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 и гипергравитации
- Испарение и течение в каплях и ручейках жидкости на твердой поверхности

Результаты научно-исследовательских работ 2013 г.

Проект III.22.7.4. «Интенсификация процессов переноса в энергонапряженных теплообменных системах» (руководитель зав. лаб., д.ф.-м.н. О.А. Кабов) (Гос. Рег. 01201350449).

Численно исследовалось влияние величины силы тяжести на величину коэффициента теплоотдачи при конденсации чистого пара в горизонтальной круглой трубе. Влияние величины силы тяжести на величину коэффициента теплоотдачи показано на Рис 1.



Рис. 1. Распределение коэффициента теплоотдачи при конденсации пара этанола в горизонтальной круглой трубе. Влияние силы тяжести $G=10 \text{ kg/m}^2 s$, d=0.5 mm, $\beta=0$, этанол, l=100, Ts=58 C, $\Delta T=1 \text{ K}$.

Расчеты приведены для трех уровней ускорения свободного падения g=0, g=10, g=100. На входном начальном участке трубы, где реализуется кольцевой режим течения конденсата, величины коэффициентов теплоотдачи совпадают, при этом КТО резко убывает, что связано с увеличением толщины пленки конденсата по всему периметру трубы. Далее, при достижении определенной толщины пленки конденсата начинается отвод конденсата из верхней части трубы за счет силы тяжести. На графике этому соответствуют точки, где кривая расходится с кривой g=0. Дальнейшее уменьшение КТО уже связано с увеличением области тонкой пленки конденсата в верхней части трубы в связи с увеличением уровня заполнения жидкостью нижней части.

Интеграционная программа СО РАН

Проект партнерских фундаментальных исследований «Двухфазные системы в космической энергетике» (ПП-96) (Гос. Рег. 01201372410)

Выполнены экспериментальные исследования динамики испарения с локальной поверхности горизонтального слоя жидкости под действием потока газа. Измерен средний расход испарения слоя жидкости (HFE-7100) под действием потока инертного газа (Азот) с помощью двух независимых методов. Исследовано влияние средней скорости газа, температуры жидкости и газа, а также толщины слоя на скорость испарения и конвекцию в слое жидкости. Получены корреляционные зависимости, расхода испарения от расхода инертного газа и температуры. Обнаружено, Рис. 2 и 3, что средний расход испарения имеет локальный максимум при увеличении толщины слоя жидкости. С ростом температуры жидкости и газа, этот локальный максимум расхода испарения смещается в сторону большего значения толщины слоя жидкости.



Рис. 2. Зависимость массовой скорости испарения от толщины слоя жидкости. Температура – 20 °С.

Рис. 3. Зависимость массовой скорости испарения от толщины слоя жидкости. Температура – 30 °С.

Междисциплинарный интеграционный проект: «Микро- и наноразмерные многофазные неизотермические течения» (ИП-116)

Выполнено экспериментальное исследование течения двухфазного потока в прямоугольном коротком горизонтальном канале высотой 200 микрометров. Определены границы между режимами и частоты характерных пульсаций. По-

строена режимная карта процесса, Рис. 4. Установлено существование раздельного режима течения. Подробно исследованы и уточнены границы перехода к вспененному режиму. Используя данные предыдущих исследований и полученные данные показано, что изменение высоты горизонтального канала оказывает существенное влияние на границы между режимами. Область вспененного режима течения возрастает с уменьшением толщины канала.



Рис. 4. Режимная карта двухфазного течения в канале сечением 0.2x34 мм. Режимы течения: 1 – раздельный, 2 – кольцевой, 3 – вспененный, 4 – струйный, 5 – снарядный, 6 – пузырьковый.

Междисциплинарный интеграционный проект: «Обратные задачи и их приложения: теория, алгоритмы, программы» (ИП-14)

Экспериментально исследовались испаряющиеся капли воды, сидящие на горизонтальной нагреваемой подложке. В качестве подложки использовалась константановая фольга (CuNi) толщиной 25 мкм с размерами 42х35 мм и коэффициентом теплопроводности 23 Вт/мК. Использовался Джоулев нагрев фольги. Мощность тепловыделения в экспериментах составляла от 0.25 до 2.5 Вт. Фотографии профиля капли делались с помощью оптической теневой системы с разрешением 8 мкм/пиксель. Методом Юнга-Лапласа определялись геометрические параметры капель: объем 5,1-39,3 µl, диаметр основания (смоченного пятна) 3,68 – 7,19 мм, высота 0,88 – 1,81 мм, контактный угол смачивания: 50-75° (средний угол 63°). Температура нижней поверхности фольги измерялась тепловизором. Термографическая съемка проводилась с частотой записи 25 Гц, разрешением 640х512 пикселей (1 пиксель / 0.1 мм) и временем интегрирования 805 мкс. Для увеличения минимальной разрешимой разности температур при использовании IR камеры обратная сторона фольги покрывалась слоем сажи. Измеренная в экспериментах температура поверхности фольги была в диапазоне 29-86 °C.

