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 2014 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).

Вскрыт механизм разрушения капельного кластера - гексагонально-упорядоченного слоя микрокапель, левитирующих над локально-нагреваемым горизонтальным слоем жидкости. С использованием высокоскоростных инфракрасной и видеосъемки (до 57 кГц) впервые обнаружены пакеты капиллярных волн на поверхности горизонтального слоя воды, генерируемые при коалесценции микрокапель со слоем жидкости. Методами высокоскоростой инфракрасной термографии и высокоскоростной видеосъемки исследовался процесс возникновения и разрушения капельного кластера. Обнаружено, что коалесценция со слоем жидкости единственной капли кластера может порождать капиллярную волну на межфазной поверхности, распространение которой приводит к коалесценции всех капель в течение тысячных долей секунды. С применением высокоскоростной видеосъемки и теневого метода впервые зарегистрированы пакеты капиллярных волн на поверхности горизонтального слоя воды, генерируемые при коалесценции со слоем микрокапель составляющих капельный кластер, Рис. 1. Длина наиболее коротких, из наблюдавшихся в эксперименте волн, составляла порядка 130 мкм, Рис. 2, а их фазовая скорость превышала 1.8 м/с. Показано, что коалесценция единичной капли запускает самоподдерживающийся волновой процесс, который за время несколько миллисекунд вызывает коалесценцию сотен капель, образующих кластер. Волны генерируются за счет энергии поверхности капель. Измеренная амплитуда волн имеет значения порядка 2-6 мкм, что согласуется с величиной поверхностной энергии капель.

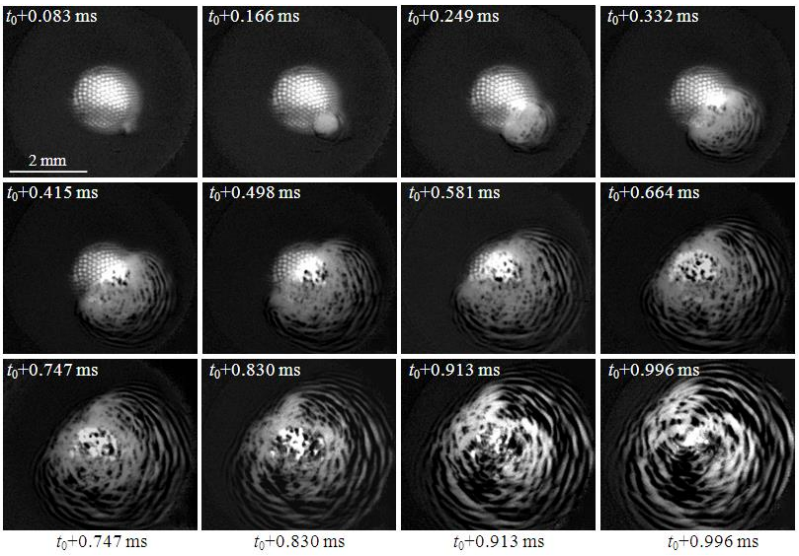

Рис. 1. Волновой процесс при коалесценции капель кластера со слоем жидкости.

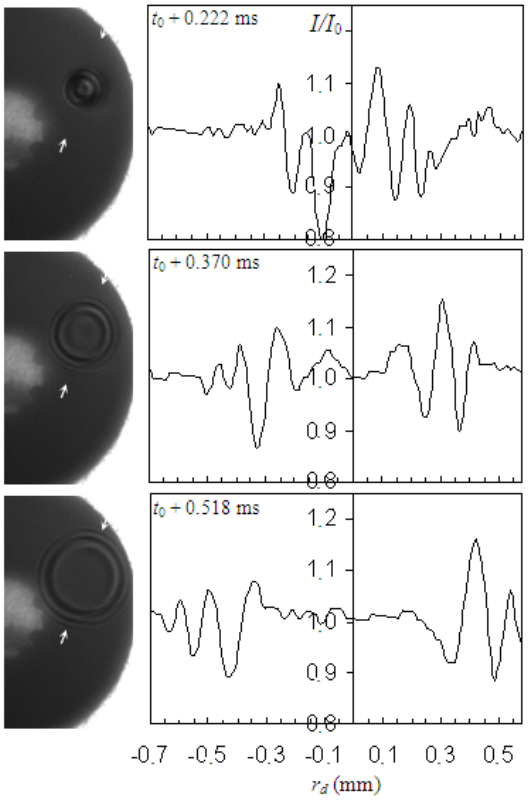

Рис 2. Изображения пакета капиллярных волн, генерируемого одиночной каплей диаметром 90 ± 20 мкм и соответствующие распределения яркости (частота записи 13500 к/с).

