



Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук

Объединенный семинар Ученого совета ИТ СО РАН

с участием членов секций

- № 1 Теплофизика и гидродинамика многофазных и многокомпонентных систем
(включая фазовые переходы, волновые явления и акустику),
№ 4 Космическая энергетика, разреженные газы, плазма, микро- и наносистемы,
№ 5 Теплофизические основы энергетики (включая горение)

Тема: «Охлаждение высоконапряженных по тепловым
потокам электронных компонентов посредством
интенсивно испаряющейся тонкой пленки жидкости
с динамическими микроразрывами»

Под редакцией

академика РАН Д.М. Марковича, академика РАН С.В. Алексеенко

МАТЕРИАЛЫ СЕМИНАРА

25 марта 2024 года,
г. Новосибирск, Россия

Новосибирск, 2024

УДК 536.2

ББК 31.31

Под редакцией
академика РАН Д.М. Марковича
академика РАН С.В. Алексеенко

Материалы объединенного семинара Ученого совета ИТ СО РАН на тему «Охлаждение высоконапряженных по тепловым потокам электронных компонентов посредством интенсивно испаряющейся тонкой пленки жидкости с динамическими микроразрывами», который прошел 25 марта 2024 г. в конференцзале ИТ СО РАН, представлены статьями и выступлениями участников, видео-данными на электронном носителе с презентациями докладов, демонстрацией работы экспериментального образца испарительной системы охлаждения теплонапряженных элементов при помощи однокомпонентных двухфазных потоков и стенда для исследования теплообмена в области линии контакта газ-жидкость-твердое тело по проекту ФЦП 14.613.21.0011 «Создание технологии охлаждения теплонагруженных элементов с использованием однокомпонентных двухфазных потоков», который выполнялся в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН в период с 27 августа 2014 г. по 31 декабря 2016 г. и был частью Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно – технического комплекса России на 2014-2021 годы». В результате выполнения данного проекта был создан научно-технический задел нового направления работы лаборатории Интенсификации процессов теплообмена ИТ СО РАН, разработан и создан экспериментальный образец испарительной системы охлаждения теплонапряженных элементов с использованием однокомпонентных двухфазных потоков, укрепились научные связи с иностранным партнером из Японии – Университетом Киушу.

Полученные научные данные в рамках проекта ФЦП 14.613.21.0011 позволили провести научные исследования по ряду проектов РНФ, РФФИ, защитить несколько квалификационных работ студентов, магистрантов и аспирантов. Продолжаются работы по госбюджетной тематике, исследования в интересах создания 2й очереди проекта СКИФ совместно с ЦКП СКИФ.

Материалы объединенного семинара Ученого совета ИТ СО РАН «Охлаждение высоконапряженных по тепловым потокам электронных компонентов посредством интенсивно испаряющейся тонкой пленки жидкости с динамическими микроразрывами» / под ред. ак. Д.М. Марковича, ак. С.В. Алексеенко. – Новосибирск: ИТ СО РАН, 2024. – 196с.: QR код электронных материалов семинара.

ISBN 978-5-89017-084-2

© Институт теплофизики СО РАН, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

1	Вступительное слово академика РАН Д.М. Марковича, директора Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук	5
2	Участники объединенного семинара Ученого совета Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук	6
3	Вступительное слово научного руководителя Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук академика РАН С.В. Алексеенко	8
4	Кабов О.А. Создание технологии охлаждения теплонагруженных элементов с использованием двухфазных потоков	9
5	Зайцев Д.В. Разработка и создание экспериментального образца испарительной системы охлаждения теплонапряженных элементов с использованием однокомпонентных двухфазных потоков	69
6	Кочкин Д.Ю., Зайцев Д.В., Димов С.В., Пуховой М.В. Воссоздание экспериментального образца испарительной системы охлаждения. Стенд для исследования теплообмена в области линии контакта. Перспективы исследований	79
7	Дискуссия	86
8	Решение объединенного семинара	101
9	Заключительное слово научного руководителя Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук академика РАН С.В. Алексеенко	105
10	Благодарности	107
11	ПРИЛОЖЕНИЕ № 1 История создания и использования экспериментального образца испарительной системы охлаждения теплонапряженных элементов при помощи однокомпонентных двухфазных потоков	108
	Фото экспериментального образца	
	Статьи 2017-2019 гг. с результатами экспериментов, полученных с использованием экспериментального образца	
	Восстановление экспериментального образца в 2023г.	

12 ПРИЛОЖЕНИЕ № 2

QR код на электронные материалы семинара

1. Кабов О.А. «Создание технологии охлаждения теплонагруженных элементов с использованием двухфазных потоков» (видео-запись лекции, презентация, стенограмма)
2. Зайцев Д.В. «Разработка и создание экспериментального образца испарительной системы охлаждения теплонапряженных элементов с использованием однокомпонентных двухфазных потоков» (видео-презентация, стенограмма)
3. Кочкин Д. Ю. «Восстановление экспериментального образца испарительной системы охлаждения. Стенд для исследования теплообмена в области линии контакта. Перспективы исследований» (видео-презентация, стенограмма)
4. Видео-демонстрация работы экспериментального образца испарительной системы охлаждения теплонапряженных элементов при помощи однокомпонентных двухфазных потоков.
5. Видео-демонстрация стенда для исследования теплообмена в области линии контакта газ-жидкость-твердое тело.



**ВСТУПИТЕЛЬНОЕ СЛОВО ДИРЕКТОРА
ИНСТИТУТА ТЕПЛОФИЗИКИ ИМ. С.С. КУТАТЕЛАДЗЕ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
АКАДЕМИКА РАН ДМИТРИЯ МАРКОВИЧА МАРКОВИЧА**

Уважаемые коллеги!

Я хочу поприветствовать всех, присоединившихся к этому научному мероприятию онлайн и тех, кто присутствует в зале Института теплофизики. Для нас это мероприятие является очень важным. Это не просто научный семинар, это наш вклад в экспертную оценку той, сейчас начавшейся, по сути дела кампании дискредитации ученых в целом в стране. Я не буду конкретно останавливаться на отдельных случаях, все их прекрасно знают. Основанием для нашего семинара стал близкий нам случай с Олегом Александровичем Кабовым. Мы ни в коей мере не вмешиваемся в ход следствия, тем более, что оно уже закончено, материалы дела стали достоянием общественности. Но для нас с вами крайне важно с научной точки зрения проанализировать те результаты, те научные направления, которые развиваются в нашем коллективе для того, чтобы это за нас с вами не сделали другие люди, называющие себя экспертами, на деле не обладающие знаниями в данной области науки. Я уверен, что научная истина, безусловно, восторжествует, поэтому прошу всех крайне не формальным образом принять участие в данном обсуждении. Научные дискуссии были и будут всегда, это нормально, но они должны оставаться в поле именно научных дискуссий. Я хочу пожелать всем нам плодотворной работы. Спасибо.

Директор ИТ СО РАН, академик РАН Маркович Д.М.

**УЧАСТНИКИ ОБЪЕДИНЕННОГО СЕМИНАРА
УЧЕНОГО СОВЕТА ИНСТИТУТА ТЕПЛОФИЗИКИ ИМ. С.С. КУТАТЕЛАДЗЕ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

Председатель объединенного семинара
научный руководитель ИТ СО РАН академик С.В. Алексеенко

Ученый секретарь объединенного семинара
заведующий лабораторией ИТ СО РАН, к.ф.-м.н. В.В. Чеверда

Представители РАН (11):

С.В. Алексеенко, академик РАН, д.ф.-м.н., научный руководитель ИТ СО РАН, Д.М. Маркович, академик РАН, д.ф.-м.н., директор ИТ СО РАН, И.В. Марчук, профессор РАН, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник ИТ СО РАН, В.П. Матвеев, академик РАН, д.ф.-м.н., председатель Пермского научного центра УрО РАН, директор ИМСС УрО РАН, И.В. Наумов, профессор РАН, д.т.н., ведущий научный сотрудник ИТ СО РАН, А.Н. Павленко, чл.-к. РАН, д.ф.-м.н., заведующий лабораторией ИТ СО РАН, М.А. Пахомов, профессор РАН, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, В.В. Пухначев, чл.-к. РАН, д.т.н., главный научный сотрудник Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Б.Г. Покусаев, чл.-к. РАН, д.ф.-м.н., профессор, г. Москва, А.К. Ребров, академик РАН, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник ИТ СО РАН, В.В. Терехов, профессор РАН, д.ф.-м.н., заведующий лабораторией ИТ СО РАН.

Доктора наук (21):

В.Б. Бекежанова, д.ф.-м.н., профессор (г. Красноярск), И.И. Гогонин, д.т.н., главный научный сотрудник, О.Н. Гончарова, д.ф.-м.н., профессор (г. Барнаул), А.Л. Куперштох д.ф.-м.н., профессор (Институт гидродинамики им М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск), В.В. Кузнецов, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник (Институт гидродинамики им М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск), Г.В. Кузнецов д.ф.-м.н., профессор (Томский политех, г. Томск), А.А. Левин, д.ф.-м.н. заведующий лабораторией (Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск), С.И. Лежнин, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник, Л.И. Мальцев, д.т.н., главный научный сотрудник, А.И. Мизев, д.ф.-м.н., директор института (Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь), А.А. Морозов, д.ф.-м.н., заведующий лабораторией, Б.И. Нигматулин д.т.н., профессор, генеральный директор (Институт проблем энергетики РАН, г. Москва), С.А. Новопашин, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, Н.И. Печеркин, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, Д.В. Смовж, д.ф.-м.н., заведующий лабораторией, В.И. Терехов, д.т.н., главный научный сотрудник, Ю.Я. Трифонов, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, А.В. Черданцев, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, Е.А. Чиннов, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, О.В. Шарыпов, д.ф.-м.н., зам. директора ИТ СО РАН, С.И. Шторк, д.ф.-м.н., заведующий лабораторией.

Кандидаты наук (23):

Д. Антонов, к.ф.-м.н., доцент (Исследовательская школа физики высокоэнергетических процессов Томский политех, г. Томск), Г.В. Барткус, к.ф.-м.н., младший научный сотрудник, Е.Ф. Быковская, к.ф.н., ведущий инженер, М.А. Воробьев, к.ф.-м.н., младший

научный сотрудник, В.В. Гузанов, к.ф.-м.н., младший научный сотрудник, С.В. Димов, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Д.В. Зайцев, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, А.В. Ковалев, к.ф.-м.н., младший научный сотрудник, Е.П. Копьев, к.т.н., заведующий лабораторией, Д.В. Кочкин, к.ф.-м.н., младший научный сотрудник, Д.В. Красинский, к.т.н., старший научный сотрудник, Ласковец Е, к.ф.-м.н., младший научный сотрудник (г. Барнаул), В.В. Лукашов, к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, Д.А. Медведев, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник (Институт гидродинамики им М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск), В.С. Наумкин, к.ф.-м.н., научный сотрудник, Ф.В. Роньшин, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, А.Ю. Сахнов, к.ф.-м.н., научный сотрудник, Д.Ф. Сиковский, к.ф.-м.н., зам. директора ИТ СО РАН, К.И. Степанов, к.т.н., главный инженер, Л.С. Тимкин, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник С.Я. Хмель, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Чеверда В.В., к.ф.-м.н., заведующий лабораторией, И.В. Ярыгин, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник.

Молодые ученые (9):

Ю.А. Дементьев, А.И. Зорькина, П.А. Кабардин, А.А. Лукоянов, А.С. Мунгалов, Кристина Паушкина (ТПУ), Плешко Андрей (ТПУ), Н.Е. Сибиряков, А. Шатекова.

Всего 70 человек, в том числе представители РАН – 11, доктора наук -21, кандидаты наук – 23, молодые ученые - 9.

**ВСТУПИТЕЛЬНОЕ СЛОВО НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ
ИНСТИТУТА ТЕПЛОФИЗИКИ ИМ. С.С. КУТАТЕЛАДЗЕ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
АКАДЕМИКА РАН СЕРГЕЯ ВЛАДИМИРОВИЧА АЛЕКСЕЕНКО**

Я приветствую всех, и находящихся в зале, и дистанционно. Мы начинаем наш семинар, а точнее, даже научную сессию. Я напомним всем участникам, что в Институте теплофизики правило сейчас такое: все научные вопросы, естественно, решает Ученый совет, но мы перешли на секционную систему. Поэтому подготовку всех научных вопросов профессионально осуществляют именно секции Ученого совета. Обычно в Институте теплофизики рассматриваются комплексные задачи, и поэтому сегодня у нас получается совместный семинар трех секций: № 1 (Теплофизика и гидродинамика многофазных и многокомпонентных систем (включая фазовые переходы, волновые явления и акустику)), № 4 (Космическая энергетика, разреженные газы, плазма, микро- и наносистемы) и № 5 (Теплофизические основы энергетика (включая горение)). Программа семинара всем была разослана. Видео лекция получилась несколько более длительной, 1 час 10 минут, но тем не менее общее время семинара осталось то же самое. Научную часть мы заканчиваем в 17.00 и дальше для желающих ждет экскурсия в лабораторию Интенсификации процессов теплообмена. Итак, тема у нас: «Охлаждение высоконапряженных по тепловым потокам электронных компонентов посредством интенсивно испаряющейся тонкой пленки жидкости с динамическими микроразрывами».

Наш семинар научный, мы уполномочены оценивать научную часть. Конкретно работа была выполнена по проекту ФЦП № 14.613.21.0011 «Создание технологии охлаждения теплонагруженных элементов с использованием однокомпонентных двухфазных потоков» (2014–2016). В Минобрнауки РФ работа была принята очень хорошо, очень хорошие результаты по публикациям и перспективам дальнейшего продолжения. Но была независимая экспертиза, где под сомнение было поставлено выполнение работы в смысле его соответствия техническому заданию, и поэтому наша задача состоит в том, чтобы оценить то, что сделано и какие перспективы. А мы полагаем, что результаты выдающиеся. Соответственно, можно провести дискуссию и сделать какое-то заключение. Поскольку у нас совместное заседание трех секций, попросили меня вести. Со-председателями являются Александр Николаевич Павленко, председатель секции № 1, и Алексей Анатольевич Морозов, исполняющий обязанности председателя секции № 4. Итак мы начинаем нашу работу. Сначала мы заслушаем в записи видео лекцию руководителя проекта ФЦП, который мы обсуждаем, Олега Александровича Кабова. Лекция более часа, но потом мы должны будем уложиться в регламент.

Главное - оценить значимость выполненной работы, сделать соответствующие выводы. Единственное, что, наверное, трудно оценить – это соответствие техзаданию, поскольку здесь надо разбираться по пунктам. А мы можем оценивать только на основании того, что нам доложили. Поэтому, прежде всего - научная и практическая значимость.

Еще можно добавить, что в 2022-м году Олег Александрович Кабов стал членом-корреспондентом Российской академии наук, и, вообще-то говоря, данные исследования составили значительную часть того, за что его избрали.

Академик РАН С.В. Алексеенко

**ЧЛЕН-КОРРЕСПОНДЕНТ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК,
ДОКТОР ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК, ПРОФЕССОР,
КАБОВ ОЛЕГ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**СОЗДАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЕПЛОАГРУЖЕННЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ**

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
Пр. Ак. Лаврентьева, 1, Новосибирск, Россия*

1. ФЕДЕРАЛЬНАЯ ЦЕЛЕВАЯ ПРОГРАММА

Проект ФЦП № 14.613.21.0011 «Создание технологии охлаждения теплонагруженных элементов с использованием однокомпонентных двухфазных потоков» выполнялся в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН в период с 27 августа 2014 г. по 31 декабря 2016 г. Проект был частью Федеральной Целевой Программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно – технического комплекса России на 2014-2021 годы.» Право выполнять данную работу было получено коллективом Института в ходе специального, открытого конкурса на выполнение исследований в рамках научно-технологического сотрудничества с участием научно-исследовательских организаций Японии. Проект относился к категории Прикладных Научных Исследований. Целями выполнения проекта являлись: 1. Создание научно-технического задела; 2. Разработка и создание экспериментального образца испарительной системы охлаждения теплонапряженных элементов с использованием однокомпонентных двухфазных потоков; 3. Развитие сотрудничества с иностранным партнером. В общей сложности в выполнении работ по проекту участвовало 47 специалистов. 7 из них имели степень доктора наук, 15 степень кандидата наук. 26 являлись молодыми учеными, студентами или аспирантами, т.е были моложе 35 лет. 7 специалистов, в том числе 2 доктора наук было привлечено из других академических организаций и университетов.

Проект продолжался 2.5 года и был разбит на 5 этапов. План – график выполнения проекта был составлен таким образом, что в конце каждого этапа создаваемый научно-технический задел должен был позволить сформулировать результат интеллектуальной деятельности (РИД). Таким образом, полученные коллективом научно-технические результаты наиболее лаконично отражены в патентах [1-5]. Кроме вышеперечисленных результатов интеллектуальной деятельности, способных к правовой охране, получены РИД, правовая охрана которым не предоставлена. К их числу относятся 23 статьи в рецензируемых научных журналах, [6-28]. К неохранным РИД также относятся 5 отчетов о прикладной научно-исследовательской работе и приложения к ним, в общей сложности более 2000 страниц, [29-33]. В дополнение, в ходе выполнения проекта, сделано 22 выступления различного уровня, включая приглашённые лекции на международных и национальных конференциях, [34-53, 55,56] и обеспечена поддержка подготовки 5 кандидатов наук. Значительная часть докладов была сделана молодыми учеными. Все тексты докладов и тезисы, опубликованные в трудах конференций, представлены как приложения к отчетам по проекту. Необходимо подчеркнуть, что в каждой опубликованной статье, докладе и тезисах опубликованных в трудах конференций указано, что эта работа подготовлена по проекту № 14.613.21.0011. Все статьи были опубликованы в рецензируемых журналах, которые реферируются в международных базах данных WOS и SCOPUS. Выполнены все требования по достижению значений показателей результативности предоставления субсидии.

2. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ПРОЕКТА

Для успешного выполнения проекта коллективу следовало ответить по крайней мере на следующие вопросы: 1) будет ли предложенная нами технология охлаждения за счет испарения тонкой пленки жидкости движимой чистым паром или смесью пара и воздуха высокоэффективной; 2) если да, то какую выбрать газовую фазу и расходные параметры? 3) какие системы охлаждения будут наиболее эффективными с точки зрения отведения максимальных потоков тепла и максимальных коэффициентов теплоотдачи? 4) за счет чего может быть достигнута высокая эффективность отвода тепла? Проект был направлен на решение важной теплофизической задачи - разработка и создание компактных, малогабаритных испарительных систем охлаждения с применением мини- и микро-каналов, позволяющих отводить высокие плотности теплового потока при относительно низкой разности температур между теплоотдающей поверхностью и стоком тепла. В заявке на участие в конкурсе [54], поданной 24.06.2014 в Министерство образования и науки, которая с приложениями включала более 240 страниц, было указано, что необходимость отведения высоких тепловых потоков при заданных температурных режимах ограничивает развитие работ по созданию новых высокопроизводительных вычислительных процессоров и мощных светодиодных устройств. Разработка новых способов и устройств для отведения тепла является важным аспектом развития ряда критических технологий. Требования к системам охлаждения мощных полупроводниковых процессоров на момент подачи заявки были сформулированы в программе американского оборонного агентства DARPA объявленной в 2012 г., (<http://www.darpa.mil>, Solicitation No.: DARPA-BAA-12-50 «Intrachip/Interchip Enhanced Cooling Fundamentals», 2012). В частности, указывалось, что проектируемые сверхвысокопроизводительные вычислительные системы планируется использовать для управления стратегическими системами и решения оперативных задач в реальном времени, что должно обеспечить подавляющее преимущество над вероятным противником. Предполагается, что охлаждающие микроканалы должны быть расположены в непосредственной близости от тепловыделяющих областей чипов. В современных микропроцессорах тепло выделяется неравномерно. Для сверхмощных объектов электроники специального назначения ставится задача отвода средних плотностей тепловых потоков более 1кВт/см² и до 5кВт/см² с отдельных наиболее теплонапряженных участков размером до 200x200 мкм.

В производстве процессоров на тот момент использовался технологический процесс с разрешением 22 нм. При этом количество транзисторов в чипе достигало уже порядка 2×10^9 . Плотность теплового потока в электронных конверторах и инверторах гибридных автомобилей достигала значений до 100 - 200 Вт/см². Средняя плотность теплового потока на чипах серийно выпускаемых компьютеров и других электронных устройств достигала до 200 - 300 Вт/см². При этом локально в областях площадью 2x2 мм² плотность теплового потока достигала значений 0.5 кВт/см². При этом тепловой поток на солнце составляет порядка 6 кВт/см². Однако на солнце теплоотдача происходит при температуре около 6000 К, в то время как от больших интегральных схем тепло должно отводиться как правило при температуре 65-75 °С, и только в некоторых специальных приложениях при температурах до 210 – 245 °С. Ситуация с отводом тепла еще более усложнялась в связи с переходом электронной промышленности на производство трехмерных чипов, где несколько подложек с электронными компонентами устанавливаются параллельно с расстоянием в 50-100 мкм.

Были известны и интенсивно исследовались четыре процесса, которые потенциально были способны обеспечить отвод столь высоких тепловых потоков и одновременно обеспечить нужную эффективность и все остальные требования. Это: 1) микроструйное охлаждение; 2) микроспрейное охлаждение; 3) кипение жидкости в мини и микро-каналах; 4) испарение быстродвижущейся тонкой пленки жидкости под действие спутного потока

пара или газа. Все процессы используют фазовый переход жидкость-пар, на который затрачивается значительное количество тепла. Каждый имеет свои преимущества и недостатки. Первые два процесса связаны с созданием микросопел и не позволяют использовать микроканалы. Их реализация имеет относительно высокую стоимость. Третий и четвертый процессы имеют некоторые общие черты, однако кипение реализуется как правило при существенно более высоких расходах жидкости. Кипение в системе микроканалов размером 50 - 200 мкм вызывает существенное гидравлическое сопротивление и как следствие перепады давления до 5 - 10 бар. Кроме того, если речь идет о системе микроканалов, имеет место неустойчивость течения, вызванная локальными кризисами теплообмена в отдельных микроканалах.

На момент подачи заявки исследования, выполненные авторами проекта, показали, что для отвода высоких тепловых потоков перспективным представляется использование интенсивно испаряющейся тонкой пленки жидкости, движущейся под действием потока газа или пара в плоском мини-, или микроканале. В общей сложности было опубликовано 16 статей в российских и международных журналах, [57-72], а также представлено несколько докладов на международных конференциях, [73]. Идея такого способа охлаждения была высказана в [57, 73]. В работе [67,79] выполнен обзор исследований авторов проекта по охлаждению локализованных источников тепла за счет испарения движущейся тонкой пленки жидкости под действием спутного потока газа. В работах [62,65,68] выполнены экспериментальные исследования локализованного нагрева пленок жидкости, движущихся под действие потока газа с использованием воды и диэлектрической жидкости FC-72. Для относительно небольшого числа Рейнольдса воды $Re=21$ был достигнут значительный критический тепловой поток 250 Вт/см^2 без учета потерь тепла в окружающую среду, [65]. Дальнейшие исследования показали, что потери тепла в окружающую среду для достаточно высоких тепловых потоков зависят от типа нагревательного элемента и конструкции рабочего участка и составляют порядка 15 - 25%, [74]. Двумерная теоретическая модель для расчета термокапиллярных деформаций и теплообмена в локально нагреваемой пленке жидкости, движущейся под действием потока газа разработана в работах [58,59,60,64]. Теплообмен на границе раздела газ-жидкость задается числом Bi , либо имеет место испарение. В работе [61] на границе раздела жидкость – стенка дополнительно учитывается эффект проскальзывания. Трехмерная, двухслойная, нестационарная математическая модель в приближении тонкого слоя с учетом фазового перехода и деформируемости границы раздела, а также зависимости вязкости и поверхностного натяжения от температуры разработана в работах [63,66,69,71,72]. В работе [70] анализируется устойчивость горизонтального слоя жидкости движущегося под действием потока собственного пара. Учитываются эффекты плавучести, термокапиллярности, испарения и динамического воздействия паровой фазы.

На момент подачи заявки в экспериментах авторов проекта был достигнут рекордный тепловой поток для расслоенного режима течения газа и жидкости 400 Вт/см^2 при сравнительно небольшом расходе жидкости, [54]. Необходимо отметить, что это достаточно высокий тепловой поток. Например, кризис кипения в большом объеме на гладкой поверхности при атмосферном давлении происходит при плотности теплового потока порядка 1 МВт/м^2 , т.е. 100 Вт/см^2 , [75]. Система теплоотвода на предложенном нами принципе позволяет использовать плоские микроканалы, что существенно повышает ее эффективность, и что является принципиальным для целого ряда практических приложений, где нужно обеспечить высокую компактность и минимальный вес оборудования (микроэлектроника, светодиоды). Система не требует дорогостоящих элементов, позволяет минимум в 2 - 3 раза снизить расход жидкости и примерно в 5-10 раз гидравлическое сопротивление при тех же размерах каналов по сравнению с кипящей или однофазной системой. Идея авторов проекта состояла в том, чтобы использовать не

хаотическое движение двухфазного потока или кипящие потоки с относительно высокими расходами жидкости и с периодически кардинально меняющимися режимами течения (однофазный, пузырьковый, снарядный, вспененный и др.), а строго структурированное расслоенное пленочное течение, обеспечивающее минимум гидравлического сопротивления и максимально интенсивное испарение. Необходимо отметить, что именно процесс теплообмена, обеспечивающий практически полное испарение жидкости без достижения кризиса теплообмена, позволяет создавать наиболее энергоэффективные системы теплоотвода. Такие системы охлаждения авторы проекта предложили назвать «интеллектуальными».

Главная задача, которую нужно было решить при создании научно-технического задела для разработки наиболее эффективной системы охлаждения это ответить на вопрос - за счет чего можно существенно, не менее чем в 2-3 раза, интенсифицировать теплообмен в пленках жидкости, движущихся за счет спутного потока газовой фазы, где эффективность теплообмена уже и так достаточно высока. К началу проекта уже был выполнен ряд исследований по теплообмену и критическому тепловому потоку в кольцевом режиме течения, [76,77], **Рис. 1**. Обзор этих работ был выполнен нами в статье [68]. Хотя реализовывался режим течения тонкой пленки под действием потока пара в режиме кольцевого течения, результаты интенсификации теплообмена были очень скромными. Зависимость коэффициента теплоотдачи от паросодержания подчинялась «М-образному» закону, т.е. закону с двумя областями интенсификации теплообмена, [78]. Первая область интенсификации теплообмена была связана с началом кипения в недогретой до температуры насыщения жидкости и ускорением течения с переходом к пузырьковому режиму. Вторую область интенсификации теплообмена связывают с утонением пленки в кольцевом режиме течения. Для различных жидкостей в работах [76,77] интенсификация теплообмена при переходе к кольцевому режиму течения могла составлять порядка 15-30%. Таким образом, хотя процесс теплообмена в пленке жидкости, движимой чистым паром, был не исследован авторами проекта применительно к охлаждению электронного оборудования, некоторые исследования по кипению жидкости в кольцевом режиме течения пара и жидкости показывали, что интенсификация данного процесса может оказаться затруднительной.

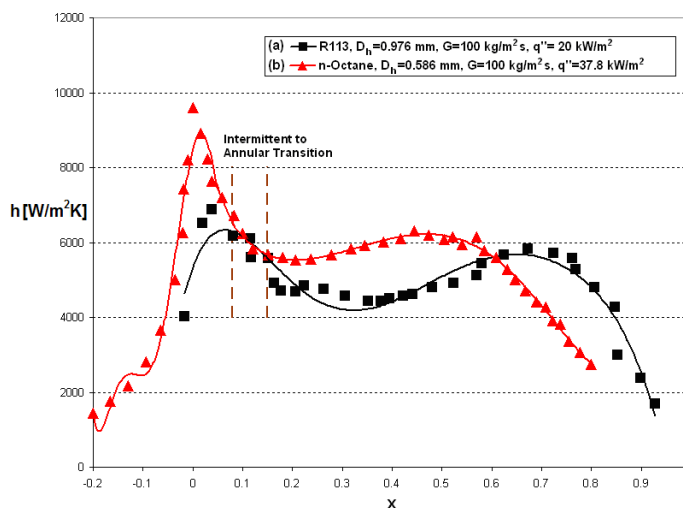


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплоотдачи от паросодержания при кипении в миниканалах, «М-образный» закон: а) [76]; б) [77] (взято из [68]).

Чтобы ответить на вопрос - за счет чего можно существенно интенсифицировать теплообмен в пленках жидкости, движущихся за счет спутного потока газовой фазы, необходимо выполнить оценку требуемых расходных и теплообменных характеристик. Известно, что в тонких пленках жидкости порядка 100 мкм тепло передается практически только механизмом теплопроводности. В результате коэффициент теплоотдачи можно описать следующей зависимостью:

$$\alpha = \lambda/h, \text{ (Вт/м}^2\text{К)} \quad (1)$$

где h – толщина слоя жидкости (м), λ – коэффициент теплопроводности жидкости (Вт/мК). Зависимость показывает, что снижение толщины пленки на порядок, например от 100 мкм до 10 мкм при том же расходе жидкости, ведет к интенсификации испарения в канале на порядок. Тем не менее, чтобы изменить толщину пленки на порядок при том же расходе жидкости, необходимо увеличить среднюю скорость движения пленки жидкости на порядок. Так как распределение скоростей в тонких сдвиговых слоях жидкости практически линейно, т.е. средняя скорость равна половине скорости границы раздела пар – жидкость, то необходимо увеличить скорость паровой фазы также примерно на порядок или более из-за эффекта проскальзывания, вызванного испарением. С точки зрения интенсивности теплообмена, требуемые средние толщины пленок в предлагаемой системе охлаждения составляют порядка 5 – 10 мкм, что в соответствии с выше приведенной формулой, в случае использования воды, обеспечивает средние коэффициенты теплоотдачи порядка 136 – 68 кВт/м²К, т.е. обеспечивает сверхинтенсивный теплообмен. Количество тепла, отведенное при испарении на чипе, описывается зависимостью:

$$Q = S \alpha \Delta T_{ev}, \text{ (Вт)} \quad (2)$$

где S – площадь чипа (м²), ΔT_{ev} – осредненная разность температур между поверхностью нагревательного элемента и температурой насыщения (К). В проекте исполнители поставили задачу создать научный задел позволяющий отвести тепловые потоки до 1000 Вт/см². В соответствии с выше приведенной формулой ΔT_{ev} в такой системе будет составлять 7.4 – 14.7 К, что вполне соответствует задаче проекта.