С использованием реализованного метода решения задачи Коши для уравнения Лапласа по термографическим измерениям были рассчитаны распределения плотности теплового потока на поверхности фольги со стороны капли. Результаты расчетов показали, что, максимальная плотность теплового потока имеет место в области контактной линии и превосходит среднюю плотность теплового потока со всей поверхности фольги в 5-7 раз. Средняя плотность теплового потока в области, смоченной каплей, превосходит среднюю плотность теплового потока со всей поверхности фольги в 3-5 раз. Более того, плотность теплового потока под каплей больше чем средняя плотность тепловыделении. Это объясняется притоком тепла с периферии фольги, за счет относительно высокого значения коэффициента теплопроводности материала фольги, а также высокой интенсивностью испарения в области контактной линии.

Стипендия Президента Российской Федерации СП-160.2012.1 «Интенсификация теплообмена в микросистемах» (к.ф.-м.н. Гатапова Е.Я.)

Исследована линейная устойчивость тонкой жидкой пленки на периодически структурированной параллельными канавками, заполненными газом, подложке. Успешно и впервые применена Теория Флоке для исследования устойчивости пленки жидкости на структурированной поверхности. Развиты и расширены идеи классической модели Кронига-Пенни для решения задачи об устойчивости для уравнений четвертого порядка в частных производных. Показано, что эффект структуры зависит от соотношения периода структуры с длиной волны неустойчивости. Когда размер структуры становится сравнимой с характерной длиной волны неустойчивости, тогда резонансное взаимодействие между режимами неустойчивости и структурированием приводит к разрыву в дисперсионных кривых и приводит к более высоким значениям максимальной скорости роста возмущений. Результаты, полученные из теории Флоке сравнены с численным решением по модели в приближении тонкого слоя. А также исследована устойчивость для полных уравнений Стокса. Получено отличное соответствие между результатами по устойчивости, полученных разными методами. Обе модели (приближение тонкого слоя и полный Стокс) дают практически идентичные результаты для значений є менее 0,1 (Рис. 5).



Рис. 5. Сравнение дисперсионных кривых, полученных из анализа устойчивости в приближении тонкого слоя (сплошные линии) и из модели течения Стокса (треугольники). Для β = 1, δ = 0.5, l = 10, и различных значений ε: ε = 0.05 (левый рисунок) and ε = 0.3 (правый рисунок).

Стипендия Президента Российской Федерации СП-2749.2013.1 «Исследование интенсификации теплообмена за счет управления формированием термокапиллярных неустойчивостей на поверхности волновой нагреваемой пленки жидкости» (аспирант Шатский Е.Н.).

Выполнено экспериментальное исследование влияния условий на поверхности нагрева при свободном стекании пленок 68% раствора глицерина в воде по вертикальной поверхности. С использованием тепловизионной методики измерения температуры поверхности жидкости было исследовано формирование термокапиллярных структур различных типов.

Показано, что для условия q=const термокапиллярные структуры (типа Б) формировались постепенно с увеличением длины пробега пленки по нагревателю и увеличением плотности теплового потока. Для граничного условия T=const регулярные структуры (типа A) формировались на верхней кромке нагревателя при достижении пороговой плотности теплового потока. Так же впервые было зафиксировано существование структур типа Б при малых числах Рейнольдса на поверхности безволновой пленки.

Грант Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук "Интенсификация теплообмена при испарении неизотермических тонких пленок жидкости в миниканале" (МК-3528.2013.8) (руководитель к.ф.-м.н. Кабова Ю.О.)

