1443

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

Теоретически исследована устойчивость пленки жидкости на периодически-структурированной поверхности при заполнении канавок газом. Влияние канавок смоделировано длиной скольжения функционально зависимой от пространственной переменной. Сделан линейный анализ устойчивости и проведено сравнение с нелинейной теорией. Оба подхода показывают, что пленка жидкости более неустойчива в присутствии канавок (Рис. 12).

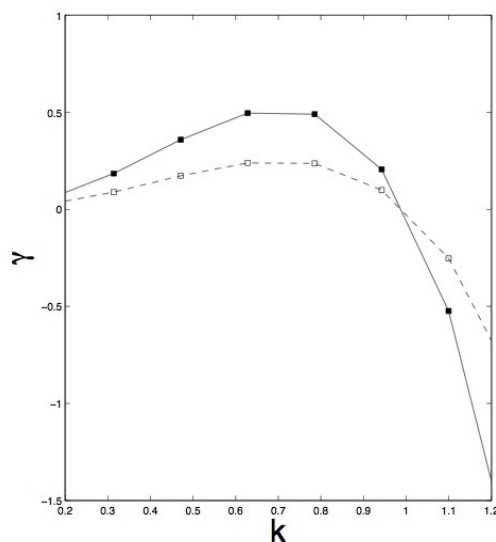


Рис. 12. Результаты линейной теории устойчивости для структурированной поверхности (сплошная линия) и плоской поверхности (пунктирная линия).

Государственный контракт №14.740.11.1070

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

С использованием ранее разработанной трехмерной математической модели, где учет эффекта испарения моделируется качественно с помощью закона Нью-

тона на границе раздела газ-жидкость (т.е. с помощью числа Био), выполнено численное исследование влияния характера взаимного расположения и формы двух нагревателей, на поверхности подложки, на динамику и деформации тонкой пленки жидкости, движущейся в канале под действием потока газа. Расчеты проведены для жидкости FC-72 и газа азота. Обнаружено существенное влияние характера расположения и формы (квадрат или прямоугольник) нагревательного элемента на характер течения и экстремальные значения толщины и температуры тонкой пленки. Для прямоугольных нагревателей характерно образование срединной струи между основными боковыми волнами. Для квадратных нагревателей перегревы на втором из них более существенны, а так же области разрыва пленки смещены от краев нагревательного элемента к центру. Обнаружено существование критического зазора между нагревателями, при котором возмущения толщины пленки максимальны. Исследовано влияние интенсивности нагрева на деформации пленки, установлено, что зависимость экстремальных значений толщины пленки от величины теплового потока сильно нелинейная. Показано что понижение уровня гравитации приводит к дестабилизации потока и усилению обнаруженных эффектов.

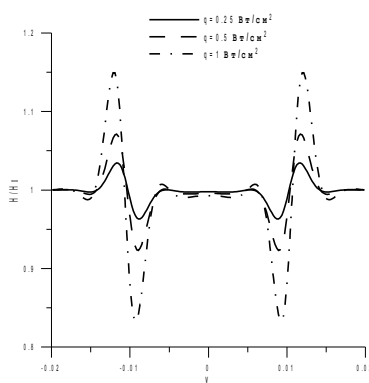


Рис. 13. Положение свободной границы раздела газ-жидкость в направлении поперек потока при $x = 0.5$ и $t = 2.5$ в зависимости от величины теплового потока. Расстояние между нагревателями равно 0.8. Числа Рейнольдса газа и жидкости равны соответственно 5 и 300. Размер каждого нагревателя составляет 0.2 см x 2 см. Гравитация равна 0.01 земной гравитации.