При этом пленочное течение должно обеспечивать протекание некоторого заданного расхода жидкости, что позволяет при его полном или почти полном испарении избежать кризиса теплообмена:

$$G = Q/r, \text{ (кг/с)} \quad (3)$$

где r – теплота фазового перехода (Дж/кг). В этой качественной оценке для понимания, поставленной перед авторами проекта проблемы, теплоемкостью жидкости пренебрегаем. Расчет показывает, что в случае охлаждения водой по чипу площадью 1 см² должен протекать расход жидкости 0.44 г/с или 0.027 л/мин. При этом будет выделяться поток пара 20 – 50 л/с. Средняя скорость движения пленки жидкости описывается зависимостью:

$$U = G/\rho h B, \text{ (м/с)} \quad (4)$$

Где ρ – плотность жидкости (кг/м³), B – ширина чипа = 1 см. Средняя скорость движения пленки воды в предложенной системе при $h = 5 - 10$ мкм будет составлять 8.8 – 4.4 м/с, а скорость границы раздела пар – жидкость будет вдвое выше 17.6 – 8.8 м/с. Считая, что скорость границы раздела пар – жидкость составляет порядка 2% от средней скорости газовой фазы, [57], получаем, что газ или пар в миниканале должен двигаться со скоростью

порядка 440 – 880 м/с. Однако, такие скорости движения газовой фазы являются технически трудно реализуемы, т.к. они примерно на порядок превышают скорости реально достижимые в созданных экспериментальных стендах авторами проекта [62,65,68] и в несколько раз превышают скорость звука, которая составляет 335 м/с для сухого воздуха при 0 °С. Таким образом задача, поставленная перед исполнителями проекта, отвести тепловые потоки до 1000 Вт/см², не имела простого технического решения. Метод интенсификации теплообмена при испарении только за счет снижения толщины пленки жидкости посредством увеличения скорости газовой фазы на основании зависимости (1), не в состоянии обеспечить нужные расходы жидкости при средней толщине пленок порядка 5 – 10 мкм в предлагаемой системе охлаждения. Таким образом исполнителям проекта было необходимо на этапе создания научно-технического задела найти принципиально новый метод интенсификации теплообмена для пленок жидкости либо дополнительный метод в сочетании с утонением пленки. Поэтому в соответствии с Заявкой на проект, [54], и календарным планом этап создания научно-технического задела должен был продолжаться два года.

Одним из возможных методов интенсификации было использование структурированных поверхностей. К началу проекта исполнители уже имели опыт исследований в данном направлении, [80,81]. Применение продольных ребер в форме равнобедренного треугольника позволяло увеличивать критический тепловой поток на 20-30% по сравнению с гладкой поверхностью при одинаковых расходах в пленке жидкости и газовой фазе. Использовалась диэлектрическая жидкость FC-72 и сухой газообразный Азот. Степень интенсификации теплообмена возрастала с ростом чисел Рейнольдса жидкости и газа. Для высоты ребра 0.5 мм критический тепловой поток был на 15% выше по сравнению с высотой ребра 0.3 мм, [80,81]. Однако авторы проекта в ходе работ отказались от использования структурированных поверхностей в силу того, что они не позволяют для охлаждения использовать микроканалы, т.е. плоские каналы высотой менее 0.2-0.3 мм.

К началу проекта в научной литературе был опубликован ряд исследований по тепло-массо-обмену в области линия контакта пар – жидкость – твердая поверхность. Из теоретических исследований [82] и экспериментов [83,84,85] было известно, что в этой области наблюдаются сверхвысокие тепловые и массовые потоки, что вносит значительный вклад в суммарный тепломассообмен. Процесс сверхинтенсивного испарения в области контактной линии обусловлен малой толщиной слоя жидкости в данном микрорегионе. Основная сложность исследований теплообмена в области линии контакта заключается в том, что данная область имеет относительно небольшую протяженность, порядка 1-10 мкм. В ряде физических моделей, [86,87], предполагается, что вся поверхность твердого тела, вблизи слоя жидкости, может быть покрыта субмикронной адсорбированной пленкой толщиной порядка 10 нм, **Рис. 2**. В этом случае линия контакта представляет собой область перехода от мениска жидкости к адсорбированной пленке. Проблемы моделирования процессов в области контактной линии связаны с тем фактом, что значительное количество физических эффектов, таких как испарение, вязкое трение, капиллярное давление, термокапиллярное течение, силы Лондона-Ван-дер-Ваальса, расклинивающее давление, неравновесные эффекты в слое Кнудсена вблизи границы раздела газ-жидкость связаны друг с другом и играют важную роль в этой локализованной области.

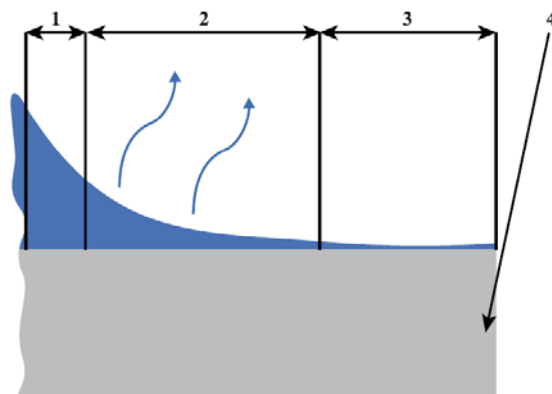


Рис.2 Схема переходной области (2) между макромасштабным мениском (1) и адсорбированной пленкой жидкости (3). (4) – подложка.

Существовало несколько методик определения теплового потока в области контактной линии. Одним из таких методов является метод, основанный на использовании специальной краски, чувствительной к температуре. В работе [88] исследуется распределение теплового потока в области парового пузыря при кипении в большом объеме во время параболических полетов. Преимуществами метода являются бесконтактные измерения, возможность наблюдать за распределением температуры на большой площади и с высоким разрешением, а также малая задержка по времени. То есть этот метод можно использовать для быстро протекающих процессов. Недостатком использования метода является разрушение краски с течением времени и ограничения по температуре. Другим методом является метод нагретой тонкой фольги, где измерение температуры поверхности фольги производится с использованием инфракрасной термографии [89,90,91]. Третий из известных методов основывался на измерении толщины слоя жидкости с использованием зависимости (1).

Процессы теплообмена в области контактной линии остаются до конца не изученными в том числе и из-за ограниченного набора экспериментальных методов исследования. Необходимо отметить, что все три указанных выше метода являются косвенными. Итоговые локальные распределения плотности теплового потока и коэффициента теплоотдачи находятся расчетным путем с использованием некоторых математических моделей и данных о температуре и/или толщине пленки. Поэтому авторы проекта поставили перед собой еще одну стратегическую задачу – развить методы экспериментального исследования данных процессов. Для этого предполагалось создать новый экспериментальный стенд и выполнить ряд измерений. Необходимо отметить, что полного понимания каким образом в пленках жидкости можно применить сверхинтенсивное испарение в области контактной линии у авторов проекта перед его началом не было. Исследования по устойчивости и разрыву пленок жидкости в проекте планировались прежде всего как лимитирующие использование предлагаемой технологии охлаждения, [54]. Полученная в этих исследованиях информация, в частности, была использована в патентах «Устройство для формирования микро-ручейкового течения жидкости в микро- и миниканалах» и «Устройство для испарения жидкости», [3,4].

В ходе работ по созданию научно-технического задела, исполнители проекта смогли ответить на все основные поставленные вопросы. Для выполнения проекта в общей сложности использовано 7 экспериментальных стендов и один стандартизованный комплекс для измерения физических свойств жидкостей и поверхностей. Два из этих стендов были разработаны и созданы в ходе выполнения проекта. Еще пять стендов уже

имелись в лаборатории до начала работ по проекту. Эти стенды были существенно модернизированы. Кратко полученные ответы можно сформулировать следующим образом:

1. Будет ли предложенная нами технология охлаждения за счет испарения тонкой пленки жидкости движимой чистым паром или смесью пара и воздуха высокоэффективной? Да, испытания созданного экспериментального образца испарительной системы охлаждения и дальнейшие исследования с использованием образца, [92,93,94,95,96,97], подтвердили, что отводимые тепловые потоки могут существенно превышать 1 кВт/см^2 .

2. Какую следует выбрать газовую фазу? С точки зрения стоимости, эффективности и эксплуатационных качеств системы охлаждения, предпочтительной газовой фазой является парогазовая смесь. На основании проведенных теоретических исследований авторы проекта выдвинули гипотезу, что «наличие примеси неконденсируемого газа в паре интенсифицирует испарение и способствует формированию маломасштабных короткоживущих разрывов в пленке жидкости». Данная гипотеза еще требует своего окончательного, подтверждения и более детального исследования.

3. Какие системы охлаждения будут наиболее эффективными с точки зрения отведения максимальных потоков тепла и максимальных коэффициентов теплоотдачи? Наиболее перспективными системами с точки зрения отведения максимальных потоков тепла можно считать системы с использованием комбинированных пленочных, газовых и капельных потоков. На конструкцию такой гибридной системы получен патент, [5].

4. За счет чего может быть достигнута высокая эффективность отвода тепла в системах пленка - спутный поток газовой фазы? Авторы проекта выдвинули гипотезу, что существенная интенсификация теплообмена может быть получена за счет сверхинтенсивного испарения в динамических линиях контакта газ – жидкость – твердое тело, которые формируются в маломасштабных, коротко живущих разрывах пленки жидкости. Данный факт самоорганизации течения в тонкой пленке жидкости с массовым образованием короткоживущих, маломасштабных разрывов слоя жидкости был зафиксирован впервые в ходе выполнения данного проекта.

3. ПОИСК МЕТОДОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА НА НОВЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИПАХ

В данном разделе кратко описаны исследования, выполненные коллективом исполнителей проекта в период создания научно-технического задела. Данный период включал работы в течении первых четырех этапов, то есть занимал два года. Главная задача, которую нужно было решить в ходе создания научно-технического задела — это за счет чего можно существенно, т.е. в несколько раз, интенсифицировать теплообмен в пленках жидкости, движущихся за счет спутного потока газовой фазы. Результаты полученные в период создания научно-технического задела были включены в отчеты и заявки на изобретения, либо опубликованы в 23 статьях в журналах и 20 докладах на Российских и международных конференциях.

3.1 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ И ИСПАРЕНИЯ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ, УВЛЕКАЕМОЙ ПОТОКОМ ПАРА ИЛИ ГАЗА

Для теоретического и расчетного исследования динамики и испарения пленки жидкости увлекаемой потоком пара или газа использовалось три основных подхода: 1) трехмерная, двухслойная, нестационарная математическая модель в приближении тонкого слоя с учетом фазового перехода и деформируемости границы раздела, а также зависимости вязкости и поверхностного натяжения от температуры; 2) двумерная, односторонняя модель на основе уравнений Навье-Стокса в приближении тонкого слоя с учетом испарения

и деформаций границы раздела; 3) двумерная, двухслойная математическая модель на основе специального класса точных решений уравнений Навье-Стокса в приближении Обербека - Буссинеска.

Рассмотрим более детально первый подход. С применением этого подхода создана модель процесса охлаждения элемента малого размера посредством тонкой испаряющейся пленки жидкости, увлекаемой потоком пара, [10,43,45]. Схема движения пленки жидкости в миниканале показано на **Рис. 3**. В итоге решение задачи сводилось к численному решению трех нелинейных дифференциальных уравнений четвертого порядка: 1) уравнение для толщины пленки; 2) уравнение для распределения температур в жидкости; 3) уравнение для распределения температур в паре. Создан и протестирован собственный расчетный код на языке Фортран, [29]. Выполнены расчеты интенсивности испарения и деформаций границы раздела пар-жидкость. Рассмотрены случаи наличия одного и двух последовательных источников тепла, [30]. Показано, что локальный нагрев пленки вызывает существенные трехмерные деформации в области нагрева, **Рис. 4**. Причем поперечные деформации по отношению к потоку существенно более выражены, чем продольные. С ростом скорости пара деформации свободной поверхности сглаживаются.

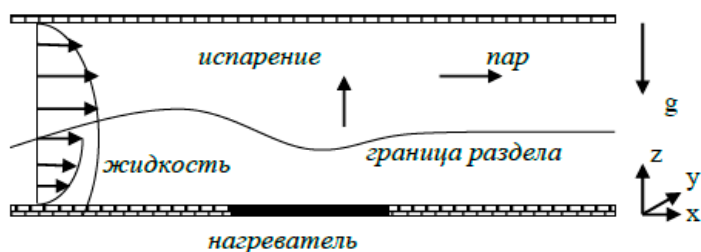


Рис. 3. Схема движения пленки жидкости в миниканале, [29].

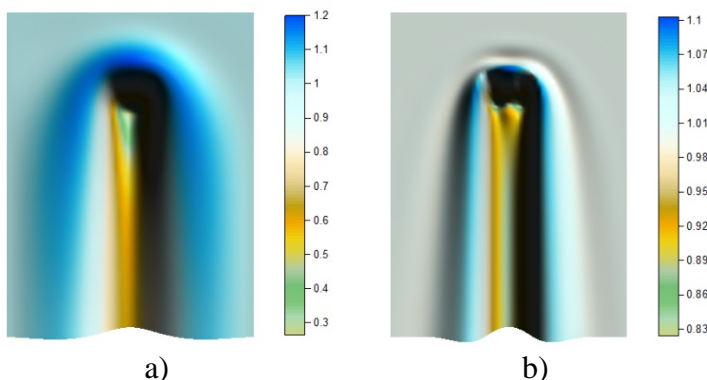


Рис. 4. Термокапиллярные деформации границы раздела газ-жидкость (вид сверху) с цветовыми шкалами деформаций, а) азот, б) водяной пар, размер нагревателя 3 x 6 мм, высота канала $H_c=400$ мкм, $T_0= 30^\circ\text{C}$, $Re_l=5$, $Re_g=8$, $q=0.5$ Вт/см², [10].

Выполнены аналогичные расчеты для течения пленки под действием чистого неконденсируемого газа, [36,38], и сравнение упомянутых выше двух случаев. Показано, что в случае чистого пара испарение становится менее интенсивным (**Рис. 5**), а деформации границы раздела пар-жидкость менее выраженными, **Рис. 6**. Данный факт связан с пренебрежимо малым эффектом термокапиллярных сил в рассматриваемом случае течения жидкости под действием чистого пара. Таким образом было установлено, что основной особенностью движения пленки жидкости под действием чистого газа и под действием парогазовой смеси является наличие существенного термокапиллярного эффекта, что способствует формированию разрывов жидкости в местах утонения пленки жидкости.

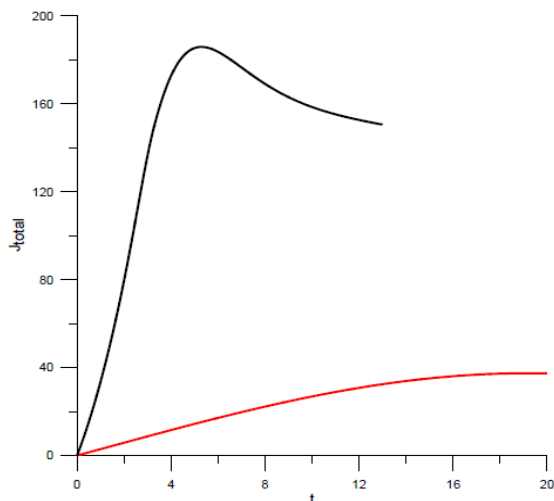


Рис. 5. Безразмерная скорость суммарного испарения с границы раздела газ/пар – жидкость в зависимости от безразмерного времени (реальное время развития процесса 4 с): черная линия - газ азот; красная линия - водяной пар, размер нагревателя 3 x 6 мм, высота канала $H_C=300$ мкм, $T_0=30^\circ\text{C}$, $Re_l=2.5$, $Re_g=4$, $q=0.5$ Вт/см², [30].

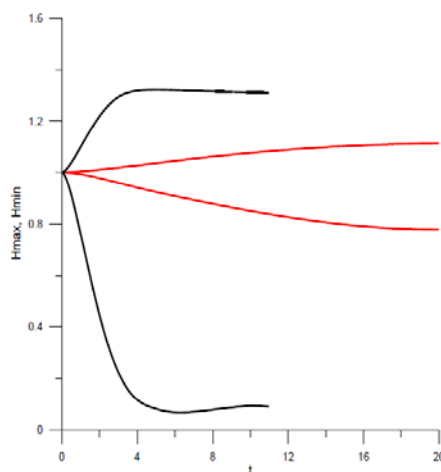


Рис. 6. Безразмерная максимальная и минимальная толщина пленки в зависимости от безразмерного времени (реальное время развития процесса 4 с, обезразмеривание выполнено делением на начальную толщину пленки): черная линия - газ азот; красная линия - водяной пар, размер нагревателя 3 x 6 мм, высота канала $H_C=300$ мкм, $T_0=30^\circ\text{C}$, $Re_l=2.5$, $Re_g=4$, $q=0.5$ Вт/см², [30].

Двумерная, односторонняя модель на основе уравнений Навье-Стокса в приближении тонкого слоя с учетом испарения и деформаций границы раздела используется в работах [13,15,28]. Проведен параметрический анализ задачи. Выполнены расчеты интенсивности испарения и деформаций границы раздела для трех жидкостей FC-72, HFE-7100 и этанола находящихся в среде воздуха. Показано, что для жидкостей с существенно различными теплофизическими свойствами характер деформаций границы раздела идентичен. В [14,16,27,40,42] численный расчет выполняется для сферического слоя. Расчет можно использовать и в случае формирования пузыря в слое жидкости. Учитываются диффузионные процессы газа в жидкости и теплообмен. Математическая модель включает в себя уравнения Навье-Стокса, переноса тепла и диффузии пассивной примеси. Коэффициенты переноса являются функциями температуры.

Двумерная, двухслойная математическая модель на основе специального класса точных решений уравнений Навье-Стокса в приближении Обербека – Буссинеска для случая испаряющейся, но недеформируемой границы раздела исследуется в [17,24,35,41,53]. Учитываются эффекты Соре и Дюфура в верхнем газопаровом слое. Данные решения могут быть названы обобщением известного решения Р.В. Бириха о конвекции в горизонтальном слое со свободной границей. Выполнено моделирование различных случаев взаимодействия термокапиллярных касательных напряжений и касательных напряжений, вызванных потоком газовой фазы. Рассчитаны профили скорости, температуры и концентрации пара для системы жидкость - HFE7100, газ – азот. В частности, показана возможность движения жидкой фазы на встречу потоку газа.

3.2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСПАРЕНИЯ С ЛОКАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО СЛОЯ ЖИДКОСТИ, ОБДУВАЕМОЙ ПОТОКОМ ИНЕРТНОГО ГАЗА

С использованием шпирен метода с отражением выполнены экспериментальные исследования испарения с локальной поверхности горизонтального слоя жидкости, обдуваемой потоком инертного газа. Эти эксперименты выполнены на стенде, который имелся в лаборатории к началу проекта, но был существенно модернизирован в ходе работы по проекту, **Рис. 7**. В стенд была добавлена система PIV для определения поля скорости в жидкости по траекториям движения микрочастиц, а также инфракрасный сканнер Titanium 570M для измерения поля температуры на поверхности слоя жидкости. Получены зависимости расхода испаряющейся жидкости от расхода газа и температуры жидкости для системы этанол-воздух, [7,52]. Показано, что взаимодействие термокапиллярных сил, естественной конвекции и касательных напряжений, вызванных потоком газа, вызывает сложную вихревую структуру течения жидкости, [7,25,50].

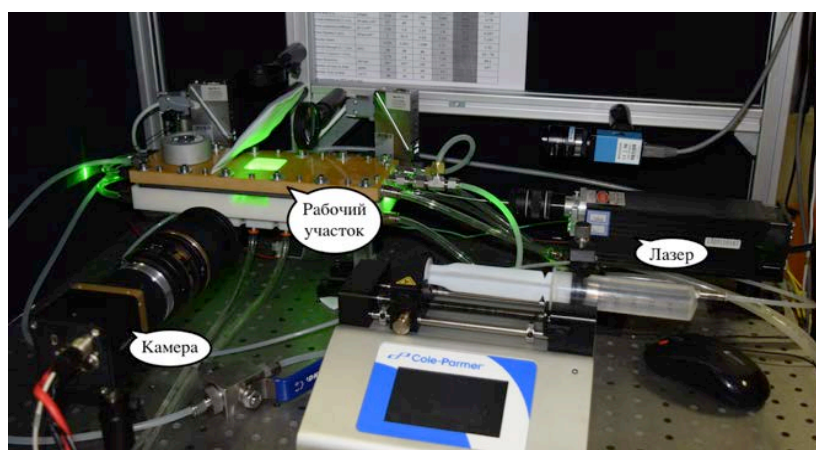


Рис. 7. Экспериментальный стенд для исследования испарения с локальной поверхности горизонтального слоя жидкости, обдуваемой потоком инертного газа, [7,52].

Было установлено, что в испаряющихся слоях жидкости, обдуваемых потоком газа, может возникать система вихрей, [18,19]. Для малых потоков газа может формироваться одно-вихревое течение. Причем движение на поверхности жидкости направлено против потока газа, что хорошо соответствует разрабатываемым в проекте математическим моделям, [17,24,35,41,53]. Увеличение скорости газа вызывает появление второго вихревого течения направленного в сторону потока газа, причем они делят область испарения примерно пополам, **Рис. 8**. С ростом температуры жидкости вихрь, вращающийся против

потока газа начинает доминировать. В работе [23] экспериментально измерены градиенты температуры на поверхности тонкого слоя жидкости обдуваемого потоком газа. Эксперименты выполнены для двух жидкостей с существенно различными физическими свойствами – этиловым спиртом и легкокипящей жидкостью HFE-7100. Проанализировано соотношение термокапиллярного касательного напряжения и касательного напряжения вызванного потоком газа в зависимости от расхода газа. Показано, что данное соотношение быстро возрастает с ростом температуры поверхности жидкости и может достигать 16, **Рис. 9**. Результаты исследований были представлены на нескольких международных и национальных конференциях, [35,50,52].

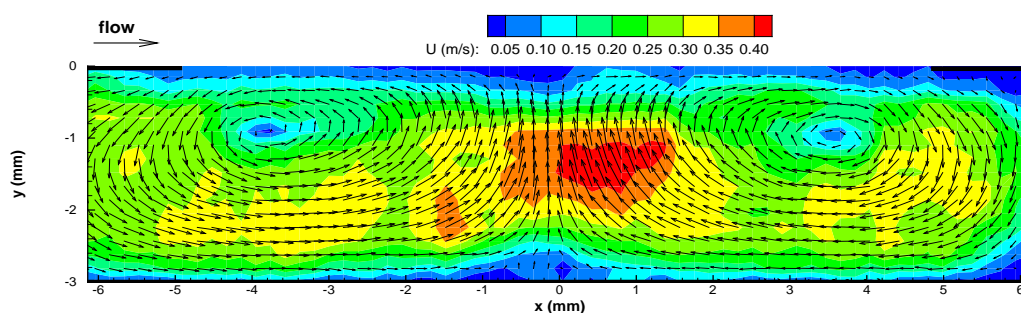


Рис. 8. Двух-вихревое течение в горизонтальном слое этанола, газ - воздух, $U_{\text{gas}}=13.8$ см/с, $H=3$ мм, $T=20^\circ\text{C}$, [18,19].

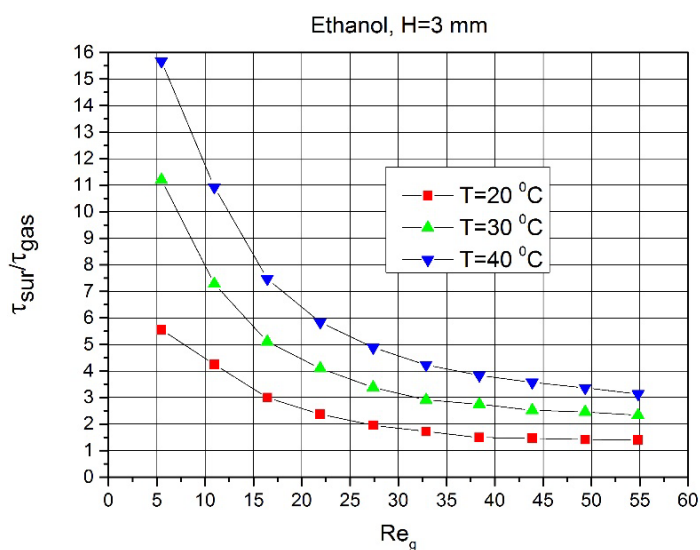


Рис. 9. Соотношение термокапиллярного касательного напряжения и касательного напряжения вызванного потоком газа (воздух) в зависимости от числа Re_g , [23, 52].

3.3 ДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН В ОБЛАСТИ ЛИНИИ КОНТАКТА ГАЗ – ЖИДКОСТЬ – ТВЕРДОЕ ТЕЛО

В ходе выполнения проекта была выдвинута гипотеза, что высокая эффективность отвода тепла в системах пленка - спутный поток газа может быть достигнута за счет сверх интенсивного испарения в статических или динамических линиях контакта газ – жидкость – твердое тело, которые формируются на границах сидящих капель, ручейков жидкости и разрывов пленки жидкости. Для проведения систематических исследований по динамике и теплообмену в области линии контакта газ – жидкость – твердое тело был разработан и создан новый экспериментальный стенд, [29,30] (**Рис. 10**). Была сформулирована и

обоснована новая научная идея стенда, которая не дублирует аналоги, описанные в литературе, но позволяет выполнять нужные исследования и в целом расширять возможности экспериментаторов. Было предложено создать практически неподвижную линию контакта посредством пузырька газа или пара под нагреваемой прозрачной поверхностью, [29,45]. Контролируемое отклонение нагреваемой поверхности от горизонта за счет высокоточного гониометра приводило в движение пузырек и позволяло создать динамическую линию контакта, **Рис. 11.**

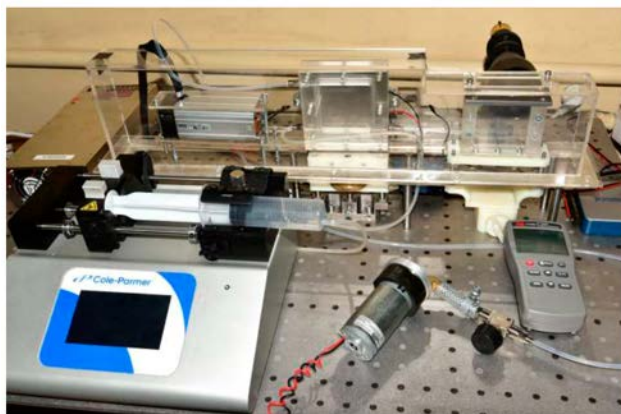


Рис. 10. Фотография экспериментального стенда для исследований по динамике и теплообмену в области линии контакта газ – жидкость – твердое тело, [29,30].

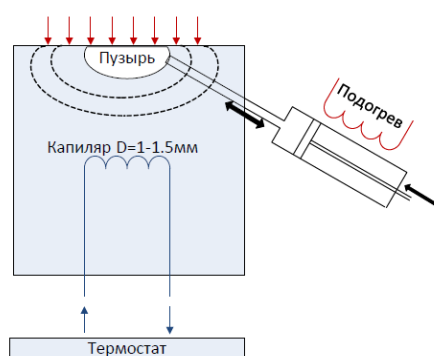


Рис. 11. Концепция стенда: создание линии контакта посредством пузырька газа или пара под нагреваемой прозрачной поверхностью, [29,45].

Была разработана методика исследований и оптических измерений, которая базировалась на использовании: 1) инфракрасного сканнера для измерения поля температур на нагреваемой поверхности; 2) высокоскоростной видео камеры; 3) шпирен метода для определения деформаций границы раздела газ-жидкость; 4) высокоточного теневого метода для определения формы пузырька. Все методы имелись в лаборатории к началу Проекта. Но в ходе выполнения проекта потребовалась их модернизация, приобретение новых компонентов, а также адаптация для нужд проекта.



Рис. 12. Оптическая схема теневого метода для определения формы пузырька, [29,30].

Иностранным партнером был изготовлен нагревательный элемент на основе сапфира с прозрачным нагревателем из оксида индия и олова (ITO), который предназначался для совместных исследований в области линии контакта, **Рис. 13**. Нагреватель включал 10 микро-термометров сопротивления из платины. Партнер не смог его предоставить для совместных исследований в Новосибирске в силу эмбарго, правительства Японии наложенного в 2014 году уже после начала проекта. Министерство образования и науки признало этот факт обстоятельством непреодолимой силы. Некоторые детали конструкции нагревательного элемента, опубликованные в совместной статье, показаны на **Рис. 14**.

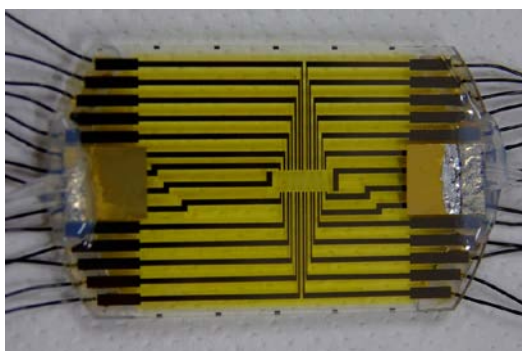


Рис. 13. Фотография нагревательного элемента на основе сапфира с прозрачным нагревателем ITO изготовленного иностранным партнером.

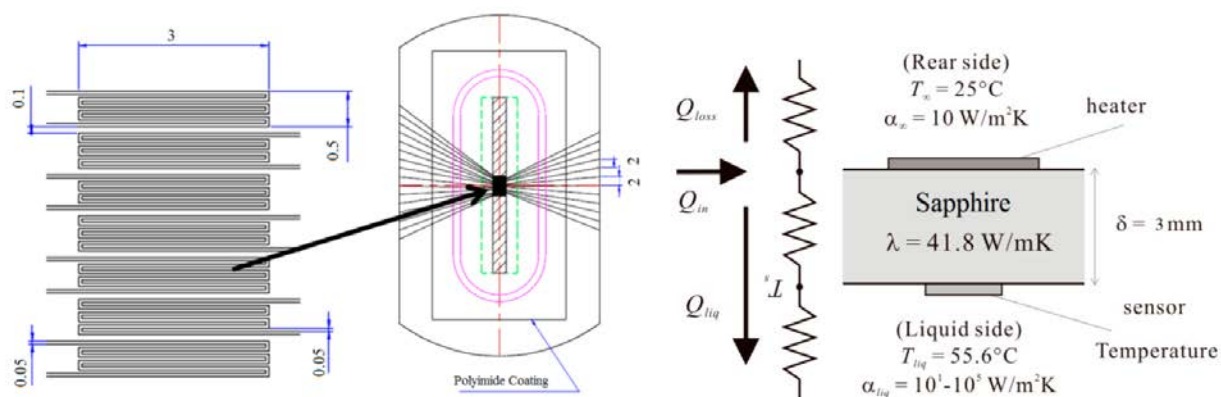


Рис. 14. Некоторые детали конструкции нагревательного элемента, изготовленного иностранным партнером, [12,30].

С использованием рекомендаций иностранного партнера был изготовлен ряд нагревательных элементов из сапфира для созданного стенда с нагревателями размером от 5 до 58 мм, [31]. Некоторые рабочие участки были снабжены 10 микро-термометрами сопротивления из платины. Конструкция разработанного стенда, а также двух нагревательных элементов, и некоторые результаты экспериментов опубликованы в совместной с иностранным партнером статье [12], а также представлены в совместном докладе на международной конференции [47]. Одна из конструкций состояла из сапфировой пластинки толщиной 3 мм. На нее был нанесен прозрачный для видимого света нагреватель из оксида индия и олова (ИТО), **Рис. 15**. Нагреватель был покрыт защитным слоем двуоксида кремния толщиной 450 нанометров, чтобы предотвратить электролиз. Это позволяло нагревателю находится в непосредственном контакте с жидкостью. Благодаря прозрачности сапфировой пластинки для инфракрасного излучения, температура нагревательного элемента, который не прозрачен для инфракрасного излучения, измеряется с использованием тепловизора с достаточно высокой точностью, порядка 0.1 К.