С использованием разработанной трехмерной математической модели для описания совместного нестационарного движения пленки жидкости и газа в микроканале при локальном нагреве, с учетом процесса испарения, диффузионного и конвективного механизмов массопереноса через деформируемую границу раздела "газ-жидкость" и зависимости свойств жидкости от температуры, проведено исследование гидродинамики и тепломассобмена в пленке жидкости. Показано, что пар перемещается в газовой фазе посредством направленной конвекции и диффузии, диффузия наиболее значительна при низких скоростях газа, Рис. 6. Тепловой и концентрационный пограничные слои имеют S- образную форму, что связано с параболическим профилем скорости течения газа в канале. При Re_o>15 пограничные слои касаются верхней стенки канала на дистанции больше, чем длина нагревателя. Несмотря на локальность нагрева, более 90% пара образуется в области нагревателя. За нагревателем концентрация пара и температура быстро устанавливаются вдоль и поперек канала, что объясняется конденсацией пара на холодных участках пленки. Толщина пленки жидкости достигает своего минимума в области нижней кромки нагревателя, основной причиной образования волн по краям нагревателя и существенного утончения пленки являются испарение и термокапиллярный эффект. С увеличением Re высота боковых волн и вала жидкости существенно уменьшается.



Рис. 6. Безразмерная температура и положение свободной границы «газ-жидкость» поперек канала при x=0.3 мм, t=3 с, вода, $Re_{l}=1$, и азот. Высота канала 250 µм, нагреватель 2x12 мм², q=1 Bm/cm^2 . а) $Re_g=5$, $H_0=74.3$ µм, [T]=1.24 °C; b) $Re_g=15$, $H_0=51.7$ µм, [T]=0.865 °C; c) $Re_g=50$, $H_0=32.7$ µм, [T]=0.547 °C.

Субсидия в виде муниципального гранта мэрии города Новосибирска молодым ученым и специалистам «Разработка испарительной системы охлаждения для теплонапряженных элементов промышленного оборудования» (руководитель к.ф.-м.н. Кабова Ю.О.)

Для тестирования численного кода, разработанного на языке программирования Фортран, для численного решения нестационарных задач совместного движения пленки жидкости и газа в микроканале при локальном нагреве, с учетом испарения, построено точное решение задачи о движении плоского слоя жидкости по бесконечно-протяженной подложке с заданной температурой. Расчеты показывают, что разница между точным решением и результатами, полученными с использованием разработанного численного алгоритма, составляет не более нескольких процентов, что может считаться хорошим соответствием.

Параметры течения		Численный алгоритм		Точное решение		
[T], ⁰ C	Re	Re _g	h	θ_{l}	h	θ_1
1.0	0.5	3.5	0.9892	0.9557	0.9926	0.9485
2.0	0.5	3.5	0.9784	0.9745	0.9714	0.9785
3.0	1.0	7.5	0.9771	0.9561	0.9784	0.9494

Таблица 1. Результаты расчетов температуры свободной границы пленки, θ₁, и толщины пленки, h

Молодежный научно-исследовательский проект ИТ СО РАН «Исследование Кризиса теплообмена в локально нагреваемой плёнке жидкости, движущейся под действием спутного потока газа» (руководитель аспирант Чеверда В.В.)

Создан экспериментальный стенд по исследованию двухфазного течения в условиях интенсивного теплообмена. Произведена адаптация скоростной шлирен-системы и фазовой шлирен-системы под исследования двухфазного потока в условиях испарения; выполнена визуализация деформаций на поверхности плёнки. В диапазоне значений параметров (Re_g=1-2000, Re_l=1-100, T_o=10-40°C) проведено систематическое экспериментальное исследование режимов течений плёнки диэлектрической жидкости FC-72, движущейся под действием потока спутного газа в миниканале; полученные значения параметров и характеристики течения систематизированы, построена карта пяти режимов плёночного течения (с разрывом, ячеистый, структурный, двухмерные и трёхмерные волны) жидкости FC-72 в миниканале (Рис. 7). Эксперименты показали, что в представленном диапазоне расходов жидкости и газа, всегда наблюдались деформации на поверхности плёнки, что не всегда наблюдалось в выполненных ранее в лаборатории экспериментах по течению плёнки воды под действием потока спутного газа в миниканале. Возможными объяснениями являются: эффект испарения в эксперименте с легкокипящей жидкостью, более чувствительная оптическая система, чем в предыдущей работе.



Рис. 7. Карта режимов течений (FC-72 - азот): 1-ячейки, 2-структуры, 3- 2D волны и структуры, 5-разрыв плёнки жидкости.