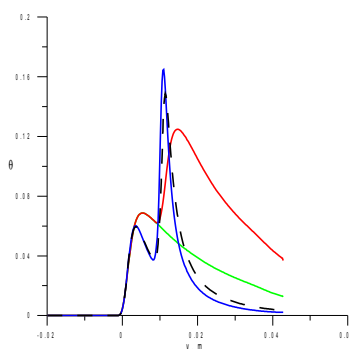


Рис. 14. Профиль температуры на оси симметрии при $y=0$ и $t=2.5$. Зеленая линия – один прямоугольный нагреватель. Красная линия - два прямоугольных нагревателя. Черная пунктирная линия - два квадратных нагревателя. Синяя линия - два квадратных нагревателя, $g=0.01g_0$, $q=1$ Вт/см². Размер каждого прямоугольного и квадратного нагревателя составляет соответственно 0.2 см x 2 см и 0.2 см x 0.2 см. $g_0 = -9.81$ м/с².

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

Выполнено экспериментальное исследование взаимодействия термокапиллярной и гидродинамической неустойчивостей в стекающей пленке жидкости. Исследовано влияние градиента температуры на поверхности нагрева на формирование термокапиллярных структур для 68% раствора глицерина в воде. Показано, что в условиях высоких градиентов температуры ($dT/dx = 13$ К/мм) на верхней кромке нагревателя образуются термокапиллярные структуры типа А (Рис. 15 а).

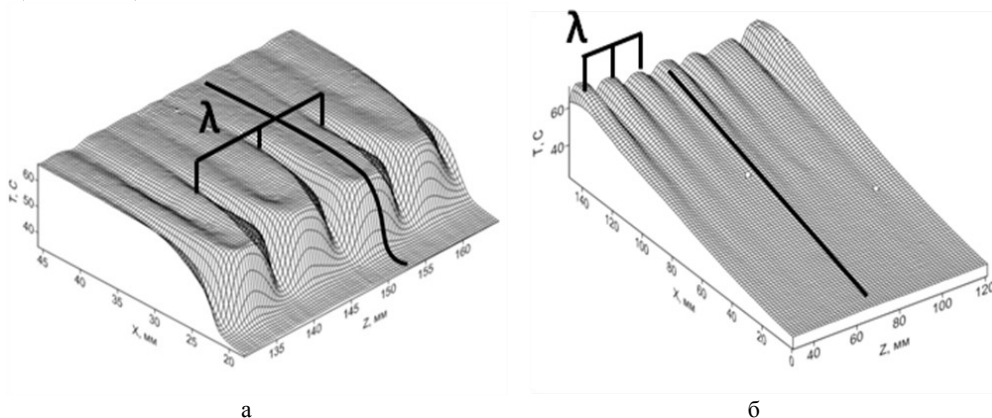


Рис. 15. Температура пленки 68% раствора глицерина в воде

При этом расстояние между струями в данном режиме составляет 8,5мм, а число Рейнольдса 0,1. В случае малых температурных градиентов (порядка $dT/dx = 0,2$ К/мм) на верхней кромке нагревателя не образуются регулярные структуры. Струйное течение происходило в нижней части нагревателя и расстояние между струями составляло порядка 14 мм при числе Рейнольдса 2 (Рис. 15б).

Показано, что при воздействии на течение внешних возмущений «наиболее опасная» длина волны точно совпадает с расстоянием между струями в термокапиллярном режиме течения (режиме А). Показано, что при высоких числах Рейнольдса (до $Re=300$) два термокапиллярных эффекта проявляются в межструйной области по мере увеличения плотности теплового потока. Поперечные градиенты температуры вызывают существенное уменьшение толщины пленки жидкости, а продольные градиенты - рост относительной амплитуды волн и числа Марангони по сравнению с изотермическими условиями.

Международный проект Европейского космического агентства:

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

Изучены трехмерные задачи конвекции двух несмешивающихся, вязких, несжимаемых жидкостей, заполняющих бесконечный канал и находящихся под действием поперечного гравитационного поля и продольного градиента температуры. Движение жидкостей описывается с помощью классических уравнений

конвекции. На границе раздела точно выполняются кинематическое и динамические условия, условия непрерывности температуры и тепловых потоков. Твердые, неподвижные стенки канала предполагаются теплоизолированными, либо осуществляется нагрев одной из них. Построено трехмерное решение уравнений конвекции при отсутствии осевой симметрии: компоненты вектора скорости представляют собой функции, зависящие от поперечных координат. Температура и давление также имеют аналогичные составляющие. Построен численный алгоритм сквозного счета с использованием метода переменных направлений.