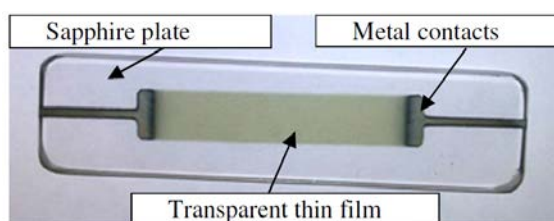


Рис. 15. Фотография сапфировой подложки с тонкопленочным нагревателем, изготовленным по технологии ИТО в Новосибирске, [12,31].

Была выполнена характеристика изготовленных нагревательных элементов, **Рис. 16**. Детально исследована их динамическая смачиваемость и определены отступающий и наступающий контактные углы смачивания, **Рис. 17**. Выполнено исследование формирования сухих пятен в зависимости от интенсивности нагрева, **Рис. 18**. Отработана методика измерения локальной температуры и плотности теплового потока, а также получения пузырьков размером до 15-20 мм, **Рис. 19**. Впервые измерены скорости движения испаряющейся линии контакта газ - жидкость – твердое тело для воды и различных материалов, [31,12,47]. Разработанная в ходе выполнения проекта технология создания прозрачных в видимом и инфракрасном диапазонах рабочих участков из сапфира с микро-нагревателями ИТО активно используется в лаборатории интенсификации процессов теплообмена ИТ СО РАН для различных исследований до настоящего времени [98,99]. После окончания Проекта, т.е. после 2016 г., созданный стенд использовался сотрудниками лаборатории для выполнения проектов РФФИ и РНФ, что привело к публикации высокорейтинговых журнальных статей [100,101].

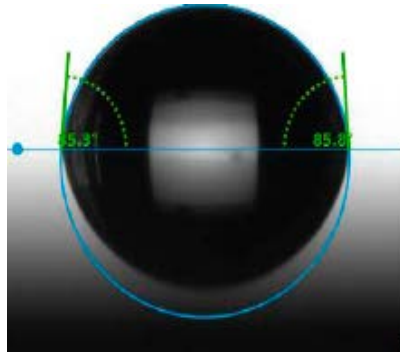


Рис. 16. Изучение динамической смачиваемости нагревательного элемента (поверхность сапфира), [31].

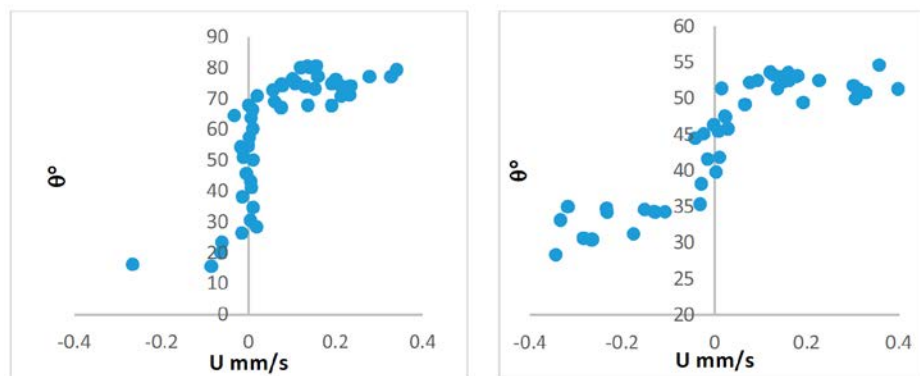


Рис. 17. Гистерезис контактного угла смачивания воды на сапфире (слева) и прозрачном нагревателе ИТО (справа), [12].

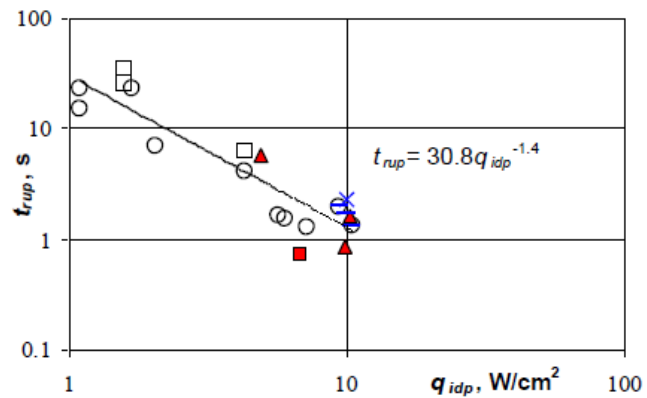


Рис. 18. Время образования сухого пятна в зависимости от плотности теплового потока, [31].

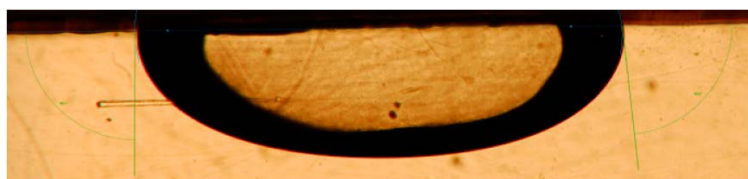


Рис. 19. Фотография пузырька в воде на прозрачном нагревателе ИТО, полученная теньевым методом, [31].

Микронагреватели создают на рабочей поверхности неоднородности смачивания и рельефа, которые могут существенно влиять на поведение контактной линии и на испарение. Перед проведением экспериментов был выполнен необходимый анализ возможного влияния неоднородностей на движение контактной линии и на теплообмен. Было проанализировано более 30 научных работ, [31]. В частности, рассмотрен вопрос о движении линии контакта по гетерогенным поверхностям и вопрос расчета углов смачивания. Данные были опубликованы в высокорейтинговом журнале [102], совместно с результатами, полученными на более поздних этапах исследований в лаборатории интенсификации процессов теплообмена по данной теме.

Экспериментальное исследование закономерностей развития разрывов в пленках жидкости (сухих пятен) было выполнено на экспериментальном стенде, имеющемся в лаборатории, со сменными нагревательными элементами, открытыми в атмосферу. Было исследовано влияние смачиваемости подложки на разрыв локально нагреваемой пленки жидкости воды, [37,46,48]. Подложка представляла собой пластину из нержавеющей стали с впрессованным заподлицо медным сердечником размером 10x10 мм², который служил нагревательным элементом. Применялась различная обработка подложки, что позволяло варьировать наступающий контактный угол смачивания от 27 до 74 градусов без изменения теплофизических свойств подложки. Исследования проведены для трех конфигураций течения: 1) неподвижная пленка жидкости на горизонтальной подложке; 2) пленка, движущаяся по горизонтальной подложке под действием силы инерции; 3) пленка, стекающая по подложке под углом 5 градусов к горизонту. Динамика разрыва пленки фиксировалась при помощи высокоскоростного шпирен метода с частотой 5400 кадров/сек. Установлено, что во всех трех случаях смачиваемость подложки существенно влияет на скорость распространения линии контакта, а также на конечный размер сухого пятна, однако практически не влияет на пороговый тепловой поток, при котором происходит разрыв пленки, **Рис. 20**. Скорость распространения линии контакта отличалась в 90 раз для поверхностей с различной смачиваемостью, **Рис. 21**.

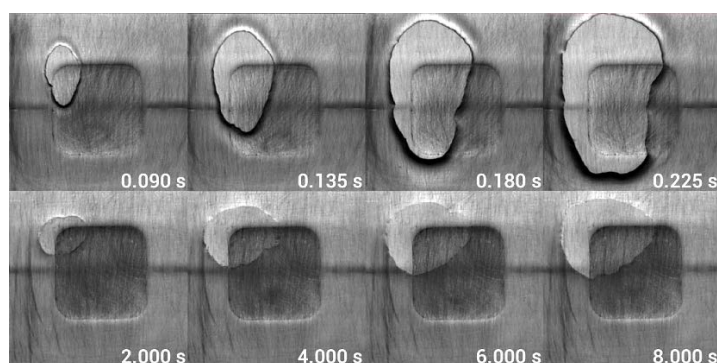


Рис. 20. Влияние смачиваемости подложки на скорость распространения сухого пятна в пленке воды толщиной $h=0,4$ мм, $q=27$ Вт/см² (съемка 5000 кадров/сек): верхняя линия фото - $\theta_a=74\pm 5^\circ$; нижняя линия фото - $\theta_a=27\pm 3^\circ$, [37,46].

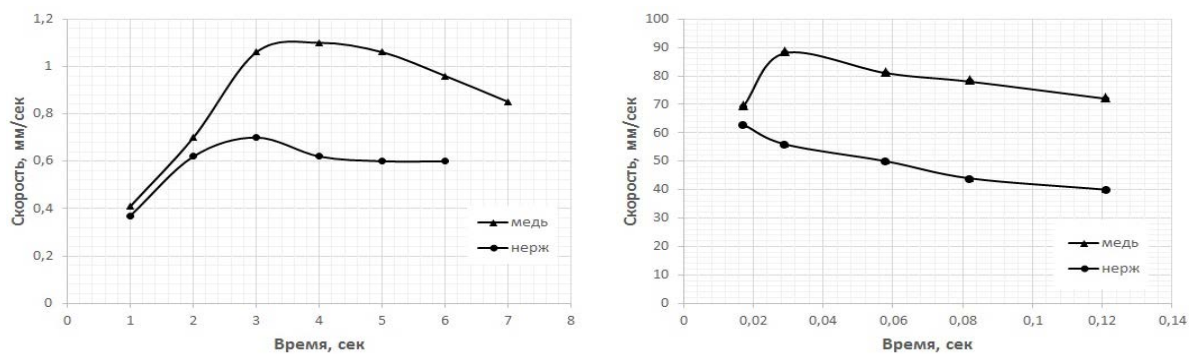


Рис. 21. Скорость распространения линии контакта для пленки воды на поверхностях с различной смачиваемостью: $h=0,4$ мм, $q=27$ Вт/см², слева - $\theta_a=27\pm 3^\circ$, справа - $\theta_a=74\pm 5^\circ$, [37,46].

В экспериментах, [37], было зафиксировано образование монослоя из микрокапель конденсата, размером порядка 5 – 50 микрон, левитирующего над испаряющимся слоем жидкости, **Рис. 22**. Впервые было обнаружено, что микрокапли могут левитировать не только над смоченной, но и над «сухой» поверхностью нагревателя. Микрокапли распространялись на «сухую» поверхность на расстояние до 1 мм и могли существовать до 5 секунд. Установлено, что в окрестности линии контакта существует зона, шириной порядка 100 микрон, из которой микрокапли вытесняются, что, по-видимому, свидетельствует об интенсивном испарении в данной области. В работе [9] были получены новые данные по самопроизвольному образованию микрокапель жидкости над интенсивно испаряющейся поверхностью жидкости, а также предложен способ стабилизации монослоя на длительное время за счет его облучения инфракрасным лазером.

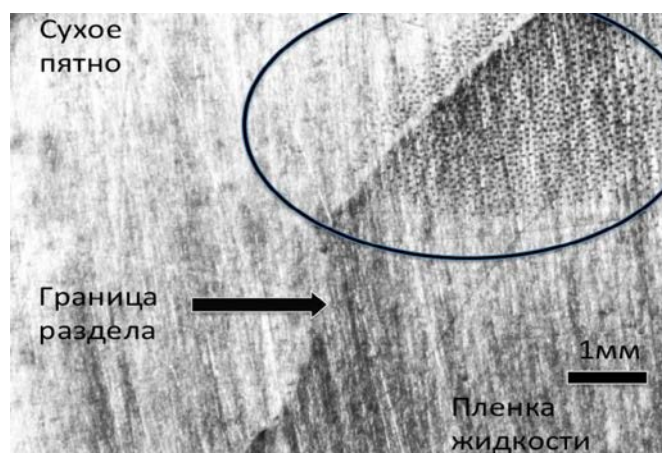


Рис. 22. Локально нагреваемый горизонтальный слой воды: нагреватель 1×1 см², толщина слоя 0.4 мм, тепловой поток 27.5 Вт/см², область монослоя из микрокапель конденсата обведена овалом, в области линии контакта газ – жидкость – твердое тело микрокапли не могут существовать (белая полоска внутри овала), по-видимому, микрокапли ее перепрыгивают, [37].

В работе [51] изучена зависимость порогового теплового потока, при котором происходит разрыв пленки в зависимости от ее начальной толщины, которая варьировалась от 300 до 930 микрон. Исследования были продолжены в работах [43,48], где было показано, что разрушение пленки для всех рассмотренных случаев и различных размеров нагревательных элементов (от 1.6 до 10 мм) происходит по одному сценарию. Вначале происходит утонение слоя жидкости над областью локального нагрева за счет действия термокапиллярных сил и испарения до некоторой критической толщины. Эксперименты с точечным нагревом (размер нагревателя 1.6 мм) были выполнены на уже имеющемся в лаборатории стенде, **Рис. 23**. Было показано, что перед разрывом слоя макропленки возникает плоский остаточный слой сверхтонкой пленки (толщиной порядка 5 - 10 микрон), который в некоторых случаях (этиловый спирт) может существовать несколько секунд, **Рис. 24**. Дальнейший нагрев приводит к неустойчивости остаточной пленки и возникновению одного или нескольких сухих пятен в зависимости от шероховатости поверхности. Далее происходит расширение сухого пятна до некоторого равновесного размера за счет капиллярных сил и испарения.

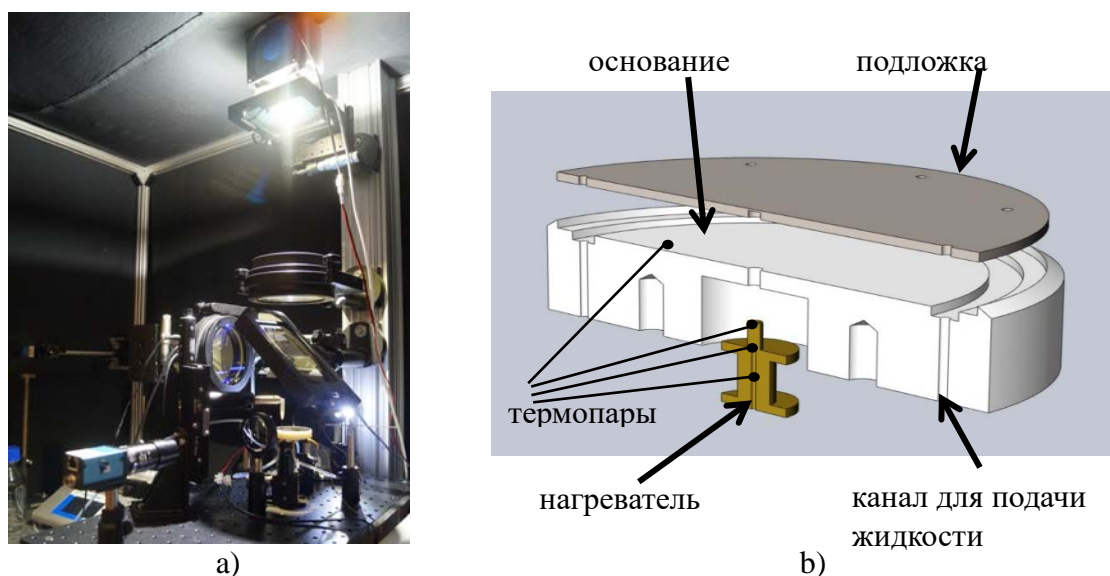


Рис. 23. Стенд для исследования разрыва горизонтального слоя жидкости с точечным нагревом: а) фотография штирен системы и рабочего участка; б) конструкция поверхности нагрева, диаметр подложки – 50 мм, толщина подложки – 1 мм, материал подложки – нержавеющая сталь, диаметр нагревателя – 1,6 мм, материал нагревателя – латунь, [51,43,48].

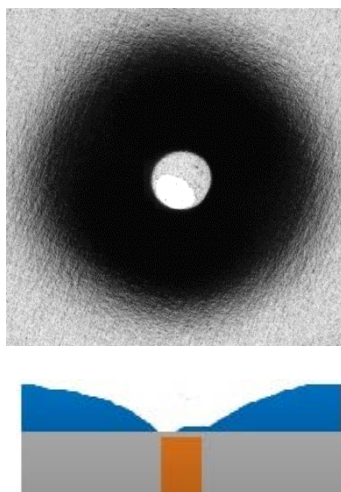


Рис. 24. Формирование плоского остаточного слоя сверхтонкой пленки жидкости перед разрывом слоя макропленки (шлирен изображение и схема): этанол, $h = 700$ мкм, $q = 95$ Вт/см², $\Theta_a = 8 \pm 1^\circ$, полированная поверхность, [43,48].

Экспериментальное исследование по динамике и теплообмену в области линии контакта газ – жидкость – твердое было дополнено теоретическими и расчетными работами. В [20,49] была разработана теоретическая модель и выполнены расчеты испарения и формы границы раздела газ – жидкость вблизи линии контакта для случая одиночного парового пузырька, прикрепленного к поверхности. Модель учитывает электростатический эффект из-за присутствия ионов в жидкости, что справедливо, например для воды. Выполнены расчеты по влиянию коэффициента аккомодации и диаметра растущего пузырька на форму линии контакта газ- жидкость – твердое тело и на максимальную кривизну границы раздела газ – жидкость.

В работах [21,22] рассмотрены закономерности развития сухих пятен в пленках жидкости и разработан критерий роста и схлопывания таких разрывов. Выполнен теоретический анализ влияния равновесного краевого угла смачивания, поверхностного натяжения и сил гравитации на критические размеры сухих пятен в изотермической пленке жидкости заданной толщины на горизонтальной плоской подложке. Схематическое изображение сухого пятна в пленке жидкости на горизонтальной плоскости и поперечное сечение валика в плоскости, проходящей через его ось симметрии показано на **Рис. 25**. Предполагается, что сухое пятно имеет форму круга, пленка толщиной h неподвижна, а образующийся валик жидкости высотой H , на краю сухого пятна, имеет постоянный радиус кривизны. Рассмотрен также случай, когда сухое пятно возникает вследствие раскрытия пузырька в пленке жидкости, то есть $H = h$. За счет действия сил гравитации в пленке возникает статическое давление. На каждый элемент валика действуют сила тяжести и сила, обусловленная наличием поверхностного натяжения на криволинейной поверхности валика. Учитываются обе главные кривизны поверхности валика. Под влиянием этих сил, действующих на элементы валика в плоскости подложки, валик начинает симметрично расширяться, вбирая в себя жидкость пленки, или сокращаться. Равенство сил является условием равновесного положения валика, а поведение пятна определяется знаком при величине суммарной силы, действующей на элемент валика в направлении радиуса сухого пятна: пятно закрывается, если эта сила направлена к центру валика, и вырастает в размерах, если сила направлена от центра.

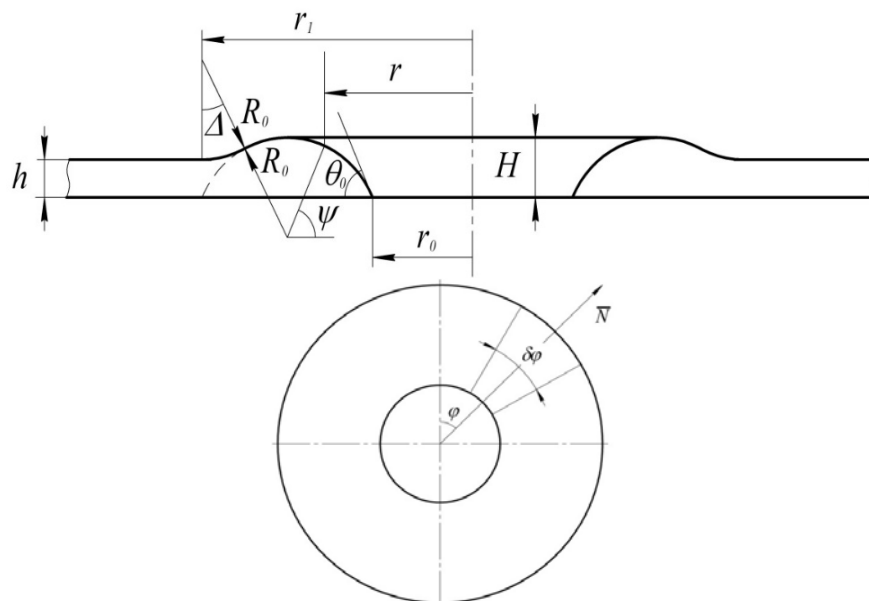


Рис. 25. Схематическое изображение сухого пятна в пленке жидкости, [21].

На **Рис. 26** показаны критические значения отношения безразмерного радиуса сухого пятна r_0/h в зависимости от числа Бонда и краевого угла смачивания. Здесь число Бонда характеризует соотношение гидростатического и капиллярного давлений в пленке. При каждом значении числа Бонда в области, находящейся выше и правее соответствующей линии на **Рис. 26**, сухое пятно имеет тенденцию к расширению, а в области ниже и левее линии к его сужению, вплоть до исчезновения. При углах смачивания, превышающих 70-80 градусов, влияние числа Бонда не велико, а сами критические значения отношения радиуса сухого пятна к толщине пленки малы ($r_0/h=1 - 2$). Однако при средних и малых значениях угла смачивания роль числа Бонда исключительно велика. В этом случае даже относительно большие сухие пятна имеют тенденцию к замыванию. Для поверхности с хорошей смачиваемостью ($\Theta_0=10^\circ$) при $Bo = 10^{-2}$, что соответствует толщине пленки воды $h = 270$ мкм, смачиваться будут пятна при $r_0/h \leq 10$, т.е. радиусом менее 2.7 мм. При $Bo = 10^{-3}$, что соответствует толщине пленки воды $h = 85$ мкм, смачиваться будут пятна при $r_0/h \leq 4$, т.е. радиусом менее 340 мкм. Для поверхности с равновесным краевым углом смачивания $\Theta_0=20^\circ$ при толщине слоя воды 270 мкм и 85 мкм, порядок радиуса сухих пятен, которые будут смачиваться можно оценить как - менее 810 мкм и 170 мкм, соответственно. Данный результат хорошо соответствует измерениям, выполненным в работе [103], которые будут описаны ниже. Видеосъемка с частотой 100 000 кадров в секунду показала, что для течения пленки воды с начальной толщиной порядка 100 мкм ($Re_l=40$) под действием потока воздуха с приведенной скоростью $U_{sg}=19,5$ м/с при плотности теплового потока $q=450$ Вт/см², сухие пятна достигали диаметра 100 – 420 мкм, а затем замывались. Таким образом в работах [21,22] был вскрыт один из механизмов приводящий к схлопыванию сухих пятен в тонких слоях жидкости.

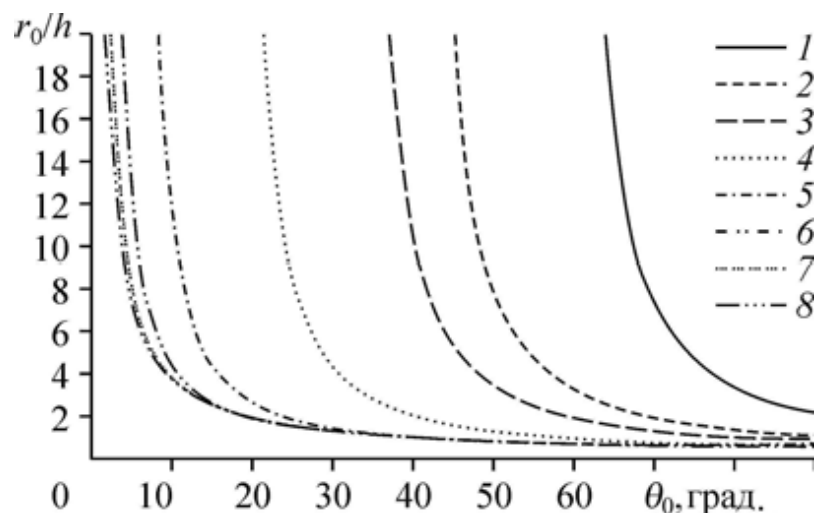


Рис. 26. Результаты расчетов критических значений радиуса сухого пятна в пленке жидкости в зависимости от равновесного краевого угла смачивания и числа Бонда. $Bo = 1$ (1), 2 (2), 3 (3), 10 (4), 10^{-2} (5), 10^{-3} (6), 10^{-4} (7), 10^{-6} (8), [22].

В ходе работ по созданию научно-технического задела данное направление по изучению динамики и теплообмен в области линии контакта газ – жидкость – твердое тело было наиболее трудоемким. Был накоплен значительный экспериментальный материал с использованием созданного стенда и двух модернизированных стендов, имеющих в лаборатории. Кроме того, был выполнен обширный обзор имеющейся литературы в открытой печати и построены математические модели по динамике сухих пятен и теплообмену в области линии контакта. Полученная информация, в частности, была использована для обоснования изобретений «Устройство для формирования микро-ручейкового течения жидкости в микро- и микросканалах», [3], и «Устройство для испарения жидкости», [4]. Кроме того, полученная информация послужила основой для предположения, о том, что в тонких нагреваемых пленках жидкости возможен новый высокоинтенсивный механизм теплообмена. Механизм связан со сверхинтенсивным испарением жидкости из областей динамической линии контакта газ-жидкость-подложка. Такие области возникают на краю разрывов пленки жидкости (сухих пятен). Однако оставалось неясным каким образом можно технически реализовать данный процесс.

3.4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ, ТЕПЛООБМЕНА И КРИЗИСНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ПЛЕНКЕ ЖИДКОСТИ, ДВИЖУЩЕЙСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОТОКА ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

Для проведения исследований по теплообмену в пленке жидкости, движущейся под действием потока газовой фазы при интенсивном локализованном нагреве, был модернизирован экспериментальный стенд, уже имеющийся в лаборатории к началу выполнения Проекта (Рис. 27), [30,43]. Исследовалось течение тонкой пленки жидкости, создаваемой сопловым устройством в горизонтальном прямоугольном микросканале шириной 30 – 40 мм. Длина канала составляла 80 мм. Пленка двигалась за счет спутного потока газа и нагревалась от источника тепла размером $10 \times 10 \text{ мм}^2$, моделирующим электронный компонент. В качестве газовой фазы использовался воздух с концентрацией водяного пара от 15 до 30%. Рабочий участок был адаптирован для варьирования высоты канала от 0.1 до 2 мм. В данном исследовании измерения выполнены для высоты канала 1.2 и 2 мм. Нижняя стенка канала представляла собой пластину из нержавеющей стали с впрессованным нагревательным элементом из меди. Верхняя стенка канала была выполнена

из стекла, что позволяло использовать следующие оптические методы: 1) инфракрасный сканнер для измерения поля температур на поверхности пленки; 2) высокоскоростную видео камеру; 3) камеру высокого разрешения. Были выполнены методические работы по совершенствованию измерения плотности теплового потока, определению потерь тепла и определению высоты микроканала.

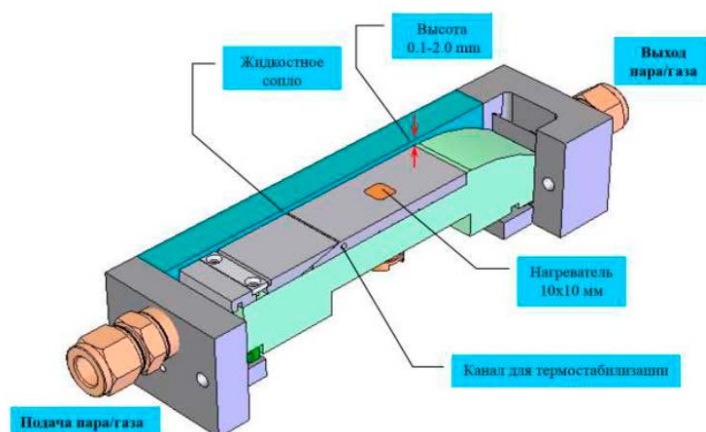


Рис. 27. Стенд для экспериментального исследования гидродинамики, теплообмена и кризисных явлений в пленке жидкости, движущейся под действием потока газовой фазы, [30,43].

На основе данных инфракрасной термографии и съемки с высоким разрешением с ростом плотности теплового потока зафиксирована возможность самопроизвольного перехода от пленочного течения к ручейковому. Впервые получены данные по коэффициенту теплоотдачи в системе охлаждения данного типа, **Рис. 28**. Измерения коэффициентов теплоотдачи при относительно малых числах Рейнольдса жидкости, $Re_l=21$, показали, что они могут составлять до $65000 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, что составляет уже очень значительную величину, [30]. Причем коэффициенты теплоотдачи возрастали с ростом числа Рейнольдса жидкости при постоянном числе Рейнольдса газа. Получены данные по критическому тепловому потоку в широком диапазоне параметров, **Рис. 29**. При числах Рейнольдса жидкости $Re_l = 21$ критический тепловой поток составлял 245 Вт/см^2 , [30,45]. Выполнено сравнение с данными по гравитационному стеканию пленок жидкости. В некоторых режимах критический тепловой поток возрастает до 10 раз по сравнению с чисто гравитационным течением пленки, что подтвердило перспективность разрабатываемой системы для охлаждения оборудования с высоким тепловыделением.

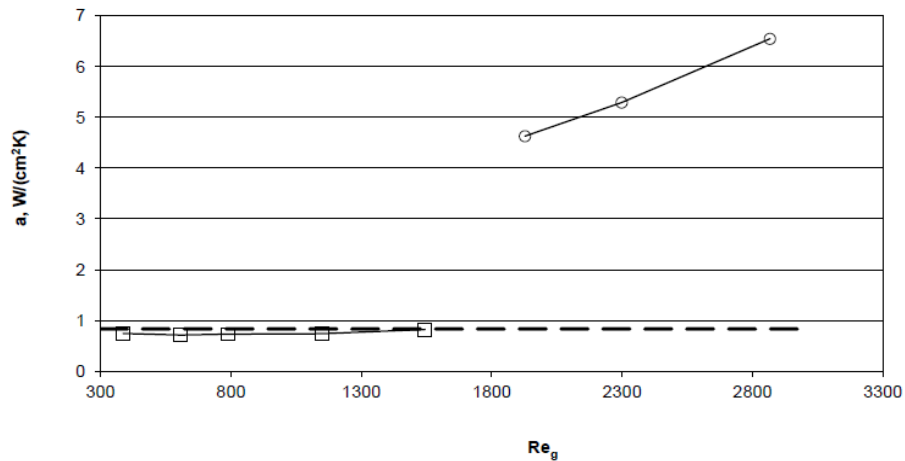


Рис. 28. Зависимость коэффициента теплоотдачи от числа Re газа. За характерную температуру жидкости при температуре стенки более $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ принимается температура насыщения (круглые значки), а при температуре стенки менее $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ принимается начальная температура пленки (квадратные значки). Пунктир - коэффициент теплоотдачи для стекающей пленки, [30].