Интеграционная программа СО РАН

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

Экспериментально исследовались испаряющиеся капли воды, сидящие на горизонтальной нагреваемой подложке, в качестве которой использовалась константановая фольга толщиной 25 мкм с размерами 42х35 мм^2.Температура нижней поверхности фольги измерялась тепловизором. Для того чтобы определить плотность теплового потока при испарении жидкости вблизи контактной линии решалась задача Коши для уравнения теплопроводности с использованием термографических данных. 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. Это объясняется притоком тепла с периферии фольги к капле, за счет относительно высокого значения коэффициента теплопроводности материала фольги, а также высокой интенсивностью испарения в области контактной линии.

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

Выполнено экспериментальное исследование течения двухфазного потока в прямоугольных коротких горизонтальных микроканалах. Определены границы между режимами и частоты характерных пульсаций.

Установлено, что существование вспененного режима обусловлено развитием неустойчивости струйного режима и увеличением частоты взаимодействия жидкости, поступающей с боковых сторон канала. При переходе к кольцевому режиму течения сплошные заполненные перемычки жидкости исчезают, а при переходе к пузырьковому становятся устойчивыми. На рис. 3 приведен наиболее характерный образец вспененного режима. В этом случае частота сплошных перегородок увеличивается до 3 Гц, а количество разорванных перемычек составляет 33% от общего их числа.

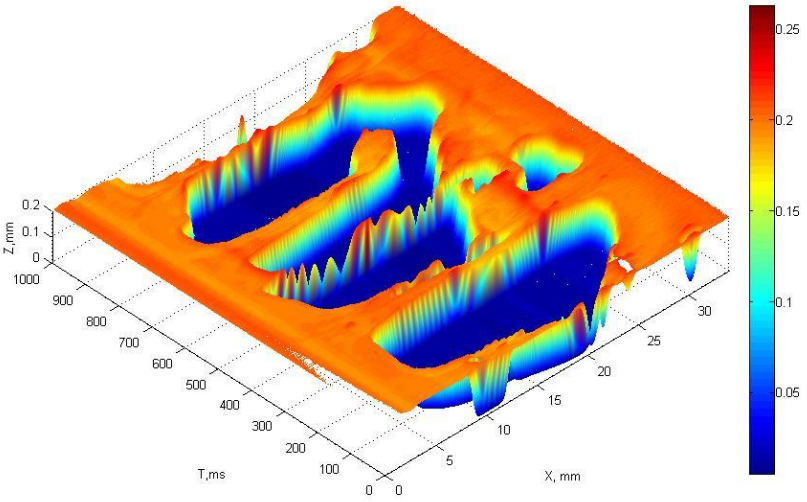

Рис. 3. Распределение жидкости в канале сечением 0.2x34 мм при U_{SG}=2.45 м/с, U_{SL}=0.16 м/с.

На рис. 4 показано сравнение данных для канала с зазором 0.2 мм с данными для горизонтальных каналов с большей высотой (0.42 и 1 мм). Граница пузырькового и снарядного течения не претерпела существенных изменений при изменении высоты канала от 0.42 до 0.2 мм. С увеличением высоты канала уменьшалась область струйного режима (граница между струйным и раздельным режимами сдвигается в сторону более низких приведенных скоростей газа), за счет чего существенно увеличивается область раздельного течения. Область кольцевого режима уменьшается с увеличением высоты канала (граница между кольцевым и раздельным режимами сдвигается в область более высоких приведенных скоростей жидкости).