Построены примеры трехмерных течений в стационарном случае для системы жидкость (этанол) - газ (азот). Течение имеет ярко выраженный вихревой характер и поступательную направленность (Рис.16). В случае, когда наряду с продольным градиентом температуры, создаваемым вдоль границы раздела, имеет место поперечный перепад температуры (одна из твердых стенок канала горячая, а другая холодная), вихревой характер движения жидкости и распределение температуры меняется. Особенности двухслойных течений жидкостей и процессы теплопереноса в них могут быть изучены с помощью построенных решений в случае, когда наряду с продольным градиентом температуры, создаваемым вдоль границы раздела, будет иметь место поперечный перепад температуры.

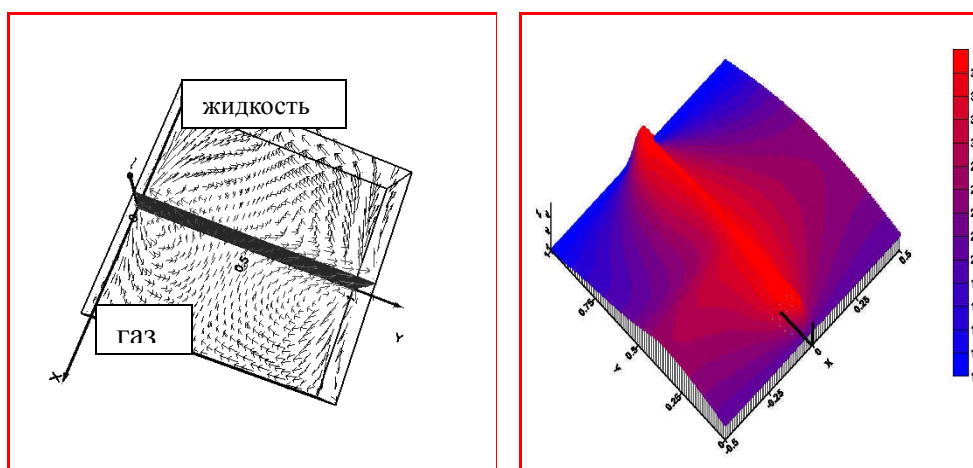


Рис. 16. Пример трехмерного течения при пониженной гравитации (сила тяжести направлена против оси Ox).

Поле скоростей:

$Gr = 1$ (число Грасгофа); $Ma=10000$ (число Марангони); $\tilde{T} = 1$ (продольный градиент температуры); $\tilde{u} = 1$ (отношение продольной и поперечной характерных скоростей).

Профиль температуры:

Теплоизоляция горизонтальных (относительно силы тяжести стенок), правая стенка горячая ($T_{hot} = 2$), левая стенка холодная ($T_{cold} = 1$). На распределение температуры существенное влияние оказывает наличие продольного градиента температуры.

Международный проект Европейского космического агентства:

Локальные измерения в пленках жидкости при фазовых переходах (СА-ФИР)

Международный проект SAFIR (координатор проекта проф. О.А. Кабов) выполняется в рамках международной лаборатории Института теплофизики (НТИ)

в сотрудничестве с центром по Микрогравитации Свободного Университета Брюсселя. Целью проекта является проведение экспериментального исследования различных аспектов пленочных и ривулетных течений с испарением и конденсацией (устойчивость, разрушение, теплообмен) на Международной Космической Станции. В 2011 г. выполнены предварительные исследования в условиях параболического полета. Изучались ручейковые течения жидкости FC-72 со спутным потоком газа (азота) в мини каналах ориентированных перпендикулярно к направлению силы тяжести. Визуализация, Рис.17, и измерения ширины ривулета, Рис.18, проводилась при помощи скоростного шлирен-метода, позволяющего измерять деформации поверхности пленки с скоростью до 300 кадров в секунду.