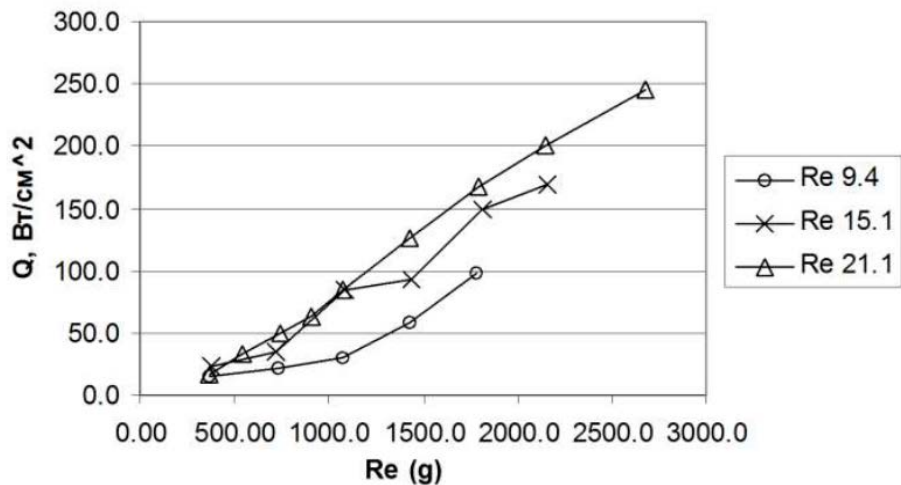


Рис. 29. Зависимость критического теплового потока от числа Рейнольдса газа для различных чисел Рейнольдса жидкости, [30,43].

В наших экспериментах в ходе выполнения проекта впервые была использована высокоскоростная камера FASTCAM 1.1 со скоростью съемки до 650000 кадров в сек. Совместно с другими методами визуализации (тепловизор и камера высокого разрешения) были получены новые данные по гидродинамике пленки жидкости при высоких тепловых потоках. Было установлено, что с ростом плотности теплового потока от 134 Вт/см^2 до 230 Вт/см^2 смачиваемость нагревателя не снижается, как можно было бы ожидать в силу влияния отдачи пара на краевой угол смачивания при интенсивном испарении, а возрастает, [31] (Рис.30). Нагреватель покрывается более мелкой структурой из сотен и тысяч динамических сухих пятен. Анализ полученной информации, а также информации предыдущего раздела, показал, что в тонких пленках жидкости, увлекаемых потоком газовой фазы возможен новый высокоинтенсивный механизм теплообмена. Механизм связан со сверхинтенсивным испарением жидкости из областей динамической линии контакта газ-жидкость-подложка. Такие области возникают на краю разрывов пленки жидкости (сухих пятен). Было установлено, что в пленках формируются сухие пятна двух

типов: 1) крупные квазистатические сухие пятна размером более 1-5 мм при относительно малых тепловых потоках. Таких сухих пятен следует избегать в системах охлаждения, т.к. они являются устойчивыми; 2) сверхмалые динамические сухие пятна размером порядка 100-500 микрон при высоких тепловых потоках. Важно, что такие малоразмерные сухие пятна, в отличие от пятен первого типа, являются неустойчивыми, в том смысле, что они постоянно формируются и исчезают с достаточно высокой частотой (порядка нескольких сотен Гц). Такой же эффект можно наблюдать при съемке температуры поверхности пленки жидкости при помощи IR сканнера, **Рис. 31**. При других параметрах эксперимента ($Re_l = 30$, $Re_g = 2200$) с ростом плотности теплового потока от 125 Вт/см^2 до 200 Вт/см^2 смачиваемость нагревателя не снижается, а возрастает. Предполагается, что существенную роль в формировании сверхмалых динамических сухих пятен играет термокапиллярный эффект. Поэтому газовая фаза должна содержать определенное количество неконденсируемого газа, т.е. быть парогазовой смесью. По итогам данных исследований был сделан приглашенный доклад на Школе молодых ученых под руководством академика РАН А.И. Леонтьева, [43].

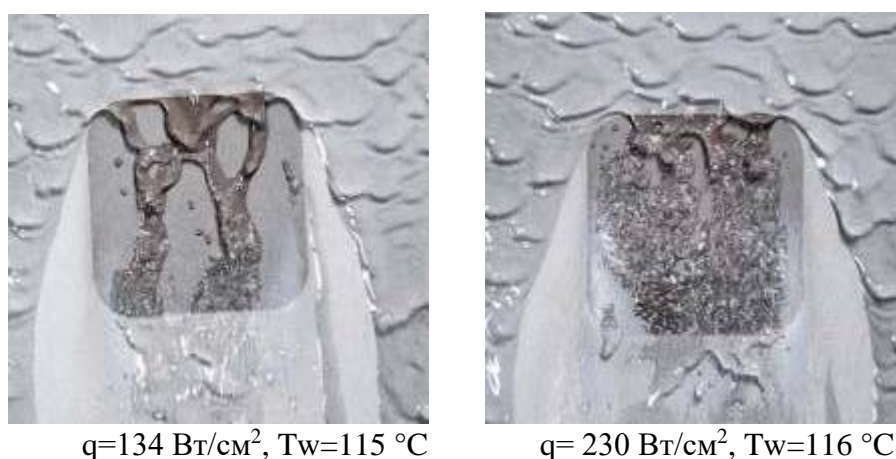


Рис.30. Разрушение пленки воды при локальном нагреве в плоском горизонтальном миниканале при $Re_l = 21,1$ и $Re_g = 2700$. Течение направлено сверху вниз, [31].

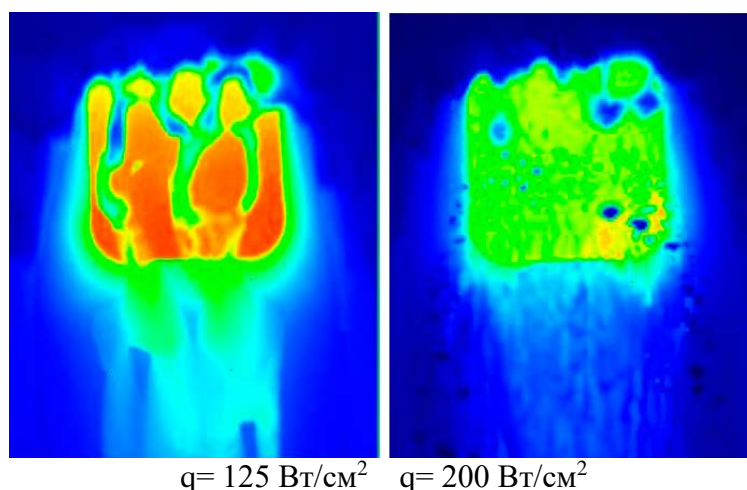


Рис. 31. Разрушение пленки воды при локальном нагреве в плоском горизонтальном миниканале при $Re_l = 30$ и $Re_g = 2200$. Течение направлено сверху вниз, [30].

В ходе работ по созданию научно-технического задела данное направление по экспериментальному исследованию гидродинамики, теплообмена и кризисных явлений в

пленке жидкости, движущейся под действием потока газовой фазы, было наиболее эффективным. Был накоплен значительный экспериментальный материал с использованием модернизированного стенда, имеющегося в лаборатории. Анализ полученной информации, а также информации предыдущего раздела, показал, что формирование малоразмерных, короткоживущих сухих пятен в тонких пленках жидкости, увлекаемых потоком газовой фазы, может быть новым высокоинтенсивным механизмом теплообмена. В тонких пленках жидкости, увлекаемых потоком газовой фазы, может быть несколько механизмов возникновения и развития сухих пятен. Это – нуклеация, испарение, влияние отдачи пара при интенсивном испарении, термокапиллярный эффект. Механизм, описанный в работах [21,22] будет способствовать схлопыванию сухих пятен. Полученная информация, в частности, была использована для обоснования изобретений «Способ охлаждения электронного оборудования с конденсатором-плёнкоформирователем», [1], и «Способ охлаждения электронного оборудования с использованием комбинированных пленочных и капельных потоков», [5].

3.5 СОЗДАНИЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДЕЛА ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОЕКТА

Были выполнены и другие исследования, прямо не относящиеся к испарению и разрывам тонкой пленки жидкости. Конденсатор пара является неотъемлемой частью любой замкнутой испарительной системы охлаждения электронного оборудования. Еще на стадии подачи заявки на проект, предполагалось, что исследования будут проводиться не только с чистым паром, но и с парогазовой смесью. Такая замкнутая система охлаждения должна включать не только конденсатор пара, но и сепарационную систему, которая отделяет жидкость от парогазового потока. В проекте была поставлена задача продолжить экспериментальные и теоретические исследования процессов в пассивной конденсационно-сепарационной системе способной работать в условиях переменного вектора силы тяжести (транспорт, флот, авиация), в том числе и в условиях микрогравитации, [32]. Конденсатором являлась медная круглая трубка диаметром 4,8 мм и длиной - 200 мм, **Рис. 32.**

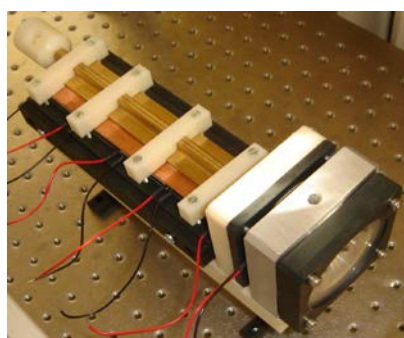


Рис. 32. Стенд для исследования процессов в пассивной конденсационно-сепарационной системе, [32].

Плотность теплового потока в конденсаторе определялась с помощью датчиков теплового потока, **Рис. 33.** Для увеличения производительности миниатюрного конденсатора пара были использованы термоэлектрические преобразователи (элементы Пельтье), охлаждаемые с помощью водяного теплообменника, что позволяло понижать температуру стенки конденсатора до минус 27 °С в случае работы с жидкостью FC-72. Часть пара из поступающего в конденсационно - сепарационную систему парогазового

потока конденсируется в трубке. Сконденсированная жидкость поступает в сепаратор под действием касательных напряжений, создаваемых потоком парогазовой смеси. Сепаратор собственной конструкции был основан на принципе расширяющегося кольцевого микроканала с минимальной шириной щели 10 мкм, который создает «капиллярный гидрозамок», препятствующий выходу газовой фазы в жидкостную часть контура.

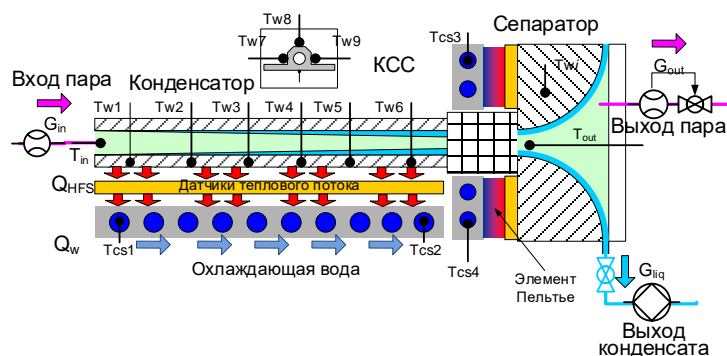


Рис. 33. Схема конденсационно - сепарационной системы, [32].

Проведено математическое моделирование положения мениска жидкости в сепараторе с использованием уравнений Навье-Стокса в предположении, что процесс стационарный, а, значит, граница раздела жидкость – газ неподвижна, **Рис. 34**. Получено хорошее соответствие результатов моделирования с данными эксперимента, [32]. По итогам работ по проекту получен патент на оптимизированную конденсационно - сепарационную систему значительно большей мощности, чем испытанная в проекте, [2].

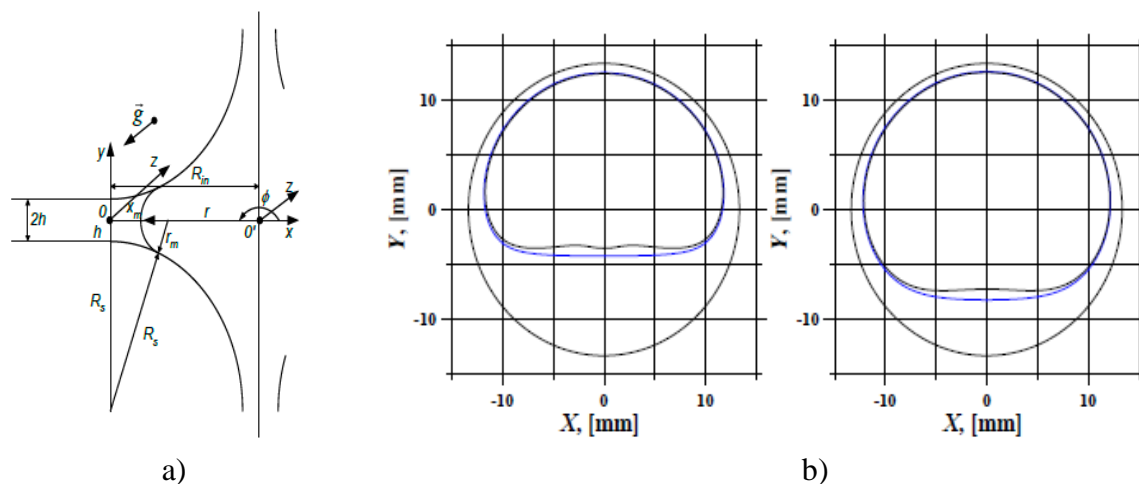


Рис. 34. Моделирование положения мениска в сепараторе: а) схема мениска; б) сравнение эксперимента (черная линия) и расчета (синяя линия), [32].

Таким образом участники проекта смогли ответить на все поставленные вопросы для достижения цели №-1 Проекта: «Создание научно-технического задела». Данную цель можно считать полностью достигнутой, т.к. авторы проекта ответили на главный вопрос - за счет чего может быть достигнута высокая эффективность отвода тепла в системах пленка - спутный поток газа и предложили новый метод интенсификации теплообмена для пленочных течений, основанный на массовом образовании короткоживущих, маломасштабных разрывов слоя жидкости. Можно утверждать, что работа над данной частью проекта во многом определила тематику исследований лаборатории интенсификации процессов теплообмена ИТ СО РАН на последующие 5-10 лет и привела к

получению целого ряда важных научных и технических результатов. В итоге данных работ лаборатория является признанным в мире лидером по интенсификации теплообмена в двухфазных системах и по исследованиям в области линии контакта газ – жидкость – твердое тело, что подтверждается публикациями в высокорейтинговых журналах [104,105,106,107,108] и регулярными приглашенными докладами на конференциях [109,110].

Выполнение проекта дало толчок к более детальному исследованию ряда задач в течении последующих лет, таких как исследования теплообмена в области динамической линии контакта газ-жидкость-твердое тело; охлаждение локальных источников тепла посредством пленки жидкости, увлекаемой парогазовым потоком; использование для охлаждения электроники гибридной системы, включающей спрей, газ и пленку жидкости, [5]. На основании проведенного теоретического и экспериментального исследования впервые в данном проекте был сделан далеко идущий вывод о том, что сверхинтенсивное испарение в области динамической линии контакта может быть перспективным методом интенсификации теплообмена в тонких пленках жидкости, где теплообмен уже и так достаточно высок. В будущих проектах этот вывод хорошо подтвердился, [103]. Выполненные исследования легли в основу пяти патентов, [1-5]. Разработка необходимого научно-технического задела создало благоприятные условия для выполнения более прикладной цели проекта №2: «Разработка и создание экспериментального образца испарительной системы охлаждения теплонапряженных элементов с использованием однокомпонентных двухфазных потоков». Предложенная в данной части проекта идея была революционной для пленочных аппаратов, т.к. инженеры при разработке и эксплуатации различных пленочных систем пытаются исключить появление разрывов (сухих пятен) в пленках жидкости.

4. РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА ИСПАРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

После опубликования в работах [57,73] идеи использования испарения тонкой пленки жидкости увлекаемой потоком пара или газа для отвода высоких тепловых потоков и, в частности, охлаждения электронного оборудования с высоким тепловыделением, продолжение получили исследования только с использованием газа [62,65,67,68,73]. Авторам проекта не было известно ни одной работы, где бы систематически исследовался случай локально нагреваемой пленки жидкости, увлекаемой ее паром, [54]. Поэтому на первом этапе проекта было предложено провести систематические теоретические исследования теплообмена, испарения и разрушения пленки жидкости при течении под действием собственного пара в мини каналах и ряд других исследований необходимых для создания нужного научно - технического задела. Затем с использованием полученной информации на последнем, пятом этапе проекта было запланировано создать экспериментальный образец системы охлаждения электронного оборудования. Один из вопросов, который стоял перед коллективом исполнителей в период создания научно – технического задела, это: «какую следует выбрать газовую фазу в наиболее эффективной системе охлаждения?». В общем случае существует три варианта: 1) чистый сухой (неконденсируемый) газ; 2) чистый пар; и 3) парогазовая смесь. Недостатками системы охлаждения с использованием чистого сухого газа являются: 1) система должна быть укомплектована источником чистого, сухого газа, например Азота; 2) система должна быть разомкнута по газовой фазе, иначе потребуется громоздкое сепарационное и конденсационное оборудование для осушения газа и его возвращения на вход системы охлаждения.

В ходе выполнения проекта было разработано две новых концепции испарительных систем охлаждения. Первая с использованием только чистого пара, а вторая с возможностью использования как чистого пара, так и парогазовой смеси. Обе системы были защищены патентами уже после окончания проекта, [111,112]. Система охлаждения с использованием чистого пара схематично показана на **Рис. 35**. Важным преимуществом предложенной системы охлаждения, является то, что насос для паровой фазы заменяется жидкостным насосом, который подает конденсат в парогенератор с электрическим подогревом. Насос должен обеспечивать давление существенно большее, чем в парогенераторе. Движение паровой фазы в миниканале происходит за счет перепада давлений в парогенераторе и конденсаторе. Давление в конденсаторе определяется температурой охладителя подаваемого из системы охлаждения конденсатора, которая, как правило, постоянна, следовательно давление в конденсаторе также практически постоянно. Регулировка расхода и скорости паровой фазы в канале происходит за счет давления в парогенераторе (11), которое регулируется за счет мощности электрического подогревателя (12). В зависимости от устройства парогенератора в нем может испаряться вся поступающая жидкость, либо часть жидкости может постоянно присутствовать. В качестве парогенератора может использоваться другая система охлаждения электронного оборудования с меньшими значениями удельного теплового потока, но с достаточным общим тепловыделением для получения требуемого объёма пара и давления. Например, это может быть система охлаждения с кипением в большом объёме на электронных компонентах. Давление в парогенераторе может составлять очень значительную величину, до 10 и даже 50 атмосфер. Поэтому предложенная система может обеспечивать максимально высокие скорости движения паровой фазы в канале, практически недоступные для систем охлаждения при использовании насоса для газа или парогазовой смеси. Таким образом, предложенная система может обеспечивать расслоенный режим течения в мезоканалах и микроканалах, т.е. каналах высотой менее 0.1 мм. При движении двухфазного потока в таком канале перепад давления за счет гидравлического сопротивления может составлять 10 - 20 и более атмосфер.

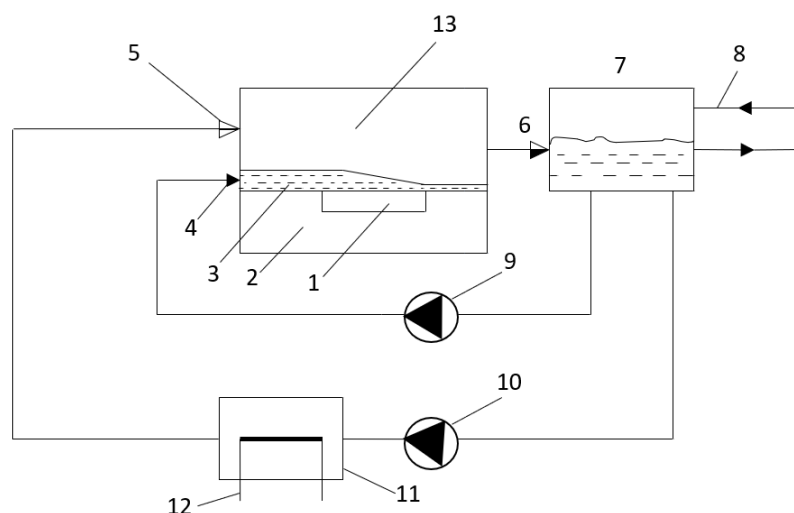


Рис. 35. Концепция системы охлаждения электронного оборудования с использованием чистого пара: 1 –электронный компонент; 2 – подложка; 3 –испаряющаяся плёнка жидкости; 4 – вход жидкости в канал; 5 – вход пара в канал; 6 – вход жидкости и пара в конденсатор; 7 – конденсатор пара и резервуар для жидкости; 8 – система охлаждения конденсатора; 9 –насос для подачи жидкости в канал; 10 – насос для подачи жидкости в парогенератор; 11- парогенератор и резервуар для пара; 12- электрический подогреватель; 13 – мини или микро-канал, [111].

Потенциально данная система может обеспечивать максимально высокие скорости движения пара и жидкости в канале охлаждения и как следствие обеспечивать отведение сверхвысоких тепловых потоков за счет высоких удельных расходов жидкости и пара, в том числе и в микроканалах. К преимуществам системы относятся – отсутствие сепаратора жидкости и газа, высокая эффективность конденсатора чистого пара и относительная простота расчетов такой однокомпонентной системы. Однако, даже незначительные примеси неконденсируемого газа, могут существенно снизить эффективность конденсатора пара. Аналитический обзор, [29], анализ имеющейся экспериментальной информации [30,31,32], а также расчетные исследования показали, что система охлаждения с использованием чистого пара имеет также ряд существенных недостатков, как и система с чистым, сухим газом. Можно перечислить следующие основные недостатки системы охлаждения с использованием чистого пара: 1) система должна быть тщательно герметизирована, чтобы исключить натекание воздуха при давлениях внутри системы ниже атмосферного; 2) перед заправкой в систему жидкость должна быть тщательно дегазирована; 3) система перед ее заправкой должна быть тщательно дегазирована с использования дорогостоящего вакуумного оборудования; 4) в ходе эксплуатации и временной остановки должны быть исключены присосы воздуха в систему из атмосферы. Нужно отметить, что при использовании в качестве теплоносителя воды, система находится под избыточным давлением, только если все ее части имеют температуру выше 100 °С; 5) материал внутренних поверхностей системы охлаждения не должен выделять неконденсируемых примесей при контакте с теплоносителем вследствие химических реакций; 6) за счет интенсивной конденсации пара на поверхности жидкости, поступающей в микротрубу, в зависимости от длины участка формирования пленки, частично или полностью теряется переохлаждение жидкости. При относительно малых расходах жидкости и пара, рабочее тело будет поступать на нагревательный элемент при температуре практически равной температуре насыщения, соответствующей давлению в микротрубе, что заметно снижает критический тепловой поток. Упомянутые аспекты могут приводить к существенному росту металлоемкости и габаритов системы охлаждения и как следствие к значительному росту ее стоимости.

В ходе систематических теоретических исследований теплообмена на первом этапе проекта было показано, что в случае чистого пара испарение становится менее интенсивным, [10,43,44]. Было установлено, что основным отличием движения пленки жидкости под действием чистого газа или парогазовой смеси является наличие существенного термокапиллярного эффекта, что способствует разрывам пленки жидкости при ее утонении, [29,30]. Можно ожидать что для случая чистого пара или высоких концентраций пара в парогазовой смеси, микроразрывы пленки будут затруднены, что ухудшит теплообмен. Поэтому в ходе выполнения проекта также была разработана вторая концепция испарительной системы охлаждения с возможностью использования как чистого пара, так и парогазовой смеси.

Вторая концепция системы охлаждения схематично показана на **Рис. 36**. Согласно изобретению, в системе охлаждения в качестве сепаратора используют гравитационный сепаратор, совмещенный с баком- накопителем для жидкости и газовой фазы, что снижает габариты и металлоёмкость предложенной системы охлаждения, т.к. позволяет объединить три устройства в одном. В качестве теплоносителя используется пар с некоторым содержанием неконденсируемых примесей. Концентрация примесей регулируется клапаном для сброса и регулировки концентрации неконденсируемого газа. Пар, образующийся при испарении жидкости на электронных компонентах, только частично конденсируется в конденсаторе, что существенно повышает эффективность конденсатора с движущимся паром. Использование пластинчатого теплообменника в качестве

конденсатора позволяет достигать большой площади теплообменной поверхности при высокой компактности и относительно низкой стоимости. Остатки пара с неконденсируемыми примесями поступают в сепаратор, и оттуда перекачиваются высокоэффективным компрессором обратно в систему охлаждения. Предложенная система является наиболее энергоэффективной, что является одним из важнейших преимуществ, особенно с ростом общей мощности системы. Такая система позволяет запускаться в работу после ее отключения из состояния с любым количеством неконденсируемого газа внутри системы и набирать нужное количество пара только за счет испарения на охлаждаемом электронном оборудовании. При этом система является двухконтурной и замкнутой как по жидкости, так и по газовой фазе.

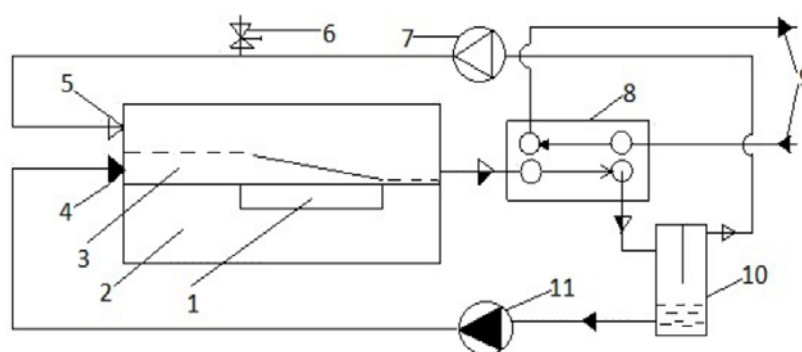


Рис. 36. Концепция системы охлаждения электронного оборудования с использованием чистого пара и парогазовой смеси: 1 –электронный компонент; 2 – подложка; 3 – испаряющаяся плёнка жидкости; 4 – вход жидкости в канал; 5 – вход парогазовой смеси в канал; 6 – клапан для сброса и регулировки концентрации неконденсируемого газа; 7 – компрессор; 8 – пластинчатый теплообменник (конденсатор пара); 9 – система охлаждения конденсатора; 10 – сепаратор, совмещенный с баком-накопителем для жидкости и газовой фазы; 11- жидкостный насос, [112].

В ходе выполнения проекта было показано, что в тонких пленках жидкости, увлекаемых потоком газовой фазы возможен новый высокоинтенсивный механизм теплообмена. Механизм связан со сверхинтенсивным испарением жидкости из областей динамической линии контакта газ-жидкость-подложка. Такие области возникают на краю сухого пятна. В пленках формируются сверхмалые динамические сухие пятна размером порядка 100-500 мкм при высоких тепловых потоках. Важно, что такие малоразмерные сухие пятна являются неустойчивыми, т.е. они постоянно формируются и исчезают с достаточно высокой частотой. Существенную роль в формировании сверхмалых динамических сухих пятен играет термокапиллярный эффект. Поэтому газовая фаза должна содержать определенное количество неконденсируемого газа, т.е. быть парогазовой смесью. Для случая чистого пара или высоких концентраций пара в парогазовой смеси, микроразрывы пленки будут затруднены, что ухудшит теплообмен. При этом концентрация газа становится дополнительным параметром, определяющим эффективность теплообмена, с помощью которого можно управлять гидродинамикой и морфологией пленки жидкости, наряду с такими параметрами как расход жидкости и газа. Тем не менее данный вопрос требует дополнительных систематических исследований. Оптимальная концентрация неконденсируемого газа регулируется в предложенной системе специальным клапаном (6).

Экспериментальный образец испарительной системы охлаждения теплонапряженных элементов с использованием второй концепции, когда в качестве газовой фазы может служить как чистый пар, так и парогазовая смесь был изготовлен и

испытан. Причинами по которым для изготовления был выбран именно второй вариант уже отмечались выше, это: 1) интенсивность испарения для чистого пара, как показали теоретические исследования, ниже, чем для парогазовой смеси; 2) однокомпонентная система подавляет термокапиллярный эффект, который важен для дестабилизации поверхности пленки и развития сухих пятен; 3) анализ кипения жидкостей на участке кольцевого режима течения для однокомпонентных систем, на основе данных из литературы (Рис. 1), показывает несущественную интенсификацию теплообмена; 4) однокомпонентная система обладает целым рядом технических и эксплуатационных недостатков; 5) однокомпонентная система может иметь существенно большую стоимость, габариты и металлоемкость при меньшей эффективности. Постепенное осознание всех вышеуказанных фактов заставило коллектив исполнителей проекта остановить уже начатое создание чисто однокомпонентной системы по уже разработанному дизайну. Некоторые, уже во многом изготовленные детали для первого варианта (парогенератор и рабочий участок повышенной мощности с круглым нагревателем), продолжали храниться на создаваемом образце для возможности его дальнейшей модернизации. Эти детали хорошо видны на фотографии экспериментального образца испарительной системы охлаждения, Рис. 37, опубликованной в отчете по этапу – 5.

Таким образом в ходе выполнения этапа – 5 проекта, возник риск получения отрицательного результата. Чисто однокомпонентная система по данным полученного научно – технического задела оказывалась менее эффективной и могла быть не в состоянии отвести 1 кВт/см^2 . Необходимо отметить, что ни заявка на проект [54] ни соглашение с Министерством образования и науки не запрещали создавать универсальную систему. Была поставлена задача создать образец системы охлаждения «с использованием однокомпонентных двухфазных потоков». Это было важно, например для будущего более тщательного исследования таких систем и их сравнения. Очевидно, что создаваемая система охлаждения могла и должна была включать различные способы интенсификации теплообмена. Указанные выше документы не определяли, что отвести 1 кВт/см^2 необходимо именно с использованием чистого пара. Критерии чистоты пара в документах не обсуждаются и никак не установлены. Это связано с тем, что в проекте нацеленность на исследования с чистым паром была только для этапа создания научно – технического задела. Создание образца было отдельной задачей. Главное здесь было, чтобы он являлся замкнутым по газовой фазе и по жидкости, в противовес всем предыдущим стендам лаборатории интенсификации процессов теплообмена Института теплофизики СО РАН, а кроме того, чтобы он имел возможность отвести 1 кВт/см^2 . Все вышеперечисленные ключевые требования в созданном нами прототипе выполнены, т.е. он может работать как однокомпонентная система, полностью замкнут и отводит 1 кВт/см^2 . Впервые была создана замкнутая, микроканальная система, основанная на пленочном течении с почти полным испарением жидкости. Система второго типа была создана на основе конструкторской документации, разработанной для системы первого типа с внесенными туда изменениями на основе специального раздела в календарном плане этапа-5: «Разработка рекомендаций по созданию наиболее энергоэффективных систем охлаждения», а также с использованием опыта полученного при эксплуатации стенд для экспериментального исследования гидродинамики, теплообмена и кризисных явлений в пленке жидкости, движущейся под действием потока газовой фазы, описанного в разделе 3.4.