Существенно изменялась область вспененного режима при изменении высоты канала. Для канала с высотой 1 мм область вспененного режима практически отсутствует. В горизонтальных каналах большей высоты этот режим также не был зарегистрирован. С уменьшением высоты горизонтальных каналов область вспененного режима возрастает, достигая максимальной величины для канала с зазором 0.2 мм. При этом граница между вспененным и кольцевым режимами в зоне высоких приведенных скоростей жидкости остается практически неизменной.

Обратная тенденция наблюдается для раздельного режима, область которого убывает с уменьшением высоты горизонтальных каналов. Однако в отличие от цилиндрических труб эта область не исчезает. Видно, что в микроканале толщиной 200 мкм существует область устойчивого раздельного течения с тонкой пленкой жидкости.

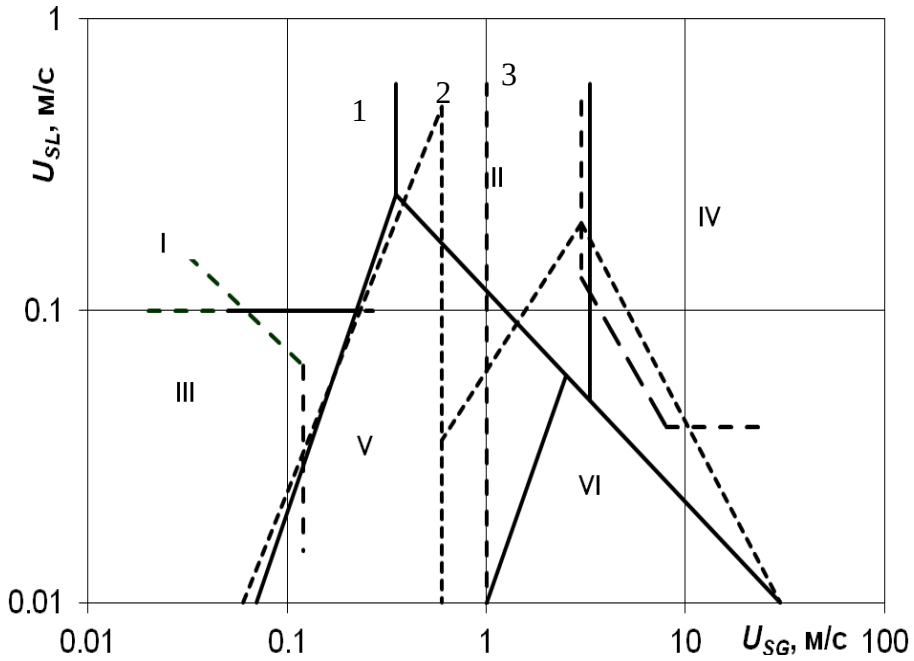

Рис. 4. Сравнение режимных карт для каналов сечением 1 – 0.2×34 мм, 2 – 0.42×40 мм, 3 – 1×40 мм; режимы течений: I – пузырьковый, II – вспененный, III – снарядный, IV – кольцевой, V – струйный, VI – раздельный.

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

В приближении тонкого слоя решена осесимметричная нестационарная задача с локализованным тепловым воздействием на горизонтальный слой жидкости с деформируемой свободной поверхностью. Помимо термокапиллярного эффекта в модели учтено капиллярное давление, связанное с переменной кривизной свободной поверхности. Рассчитана эволюция свободной поверхности для различных вариантов нагрева. Обнаружено, что при импульсном локальном нагреве горизонтального слоя жидкости в начальный момент времени вокруг термокапиллярного углубления формируется вал жидкости. Вал наблюдается и в расчетах и в экспериментах и объясняется вытеснением жидкости из центра на периферию, Рис. 5. В стационарных условиях вала не наблюдается. Данный результат служит основой для решения обратных задач термокапиллярной конвекции.