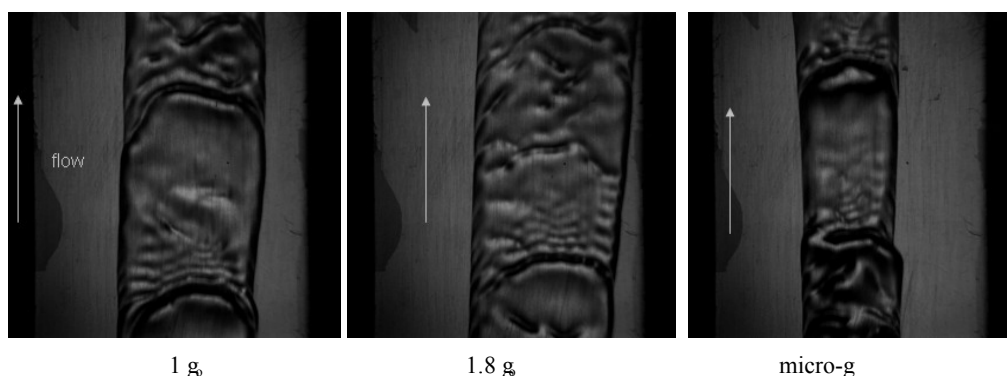


Рис. 17. Шлирен фотографии ручейкового течения FC-72 со спутным потоком газа в мини канале в условиях параболического полета, температура подложки 20°C, $Re_g=300$, $Re_l=20$.

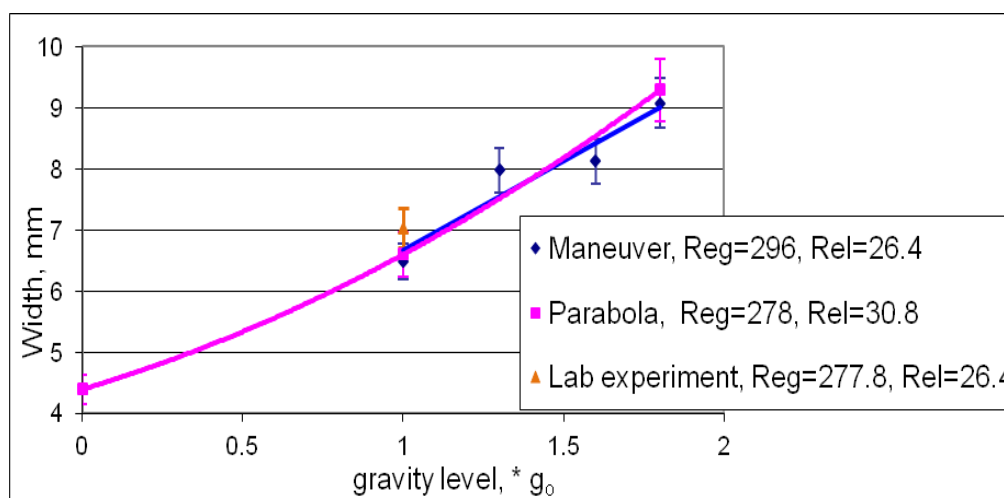


Рис. 18. Ширина ручейкового течения FC-72 в зависимости от гравитации, температура подложки 30°C.

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

Исследовано влияние гравитации (в диапазоне от 0 до 20 g) на динамический краевой угол смачивания в капле жидкости, растущей на твердой поверхности. Эксперименты проводились в рамках 55-ой кампании параболических полетов Европейского Космического Агентства, состоявшейся в ноябре 2011 г. в г. Бордо, Франция (Рис. 19а), а также на центрифуге Европейского Космического Агентства в ESTEC, Голландия (Рис.19б). В экспериментах использовались 11 различных поверхностей. В качестве рабочей жидкости использовалась вода. Для получения профиля капли использовался высокоскоростной теневой метод. Было обнаружено, что с увеличением уровня гравитации, наступающий краевой угол смачивания увеличивается, Рис. 20.