Принципиальная схема созданного образца приведена на **Рис. 38**. Фотография экспериментального образца испарительной системы охлаждения, опубликованная в отчете по этапу 5, приведена на **Рис. 37**. Образец имеет замкнутые контуры по жидкости и газу. Электронный компонент моделируется нагревательным элементом размером $10 \times 10 \text{ мм}^2$. Жидкость перекачивается насосом. Пленка жидкости формируется с помощью щелевого устройства и движется за счет потока газовой фазы. Данная система охлаждения может

эффективно работать с неконденсируемым газом внутри, что существенно упрощает и удешевляет ее конструкцию и эксплуатацию, а также повышает эффективность теплообмена. Испытание экспериментального образца показало, что он удовлетворяет всем требованиям технического задания: он в состоянии отводить тепловой поток более 1000 Вт/см^2 ; высота канала может варьироваться от 0.1 до 2.0 мм; число Рейнольдса пленки жидкости может превосходить 100; число Рейнольдса газовой фазы может превосходить 3000; погрешность измерения температуры составляет не более 1 К; погрешность определения теплового потока не более 20%.

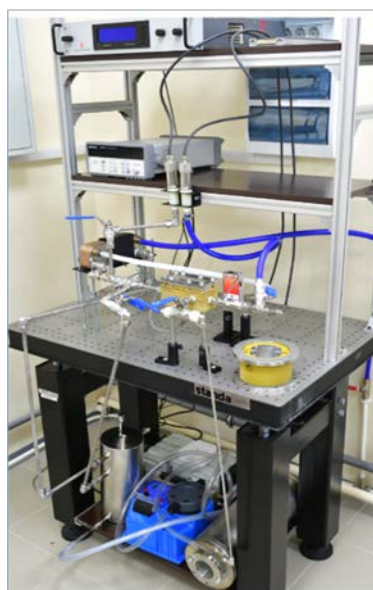


Рис. 37. Фотография экспериментального образца испарительной системы охлаждения теплонапряженных элементов с использованием однокомпонентных двухфазных потоков, [33].

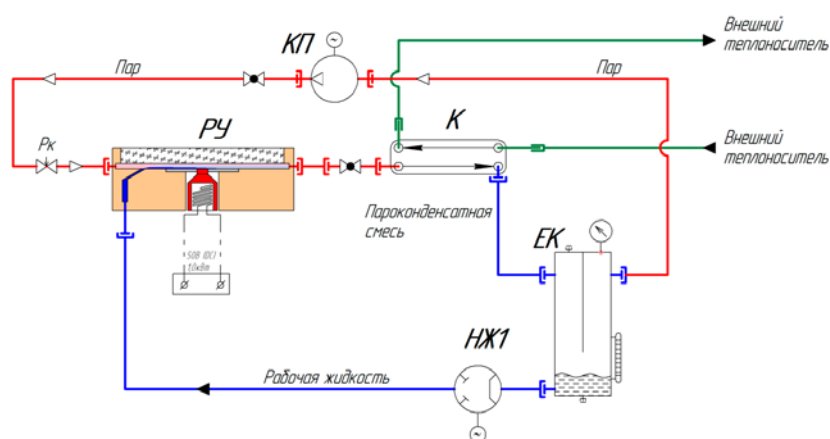


Рис. 38. Экспериментальный образец испарительной системы охлаждения теплонапряженных элементов с паровым компрессором. РУ – рабочий участок; НЖ1 – насос для жидкости; КП – компрессор паровой; К – конденсатор; ЕК – емкость конденсата; Рк – регулирующий клапан пара, [33].

В проекте предусматривался только дизайн, изготовление и испытание экспериментального образца. На эти работы по календарному плану отводилось 6 месяцев. Проведение детальных исследований не предполагалось в связи со сжатыми сроками выполнения проекта. Детальные исследования с использованием экспериментального образца не предполагались в проекте еще и в силу того, что работы по созданию образца были запланированы только на последнем пятом этапе проекта, т.е. после создания нужного научно – технического задела. После окончания проекта экспериментальный образец испарительной системы охлаждения продолжал использоваться для исследований, а также обучения и повышения квалификации студентов и аспирантов, [92,93,94,95,96]. В работе [92], были опубликованы результаты первых систематических экспериментов, выполненных с использованием данного образца. Было получено, что образец способен отводить тепловой поток 850 Вт/см^2 . Тем не менее авторы [92] не пишут, что они не могут повысить отводимый тепловой поток, например увеличивая расход жидкости или газа или меняя высоту канала. Задачи отвести максимально возможный тепловой поток в данной работе не ставилось. Задачей было выполнить новые эксперименты, когда ширина канала равна ширине нагревательного элемента. В экспериментах было достигнуто число Рейнольдса жидкости равное 249. Исследования в статье выполнялись по проекту Российского Научного Фонда № 14-19-01755 (2017 – 2018 гг.). То есть работы по проекту РФН начались практически сразу после окончания проекта ФЦП. В проекте РФН создание стенда для таких исследований не предполагалось.

В период 2018 – 2020 годы группа молодых исследователей лаборатории с использованием экспериментального образца испарительной системы охлаждения созданного в проекте ФЦП № 14.613.21.0011 выиграла проект на Конкурсе на лучшие научные проекты фундаментальных исследований, проводимого совместно РФФИ и Национальным центром научных исследований Франции https://www.rfbr.ru/rffi/ru/contest/o_2059552. Исследования по проекту опубликованы в статьях [93,94,95,96]. Все эксперименты в проекте производились только с использованием экспериментального образца, который был модифицирован в части жидкостного контура, что делает возможными пульсации при движении жидкой пленки. В ходе исследований в статье [93] было подтверждено, что образец способен отводить тепловой поток 1480 Вт/см^2 , при этом число Рейнольдса жидкости составляло 233. Таким образом последующие эксперименты подтверждают результаты проведённых испытаний при сдвиге экспериментального образца испарительной системы охлаждения в эксплуатацию. Этот же факт подтвержден и в статьях [94,95,96]. В период 2016 – 2020 годы экспериментальный образец использовался для обучения аспиранта К.С. Элояна и подготовки его научно-квалификационной работы, [97]. Необходимо отметить, что в лаборатории интенсификации теплообмена ИТ СО РАН до сих пор существует только один стенд, имеющий замкнутые контуры и по газовой фазе, и по жидкости это экспериментальный образец созданный в 2016 г. по проекту ФЦП № 14.613.21.0011.

5. ВКЛАД ИНОСТРАННОГО ПАРТНЕРА

Данный проект был частью специального конкурса на выполнение исследований в рамках научно-технологического сотрудничества с участием научно-исследовательских организаций Японии в рамках мероприятия 2.1 федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно – технического комплекса России на 2014-2020 годы», шифр: 2014-14-585-0011. Мероприятие 2.1 «Проведение исследований в рамках международного многостороннего и двустороннего сотрудничества» указывает, что «Целями мероприятия являются интеграция российской науки в общемировую научно-исследовательскую сферу, расширение географии

международного научно – технического сотрудничества и содействие формированию устойчивых кооперационных связей российских и иностранных научно – исследовательских организаций и получение новых знаний». Кроме того, отмечено что «К ожидаемым результатам осуществления этого мероприятия относятся: интеграция российской науки в мировое научное сообщество и усиление роли науки и научного сообщества в стране; значительное расширение географии международного сотрудничества научно – исследовательских организаций и университетов; укрепление позиций российской науки и высшего образования в мире; развитие новых перспективных направлений исследований и прикладных разработок за счет привлечения к совместным работам ведущих международных специалистов; взаимовыгодный информационный и научно-технический обмен между странами-партнерами».

Нашим партнером в Японии был профессор Харухико Охта, заведующий отделения Аэронавтики и Астронавтики, университета Киушу, ученый с мировым именем, Рис. 39. Профессор Охта руководил в то время проведением очень значимого для мирового сообщества эксперимента по кипению жидкости в каналах в условиях микрогравитации. Такой эксперимент был подготовлен впервые командой исследователей из Японии и проводился на Международной Космической Станции. В период подготовки и выполнения нашего проекта заканчивался этап настройки оборудования и его тестирования в земных условиях. Эксперимент на МКС был намечен на 2016 год, т.е. год окончания нашего проекта. Тематика этого космического проекта была близка к тематике нашего проекта ФЦП. Профессор Охта на момент подачи нашего проекта был одним из самых авторитетных ученых в Японии в области двухфазных потоков и кипения. Коллеги из Японии активно использовали технологию микро-нагревателей на сапфировой пластине, разработанную ими для космических экспериментов, [113,114]. Была достигнута договоренность, что коллеги передадут нам информацию о этой технологии для изучения гидродинамики и теплообмена в испаряющемся мениске, моделирующем пленку жидкости в области ее разрыва.



Рис. 39. Профессор Харухико Охта, заведующий отделения Аэронавтики и Астронавтики, университета Киушу (партнер при выполнении проекта из Японии).

Финансирование совместного исследования осуществлялось для Института теплофизики и университета Киушу из национальных источников, т.е. никакие работы на территории Японии не финансировались Российской стороной и никакие средства из Японии не перечислялись в Российскую Федерацию. Иностранному партнеру на каждом из 5 этапов проекта предоставлялись научные аннотационные отчеты о проделанной работе, предусмотренные соглашением. Под влиянием наших предшествующих работ профессор Охта проявил интерес к исследованию процессов теплообмена в пленках жидкости, увлекаемых потоком газа. Коллег из Японии интересовал отвод тепловых потоков от поверхностей более значительного размера, чем в наших исследованиях, составляющих 50

- 100 мм в длину и более. В то время как лаборатория интенсификации процессов теплообмена ИТ СО РАН концентрировалась на поверхностях размером порядка 10 мм и менее, но с максимально высокими тепловыми потоками. На этом основании между нашими двумя лабораториями к 2014 г. возникло понимание, что мы готовы к реализации взаимовыгодного международного проекта. Предполагалось, что исследования гидродинамики и теплообмена в пленке жидкости, увлекаемой потоком пара или газа, будут идти параллельно в России и Японии по единому плану, стороны будут периодически встречаться и обсуждать результаты, делать совместные доклады на международных конференциях и публиковать совместные статьи в научных журналах. Предполагалось, что в фундаментальных исследованиях особое внимание будет уделено изучению гидродинамики и теплообмена в испаряющемся мениске, моделирующем пленку жидкости в области ее разрыва. Эти исследования будут выполнены совместно с коллегами из Японии используя разработанную ими технологию микро-нагревателей на сапфировой пластине.

Иностранный партнер создал новую экспериментальную установку и разработал оптические методы диагностики протекающих процессов на основе скоростной камеры (**Рис. 40**), [6,29]. В качестве жидкой фазы была выбрана вода, а в качестве газовой фазы – азот. Пленка жидкости двигалась в прямоугольном канале шириной 30 мм под действием спутного потока газа, **Рис. 41**. Высота канала варьировалась от 2 до 10 мм. Нагревательный элемент имел длину 100 мм и ширину 30 мм. Причем по длине он был разделен на 10 независимо обогреваемых, теплоизолированных секций. В каждой секции было установлено три термодатчики на глубине 1.5 мм, 7.5 мм и 13.5 мм от нагреваемой поверхности. Таким образом Партнер мог измерять температуру подложки, плотность теплового потока и квазилокальную интенсивность теплообмена в 10 точках вдоль поверхности течения пленки. Число Рейнольдса пленки в экспериментах варьировалось от 0 до 460, а число Рейнольдса газа от 0 до 7500.

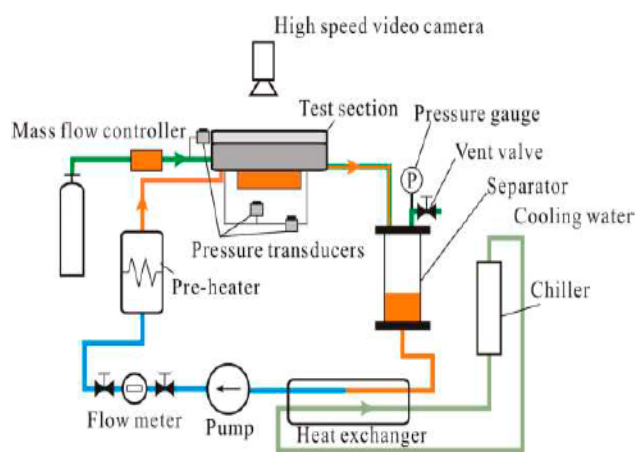


Рис. 40. Схема экспериментального стенда, созданного иностранным партнером, [6,31].

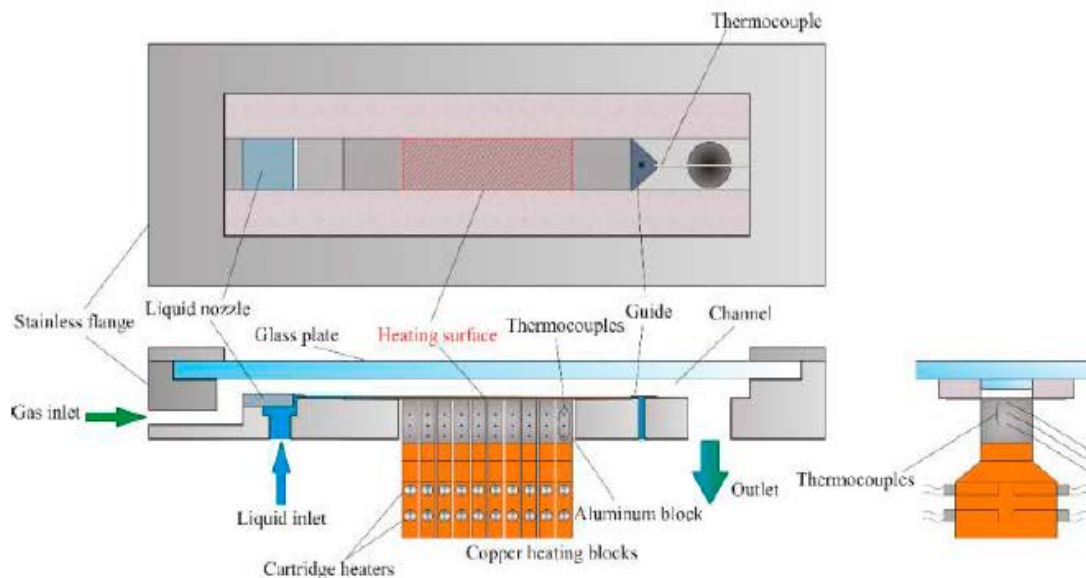


Рис. 41. Дизайн рабочего участка, [6,31].

В ходе выполнения проекта иностранный партнер выполнил все необходимые исследования по гидродинамике и теплообмену в пленке воды, увлекаемой потоком газа, и получил уникальные данные, не имеющие аналогов в литературе, [31,32,33]. Представлены систематические данные по распределению температуры стенки вдоль канала, квазилокальной плотности теплового потока и квазилокального коэффициента теплоотдачи вдоль поверхности длиной 100 мм охлаждаемой пленкой жидкости, увлекаемой потоком пара, [8]. Данные получены в широком диапазоне определяющих процесс параметров. На **Рис. 42**. Представлены локальный коэффициент теплопередачи и температура поверхности вдоль нагревательного элемента при различных сочетаниях теплового потока и температуры жидкости на входе. Локальный коэффициент теплопередачи увеличивается по направлению потока, поскольку толщина пленки жидкости уменьшается из-за повышенного напряжения сдвига на границе раздела газ - жидкость создаваемого газовой фазой и увеличенной скорости потока в результате испарения. В качестве характерного перепада температур при вычислении коэффициента теплопередачи используется разность между квазилокальной температурой стенки и среднemasсовой температурой жидкости. С увеличением числа Рейнольдса газа происходит ухудшение теплоотдачи за счет формирования крупных сухих пятен, **Рис. 43**.

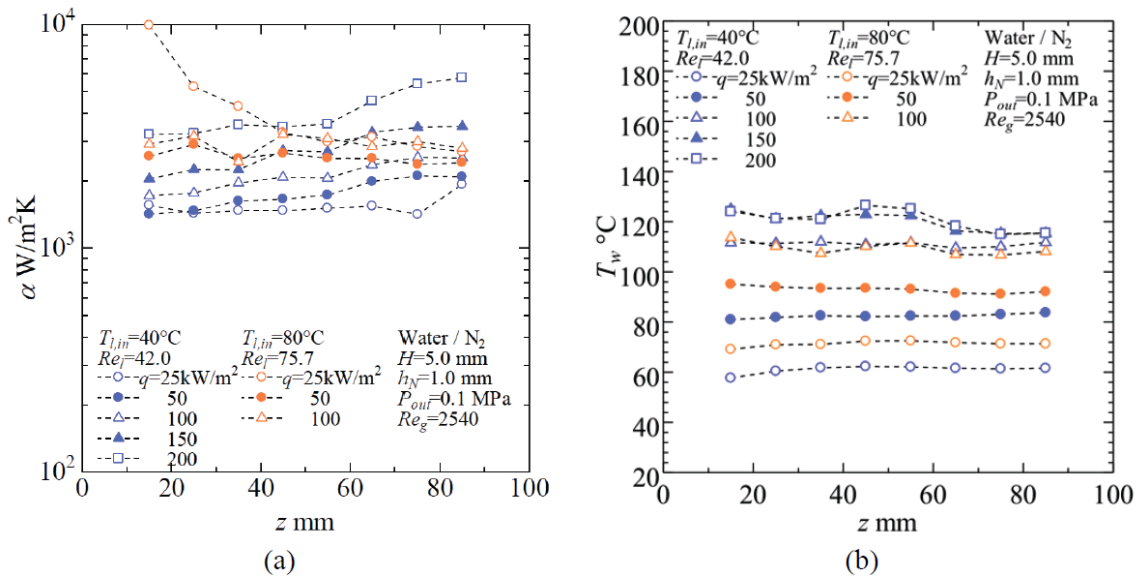


Рис. 42. Локальный коэффициент теплопередачи и распределение температуры поверхности вдоль потока при различных сочетаниях теплового потока и температуры жидкости на входе, [6,31].

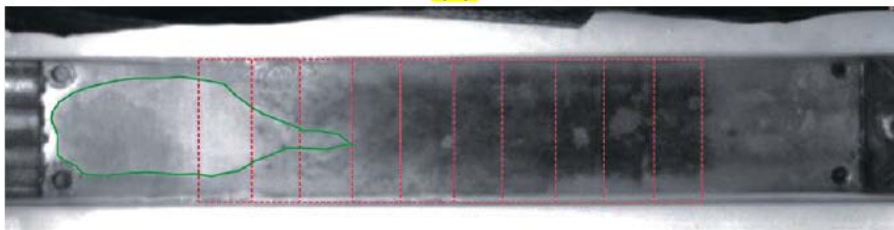


Рис. 43. Формирование крупных сухих пятен в пленке жидкости, вода, $Re_1=42$, $Re_g=2540$, $T_{1in}=40\text{ }^\circ\text{C}$, $q=20\text{ Вт/см}^2$.

Выполнена систематическая визуализация формирования сухих пятен в пленке жидкости и динамики линии контакта газ – жидкость – твердое тело. Предложена упрощенная математическая модель и на основе данных эксперимента рассчитаны термокапиллярные напряжения на границе жидкость – газ. Построена карта сдвиговых напряжений в пленке жидкости во всем диапазоне экспериментальных параметров, **Рис. 44**. Термокапиллярное касательное напряжение τ_M соизмеримо по сравнению с межфазными напряжениями сдвига обеих фаз. Для $T_{1in}=25\text{ }^\circ\text{C}$ градиент температуры на границе раздела газ – жидкость и τ_M максимальны.

Партнер предложил использовать эффект «самосмачиваемости» для увеличения критического теплового потока в пленках жидкости и провел соответствующие исследования, [33]. Эффект основан на возникновении конвекции Марангони при испарении смеси двух жидкостей с существенно разными температурами насыщения при одинаковом давлении. При этом легкокипящий компонент имеет более высокое поверхностное натяжение. Возникающая вследствие испарения разница концентраций легкокипящего компонента в слое жидкости приводит к формированию градиента поверхностного натяжения на границе раздела газ – жидкость и как следствие жидкость перемещается поверхностными силами в область более интенсивного испарения. Выполнена серия экспериментов с использованием водного раствора н-пропанола при его относительно низкой концентрации 3%. Некоторые результаты экспериментов были представлены в совместном докладе на международной конференции, [34].

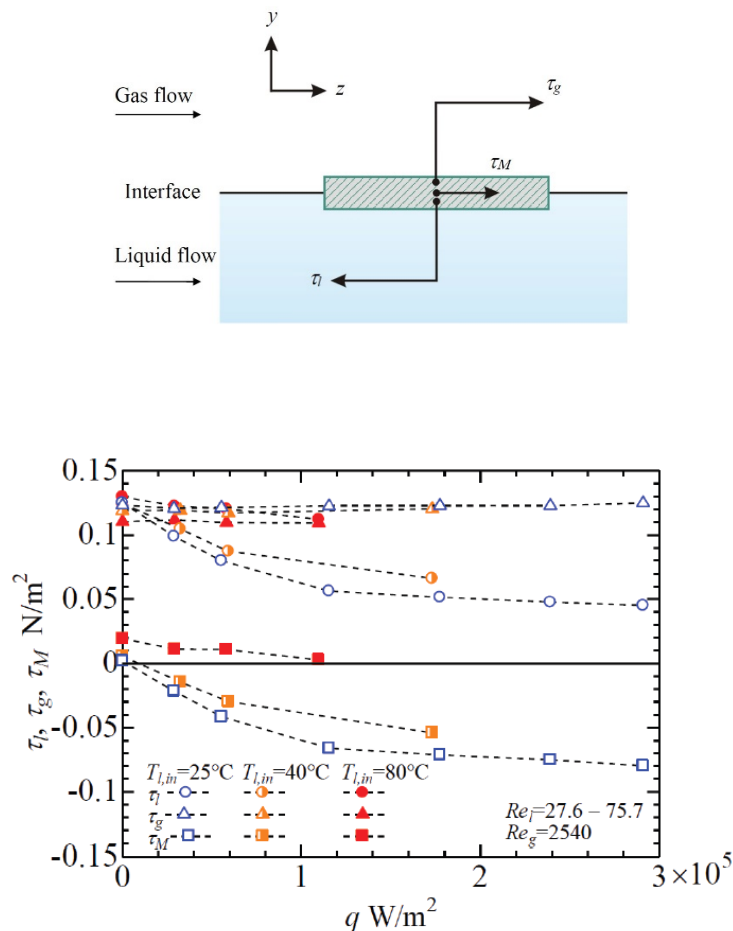


Рис. 44. Упрощенный баланс сил в пленке жидкости и карта сдвиговых напряжений в пленке жидкости, [8,31].

Был разработан и изготовлен нагревательный элемент на основе пластинки сапфира толщиной 3 мм с прозрачным нагревателем в видимом свете типа ИТО, который предназначался для совместных исследований в области нагреваемого мениска жидкости, [30]. Элемент включал также несколько миниатюрных термометров сопротивления для измерения температуры подложки. Иностранный партнер не смог предоставить изготовленный им нагревательный элемент для экспериментов на территории РФ в силу эмбарго, наложенного правительством Японии. Партнер передал всю необходимую техническую информацию сотрудникам лаборатории интенсификации процессов теплообмена ИТ СО РАН, и исполнители проекта изготовили схожий нагревательный элемент самостоятельно. Конструкция стенда для совместных исследований в области нагреваемого мениска жидкости, который был создан в Новосибирске, а также конструкция нагревательного элемента, изготовленного в России и некоторые результаты экспериментов опубликованы в совместной статье с иностранным партнером [12]. Некоторые результаты экспериментов были представлены в совместном докладе, [47]. Эмбарго несколько задержало темп совместных исследований в области нагреваемого мениска жидкости. Однако использование для экспериментов двух стендов, имеющихся в лаборатории - показанного на Рис. 23 и описанного в работах [37,46,48], наряду со стендом показанным на Рис. 10 и 11, позволило своевременно создать нужный научно – технический задел по данному направлению.

Таким образом иностранный партнер полностью выполнил взятые на себя обязательства. Необходимо отметить, что изначально в программе ФЦП не было требования, чтобы Иностранный партнер обязательно передавал что-то материальное в РФ. Мы обратились к профессору Охта с такой просьбой, и он посчитал, что это будет возможно. В итоге выполнения проекта было опубликовано три совместных журнальных статьи [6,8,12], причем две из них были опубликованы в высокорейтинговых, жестко рецензируемых международных журналах. Было сделано два совместных доклада на международной конференции, проходившей в Киото в сентябре 2015 г. и в Новосибирске в марте 2016 г. В организации последней участники данного проекта приняли активное участие. Профессор Охта являлся сопредседателем данной конференции и приглашенным докладчиком, [115]. Результаты проведенных исследований Партнером внесли вклад в развитие Российской науки совместными статьями, докладами и обсуждениями. Исполнители проекта изучали процессы на нагревателе длиной 10 мм, а партнер на нагревателе длиной 100 мм. У исполнителя ширина нагревателя составляла 10 мм, а у Партнера 30 мм. Это означает, что в ходе выполнения данного проекта было фактически проведено сразу два исследования на двух существенно разных нагревателях и двух существенно разных стендах.

Необходимо отметить, что в достаточно тонких и продвинутых экспериментах коллег из Японии, проводимых с использованием высокоточной аппаратуры и в близких условиях к экспериментам в Новосибирске, не удалось зафиксировать режимов с массовым формированием малоразмерных, короткоживущих сухих пятен в тонких пленках жидкости, увлекаемых потоком газовой фазы. Это еще раз подчеркивает уникальность данного явления, его новизну и не тривиальность одного из основных результатов, полученных исполнителями проекта в ходе создания научно - технического задела. Данный факт позволяет сделать вывод о том, что исследования в проекте велись на уровне выше мирового.

6. ДИНАМИЧЕСКИЕ МАЛОРАЗМЕРНЫЕ РАЗРЫВЫ В ПЛЕНКЕ ЖИДКОСТИ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКАХ

Гипотеза, высказанная в ходе выполнения проекта ФЦП № 14.613.21.0011 о возможной сверхвысокой интенсификации теплообмена в пленках жидкости за счет формирования сверхмалых короткоживущих разрыв жидкости при высоких тепловых потоках, полностью подтвердилась на более поздних и более детальных этапах исследований, [103]. Схема рабочего участка показана на **Рис. 45**. Конструкция рабочего участка почти полностью совпадает с той которая использовалась при создании экспериментального образца испарительной системы охлаждения в проекте ФЦП. Дно миниканала выполнено из пластины нержавеющей стали. В качестве нагревателя используется медный блок, вмонтированный заподлицо в пластину из нержавеющей стали. Поверхность медного нагревателя представляет собой квадрат площадью 10x10 мм². Нагрев осуществляется путем пропускания электрического тока через нихромовую катушку, намотанную на нижнюю часть медного блока. Высота канала равна 1 мм, ширина канала равна 36 мм. Воздушный компрессор подает в рабочий участок атмосферный воздух (рабочий газ) с начальной температурой около 25°C и относительной влажностью 20-40%. Рабочей жидкостью является вода Milli-Q (особо чистая, деионизированная, наночистая вода), которая подается шестеренчатым насосом в рабочий участок с начальной температурой 25°C.

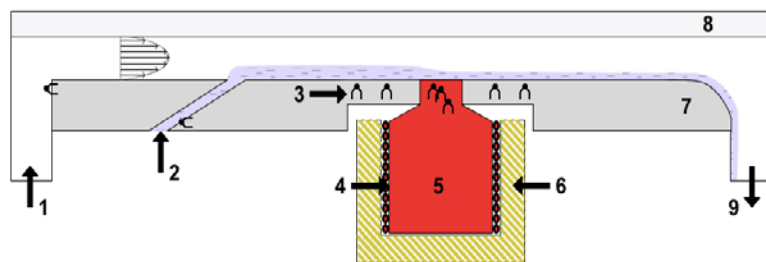


Рис. 45. Схема рабочего участка. 1 – вход газа; 2 – вход жидкости; 3 – термопары; 4 – нихромовая катушка; 5 – медный блок; 6 – теплоизоляция; 7 – стальная пластина; 8 – стеклянная пластина; 9 – выход жидкости и газа, [103].

Температура рабочей поверхности определяется с помощью термопар, встроенных в стальную пластину и медный блок. Мощность, выделяемая на нихромовой катушке, определяет общее количество выделяемого тепла. Тепловой поток определяется измерениями термопар. Оценки, полученные по измерениям термопар, расположенных в стальной пластине, показывают, что относительное распространение тепла в стальную пластину не превышает 10 % при тепловых потоках более 400 Вт/см². Оценки, полученные по измерениям термопар, расположенных в нагревателе, показывают, что относительные тепловые потери из нихромовой катушки в атмосферу не превышают 16 % при тепловых потоках более 400 Вт/см². Таким образом, величина полных теплопотерь (потери тепла в атмосферу и распространение тепла в стальную пластину) при тепловых потоках более 400 Вт/см² составляет для данной конструкции нагревательного элемента порядка 25 %, [74]. Для лучшей смачиваемости поверхность нагревателя и пластины из нержавеющей стали были отполированы. Исследование морфологии обработанной поверхности проводилось на атомно-силовом микроскопе Solver Pro NT MDT. На различных участках поверхности нагревателя среднеквадратическая шероховатость составила около 0,5 мкм. Для визуализации динамики пленки жидкости использовалась высокоскоростная камера Photron FASTCAM SA1.1. При максимальном разрешении видеосъемки (1024x1024 пикселей) скорость съемки составляет 5400 кадров/секунду. При более низких разрешениях видеосъемки скорость съемки может достигать 675000 кадров/секунду. С камерой использовалась оптическая система высокого пространственного разрешения. С помощью высокоскоростной визуализации зафиксировано образование, распространение и исчезновение микромасштабных сухих пятен при $T_w > 100$ °С. Видеосъемка проводилась в начальной части нагревателя, **Рис. 46**. При частоте съемки 100000 кадров в секунду поле зрения камеры составляет 750x330 мкм (300x128 пикселей).

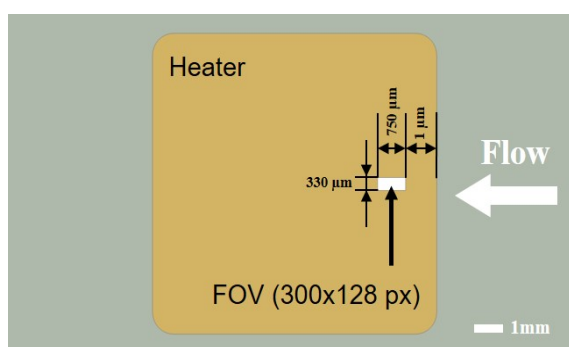


Рис. 46. Поле зрения камеры при съемке с частотой 100 000 кадров/секунду.

На **Рис. 47** показаны типичные стадии образования и размывания сухих пятен при $T_w=130^\circ\text{C}$. В первый момент наблюдается непрерывное течение пленки жидкости. Затем в пленке на нагревателе самопроизвольно образуется микропузырек. Дальнейший быстрый рост пузыря приводит к прорыву пленки и последующему появлению сухого пятна. Сухое пятно увеличивается и после этого можно наблюдать замывание сухого пятна.