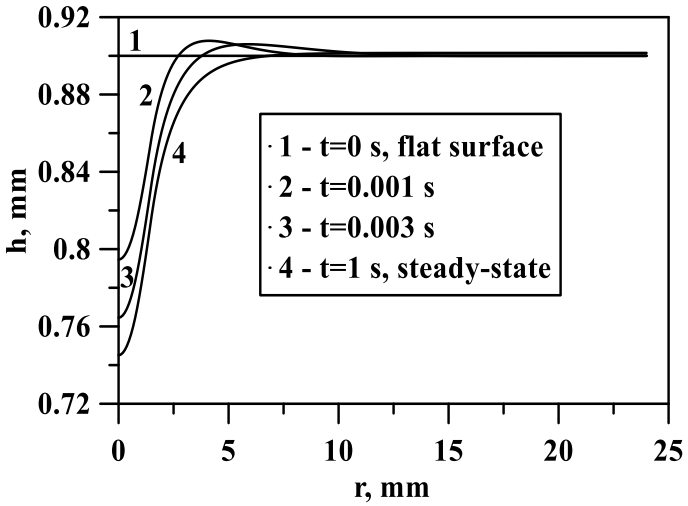

Рис. 5. Рассчитанные профили поверхности жидкости в различные моменты времени от начала нагрева, этанол, T_0= 20 C, ΔT = 1 K. Диаметр кюветы D = 48 мм, Диаметр нагрева D_H = 3mm.

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.)

Выполнено численное исследование влияния уровня гравитации и скорости потока газа на испарение и деформации поверхности пленки при совместном течение пленки жидкости и газа в канале при локальном нагреве. Показано, что испарение определяется целым рядом параметров, таких как, например, интенсивность нагрева, числа Рейнольдса газа и жидкости и, в том числе, уровнем гравитации. Влияние гравитации на течение и деформации свободной границы пленки существенно и является нелинейным. Установлено, что даже при достаточно умеренном нагреве поперечные деформации поверхности пленки в области нагревателя значительны, в то время как продольные деформации границы раздела газ-жидкость могут быть значительно меньше в сравнении с ними. Величина продольных деформаций, в свою очередь, определяется скоростью газа. Обнаружен качественно различный эффект воздействия скорости газа на интенсивность испарения в зависимости от теплового граничного условия заданного на нижней стенке канала. А именно для случая, когда на подложке задан постоянный тепловой поток, увеличение скорости газа приводит к уменьшению интенсивности испарения. Для случая когда на подложке задано постоянное распределение температуры эффект является прямо противоположным, то есть интенсивность испарения растет с ростом скорости газа.

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.).

Проведено экспериментальное исследование течения пленки воды по нагревателю с граничным условием T=const с использование двух полевых методик. Отработана методика синхронного измерения полей температуры и толщины пленки, которая позволила изучить механизм взаимодействия трехмерной гидродинамической неустойчивости с термокапиллярной.

Установлено, что течение пленки резко меняет характер при значении плотности теплового потока q>2 Вт/см^2. Это значение является пороговым для возникновения термокапиллярных структур.

Показано, что деформация фронта происходит на начальном участке нагрева вследствие сложного взаимодействия волны с термокапиллярными структурами, образующимися в остаточном слое на передней кромке нагревателя. Вследствие этого взаимодействия происходит постоянное перемещение струй в направлении поперек потока, что способствует затягиванию кризиса теплообмена.

Молодежный научно-исследовательский проект ИТ СО РАН «Волновые и термокапиллярные эффекты в пленках жидкости» (руководитель аспирант Шатский Е.Н.)

Проведено экспериментальное исследование течения пленки воды по нагревателю с граничным условием близким к T=const для числа Рейнольдса Re = 15 с использование двух полевых методик. Исследование взаимодействия гидродинамических возмущений на фронте двумерной волны с термокапиллярными неустойчивостями показало, что:

- деформация двумерного фронта происходит на начальном участке нагрева вследствие развития трехмерной гидродинамической неустойчивости,
- термокапиллярные структуры типа А формируются в остаточном слое перед фронтом волны вблизи передней кромке нагревателя, при достижении порогового значения плотности теплового потока обеспечивающего высокие градиенты температуры в области передней кромки нагревательного элемента,
- термокапиллярные структуры типа Б развиваются в нижней части нагревателя.

Экспериментально исследованы основные режимы течения двухфазного потока в каналах высотой 100 мкм и 300 мкм различной ширины. Установлено что при увеличении высоты канала возрастает область раздельного режима, а область вспененного режима существенно уменьшается. Также при увеличении высоты канала существенно изменяет свое положение область струйного режима течения. Область кольцевого режима при изменении высоты канала практически не менялась. С увеличением высоты канала интенсивность формирования капель уменьшается. В канале высотой 300 мкм капли перестают формироваться.