Международный космический эксперимент ИКМОС «Испарительная конвекция и межфазный тепло-массо-перенос (ИКМОС)»

Изучаются стационарные двухслойные течения жидкости и газа в случае, когда на границе раздела требуется учесть испарение жидкости. При этом на твердых непроницаемых границах канала выполняются условия прилипания, задано линейное относительно продольной координаты

распределение температуры и условие, определяющее концентрацию пара на верхней границе. На термокапиллярной границе раздела, остающейся недефор-

мированной, выполняются кинематическое и динамические условия, условие для тепловых потоков с учетом массопереноса, а также условия непрерывности скорости и температуры, баланса массы и соотношение для концентрации насыщенного пара. Построено точное решение стационарной задачи о конвективных двухслойных течениях с учетом испарения на термокапиллярной границе раздела при заданном расходе газа. В качестве математической модели в работе используются уравнения Навье-Стокса в приближении Обербека-Буссинеска. В верхнем слое, представляющем собой смесь газа и паров жидкости, изучается процесс диффузии пара и учитывается эффект Дюфура. Точные решения имеют такой вид, когда только продольная компонента скорости отлична от нуля и зависит от поперечной координаты, а распределение температуры в верхнем и нижнем слое и концентрация пара имеют линейную относительно продольной координаты составляющую. Представлены примеры профилей скорости, характеризующие стационарные режимы течений для системы "этанол-азот" и "HFE7100-азот" в условиях нормальной и пониженной гравитации. Исследуется влияние продольных градиентов температуры, заданной на границах канала, на характер течения. Примеры двумерных течений представлены в виде профилей скорости для системы «НFE7100-азот» (см. Рис. 8, 9) в условиях нормальной гравитации.



Рис. 8. Профили скоростей в системе "HFE7100- азот" при различных значениях продольного градиента температуры А; здесь h=4мм (высота слоя, заполненного газом); l=8мм (высота слоя, заполненного жидкостью); А1=0 (продольный градиент температуры на нижней твердой границе); g=9.81 м/ c^2 (ускорение силы тяжести); Q=9.6*10⁻⁴ Kg/(m*s)(удельный расход газа). Здесь при А=10 К/т (прод. град. темп. на св. A₂=22.8 K/m (прод. град. темп. на гран.) верхн. тв. границе), $M=1.676*10^{-4} \text{ kg/(m^2*s)}$ (уд. поток пара); при A=100 K/m $A_2 = 228$ K/m, $M=1.676*10^{-3} \text{ kg/(m^2*s)}$; npu A=200 K/m $A_2 = 456 \text{ K/m}, M = 3.352 \times 10^{-3} \text{ kg/(m^2 \times s)}.$



Рис. 9. Профили скоростей в системе "HFE7100- азот" при различных значениях продольного градиента температуры А1; здесь h=4мм (высота слоя, заполненного газом); l=8мм (высота слоя, заполненного жидкостью); А=0 (продольный градиент температуры на свободной границе); g=9.81 м/ c^2 (ускорение силы тяжести); Q=9.6*10⁻⁴ Кg/(m*s)(удельный расход газа). Здесь при А1=10 К/т (прод. град. темп. на нижн. тв. гран.) А2=-12.85 К/т (прод. град. темп. на верхн. тв. гран.), M=7.9814*10⁻³ Kg/(m²*s) (уд. поток пара); при A=100 К/т A₂=-128.5 К/т, $M=1.061674*10^{-1}$ kg/(m2*s); npu A=200 $A_2 = -256.9 \ K/m,$ $M=2.8513*10^{-1}$ K/m $kg/(m^2 * s)$.

Проведено подробное моделирование течений в случае, когда на верхней твердой границе слоя, заполненного газом (смесью газа и паров жидкости), предполагаются выполненными условие равенства нулю потока пара (Рис. 8) либо условие равенства нулю концентрации пара (Рис. 9). Аналитическое моделирование на основе точных решений проведено для значений исходных параметров (значения высоты слоя жидкости и газа, расхода газа), используемых в эксперименте. Подтверждено влияние высоты слоя газа и жидкости на интенсивность испарения, что качественно совпадает с экспериментом. Значения градиента *A*, которые обеспечивают экспериментальные значения массы испарения жидкости качественно совпадают с экспериментом

Российский фонд фундаментальных исследований:

Проект РФФИ 12-08-01285 «Двухфазные течения в мини- и микро- каналах с микроструктурированными поверхностями и нанопокрытиями» (руководитель д.ф.-м.н. Кабов О.А.)

Проект РФФИ 12-01-00360 «Взаимодействие волн с термокапиллярными структурами на поверхности нагреваемой пленки жидкости» (руководитель д.ф.-м.н. Чиннов Е.А.)

Проект РФФИ 12-08-31221 мол_а «Тепломассообмен и динамика испаряющихся капель/пленок жидкости на поверхностях с контролируемой смачиваемостью» (руководитель к.ф.-м.н. Гатапова Е.Я.)