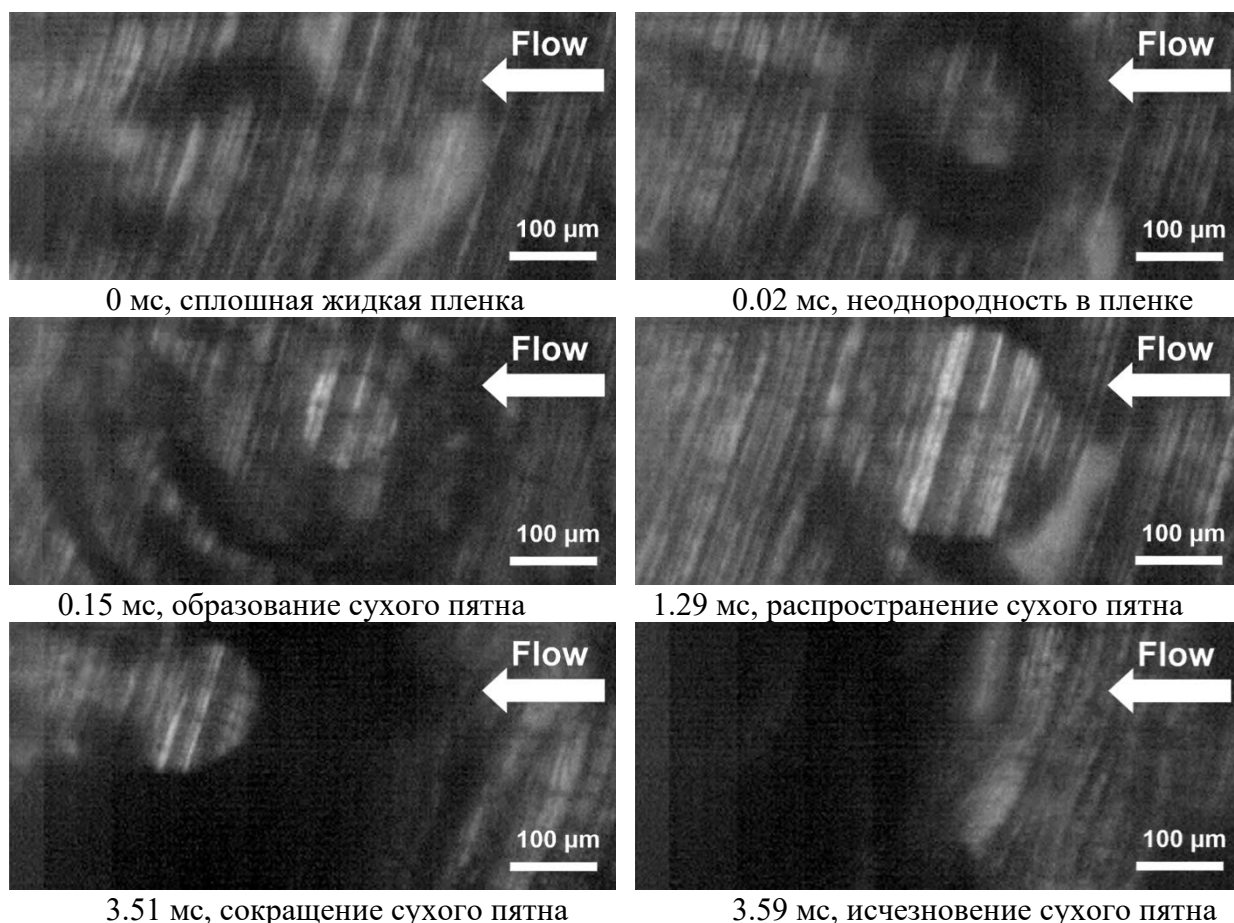


Рис. 47. Динамика сухого пятна. Число Рейнольдса жидкости $Re_l=40$, приведенная скорость газа $U_{sg}=19,5$ м/с, тепловой поток $q=450$ Вт/см², температура поверхности нагревателя $T_w=130^\circ\text{C}$, поток направлен справа налево. Частота съемки — 100 000 кадров в секунду, [103].

На основании наблюдения многочисленных сухих пятен был сделан вывод, что при $T_w > 100^\circ\text{C}$ образованию сухого пятна в пленке жидкости предшествует самопроизвольное появление микромасштабного пузырька пара на нагревателе. Затем за время порядка нескольких десятков микросекунд пузырек растет и прорывает пленку, что приводит к появлению сухого пятна. Временная диаграмма образования сухих пятен в тонкой пленке жидкости схематично показана на **Рис. 48**. Стоит отметить, что характерное время жизни сухого пятна превышает время жизни парового пузырька примерно на 2 порядка. Таким образом в тонких пленках жидкости при высоких тепловых потоках нуклеация является не основным процессом, определяющим теплообмен, а скорее триггером к запуску другого, более важного с точки зрения теплообмена, процесса формирования малоразмерных, короткоживущих разрывов в пленке жидкости.

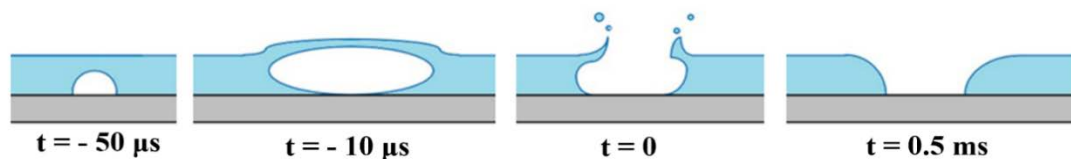


Рис. 48. Временная диаграмма образования сухих пятен в тонкой пленке жидкости.

На **Рис. 49** показана зависимость скорости линии контакта от времени для сухого пятна, показанного на Рис. 47. Скорость линии контакта достигает максимального значения в момент появления сухого пятна (около 10 м/с). При распространении сухого пятна средняя скорость линии контакта составляет около 10 см/с. При замывании сухого пятна скорость линии контакта в среднем составляет около 1 м/с. Существенная разница в скорости роста и замывания сухого пятна, примерно на порядок, может говорить о различных физических механизмах, отвечающих за эти процессы.

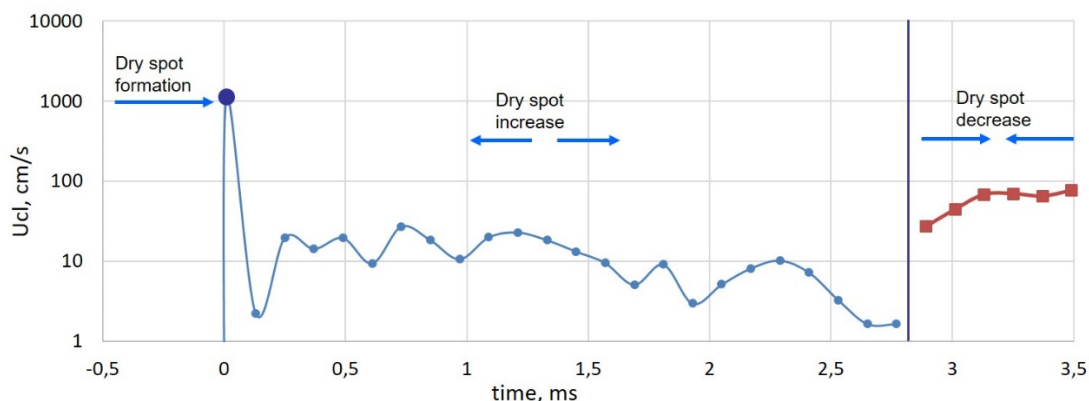


Рис. 49. Скорость линии контакта на этапах формирования, распространения и схлопывания. Все параметры потока такие же, как на Рис. 9.

Зависимость среднего диаметра сухого пятна от времени показана на **Рис. 50** на примере формирования 10 различных разрывов пленки жидкости. Видно, что начальный размер сухих пятен составляет около 100 мкм. По-видимому, этот размер примерно совпадает с предельным размером парового пузырька способным сформироваться в пленке жидкости. Этот факт косвенно подтверждается тем, что начальная толщина пленки жидкости также примерно равна 100 мкм. Видно, что не все сухие пятна имеют фазу роста: некоторые из них сразу замываются. Из **Рис. 50** видно, что скорость роста сухого пятна примерно постоянна и не зависит от диаметра разрыва. Кроме того, скорость роста сухого пятна в несколько раз ниже скорости его сокращения. Сухое пятно внезапно меняет направление своего движения, как бы натываясь на некое препятствие. Видно также, что время жизни сухих пятен находится в диапазоне от нескольких десятых долей миллисекунды до более 6 миллисекунд.

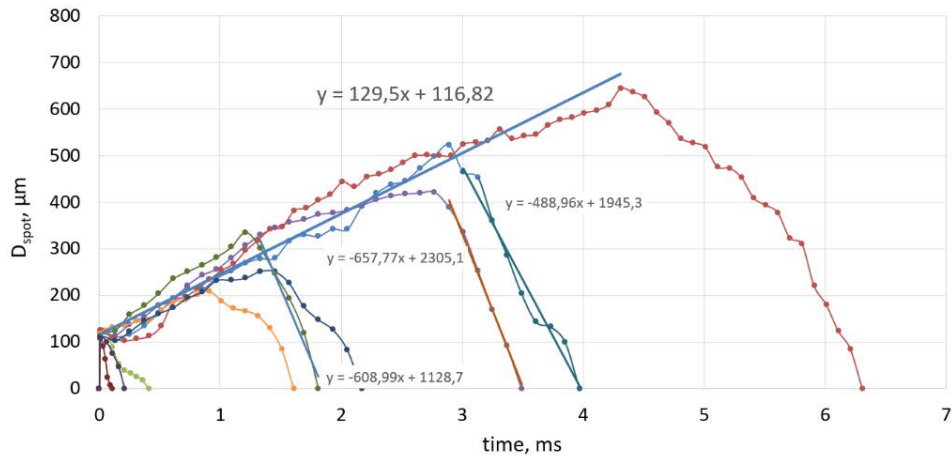


Рис. 50. Зависимость среднего диаметра сухого пятна от времени. Те же параметры эксперимента, что указаны на Рис. 9, [103].

Было проанализировано 156 последовательных сухих пятен, взятых из одного видео. Примерно 50% из них имеют время жизни менее 0,5 мс. На **Рис. 51а** представлена гистограмма времени жизни сухого пятна. Из 156 проанализированных сухих пятен только 6 были зафиксированы со временем жизни 10 мс и более, что составляет 4% от общего числа пятен. Время жизни 87 пятен попадает в интервал от 0 до 1 мс, что составляет 55%. Гистограмма для сухих пятен со временем жизни менее 1 мс представлена на **Рис. 51б**. Видно, что подавляющее большинство сухих пятен живут 100 микросекунд или меньше. Число таких пятен — 58, что составляет 37% от общего числа изученных пятен. Следует отметить, что временное разрешение видеосъемки составляет 10 микросекунд, что фактически не позволило точно проанализировать распределение сухих пятен в интервале от 0 до 100 микросекунд. Форма гистограммы на **Рис. 51б** позволяет предположить, что значительная часть пятен может иметь время жизни менее 10 мкс, но наше оборудование не позволило это доказать.

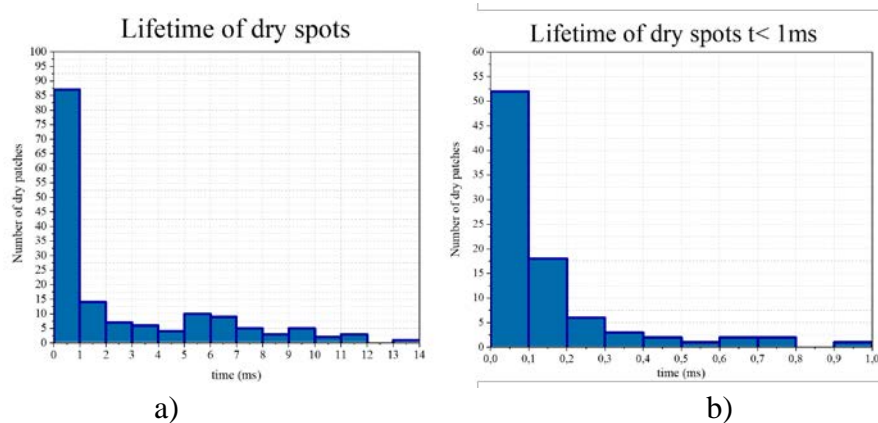


Рис. 51. Гистограмма срока жизни сухих пятен.

Была определена общая длина линии контакта в области сухих пятен на поверхности нагревателя. Типичная зависимость общей длины контактной линии от теплового потока показана на **Рис. 52**. Суммарная длина линии контакта монотонно увеличивается с ростом теплового потока и достигает максимального значения в докризисном режиме. В докризисном режиме, когда нагреватель покрыт тонкой пленкой жидкости с многочисленными микромасштабными сухими пятнами, интенсивность теплоотвода принимает максимальные значения, [103]. Следует отметить, что экспериментальные

данные, представленные на **Рис. 52** были измерены для разных серий опытов, где числа Рейнольдса для жидкости и газа значительно различались. Более того, скорость съемки и разрешение камеры тоже существенно отличались. В первой серии снимался весь нагреватель с разрешением 3872x2592 пикселей. Затем по отдельным кадрам рассчитывали длину линии контакта всех сухих пятен на поверхности нагревателя. Данные для серии 2 были получены из оценки количества сухих пятен, одновременно существующих в поле зрения на **Рис. 47** (частота съемки до 100000 кадров/сек). Зная характерный размер пятна и отношение площади всего нагревателя к полю зрения, оценивалась общая длина линии контакта. Предполагалось, что закономерности образования сухих пятен будут слабо меняться по длине и ширине нагревателя. В серии 3 длина линии контакта измерялась для всех сухих пятен в поле зрения 1086x1580 мкм². При этом частота съемки составляла 30000 кадров/сек. Аналогично, зная соотношение площадей всего нагревателя и поля зрения, оценивалось значение длины линии контакта всех сухих пятен на поверхности нагревателя. С этой точки зрения **Рис. 52** следует рассматривать как предварительный результат, но показывающий четкую тенденцию.

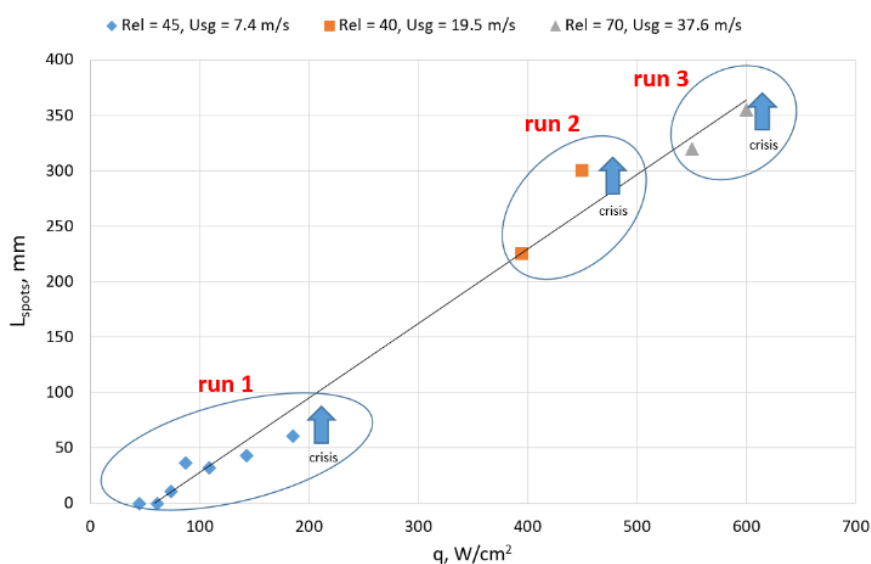


Рис. 52. Общая длина линии контакта на нагревателе размером 10x10 мм² в зависимости от теплового потока (вода).

На **Рис. 53** приведена зависимость критического теплового потока от расхода жидкости. Как параметр на рисунке приведена приведенная скорость газовой фазы. Величины достигнутого предельного теплового потока (1200 Вт/см²) и коэффициента теплоотдачи (350000 Вт/м²К) являются рекордными для пленочных течений. Эти величины измерены без учета потери тепла в атмосферу и распространение тепла в стальную пластину. Учет потери тепла согласно работам [74,116], приводит к теплому потоку 935 Вт/см² и коэффициенту теплоотдачи 273000 Вт/м²К. Данные величины также является рекордным по сравнению с многими другими техниками охлаждения электроники. На **Рис. 53** приведены также данные для кипения воды, полученные в том же канале. Кроме того, приведены данные для кипения в микроканалах при более существенном линейном размере чем в данной работе, [117,118]. Прямая линия показывает расчет критического теплового потока для полного испарения жидкости, протекающего по каналу. Видно, что все линии на **Рис. 53** имеют близкий наклон. Также видно, что именно предложенная нами технология охлаждения позволяет создать систему допускающую использовать почти полное испарение жидкости, а значит более эффективную систему с этой точки зрения.

Используя измеренный коэффициент теплоотдачи и зависимость (1) можно рассчитать эффективную средне интегральную толщину пленки на нагревательном элементе, которая бы смогла обеспечить такую интенсивность теплообмена. Величина такой толщины пленки составляет 2.5 мкм (коэффициент теплопроводности воды 0.683 Вт/мК взят при температуре 100°C). Как уже отмечалось выше, пленки такой толщины невозможно двигать в каналах с помощью газовой фазы с нужными нам расходами жидкости. Это еще раз подтверждает, что в созданных в экспериментах условиях в пленке жидкости действует новый физический механизм интенсификации теплообмена высокой эффективности. Приведенные выше рекордные параметры теплообмена были достигнуты при числе Рейнольдса воды $Re_l=193$ и приведенной скорости газа $U_{sg}=71$ м/с. При таких расходных параметрах истинную толщину пленки жидкости, протекающей по нагревательному элементу, можно оценить равной 25 - 50 мкм. Таким образом обнаруженное новое явление в физике жидкостей - самоорганизация течения в интенсивно нагреваемой тонкой пленке жидкости, движущейся под действием спутного потока газовой фазы с массовым образованием короткоживущих, малоразмерных разрывов слоя жидкости интенсифицирует теплообмен в данном случае в 10 - 20 раз.

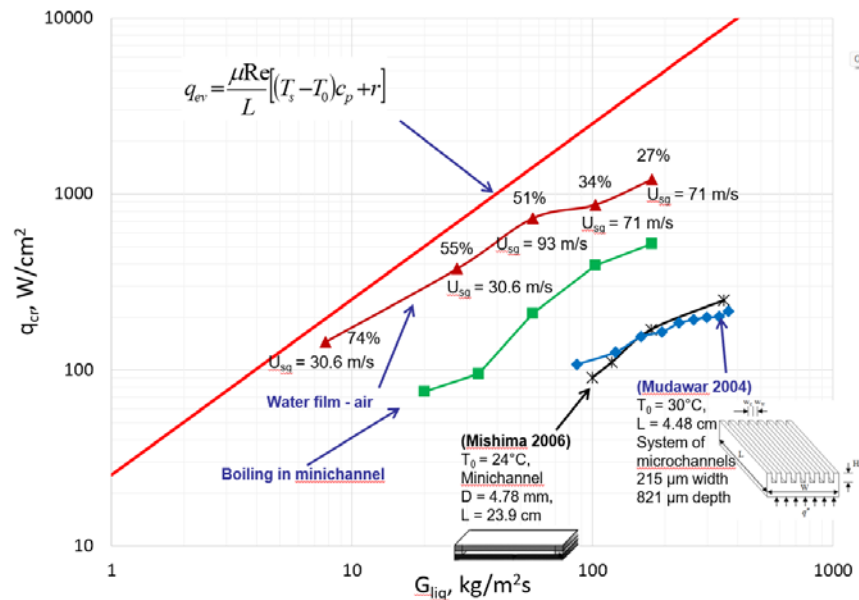


Рис. 53. Зависимость критического теплового потока от расхода жидкости, [110].

Таким образом установлено, что при движении тонкой пленки жидкости увлекаемой потоком парогазовой смеси в плоском миниканале, с увеличением теплового потока общая площадь сухих пятен на нагревателе увеличивается. Но когда температура нагревателя достигает определенного значения (около 100°C), общая площадь сухих пятен начинает уменьшаться и достигает минимального значения в докризисном режиме. Напротив, общая длина линии контакта газ – жидкость – твердое тело увеличивается с увеличением теплового потока и достигает максимального значения в докризисном режиме. Интенсивность теплоотвода принимает максимальные значения в докризисном режиме, когда нагреватель покрыт тонкой пленкой жидкости с многочисленными мелкими сухими пятнами. Сухие пятна имеют типичный размер порядка 100 микрон и время жизни около 1 мс. Сверхинтенсивное испарение в области линии контакта вокруг многочисленных динамических микромасштабных сухих пятен может объяснить достижение высоких

тепловых потоков и высоких коэффициентов теплоотдачи в пленках жидкости, увлекаемых сдвиговым потоком газовой фазы.

Обзор процессов тепло- масса- обмена в области линии контакта газ – жидкость – твердое тело выполнен в работе [119]. Процесс сверхинтенсивного испарения в области контактной линии обусловлен малой толщиной слоя жидкости в данном микрорегионе. В последние годы в Институте теплофизики СО РАН были получены убедительные данные о высокой интенсивности теплообмена в данной области [120,121,122]. Была измерена локальная плотность теплового потока в области линии контакта газ – жидкость – твердое тело вблизи испаряющихся капель и ручейков жидкости на тонкой нагреваемой фольге. Использовались IR сканнер и методы решения обратных задач. В работах [106,108,123] также выполненных в Институте теплофизики СО РАН были изучены закономерности перелета микрокапель жидкости через линию контакта. Траектория левитирующих микрокапель жидкости в этой области существенно менялась. Микрокапли высоко подпрыгивали и не могли существовать вблизи линии контакта, как показано на Рис. 22.

Можно предположить, что в ходе выполнения проекта ФЦП № 14.613.21.0011 обнаружена возможность реализации процесса теплообмена более эффективного чем кипение, который, в частности, позволяет создать системы охлаждения самой быстродействующей и теплонагруженной электроники. Кипение, как и обнаруженный нами новый процесс, включает формирование микромасштабных, динамических сухих пятен под пузырьком пара, [75], т.е. сверхинтенсивное испарение из областей линии контакта газ – жидкость – твердое тело, а также менисков жидкости, примыкающих к линии контакта. Данные процессы и обеспечивают высокую интенсивность теплообмена при кипении, что было детально исследовано в работе [88]. Однако процесс кипения имеет один весьма важный недостаток. В ходе передаче тепла жидкости формируется значительное количество пара, т.к. плотность пара примерно на три порядка меньше, чем у жидкости. При этом тепло от поверхности нагрева отводится в основном за счет поглощения теплоты фазового перехода жидкость – пар. Пузырьки, которые обеспечивают высокую интенсивность теплообмена и аккумулируют весь образующийся пар удаляются за счет достаточно медленных процессов – отрыва пузырьков и их всплытия, под действием сил гравитации и инерции в случае кипения в каналах. Данные процессы зависят не только от гравитации и перепада давления в каналах, но и от вязкости жидкости. Поэтому процесс кипения в большом объеме жидкости, например, достаточно трудно реализовать в условиях микрогравитации, т.е. в космосе, [130]. Результатом трудностей с отводом пара при кипении является кризис теплообмена или кризис оттеснения жидкости образующимся паром, который был детально исследован в пионерских работах С.С. Кутателадзе, [75].

Обнаруженный нами процесс сверхинтенсивного испарения из областей линии контакта газ – жидкость – твердое тело, а также менисков жидкости, примыкающих к линии контакта, не имеет упомянутых выше недостатков. Процесс испарения происходит не внутри пузырьков или других паровых образований (снарядов), а в тонкой пленке жидкости увлекаемой потоком газовой фазы, т.е. испарение идет непосредственно в паровое пространство. Образовавшийся при интенсивном испарении пар беспрепятственно уносится быстро движущейся газовой фазой. Необходимо отметить, что в расслоенном течении скорость движения газовой фазы примерно на 1-2 порядка выше, чем скорость движения пленки жидкости, [57]. Таким образом в обнаруженном нами процессе сверхинтенсивного испарения пар движется примерно на 1-2 порядка быстрее, чем пузырьки в жидкости, и тем сам обеспечивает интенсификацию теплообмена. Очевидно, что кризис оттеснения жидкости образующимся паром в обнаруженном нами процессе сверхинтенсивного испарения маловероятен. Жидкость может испаряться на нагревательном элементе до некоторых предельных значений средней толщины пленки, которую на основании данных Рис. 53, можно оценить в 2-3 микрона. Данный факт обеспечивает близкое к полному

испарению теплоносителя, что видно из данных Рис. 53, и обеспечивает высокую эффективность всей системы в целом.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Детальный анализ отчетов по пяти этапам, а также всех приложений включая статьи, доклады и патенты, показывает, что цель № 1: «Созданию научно-технического задела» выполнена в полном объеме так как на основании проведенного исследования впервые в данном проекте был предложен новый эффективный метод интенсификации теплообмена в пленочных системах, основанный на формировании в тонких пленках жидкости короткоживущих, динамических разрывов малого размера. Необходимо отметить, что цели 1 и 3 выполнялись в ходе всех пяти этапов проекта. Им было посвящено 28 пунктов плана-графика, в то время как цели 2 было посвящено всего 2 пункта на заключительном, пятом этапе работы.

2. До начала работ по проекту предложенный метод был неизвестен авторам проекта, т.к. о нем не сказано ни в заявке, ни в публикациях коллектива авторов. Таким образом этот выдающийся результат является прямым итогом работы по проекту. Задача, поставленная перед исполнителями проекта, отвести тепловые потоки до 1000 Вт/см^2 , не могла быть осуществлена за счет простого снижения толщины пленки жидкости, т.е. расхода жидкости. Авторам проекта удалось собрать необходимый объем новой информации, который позволил предложить принципиально новый метод интенсификации теплообмена. Такая идея была революционной для пленочных аппаратов, т.к. инженеры пытаются исключить появление сухих пятен в технологических устройствах, использующих пленки жидкости.

3. Была сформулирована и обоснована новая научная идея стенда, который бы позволил выполнять исследования процессов теплообмена в области линии контакта газ – жидкость – твердое тело, включая методику измерений и исследований. К настоящему времени на стенде, использующем идею плененного пузырька получен целый ряд прорывных результатов, которые опубликованы в высокорейтинговых журналах. В частности, измерена локальная плотность теплового потока в области линии контакта газ – жидкость – твердое тело, [100].

4. За время выполнения проекта опубликовано 23(21) статьи в жестко рецензируемых журналах, получено 5(5) патентов, сделано 22(14) выступления по материалам исследования на различных Российских и международных конференциях, поддержана и обеспечена защита 5(5) кандидатских диссертаций. В скобках указаны плановые показатели соглашения, подписанного с Министерством образования и науки. Видно, что по многим аспектам параметры технического задания были перевыполнены. Все публикации имеют ссылку на проект. Информация, опубликованная в статьях, докладах и патентах как правило не дублировалась в отчетах, а включалась в них как приложение. Для понимания объема и деталей выполненных работ необходим анализ всех опубликованных материалов.

5. В конкурсном отборе, объявленном Министерством образования и науки имелось требование: «Участник конкурса принимает на себя обязательства по выполнению требований по достижению значений показателей результативности предоставления субсидии при выполнении прикладных научных исследований (проекта), указанные в настоящем разделе конкурсной документации: Число патентов, не менее – 2. Число публикаций по результатам исследований и разработок в научных журналах, индексируемых в базе данных Scopus или в базе данных "Сеть науки" (WEB of Science), не менее – 2. Количество мероприятий по демонстрации и популяризации результатов и достижений науки, в которых приняла участие и представила результаты проекта организация - исполнитель проекта, не менее- 3. Число диссертаций на соискание ученых степеней, защищенных по результатам исследований и разработок – 0 (указывается

участником конкурса, в случае добровольного принятия на себя дополнительных обязательств).» Коллектив исполнителей проекта в ходе работ перевыполнил изначальные требования Министерства по статьям в жестко рецензируемых журналах в 12 раз, по полученным патентам в 2.5 раза, по сделанным выступлениям на различных Российских и международных конференциях более чем в 7 раз.

6. В общей сложности в выполнении работ по проекту ФЦП № 14.613.21.0011 участвовало 47 специалистов. 7 из них имели степень доктора наук, 15 степень кандидата наук. 26 специалистов являлись молодыми учеными, студентами или аспирантами, т.е были моложе 35 лет. 7 специалистов, в том числе 2 доктора наук было привлечено из других академических организаций и университетов. Очевидно, что работы по проекту были продуманы и хорошо скоординированы. К исследованиям были привлечены несколько ведущих специалистов страны по двухфазным системам. Работы велись на уровне выше мирового.

7. Цель № 2: «Разработка и создание экспериментального образца испарительной системы охлаждения теплонапряженных элементов с использованием однокомпонентных двухфазных потоков» была успешно выполнена. Испытание экспериментального образца показало, что он в состоянии отводить тепловой поток более 1000 Вт/см². В ходе дальнейших исследований с использованием данного стенда, было подтверждено, что образец способен отводить тепловой поток 1480 Вт/см² и соответствует всем требованиям соглашения с Минобрнауки. Стенд продолжает активно использоваться до настоящего времени для проведения исследований и подготовки научных кадров.

8. Экспериментальный образец может использовать как чистый пар, так и парогазовую смесь. Таким образом изначальные требования к экспериментальному образцу как к системе, работающей на однокомпонентной жидкости, были полностью выполнены. Но в итоге предложена более универсальная и надежная система по сравнению с системой, работающей только на чистом паре. Впервые была создана замкнутая по жидкости и по газовой фазе, микроканальная система, основанная на пленочном течении с почти полным испарением жидкости. Причем добавление неконденсируемого газа в систему используется для интенсификации теплообмена и повышения эффективности и эксплуатационных качеств системы в целом.

9. В ходе выполнения проекта предложена не одна, как это предполагалось в соглашении с Минобрнауки, а пять новых концепций систем охлаждения высокопроизводительных электронных компонент. Три из них были защищены патентами РФ в ходе выполнения проекта, [1,3,5]. На одну из пяти предложенных систем разработана детальная техническая документация, которая представлена в отчете по этапу – 5, [33]. На эту систему также получен патент уже после окончания проекта, [111]. Одна из систем создана в виде экспериментального образца, испытана и запатентована после окончания проекта, [112]. Одна из запатентованных систем, [5], была создана в рамках проекта РФФИ-19-19-00695 (2019-2021 гг.) и позволила отводить тепловой поток 1200 Вт/см² с учетом растечек тепла.

10. Цель № 3: «Развитие сотрудничества с иностранным партнером» была успешно выполнена. К совместным работам, были привлечены ведущие международные специалисты. Удалось достигнуть результатов по крайней мере по трем пунктам Мероприятия 2.1 ФЦП: 1) «значительное расширение географии международного сотрудничества научно – исследовательских организаций и университетов; 2) развитие новых перспективных направлений исследований и прикладных разработок за счет привлечения к совместным работам ведущих международных специалистов; 3) взаимовыгодный информационный и научно-технический обмен между странами-партнерами». Партнер вкладывал в совместный проект значительные средства, создавал новые стенды и рабочие участки, проводил исследования и предоставлял российской

стороне отчет на каждом этапе. Опубликовано три совместных статьи, сделано два совместных доклада на международных конференциях.

11. Выполнение проекта дало толчок исследованию ряда задач в течении последующих лет. Например, обнаружение остаточного слоя сверхтонкой пленки (5 - 10 микрон) перед разрывом слоя жидкости было более детально изучено в работах аспиранта Д.Ю. Кочкина, [104,124], и стало одним из основных результатов его диссертации [125]. Обнаружение того факта, что микрокапли конденсата могут левитировать не только над смоченной поверхностью нагревателя, но перетекают через линию контакта и левитируют над «сухой» поверхностью нагревателя, привело к целому циклу систематических, фундаментальных исследований по динамике микрокапель в окрестности линии контакта газ – жидкость – твердое тело. Результаты признаны мировым сообществом и опубликованы в целом ряде высокорейтинговых журналов, [105,108,123,126] в том числе в журнале «Annual Review of Fluid Mechanics», [106], который занимает первую строку в мировом рейтинге журналов по механике жидкости и газа.