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 14-08-31677 мол_а «Теоретическое и экспериментальное исследование испаряющейся пленки жидкости, движущейся под действием потока газа в микроканале при локальном нагреве» (руководитель к.ф.-м.н. Кабова Ю.О.)

Проект РФФИ 14-08-31515 мол_а «Исследование ручейкового течения жидкости под действием спутного потока газа в миниканале» (руководитель аспирант Чеверда В.В.)

Проект РФФИ 14-08-31559 мол_а «Исследование теплообмена и динамики в сидячих каплях жидкости» (руководитель аспирант Семенов А.А.)

Министерство образования и науки, ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России 2014-2020 годы»:

Соглашение № 14.604.21.0053 «Разработка и создание экспериментальных образцов испарительной системы охлаждения для высокопроизводительных вычислительных процессоров и энергоэффективных светодиодных устройств» (руководитель д.ф.-м.н. Кабов О.А.)

Соглашение № 14.613.21.0011 «Создание технологии охлаждения теплонапряженных элементов с использованием однокомпонентных двухфазных потоков» (руководитель д.ф.-м.н. Кабов О.А.)

Соглашение № 14.616.21.0016 «Создание научно-технического задела и экспериментальных образцов высокоэффективных двухфазных систем охлаждения с естественной циркуляцией для космических и транспортных приложений» (руководитель д.ф.-м.н. Кабов О.А.)

РНФ, «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами»:

Соглашение № 14-19-01755 «Процессы переноса в двухфазных течениях с контактными линиями в микроканалах применительно к высокоинтенсивным системам охлаждения» (руководитель д.ф.-м.н. Кабов О.А.)

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 – 11

Связи с отраслевой и вузовской наукой

Сотрудничество с НГУ, ТПУ, ФГОУ ВПО «Новосибирский государственный аграрный университет».

Публикации

Центральные журналы	– 9
Международные журналы	– 5
Труды отечественных конференций	– 8
Прочие публикации	– 39
Принятые в печать	- 12

Доклады на конференциях и совещаниях

Международных		– 11
в т. ч.	секц.	– 11
Всероссийских		– 32
в т. ч.	плен.	– 6
	секц.	– 17
	стенд.	– 9

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 (CIMEX - ИКМОС)», и «Процессы в области линии контакта газ-жидкость-твердое тело (Multiscale Boiling - Микрорегион)».

Сопредседатель международного семинара “Two-Phase Systems for Ground and Space Applications”, Балтимор, США.

д. ф.-м. н. Чиннов Е.А.

Член национального комитета РАН по тепло-массо обмену.

Член Ученого Совета отдела физической гидродинамики ИТ.

доцент, д.ф.-м.н. Марчук И.В.

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

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

Дипломы Шестой Российской национальной конференции по теплообмену за доклады «Испарение неизотермической пленки жидкости, движущейся в микроканале при спутном потоку газа», Кабова Ю.О., Кабов О.А.; «Исследование динамики и теплообмена испаряющейся капли жидкости на нагреваемой поверхности», Семенов А.А., Зайцев Д.В., Гатапова Е.Я., Кабов О.А.; «Растекание капли по твердой поверхности» Зайцев Д.В., Карнаухова Е.О., Кабов О.А.

Научно-педагогическая деятельность

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

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

Курс «Физика» (доцент Кабова Ю.О.), НГАСУ, кафедра физики.

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

Семинар «Основы вычислительной физики» (аспирант Семенов А.А.), НГУ, ассистент, кафедра высшей математики физического факультета

Научно-исследовательская работа со студентами и аспирантами

Аспирантов	– 3, ИТ СО РАН, 2 АлтГУ
Магистрантов НГУ	– 1, НГУ
Студентов НГУ	– 8, НГУ

Кадровый состав

Всего сотрудников – 16
Из них научных сотрудников – 8
в т. ч. докторов наук – 4
кандидатов наук – 4

Информационно-вычислительные ресурсы

Персональные ЭВМ:
Ноутбук – 9
Настольный ПК – 10

Компьютеры подключены к локальной сети Института с выходом в Internet.