Рис. 19. (а) Экспериментальная установка для параболических полетов. (б) Центрифуга Европейского Космического Агентства.

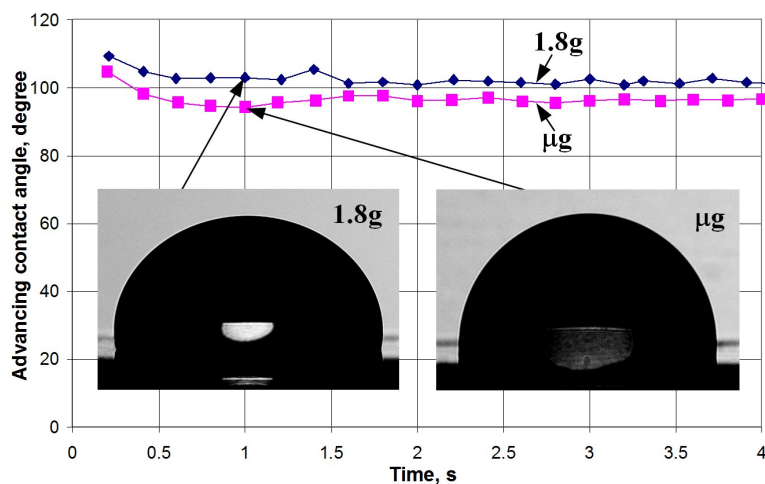


Рис. 20. Наступающий краевой угол смачивания в зависимости от времени для различных уровней гравитации (μg и $1.8g$). Медная подложка, скорость накачки жидкости 1 мл/мин.

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 Мериленд (США)

Сотрудничество с отделением математики Методистского университета штата Техас (США)

Сотрудничество с De Core Science & Technologies Ltd., Индия

Зарубежные командировки – 10

Публикации

Монографии	– 0
Центральные журналы	– 3
Международные журналы	– 10
Труды международных конференций	– 7
Охранные документы	– 2

Доклады на конференциях и совещаниях

Международных	– 24
в т. ч. пригл.	– 5
секц.	– 16
стенд.	– 3

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

Научно-организационная деятельность

профессор, д. ф.-м. н. Кабов О.А. ÿ

Член национального комитета РАН по тепло-массо обмену.

Содиректор международной лаборатории «Heat Transfer 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 международных журналов “Journal of Microgravity Science and Technology”, “International Journal of Emerging Multidisciplinary Fluid Sciences”, “International Journal of Engineering Thermophys”.

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

Координатор двух международных проектов Европейского космического агентства CIMEX “Конвекция и межфазный массообмен”, и SAFIR (Локальные измерения в пленках жидкости при фазовых переходах).

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. –

заместитель Председателя Совета научной молодежи ИТ СО РАН;

к. ф.-м. н. Кабова Ю.О. –

секретарь международного семинара Sixth International Conference on TWO-PHASE SYSTEMS FOR GROUND AND SPACE APPLICATIONS, Cava de' Tirenì, Italy, September 25-28, 2011

Премии и награды

Кабов О.А. - награжден нагрудным знаком Федерации космонавтики России «Полет Ю.А. Гагарина» за заслуги перед космонавтикой;

Кабов О.А. - награжден памятным знаком мэрии г. Новосибирска «За труд на благо города» в честь 115-летия со дня основания г. Новосибирска.

Научно-педагогическая деятельность

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

Научно-исследовательская работа со студентами и аспирантами

Аспирантов	– 2
Магистрантов НГУ	– 0
Студентов НГУ	– 0

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 – 4

Компьютеры подключены к локальной сети Института с выходом в Internet.