12. Полученные при выполнении проекта научные и научно-технические результаты имеют важное практическое значение и особо могут быть востребованы в случае ускоренного развития электронной промышленности Российской Федерации. Предложенный метод интенсификации теплообмена на новых физических принципах в перспективе позволяет перейти к разработке сверхкомпактного энергетического оборудования с плотностью тепловыделения до 10 МВт/м². Полученный в проекте опыт в настоящее время используется для исследования кипения в мини- и микро- каналах, [127], а кроме того в пионерских исследованиях динамики двухфазного потока в плоских мезоканалах высотой 10 - 50 микрон, [128]. Знания, приобретенные при создании стенда использующего идею плененного пузырька, а также в ходе исследования процессов теплообмена в области линии контакта газ – жидкость – твердое тело, в настоящее время используются для анализа результатов международного эксперимента по кипению на одиночном центре нуклеации пузырьков в большом объёме жидкости, проведенном на Международной Космической Станции, [129,130,131].

13. Обнаружено новое, ранее неизвестное явление в физике жидкостей - факт самоорганизации течения в интенсивно нагреваемой тонкой пленке жидкости, движущейся под действием сдвигового потока газовой фазы с массовым образованием короткоживущих малоразмерных разрывов слоя жидкости. При этом условная средне-интегральная толщина пленки на нагревателе может составлять порядка 2-3 микрон. Следствием указанного процесса является формирование протяженных динамических линий контакта газ – жидкость – твердое тело, в которых происходит сверхинтенсивное испарение жидкости. Итогом обнаруженного нового явления является существенная интенсификация теплообмена. Есть основания полагать, что обнаружена возможность реализации процесса теплообмена более эффективного чем кипение, который, в частности, позволяет создать системы охлаждения самой быстродействующей и теплонагруженной электроники. Обнаруженный нами процесс сверхинтенсивного испарения из областей линии контакта газ – жидкость – твердое тело, а также менисков жидкости, примыкающих к линии контакта, происходит не внутри пузырьков или других паровых образований, а в тонкой пленке жидкости увлекаемой потоком газовой фазы, т.е. образовавшийся пар беспрепятственно уносится быстро движущейся газовой фазой, что также существенно интенсифицирует теплообмен. Продолжение исследований в данном направлении подтвердило сделанные в проекте выводы, [110]. Таким образом фактически сделано важное для технических приложений научное открытие.

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

B - ширина нагревательного элемента, м

$Bo = \rho g h^2 / \sigma$ - числа Бонда

c_p - изобарная теплоемкость жидкости, Дж/(кг К)

D - диаметр, м

g - ускорение свободного падения, м/с²

G – массовый расход жидкости, кг/с

h - толщина пленки жидкости (мм) или коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² К)

H, H_C - высота канала или валика жидкости, м

L - длина нагревателя, м

q - плотность теплового потока, Вт/см²

Q - количество тепла, Вт

r – теплота фазового перехода, Дж/кг, или радиус, м

R - радиус, м

$Re = \Gamma / \mu$ - число Рейнольдса пленки

S – площадь, м²

t – время, с

T - температура, °C

T_S - температура насыщения, °C

ΔT_{ev} – осредненная разность температур между поверхностью нагревательного элемента и температурой насыщения, К

U - средняя скорость движения пленки жидкости, м/с

U_{sg} - приведённая скорость газовой фазы, м/с

x - паросодержание при кипении в миниканалах

ГРЕЧЕСКИЕ СИМВОЛЫ

α - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² К)

Γ - удельный расход жидкости, кг/мс

Θ_a - наступающий краевой угол смачивания, градус

Θ_0 - равновесный краевой угол смачивания, градус

λ - коэффициент теплопроводности, Вт/мК

μ - коэффициент динамической вязкости, кг/мс

ν - коэффициент кинематической вязкости, м²/с.

ρ - плотность, кг/м³

σ - коэффициент поверхностного натяжения, Н/ м

τ - касательное напряжение, Н/м²

НИЖНИЕ ИНДЕКСЫ

0 - начальное значение величины

cl – линия контакта

cr – критическое значение величины

g, gas - величина для газовой фазы

l - жидкость (либо отсутствие индекса)

$spot$ – сухое пятно

sur – величина на поверхности пленки

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент № 2581522 на изобретение «Способ охлаждения электронного оборудования с конденсатором-плёнкоформирователем» от 15.12.2014 г., авторы: Кабов О.А., Зайцев Д.В., Марчук И.В., Быковская Е.Ф., патентообладатель: ИТ СО РАН.
2. Патент № 2614897 на изобретение «Конденсатор-сепаратор для двухкомпонентных двухфазных систем» от 28.12.2015, авторы: Кабов О.А., Люлин Ю.В., Марчук И.В., патентообладатель: ИТ СО РАН.
3. Патент № 2629516 на изобретение «Устройство для формирования микро-ручейкового течения жидкости в микро- и миниканалах (ВАРИАНТЫ)», 28.12.2015, авторы: Кабов О.А., Чеверда В., Марчук И.В., Быковская Е.Ф.
4. Патент № 2649164 на изобретение «Устройство для испарения жидкости» от 30.12.2016, авторы: Кабов О.А., Зайцев Д.В., Люлин Ю., Быковская Е.Ф.
5. Патент № 2649170 на изобретение «Способ охлаждения электронного оборудования с использованием комбинированных пленочных и капельных потоков» от 30.12.2016, авторы: Кабов О.А., Зайцев Д.В., Быковская Е.Ф.
6. Tomoki Hirokawa, Masahiko Murozono, Oleg Kabov, Haruhiko Ohta. EXPERIMENTS ON HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF SHEARDRIVEN LIQUID FILM IN CO-CURRENT GAS FLOW // *Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT)*, 5, 17 (2014).
7. Ю.В. Люлин, Д.В. Феоктистов, И.А. Афанасьев, Е.С. Чачило, О.А. Кабов, Г.В. Кузнецов. Измерение скорости испарения с локальной поверхности слоя жидкости под действием потока газа // *Письма в ЖТФ*, 2015, том 41, вып. 14.
8. Tomoki Hirokawa, Haruhiko Ohta, Oleg A. Kabov. EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON BEHAVIORS AND HEAT TRANSFER IN SHEAR-DRIVEN LIQUID FILM FLOW // *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*, 3 (3): 303–317 (2014).
9. А. А. Федорец, Л. А. Домбровский, Д. Н. Медведев. Влияние инфракрасного облучения на подавление конденсационного роста капель воды в левитирующем капельном кластере // *Письма в ЖЭТФ*, 2015, том 102, вып. 7, с. 507 – 510.
10. Кабова Ю. О., Кузнецов В. В., Кабов О.А., Течение и испарение неизотермической пленки жидкости, увлекаемой потоком пара в микроканале, при учете тепломассообмена на свободной границе раздела. *ДАН, Механика*, Т. 467, No 6, с. 1 - 5, 2016.
11. Aleksei Kreta . Convection flow study within a horizontal fluid layer under the action of gas flow // *MATEC Web of Conferences* 84, 00017 (2016).
12. Evgeniy Orlik, Elena Bykovskaya, Haruhiko Ohta. Study of heat transfer in the bubble meniscus with an array of temperature micro-sensors // *MATEC Web of Conferences* 84, 00027 (2016).
13. Ekaterina Rezanova. Numerical Investigation of the Liquid Film Flows with Evaporation at Thermocapillary Interface // *MATEC Web of Conferences* 84, 00032 (2016).
14. Alla Zakurdaeva. Numerical investigation of heat and mass transfer processes in a spherical layer of viscous incompressible liquid with free boundaries // *MATEC Web of Conferences* 84, 00045 (2016).
15. Ekaterina Rezanova. THE LIQUID FILM FLOW WITH EVAPORATION: NUMERICAL MODELLING // *MATEC Web of Conferences* 72, 01095 (2016).
16. Ekaterina Rezanova, Alla Zakurdaeva. THE INFLUENCE OF GAS DIFFUSION ON THE DYNAMICS OF A SPHERICAL LAYER OF VISCOUS INCOMPRESSIBLE LIQUID AND HEAT AND MASS TRANSFER IN IT // *MATEC Web of Conferences* 72, 01130 (2016). DOI: 10.1051/ mateconf/20167201130.
17. E. Rezanova. Heat transfer in a free liquid layer under action of additional tangential stresses: numerical modeling // *IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series* 754 (2016) 062008.
18. Aleksei Kreta, Yuriy Lyulin. CONVECTION STUDY BY PIV METHOD WITHIN HORIZONTAL LIQUID LAYER EVAPORATING INTO INERT GAS FLOW // *MATEC Web of Conferences* 72, 01053 (2016).

19. A Kreta, Y Lyulin, O Kabov. Effect of temperature on the convection flow within the liquid evaporation into the gas flow // IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series 754 (2016) 032011
20. Christiaan Ketelaar, Vladimir Ajaev. Electrostatic effects in the apparent contact line region under a vapor bubble // MATEC Web of Conferences 84, 00016 (2016).
21. Leonid Maltsev, Oleg Kabov. Criterion for dry spot development in isothermal liquid film on a horizontal substrate // MATEC Web of Conferences 84, 00024 (2016).
22. Мальцев Л.И., Поджаров Ю.С., Кабов О.А., Критерий роста сухих пятен в изотермических пленках жидкости на горизонтальной подложке. *Теплофизика и аэромеханика*, 2017, том 24, № 3, стр. 395-399.
23. Aleksei Kreta, Yuriy Lyulin. Thermographic investigation of surface temperature of the evaporating liquid layer under the action of gas flow // MATEC Web of Conferences 92 , 01048 (2017).
24. Ekaterina Rezanova. Numerical modelling of heat transfer in the layer of viscous incompressible liquid with free boundaries // EPJ Web of Conferences 159, 00047 (2017).
25. Vyacheslav Maksimov, Takhir Sharifulin, Larisa Zhidkova, Karapet Eloyan. Experimental study of moving liquid layer evaporation under gas flow into rectangular minichannel // EPJ Web of Conferences 159, 00033 (2017).
26. Aleksei Kreta. Infrared study of surface of the HFE-7100 liquid evaporating into gas flow // EPJ Web of Conferences 159, 00029 (2017).
27. Закурдаева А.В., Резанова Е.В. Численное исследование влияния давления внешней среды на динамику жидкой сферической оболочки // Омский научный вестник, №3(143) 2015.
28. O.N. Goncharova, E.V. Rezanova. Construction of a Mathematical Model of Flows in a Thin Liquid Layer on the Basis of the Classical Convection Equations and Generalized Conditions on an Interface // МАТЕМАТИКА.
29. ОТЧЕТ О ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО - ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ «Создание технологии охлаждения теплонапряженных элементов с использованием однокомпонентных двухфазных потоков». Шифр 2014-14-585-0011-004, Соглашение от 27.08.2014 г. № 14.613.21.0011 в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса на 2014-2020 годы», Промежуточный, Этап № 1 (27.08.2014-31.12.2014): «Выбор направления исследований. Теоретические и экспериментальные исследования. Создание установок». УДК 536.423, № Госрегистрации 114120950010, 2014 г.
30. ОТЧЕТ О ПРИКЛАДНЫХ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ «Создание технологии охлаждения теплонапряженных элементов с использованием однокомпонентных двухфазных потоков». Шифр 2014-14-585-0011-004, Соглашение от 27.08.2014 г. № 14.613.21.0011 в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса на 2014-2020 годы», Дополнительное соглашение № 1 от 25 июня 2015 г. Промежуточный, Этап № 2 (01.01.2015-30.06.2015): «Теоретические и экспериментальные исследования». № Госрегистрации 114120950010, 2015 г.
31. ОТЧЕТ О ПРИКЛАДНЫХ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ «Создание технологии охлаждения теплонапряженных элементов с использованием однокомпонентных двухфазных потоков». Шифр 2014-14-585-0011-004, Соглашение от 27.08.2014 г. № 14.613.21.0011 в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса на 2014-2020 годы», Дополнительное соглашение № 1 от 25 июня 2015 г. Промежуточный, Этап № 3 (01.07.2015-31.12.2015): «Теоретические и экспериментальные исследования». № Госрегистрации 114120950010, 2015 г.

32. ОТЧЕТ О ПРИКЛАДНЫХ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ «Создание технологии охлаждения теплонапряженных элементов с использованием однокомпонентных двухфазных потоков». Шифр 2014-14-585-0011-004, Соглашение от 27.08.2014 г. № 14.613.21.0011 в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса на 2014-2020 годы», Дополнительное соглашение № 1 от 25 июня 2015 г. и № 2 от 10 августа 2016 г. Промежуточный, Этап № 4 (01.01.2016-30.06.2016) : «Сопоставление расчетных и опытных данных. Обобщение и оценка полученных результатов». № Госрегистрации 114120950010, 2016 г.
33. ОТЧЕТ О ПРИКЛАДНЫХ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ «Создание технологии охлаждения теплонапряженных элементов с использованием однокомпонентных двухфазных потоков». Шифр 2014-14-585-0011-004, Соглашение от 27.08.2014 г. № 14.613.21.0011 в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса на 2014-2020 годы», Дополнительное соглашение № 1 от 25 июня 2015 г. и № 2 от 10 августа 2016 г. Заключительный, Этап № 5 (01.07.2016-31.12.2016) : «Создание образцов. Обобщение и оценка результатов исследований». № Госрегистрации 114120950010, 2016 г.
34. Tomoki Hirokawa, Masahiko Murozono, Oleg A. Kabov, Yasuhisa Shinmoto and Haruhiko Ohta, Experimental study on heat transfer characteristics of shear-driven liquid film flow in a rectangular duct, 10th Int. Conf. on Two-Phase Systems for Ground and Space Applications, Kyoto, Japan, September 14-18, 2015.
35. Goncharova O., Lyulin Yu., Rezanova E., Kabov O. Convective fluid flows with evaporation: analytical, numerical and experimental investigations // The 9th International Conference on Two-phase systems for ground and space applications. Baltimor, Meryland, MD USA, September 22-26, 2014, p. 79 – 80.
36. Кабова Ю.О., Кабов О.А. Испарение неизотермической пленки жидкости, движущейся в микроканале при спутном потоке газа // Шестая российская национальная конференция по теплообмену. Москва, Россия, 27-31 октября 2014 г., стр. 135 – 136.
37. Зайцев Д.В., Кириченко Д.П., Кабов О.А. Влияние смачиваемости подложки на разрыв локально-нагреваемой пленки жидкости // XXXI Сибирский теплофизический семинар, посвященный 100-летию со дня рождения С.С. Кутателадзе, Новосибирск, Россия, 17-19 ноября, 2014, стр. 182.
38. Кабова Ю.О., Кузнецов В.В., Кабов О.А. Влияние гравитации на испарение и деформации низкотермической пленки жидкости, движущейся под действием спутного потока газа в микроканале // XXXI Сибирский теплофизический семинар, посвященный 100-летию со дня рождения С.С. Кутателадзе, Новосибирск, Россия, 17-19 ноября, 2014, стр. 183.
39. Зайцев Д.В. Создание технологии охлаждения теплоэнергетических элементов с использованием однокомпонентных двухфазных потоков // Научно-практическая конференция «Реализация прикладных научных исследований и экспериментальных разработок по приоритетному направлению «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика» в 2014 году в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы»». Москва, Россия, этап 1, 27-28 ноября 2014.
40. Закурдаева А.В., Резанова Е.В. Численное исследование процессов тепломассопереноса в жидкой сферической оболочке со свободными границами // XIX Зимняя школа по механике сплошных сред. Пермь, 2015, стр. 119.
41. Гончарова О.Н., Резанова Е.В. Математическое моделирование двухслойных конвективных течений с испарением на границе раздела для жидкостей с нормальным и аномальным термокапиллярным эффектом // XIX Зимняя школа по механике сплошных сред. Пермь, 2015, стр. 86.

42. Закурдаева А.В. Влияние внешних тепловых условий на динамику сферической оболочки вязкой несжимаемой жидкости // Материалы 53-й международной научной студенческой конференции МНСК-2015, Новосибирск, Россия, 11-17 апреля, 2015, стр. стр. 77.
43. Кабов О.А. Неизотермические, расслоенные течения газа и жидкости с испарением в плоских микро- и мини каналах. Теория и эксперимент // XX Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках. Г. Звенигород, Московская обл., 25-29 мая 2015.
44. Kabov O.A., Kabova Yu. O., Zaitsev D.V., Cheverda V.C. Non-Isothermal Separated Gas-Liquid Flows in Mini and Micro Channels: Theory and Experiment // the ELGRA Symposium and General Assembly, Corfu, Greece, 29 Sept – 1 Oct 2015.
45. Кабов О.А. Создание технологии охлаждения теплоэнергетических элементов с использованием однокомпонентных двухфазных потоков // Научно-практическая конференция «Реализация прикладных научных исследований и экспериментальных разработок по приоритетному направлению «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика» в 2014 году в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы»». Москва, Россия, этап 3, 2015.
46. Зайцев Д.В., Кириченко Д.П., Кабов О.А. Разрыв горизонтального слоя жидкости при локальном нагреве подложки // III Международный молодежный форум «Интеллектуальные энергосистемы», Томск, Россия, 28 сентября – 2 октября, 2015.
47. Orlik E. Zaitsev D., Ohta H., Kabov O.A. Study of heat transfer in the bubble meniscus with an array of temperature micro-sensor // International Symposium and School of Young Scientists Interfacial Phenomena and Heat Transfer, Novosibirsk, Russia, 2-4 March, 2016
48. Ajaev V.S., Gatapova E.Ya., Kabov O.A., Kabova Yu.O., Lyulin Y.V., Marchuk I.V., Zaitsev D.V., KIT, Dry spots spreading and non-equilibrium effects in thin liquid layer // MAP BOILING. Kick-off meeting. ESTEC, Noordwijk (The Netherlands), 02-03 February 2016.
49. Ketelaar Ch., Ajaev V. Electrostatic effects in the apparent contact line region under a vapor bubble // Invited Lecture, 9 June 2016, Aix-Marseille University, Marseille, France.
50. Крета А.С., Люлин Ю.В. Исследование структуры конвективных течений в горизонтальном слое жидкости, испаряющемся под действием потока газа. // Международная молодежная научная конференция «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования». Томск, Россия, 19-21 апреля 2016.
51. Кочкин Д.Ю., Зайцев Д.В. Исследование термокапиллярного разрыва локально нагреваемого горизонтального слоя жидкости // XIV Всероссийская школа-конференция молодых ученых с международным участием Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики, Новосибирск, Россия, 22-25 ноября 2016, стр. 123 - 124.
52. Крета А.С., Исследование конвективных структур в слое жидкости испаряющегося под действием при различных температурах системы «жидкость – газ». // VII Всероссийская научная конференция с международным участием, Томск, 26-28 октября 2016.
53. Резанова Е.В. Численное моделирование процессов теплопереноса в слое вязкой несжимаемой жидкости с движущимися свободными границами // XIV Всероссийская школа-конференция молодых ученых с международным участием Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики, Новосибирск, Россия, 22-25 ноября 2016, стр. 192.
54. ЗАЯВКА НА УЧАСТИЕ В КОНКУРСЕ «Создание технологии охлаждения теплонапряженных элементов с использованием однокомпонентных двухфазных потоков», Министерство образования и науки Российской Федерации, Шифр лота 2014-14-585-0011, Уникальный системный номер 2014-14-585-0011-1417, 24.06.2014.

55. Крета А.С., Люлин Ю.В., Кабов О.А. Конвективные течения в слое жидкости в условиях воздействия потока газа. Всероссийская научная конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика» с элементами школы молодых ученых. Ялта, 19-25 сентября, 2016.
56. Резанова Е.В. Процессы переноса тепла в свободном слое вязкой несжимаемой жидкости: численное моделирование. Всероссийская научная конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика» с элементами школы молодых ученых. Ялта, 19-25 сентября, 2016.
57. Кабов О.А., Марчук И.В., Кузнецов В.В., Пухначев В.В., Чиннов Е.А. Регулярные структуры при термокапиллярной конвекции в движущемся тонком слое жидкости. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2001. - № 9. С 84-90.
58. Гатапова Е.Я., Кабов О.А., Марчук И.В. Термокапиллярная деформация локально нагреваемой пленки жидкости, движущейся под действием газового потока. Письма в ЖТФ. – 2004. – Т. 30. - Вып. 10, с. 46-52.
59. Gatapova E.Ya., Marchuk I.V., Kabov O.A., Heat Transfer and Two-Dimensional Deformations in Locally Heated Liquid Film with Co-Current Gas Flow, *J. of Thermal Science and Engineering, The Heat Transfer Society of Japan*, Vol. 12, No. 1, pp. 27-34 (2004).
60. Gatapova E. Ya., Kabov O. A., Kuznetsov V. V. and Legros J.-C., Evaporating shear-driven liquid film flow in minichannel with local heat source, *J. Eng. Thermophys*, Vol. 13, No 2, pp. 179-197, 2004.
61. Gatapova E.Ya., Kabov O.A., Slip Effect on Shear-Driven Evaporating Liquid Film in Microchannel, *Microgravity sci. technol.*, XIX-3/4, p. 132-134, 2007
62. Kabov O.A., Lyulin Yu.V., Marchuk I.V. and Zaitsev D.V., Locally heated shear-driven liquid films in microchannels and minichannels, *Int. Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 28, p. 103-112, 2007
63. Kabova Yu.O., Kuznetsov V.V., Kabov O.A., Gravity effect on the locally heated liquid film driven by gas flow in an inclined minichannel, *Microgravity sci. technol.*, Vol. 20, issue 3-4, p. 187-192, 2008
64. Gatapova E.Ya. and Kabov O.A., Shear-driven flows of locally heated liquid films, *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, No. 19-20, p. 4797-4810, 2008
65. Зайцев Д.В., Родионов Д.А., Кабов О.А., Критический тепловой поток в локально нагреваемой пленке жидкости, движущейся под действием потока газа в мини-канале. Письма в ЖТФ. – 2009. – Т. 35. - Вып 14. – С. 88- 94.
66. Kabova Yu.O., Kuznetsov V.V. and Kabov O.A., The effect of gravity and shear stress on a liquid film driven in a horizontal minichannel at local heating, *Microgravity sci. technol.*, Vol. 21, Suppl. 1, p. S145-S152, 2009.
67. Kabov O.A., Interfacial Thermal Fluid Phenomena in Thin Liquid Films, *Intern. Journal of Emerging Multidisciplinary Fluid Sciences*, Vol. 2, No. 2-3. p. 87–121, 2010
68. Kabov O.A., Zaitsev D.V., Cheverda V.V. and Bar-Cohen A., Evaporation and flow dynamics of thin, shear-driven liquid films, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 35, issue 5, pp. 825-831, 2011.
69. Kabova Yu.O., Kuznetsov V.V., Kabov O.A., Shear-driven flow of locally heated viscous liquid film in a minichannel, *Microgravity sci. technol.*, Vol. 23, Suppl. 1, p. S105- S112, 2011. DOI: 10.1007/s12217-011-9277-2
70. Liu R. and Kabov O.A., Instabilities in a horizontal liquid layer in cocurrent gas flow with an evaporating interface, *Physical Review E-Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics* 85(6), art. No 066305, 2012.
71. Кабов О.А., Кабова Ю.О., Кузнецов В.В., Испарение неизотермической пленки жидкости в микроканале при спутном потоке газа, ДАН, Механика, Т. 446, No 5, с. 522-526, 2012.

72. Kabova Yu.O., Kuznetsov V.V., Kabov O.A., Gambaryan-Roisman T. and Stephan P., Evaporation of a thin viscous liquid film sheared by gas in a microchannel, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 68, pp. 527-541, 2014.
73. Kabov O.A., Kuznetsov V.V., and Legros J-C., Heat transfer and film dynamic in shear-driven liquid film cooling system of microelectronic equipment, Second Int. Conference on Microchannels and Minichannels, Ed. S.G. Kandlikar, June 17-19, 2004, Rochester, NY, ASME, New York, pp. 687-694, 2004.
74. Dmitry V Zaitsev, Valentin V Belosludtsev, Egor M Tkachenko, Fang Ye, Hang Guo, Vyacheslav V Cheverda, Oleg A Kabov Shear-driven liquid films in a channel under intense local heating: methodology and critical heat flux results. *Interfacial Phenomena and Heat Transfer* 10 (2), 2022, pp. 53-65.
75. Кутателадзе С.С., 1979, Основы теории теплообмена. - 5-е изд., перераб. и дополн. - М.: Атомиздат.- 415 с.
76. Y. Yang, Y. Fujita, Flow boiling heat transfer and flow pattern in rectangular channel of mini-gap, in: Second International Conference on Microchannels and Minichannels (ICMM2004-2383), New York, USA, 2004.
77. M. Cortina-Diaz, J. Schmidt, Flow boiling heat transfer of n-hexane and n-octane in a minichannel, in: Proceedings of the 13th International Heat Transfer Conference, Sydney, Australia, 2006.
78. A. Bar-Cohen, E. Rahim, Modeling and prediction of two-phase microgap channel heat transfer characteristics, *Heat Transfer Eng.* 30 (8) (2009) 601.
79. Kabov O.A. and Zaitsev D.V., Effect of shear stress and gravity on rupture of a locally heated liquid film, *Multiphase Science and Technology*, Vol. 21, Issue 3, pp. 249-266, 2009.
80. Чеверда В.В., Кабов О.А. Кризис теплообмена в локально нагреваемой плёнке жидкости движимой потоком газа в миниканале // Шестая Российская национальная конференция по теплообмену (РНКТ-6) (Москва, 27-31 октября 2014 г.). – М., 2014. – С. 289.
81. Чеверда В.В. Экспериментальное исследование теплообмена и деформации в пленке и ручейке жидкости FC-72 при течении в миниканале под действием потока газа азота. Диссертация на соискании ученой степени кандидата физико-математических наук. 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника. 234 с. Новосибирск – 2015.
82. Ajaev V. S. and Homsy G. M. Steady Vapor Bubbles in Rectangular Microchannels, *J. of Coll. and Interf. Sci.* (2001) 240, 259–271.
83. Plawsky J. L., Fedorov A. G., Garimella S. V., Ma H. B., Maroo S. C., L. Chen & Y. Nam, Nano- and Microstructures for Thin-Film Evaporation - A Review, *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering*, 18:3, pp. 251-269, 2014.
84. Stephan, P.C., Busse, C.A.: Analysis of the heat transfer coefficient of grooved heat pipe evaporator walls. *Int. J. Heat Mass. Tran.* 35, 383–391 (1992)
85. Stephan, P., Brandt, C.: Advanced capillary structures for high performance heat pipes. *Heat Transf. Eng.* 25, 78–85 (2004)
86. Potash, M., Wayner, P.C., Jr.: Evaporation from a two-dimensional extended meniscus. *Int. J. Heat Mass. Tran.* 15, 1851–1863 (1972)
87. Panchamgam, S.S., Chatterjee, A., Plawsky, J.L., Wayner, P.C., Jr.: Comprehensive experimental and theoretical study of fluid flow and heat transfer in a microscopic evaporating meniscus in a miniature heat exchanger. *Int. J. Heat Mass. Tran.* 51, 53685379 (2008)
88. Schweizer, N., Stephan, P.: Experimental study of bubble behavior and local heat flux in pool boiling under variable gravity conditions. *Multiph. Sci. Technol.* 21, 329–350 (2009)
89. Carlomagno, G.M., De Luca, L.: Infrared thermography in heat transfer. *Handbook of Flow Visualization*, Ed. Hemisphere, London, Chapter 32, 531–553 (1989)
90. Astarita, T., Cardone, G., Carlomagno, G.M., Meola, C.: A survey on infrared thermography for convective heat transfer measurements. *Opt. Laser Technol.* 32, 593–610 (2000)

91. Carlomagno, G.M., Cardone, G.: Infrared thermography for convective heat transfer measurements. *Exp. Fluids* 49, 1187–1218 (2010)
92. Eloyan K.S., Zaitsev D.V. Thin film evaporative cooling system for high heat flux applications // IOP Publishing IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1105 (2018) 012084.
93. Karapet Eloyan, Alexey Kreta and Egor Tkachenko, Two-phase cooling system with controlled pulsations, *EPJ Web of Conferences*, 2019, Vol. 196, paper No. 00021.
94. Eloyan K S and Kreta A S Influence of controlled pulsations of a liquid flow on the surface temperature of heater with a high heat flux // *TPH-2019, Journal of Physics: Conference Series* 1359 (2019) 012028.
95. Karapet S. Eloyan, Alexey S. Kreta Influence of Controlled Pulsations on the Heat Transfer in the Two-phase System with a Local Heat Source // *AIP Conference Proceedings* 2135, 020021 (2019).
96. Элоян К.С., Крета А.С., Влияние контролируемых пульсаций на теплообмен в двухфазной системе в миниканале прямоугольного сечения, IV Всероссийская научная конференция с элементами школы молодых ученых «Теплофизика и физическая гидродинамика». Ялта, Республика Крым, отель «Ливадийский», 15-22 сентября 2019, Тезисы докладов, с. 95.
97. Элоян К.С., Теплообмен и гидродинамика в пленочных, высоконапряженных по тепловым потокам системах охлаждения микроэлектроники. Научно- квалификационная работа по итогам обучения в аспирантуре, 2020. Научный руководитель – д.ф.-м.н. Кабов О.А.
98. Чеверда В. В., Федорец А. А., Марчук И. В., Кабов О. А. Термокапиллярная деформация слоя воды при локальном нагреве, *Теплофизика и аэромеханика*. – 2016. - Т. 23, № 2. С. 241–246.
99. D.Y. Kochkin, A.S. Mungalov and I.A. Derevyannikov, Dynamics of bubble growth under a heated substrate, *Journal of Physics. Conference Series*, 2021, Vol. 2119, Номер статьи 012134, pp. 1-5.
100. Сибиряков Н.Е., Кочкин Д.Ю., Кабов О.А., Карчевский А.Л. Определение плотности теплового потока в области контактной линии при испарении жидкости в пузырь // *Сибирский журнал индустриальной математики*. 2023, Т. 26, № 3, с. 1-13.
101. Mungalov A.S., Derevyannikov I.A., Kochkin D.Yu., Kabov O.A., Marchuk I.V., Zhengyuan Luo, Chengzhen Sun, Bofeng Bai, Dynamics of vapor-gas bubbles and dry spots under the downward-facing substrate // *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*, 2023. (принято в печать).
102. Ajaev Vladimir S., Gatapova Elizaveta Ya., Kabov Oleg A. Stability and break-up of thin liquid films on patterned and structured surfaces // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2016. - Vol. 228, February. - P. 92-104.
103. Oleg Kabov, Dmitry Zaitsev, Egor Tkachenko, Interfacial thermal fluid phenomena in shear-driven thin liquid films, *Proceedings of the Intern. Heat Trasfer Conference, ИИТС-16, August 10-15, Beijing, 2018, paper 24435, pp. 1061-1067.*
104. D.V. Zaitsev, D.Y. Kochkin, O.A. Kabov, Dynamics of liquid film rupture under local heating // *International Journal of Heat and Mass Transfer* 184, 122376, 2022.
105. V.S. Ajaev, O.A. Kabov, Evaporation and fluid flow near the boundary of a stationary dry patch // *Physical Review E* 105 (6), 065111, 2022
106. Vladimir S. Ajaev and Oleg A. Kabov Levitation and Self-Organization of Droplets // *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2021, Vol. 53: 203-225.
107. Karchevsky A.L., Cheverda V.V., Marchuk I.V., Ponomarenko T.G., Sulyaeva V.S., Kabov O.A. Heat flux density evaluation in the region of contact line of drop on a sapphire surface using infrared thermography measurements. // *Microgravity Sci. Technol.* 33, 53 (2021).
108. O.A. Kabov, D.V. Zaitsev, D.P. Kirichenko, and V.S. Ajaev. Interaction of Levitating Microdroplets with Moist Air Flow in the Contact Line Region, *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering*, 2017, Vol. 21, No. 2, pp. 60-69.