Министерство образования и науки, ФЦП «Научные и научнопедагогические кадры инновационной России»:

Соглашение № 8241 «Исследование двухфазных процессов для космической энергетики» (Гос. Рег. 01201372411) (руководитель д.ф.-м.н. Кабов О.А.)

Соглашение № 8745 «Взаимодействие границ раздела жидкости с наноструктурированными поверхностями» (Гос. Рег. 01201372893) (руководитель к.ф.-м.н. Гатапова Е.Я.)

Соглашение №8505 «Нестационарное течение испаряющихся пленок жидкости в микросистемах» (Гос. Рег. 01201372894) (руководитель профессор Ажаев В.С., США)

Соглашение № 8511 « Теоретическое и экспериментальное исследование границы раздела жидкость-пар» (Министерство образования и науки). Гос. Рег. 01201372895) (руководитель профессор Мартин И.А., Франция) Государственный контракт №14.740.11.1070 «Разработка энергоэффективной системы охлаждения, основанной на испарении тонких пленок жидкости» (руководитель к.ф.-м.н. Кабова Ю.О.).

Государственный контракт № 14.132.21.1357 «Исследование волновой динамики и термокапиллярных эффектов при течении пленок жидкости по нагреваемой поверхности» (руководитель аспирант Шатский Е.Н.)

Министерство образования и науки, ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России»:

Государственный контракт № 14.516.11.0087 «Разработка новых испарительных систем для эффективного охлаждения светодиодов, повышения срока службы и качества работы»

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)

Сотрудничество с De Core Science & Technologies Ltd., Индия

Сотрудничество с Инженерной школой при университете Марселя (Франция)

Зарубежные командировки – 10

Связи с отраслевой и вузовской наукой

Сотрудничество с ФГОУ ВПО «Новосибирский государственный аграрный университет».

Публикации

Центральные журналы	- 5
Международные журналы	- 10
Труды отечественных конференций	- 1
Прочие публикации	- 15
Принятые в печать	- 12

Доклады на конференциях и совещаниях

Международных		- 13
В Т. Ч.	секц.	- 11
	стенд.	- 2
Всероссий в т. ч.	ских секц. стенд.	- 7 - 5 - 2

Научно-организационная деятельность

профессор, д. ф.-м. н. Кабов О.А.

Член национального комитета РАН по тепло-массо обмену.

Главный редактор международного журнала «Interfacial Phenomena and Heat Transfer».

Член редакционной коллегии международного журнала "Journal of Microgravity Science and Technology".

Координатор от России двух международных проектов Европейского космического агентства «Испарительная конвекция и межфазный тепло-массо-перенос (СІМЕХ - ИКМОС)», и «Процессы в области линии контакта газ-жидкостьтвердое тело (Multiscale - Boiling Микрорегион)».

Сопредседатель международного семинара "Two-Phase Systems for Ground and Space Applications", Бремен.

д. ф.-м. н. Чиннов Е.А.

член Ученого Совета отдела физической гидродинамики ИТ

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»;

помощник редактора международного журнала «Interfacial Phenomena and Heat Transfer»;

аспирант Шатский Е.Н. –

член Совета научной молодежи ИТ СО РАН;

к.ф.н. Быковская Е.Ф.-

помощник редактора международного журнала «Interfacial Phenomena and Heat Transfer»;

Премии и награды

Гончарова О.Н. - Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации (26 марта 2013 г., № 187 к-н.)

Кабова Ю.О. - Муниципальный грант мэрии города Новосибирска. *Кунгурцев П.В.* - Стипендия British Petroleum Russia 2013/14;

Шатский Е.Н. - Стипендия Президента РФ 2013-2015;

Научно-педагогическая деятельность

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

Курс «Общей физики» (проф. Чиннов Е.А.), НГАСУ, кафедра физики.

Молекулярный практикум (аспирант Шатский Е.Н.), НГУ, физический факультет, ассистент

Научно-исследовательская работа со студентами и аспирантами

Аспирантов	– 3, ИТ СО РАН, 1 АлтГУ
Магистрантов НГУ	– 2, НГУ
Студентов НГУ	– 3, НГУ

Кадровый состав

Всего сотрудников	- 12
Из них научных сотрудников	- 8
в т. ч. докторов наук	- 3
кандидатов наук	- 5

Информационно-вычислительные ресурсы

Персональные ЭВМ:	
Ноутбук	- 9
Настольный ПК	- 9

Компьютеры подключены к локальной сети Института с выходом в Internet.