109. Кабов О.А. Предельные тепловые потоки в системах охлаждения электронного оборудования // «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках», 24–28 мая 2021 года, Екатеринбург. *Приглашенная лекция.*
110. Кабов О.А. «Испарительная левитация и самоорганизация микрокапель в окрестности жидких и твердых поверхностей» VI Всероссийская научная конференция с элементами школы молодых учёных Севастополь, Республика Крым, Севастопольский государственный университет 22-29 августа 2021 г., *пленарная лекция.*
111. Кабов О.А., Зайцев Д.В., Быковская Е.Ф. Двухфазная однокомпонентная система охлаждения. Патент № 2807853 от 21 ноября 2023 г. Приоритет изобретения от 07 июля 2023.
112. Кабов О.А., Зайцев Д.В., Быковская Е.Ф. Система охлаждения электронного оборудования со смесью пара и неконденсируемого газа. Патент № 2816279 от 28 марта 2024. Приоритет изобретения от 05 октября 2023.
113. Kawanami O., Ohta H., Kabov O., Sakata Y., Kotani Y., Asada Y., Nagayasu T., Shinmoto Y., Chikov S., Queeckers P. and Straub J., Heat Transfer and Bubble Behaviors in Microgravity Pool Boiling in ESA Parabolic Flight Experiment, *Microgravity sci. technol.*, Vol. 21, Suppl. 1, p. S3-S8, 2009.
114. Kubota, C., Kawanami, O., Asada, Y., Wada, Y., Nagayasu, T., Shinmoto, Y., Ohta, H., Kabov, O., Queeckers, P., Chikov, S., and Straub, J. Experiment on nucleate pool boiling in microgravity by using transparent heating surface-Analysis of surface heat transfer coefficients, *Journal of Physics: Conference Series* 327 (1), art. No. 012040, pp. 1-8, 2011.
115. Vladimir S. Ajaev, Sergey V. Alekseenko, Elena F. Bykovskaya, Oleg A. Kabov, Haruhiko Ohta, Dmitry V. Zaitsev, Book of abstracts, International Symposium and School of Young Scientists “Interfacial Phenomena and Heat Transfer”, Novosibirsk, Russia, 2-4 of March 2016.
116. Tkachenko E.M. and Zaitsev D.V. Taking into account heat losses in experiments with locally heated shear-driving liquid films in a mini-channel, *AIP Conference Proceedings*, vol. 2135, 020057, 2019.
117. Zhang W., Hibiki T., Mishima K., Mi Y., *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, p. 1058, 2006.
118. Mudawar I., Qu W., *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, p. 2045, 2004.
119. Ajaev Vladimir S., Kabov Oleg. Heat and mass transfer near contact lines on heated surfaces // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2017. - Vol. 108, pp. 918-932.
120. Igor Marchuk, Andrey Karchevsky, Anton Surtaev, and Oleg A. Kabov, Heat flux at the surface of metal foil heater under evaporating sessile droplets // *International Journal of Aerospace Engineering*. Vol. 2015 (2015), Article ID 391036, p. 1-5.
121. Karchevsky A.L., Marchuk I.V., and Kabov O.A. Calculation of the heat flux near the liquid-gas-solid contact line // *Applied Mathematical Modeling*. – 2016. – Vol. 40. - pp. 1029–1037.
122. Чеверда В. В., Марчук И. В., Карчевский А. Л., Орлик Е. В., Кабов О. А. Экспериментальное исследование теплообмена в стекающем по наклонной фольге ручейке // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2016. - Т. 23, № 3. – С. 431–436.
123. Zaitsev Dmitry V., Kirichenko Dmitry P., Ajaev Vladimir S., Kabov, Oleg A. Levitation and Self-Organization of Liquid Microdroplets over Dry Heated Substrates. *Physical Review Letters*, Vol. 119, No. 9, paper No. 094503, 2017.
124. Kochkin, D.Y., Zaitsev, D.V., Kabov, O.A. Thermocapillary rupture and contact line dynamics in the heated liquid layers // *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*. - 2020, 8 (1), pp. 1-9.
125. Кочкин Д.Ю. Динамика термокапиллярного разрыва тонкого слоя жидкости на горизонтальной поверхности с локальным источником тепла. АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискании ученой степени кандидата физико-математических наук. 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника. 26 с. Новосибирск – 2023.

126. J Davis, O Kabov, D Zaitsev, V Ajaev, Heat transfer, vapor diffusion, and Stefan flow around levitating droplets near a heated liquid surface // *Bulletin of the American Physical Society*, 2022.
127. Dmitry V. Zaitsev, Valentin V. Belosludtsev, Gherhardt Ribatski, Oleg A. Kabov. The effect of channel height on flow boiling heat transfer and chf in flat minichannels with local heating, *Interfacial Phenomena and Heat Transfer* 10 (3), pp. 1-14, 2022.
128. Dementyev Yuriy A., Evgeniy A. Chinnov, Fedor V. Ronshin Anatoliy A. Evstrapov, Victor S. Gusev, Sergey S. Karpich, Oleg A. Kabov, An experimental investigation of two-phase gas-liquid flow patterns in extremely small wide gap microchannel, *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*. Volume 11, Issue 2, pp. 123-133, 2023.
129. O Oikonomidou, S Evgenidis, C Argyropoulos, X Zabulis, P Karamaounas, MQ Raza, J Sebilliau, F Ronshin, M Chinaud, AI Garivalis, M Kostoglou, A Sielaff, M Schinnerl, P Stephan, C Colin, L Tadrisk, O Kabov, P Di Marco, T Karapantsios Bubble growth analysis during subcooled boiling experiments on-board the international space station: Benchmark image analysis, *Advances in Colloid and Interface Science*, V 308, 102751, 2022
130. Sielaff A., Mangini D., Kabov O., Raza M.Q., Garivalis A.I., Zupančič M., Dehaeck S., Evgenidis S., Jacobsi C., Van Hoof D., Oikonomidou O., Zabulisj X., Karamaounasj P., Bender A., Ronshin F., Schinnerl M., Sebilliau J., Colin C., Marco P. Di, Karapantsios T., Golobič I., Rednikov A., Colinet P., Stephan P., Tadrisk L. The Multiscale Boiling Investigation on-board the International Space Station: An overview, *Applied Thermal Engineering*, Volume 205, no. 117932. 2022.
131. Ronshin, F., Kabov, O., Rednikov, A. & Tadrisk, L. Preliminary physical analysis of a single-bubble pool-boiling experiment in space: Effect of subcooling and possible non-condensable residuals. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 150, 107188. 2024.

**СТАРШИЙ НАУЧНЫЙ СОТРУДНИК
ИНСТИТУТА ТЕПЛОФИЗИКИ ИМ. С.С. КУТАТЕЛАДЗЕ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК,
КАНДИДАТ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК
ДМИТРИЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ ЗАЙЦЕВ**

**РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА
ИСПАРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЕПЛОНАПРЯЖЕННЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОДНОКОМПОНЕНТНЫХ ДВУХФАЗНЫХ
ПОТОКОВ**

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
Лаврентьева, 1, Новосибирск, Россия*

1. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЗАДЕЛ ДО НАЧАЛА ПРОЕКТА

После опубликования идеи [1] использования испарения тонкой пленки жидкости увлекаемой потоком пара или газа в канале, и до начала работ по Соглашению с Минобрнауки № 14.613.21.0011 от 27.08.2014 г., выполняемого в Лаборатории интенсификации процессов теплообмена ИТ СО РАН в 2014-2016 годах, для отвода высоких тепловых потоков и, в частности, охлаждения электронного оборудования с высоким тепловыделением, проводились исследования только с использованием газа, когда жидкостный контур замкнут, а газовый контур разомкнут, Рис. 1. Максимальный критический тепловой поток, который удалось отвести с использованием такой системы, составлял 410 Вт/см^2 , Рис. 2 [2].

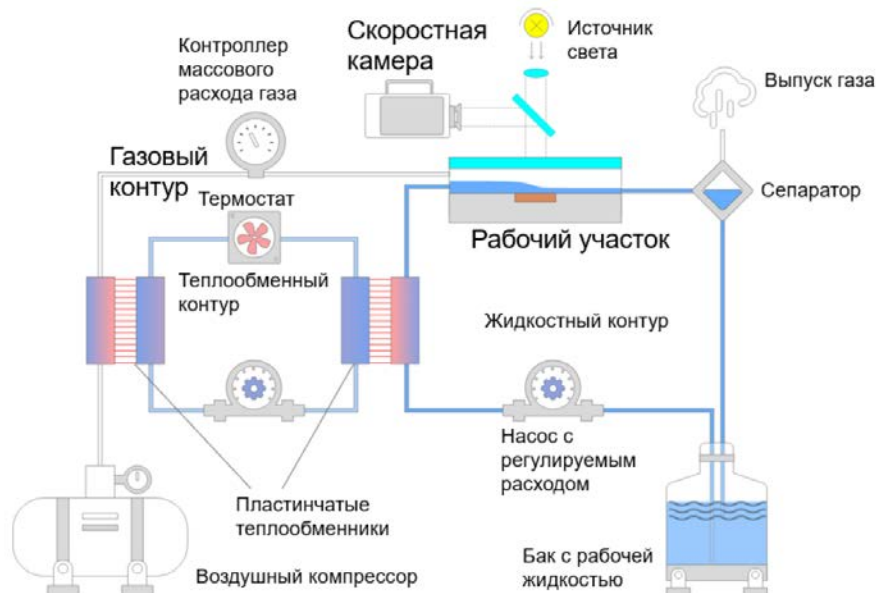


Рис. 1. Схема стенда, в котором для охлаждения локального источника тепла используется испарение тонкой пленки жидкости, увлекаемой потоком газа в канале (жидкостный контур замкнут, газовый контур разомкнут).

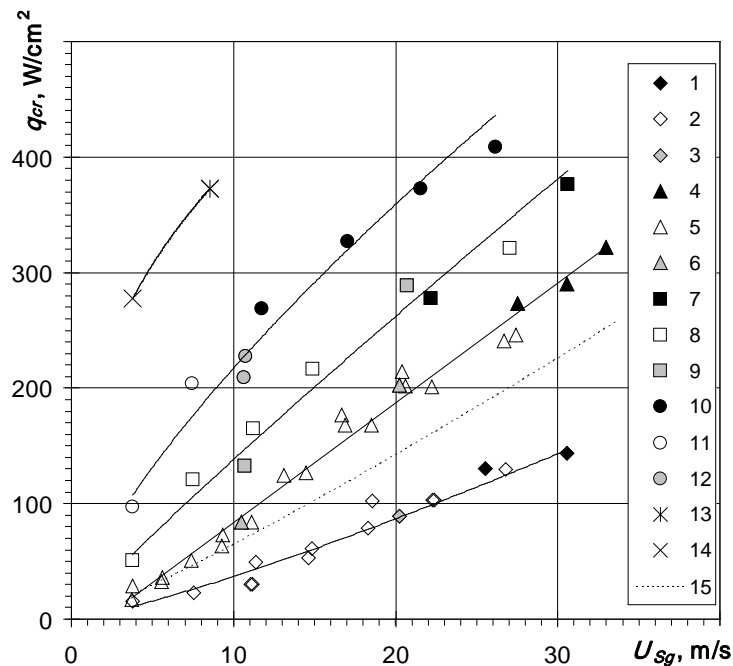


Рис. 2. Критический тепловой поток, в зависимости от приведенной скорости газа в канале U_{sg} , для различных чисел Рейнольдса жидкости Rel и различных высот канала H : 1- $Rel=8.5$, $H=1.2$ mm; 2- $Rel=8.5$, $H=1.5$ mm; 3- $Rel=8.5$, $H=2$ mm; 4- $Rel=20$, $H=1.2$ mm; 5- $Rel=20$, $H=1.5$ mm; 6- $Rel=20$, $H=2$ mm; 7- $Rel=30$, $H=1.2$ mm; 8- $Rel=30$, $H=1.5$ mm; 9- $Rel=30$, $H=2$ mm; 10- $Rel=46$, $H=1.2$ mm; 11- $Rel=46$, $H=1.5$ mm; 12- $Rel=46$, $H=2$ mm; 13- $Rel=84$, $H=1.2$ mm; 14- $Rel=84$, $H=1.5$ mm; 15- обобщение данных для $Rel=14$, $H=1.2-2$ mm [2].

Авторам проекта не было известно ни одной работы, где бы систематически исследовался случай локально нагреваемой пленки жидкости, увлекаемой ее паром. Поэтому на первом этапе проекта было предложено провести систематические теоретические исследования теплообмена, испарения и разрушения пленки жидкости при течении под действием собственного пара в мини каналах и ряд других необходимых исследований. Затем с использованием полученной информации на последнем, пятом этапе проекта было запланировано создать экспериментальный образец системы охлаждения. Один из вопросов, который стоял перед коллективом исполнителей в период создания научно – технического задела, это: «какую следует выбрать газовую фазу в наиболее эффективной системе охлаждения?». В общем случае существует три варианта: 1) чистый сухой газ; 2) чистый пар; и 3) парогазовая смесь. Недостатками системы охлаждения с использованием чистого сухого газа являются: 1) система должна быть укомплектована источником чистого, сухого газа; 2) система должна быть разомкнута по газовой фазе, иначе потребуются громоздкое сепарационное и конденсационное оборудование для осушения газа и его возвращения на вход системы.

2. РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ И СОЗДАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА В РАМКАХ ПРОЕКТА

В ходе выполнения проекта было разработано две новых концепции испарительных систем охлаждения. Первая с использованием только чистого пара (была защищена

патентом уже после окончания проекта, [3]), а вторая с возможностью использования как чистого пара, так и парогазовой смеси. Система охлаждения с использованием чистого пара схематично показана на Рис. 3. Важным преимуществом предложенной системы охлаждения, является то, что насос для паровой фазы заменяется жидкостным насосом, который подает конденсат в парогенератор с электрическим подогревом. Насос должен обеспечивать давление существенно большее, чем в парогенераторе. Движение паровой фазы в микрочанале происходит за счет перепада давлений в парогенераторе и конденсаторе. Давление в конденсаторе определяется температурой охладителя подаваемого из системы охлаждения конденсатора, которая, как правило, постоянна, следовательно давление в конденсаторе также практически постоянно. Регулировка расхода и скорости паровой фазы в канале происходит за счет давления в парогенераторе (11), которое регулируется за счет мощности электрического подогревателя (12). В зависимости от устройства парогенератора в нем может испаряться вся поступающая жидкость, либо часть жидкости может постоянно присутствовать. В качестве парогенератора может использоваться другая система охлаждения электронного оборудования с меньшими значениями удельного теплового потока, но с достаточным общим тепловыделением для получения требуемого объема пара и давления. Например, это может быть система охлаждения с кипением в большом объеме на электронных компонентах. Давление в парогенераторе может составлять очень значительную величину, до 10 и даже 50 атмосфер. Поэтому предложенная система может обеспечивать максимально высокие скорости движения паровой фазы в канале, практически недоступные для систем охлаждения при использовании насоса для газа или парогазовой смеси. Таким образом, предложенная система может обеспечивать расслоенный режим течения в мезоканалах и микроканалах, т.е. каналах высотой менее 0.1 мм. При движении двухфазного потока в таком канале перепад давления за счет гидравлического сопротивления может составлять 10 - 20 и более атмосфер.

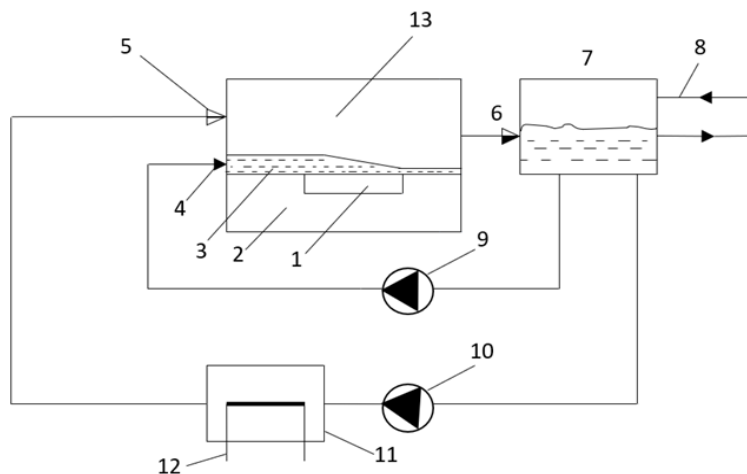


Рис. 3. Концепция системы охлаждения электронного оборудования с использованием чистого пара: 1 –электронный компонент; 2 – подложка; 3 –испаряющаяся плёнка жидкости; 4 – вход жидкости в канал; 5 – вход пара в канал; 6 – вход жидкости и пара в конденсатор; 7 – конденсатор пара и резервуар для жидкости; 8 – система охлаждения конденсатора; 9 –насос для подачи жидкости в канал; 10 – насос для подачи жидкости в парогенератор; 11- парогенератор и резервуар для пара; 12- электрический подогреватель; 13 – мини или микро-канал.

Потенциально данная система может обеспечивать максимально высокие скорости движения пара и жидкости в канале охлаждения и как следствие обеспечивать отведение сверхвысоких тепловых потоков за счет высоких удельных расходов жидкости и пара, в том

числе и в микроканалах. К преимуществам системы относится – отсутствие сепаратора жидкости и газа, высокая эффективность конденсатора чистого пара и относительная простота расчетов такой однокомпонентной системы. Однако, даже незначительные примеси неконденсируемого газа, могут существенно снизить эффективность конденсатора пара. Аналитический обзор, анализ имеющейся экспериментальной информации, а также расчетные исследования показали, что система охлаждения с использованием чистого пара имеет также ряд существенных недостатков, как и система с чистым, сухим газом. Можно перечислить следующие основные недостатки системы охлаждения с использованием чистого пара: 1) система должна быть тщательно герметизирована; 2) перед заправкой в систему жидкость должна быть тщательно дегазирована; 3) система перед ее заправкой должна быть тщательно дегазирована с использования дорогостоящего вакуумного оборудования; 4) в ходе эксплуатации должны быть исключены присосы воздуха в систему из атмосферы; 5) при использовании в качестве теплоносителя воды, система находится под избыточным давлением, только при температуре выше 100 °С. 6) материал внутренних поверхностей системы охлаждения не должен выделять неконденсируемых примесей при контакте с теплоносителем. Упомянутые аспекты могут приводить к существенному росту металлоемкости и габаритов системы и как следствие к росту ее стоимости.

В ходе систематических теоретических исследований теплообмена на первом этапе проекта было показано, что в случае чистого пара испарение становится менее интенсивным. Было установлено, что основным отличием движения пленки жидкости под действием чистого газа или парогазовой смеси является наличие существенного термокапиллярного эффекта, что способствует разрывам пленки жидкости при ее утонении. Можно ожидать что для случая чистого пара или высоких концентраций пара в парогазовой смеси, микроразрывы пленки будут затруднены, что ухудшит теплообмен. Поэтому в ходе выполнения проекта также была разработана вторая концепция испарительной системы охлаждения с возможностью использования как чистого пара, так и парогазовой смеси. Система охлаждения показана на Рис. 4. В системе охлаждения в качестве сепаратора используют гравитационный сепаратор, совмещенный с баком- накопителем для жидкости и газовой фазы, что снижает габариты и металлоёмкость предложенной системы охлаждения, т.к. позволяет объединить три устройства в одном. В качестве теплоносителя используется пар с высоким содержанием неконденсируемых примесей. Концентрация примесей регулируется клапаном для сброса и регулировки концентрации неконденсируемого газа. Пар, образующийся при испарении жидкости на электронных компонентах, только частично конденсируется в конденсаторе, что существенно повышает эффективность конденсатора с движущимся паром. Использование пластинчатого теплообменника в качестве конденсатора позволяет достигать большой площади теплообменной поверхности при высокой компактности и относительно низкой стоимости. Остатки пара с неконденсируемыми примесями поступают в сепаратор, и оттуда перекачиваются высокоэффективным компрессором обратно в систему охлаждения. Предложенная система является наиболее энергоэффективной, что является одним из важнейших преимуществ, особенно с ростом общей мощности системы. Система позволяет запускаться в работу из состояния с любым количеством неконденсируемого газа внутри системы и нарабатывать нужное количество пара только за счет испарения на охлаждаемом электронном оборудовании. При этом система является двухконтурной и замкнутой.

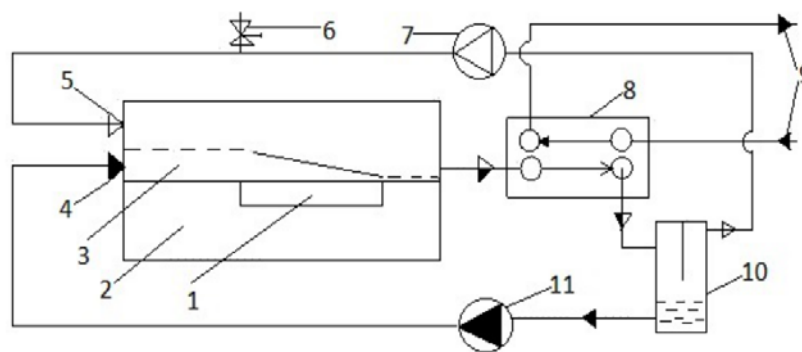


Рис. 4. Концепция системы охлаждения электронного оборудования с использованием чистого пара и парогазовой смеси: 1 –электронный компонент; 2 – подложка; 3 – испаряющаяся плёнка жидкости; 4 – вход жидкости в канал; 5 – вход парогазовой смеси в канал; 6 – клапан для сброса и регулировки концентрации неконденсируемого газа; 7 – компрессор; 8 – пластинчатый теплообменник (конденсатор пара); 9 – система охлаждения конденсатора; 10 – сепаратор, совмещенный с баком-накопителем для жидкости и газовой фазы; 11- жидкостный насос.

В ходе выполнения проекта было показано, что в тонких пленках жидкости, увлекаемых потоком газовой фазы возможен новый высокоинтенсивный механизм теплообмена. Механизм связан со сверхинтенсивным испарением жидкости из областей динамической линии контакта газ-жидкость-подложка. Такие области возникают на краю сухого пятна. В пленках формируются сверхмалые динамические сухие пятна размером порядка 100-500 мкм при высоких тепловых потоках. Важно, что такие малоразмерные сухие пятна являются неустойчивыми, т.е. они постоянно формируются и исчезают с достаточно высокой частотой. Существенную роль в формировании сверхмалых динамических сухих пятен играет термокапиллярный эффект. Поэтому газовая фаза должна содержать определенное количество неконденсируемого газа, т.е. быть парогазовой смесью. Для случая чистого пара или высоких концентраций пара в парогазовой смеси, микроразрывы пленки будут затруднены, что ухудшит теплообмен. При этом концентрация газа становится дополнительным параметром, определяющим эффективность теплообмена, с помощью которого можно управлять гидродинамикой и морфологией пленки жидкости, наряду с такими параметрами как расход жидкости и газа. Тем не менее данный вопрос требует дополнительных систематических исследований. Оптимальная концентрация неконденсируемого газа регулируется в предложенной системе специальным клапаном (6).

Экспериментальный образец испарительной системы охлаждения теплонапряженных элементов с использованием второй концепции, когда в качестве газовой фазы может служить как чистый пар, так и парогазовая смесь был изготовлен и испытан. Принципиальная схема образца приведена на Рис. 5. Фотография экспериментального образца испарительной системы охлаждения, опубликованная в отчете по этапу 5, приведена на Рис. 6. Образец имеет замкнутые контуры по жидкости и газу. Электронный компонент моделируется нагревательным элементом размером 10x10 мм. Жидкость перекачивается насосом. Пленка жидкости формируется с помощью щелевого устройства и движется за счет потока газовой фазы. Данная система охлаждения может эффективно работать с неконденсируемым газом внутри, что существенно упрощает и удешевляет ее конструкцию и эксплуатацию, а также повышает эффективность теплообмена. Испытание экспериментального образца показало, что он удовлетворяет всем требованиям технического задания: он в состоянии отводить тепловой поток более 1000 Вт/см²; высота канала может варьироваться от 0.1 до 2.0 мм; число Рейнольдса пленки

жидкости может превосходить 100; число Рейнольдса газовой фазы может превосходить 3000; погрешность измерения температуры составляет не более 1 К; погрешность определения теплового потока не более 20%.

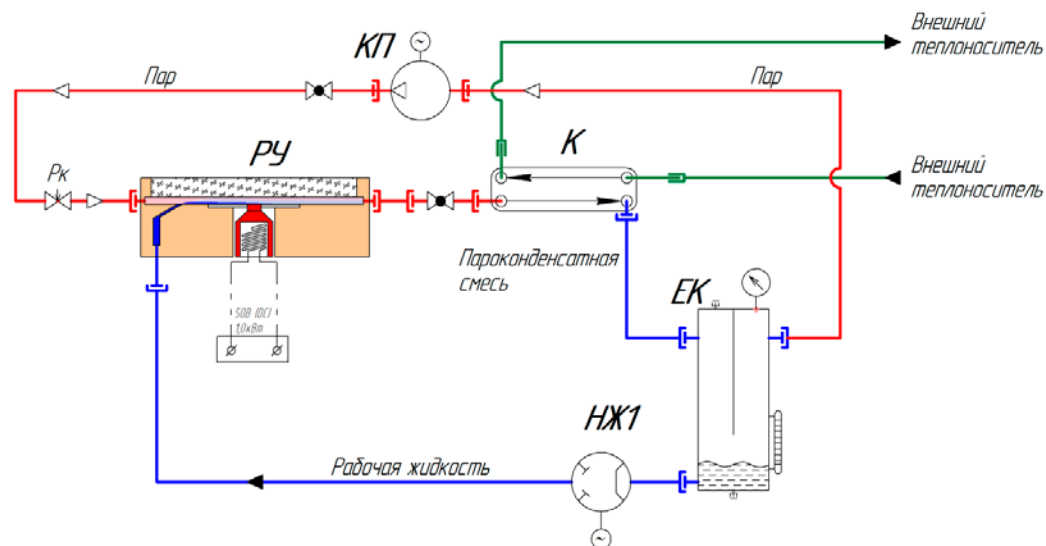


Рис. 5. Экспериментальный образец испарительной системы охлаждения теплонапряженных элементов с паровым компрессором. РУ – рабочий участок; НЖ1 – насос для жидкости; КП – компрессор паровой; К – конденсатор; ЕК – емкость конденсата; Рк – регулирующий клапан пара.



Рис. 6 Фотография экспериментального образца испарительной системы охлаждения теплонапряженных элементов с использованием однокомпонентных двухфазных потоков.

3. ДАЛЬНЕЙШЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА

В проекте предусматривался только дизайн, изготовление и испытание экспериментального образца. На эти работы по календарному плану отводилось 6 месяцев. Проведение детальных исследований не предполагалось в связи со сжатыми сроками выполнения проекта. Детальные исследования с использованием экспериментального образца не предполагались в проекте еще и в силу того, что работы по созданию образца были запланированы только на последнем пятом этапе проекта. После окончания проекта экспериментальный образец испарительной системы охлаждения продолжал использоваться для исследований, а также обучения и повышения квалификации студентов и аспирантов, [4-8]. В работе [4], были опубликованы результаты первых систематических экспериментов, выполненных с использованием данного образца. Было получено, что образец способен отводить тепловой поток 850 Вт/см^2 . Тем не менее авторы [4] не пишут, что они не могут повысить отводимый тепловой поток, например увеличивая расход жидкости или газа или меняя высоту канала. Такой задачи в данной работе не ставилось. Задачей было выполнить новые эксперименты, когда ширина канала равна ширине нагревательного элемента. В экспериментах было достигнуто число Рейнольдса жидкости равное 249. Исследования в статье выполнялись по проекту Российского Научного Фонда № 14-19-01755 (2017 – 2018 гг.).

В период 2018 – 2020 годы группа молодых исследователей лаборатории с использованием экспериментального образца испарительной системы охлаждения созданного в проекте ФЦП № 14.613.21.0011 выиграла проект на Конкурсе на лучшие научные проекты фундаментальных исследований, проводимого совместно РФФИ и Национальным центром научных исследований Франции https://www.rfbr.ru/rffi/ru/contest/o_2059552. Исследования по проекту опубликованы в статьях [5-8]. Все эксперименты в проекте производились только с использованием экспериментального образца, который был модифицирован в части жидкостного контура, что делает возможными пульсации при движении жидкой пленки. В ходе исследований в статье [7] было подтверждено, что образец способен отводить тепловой поток 1430 Вт/см^2 , при этом число Рейнольдса жидкости составляло 233. Таким образом последующие эксперименты подтверждают результаты проведенных испытаний при сдвиге экспериментального образца испарительной системы охлаждения в эксплуатацию. В период 2016 – 2020 годы экспериментальный образец использовался для обучения аспиранта К.С. Элояна и подготовки его научно- квалификационной работы. Необходимо отметить, что в лаборатории интенсификации теплообмена ИТ СО РАН до сих пор существует только один стенд, имеющий замкнутые контуры и по газовой фазе, и по жидкости это экспериментальный образец созданный в 2016 г. по проекту ФЦП № 14.613.21.0011.

4. МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

Иностранным партнером в рамках проекта был японский профессор Харухико Охта, заведующий отделения Аэроавтики и Астронавтики, университета Киушу, ученый с мировым именем. Финансирование совместного исследования осуществлялось для Института теплофизики и университета Киушу из национальных источников, т.е. никакие работы на территории Японии не финансировались Российской стороной и никакие средства из Японии не перечислялись в Российскую Федерацию.

Иностранный партнер создал новую экспериментальную установку (Рис. 7) и разработал оптические методы диагностики протекающих процессов на основе скоростной камеры. В качестве жидкой фазы была выбрана вода, а в качестве газовой фазы азот. Пленка жидкости двигалась в прямоугольном канале шириной 30 мм под действием спутного потока газа. Высота канала варьировалась от 2 до 10 мм. Нагревательный элемент имел длину 100 мм и ширину 30 мм. Причем по длине он был разделен на 10 независимо обогреваемых, теплоизолированных секций. Таким образом Партнер мог измерять

температуру подложки, плотность теплового потока и квазилокальную интенсивность теплообмена в 10 точках вдоль поверхности течения пленки. В рамках проекта были написаны 2 совместные статьи с иностранным партнером в престижных журналах [9-10].

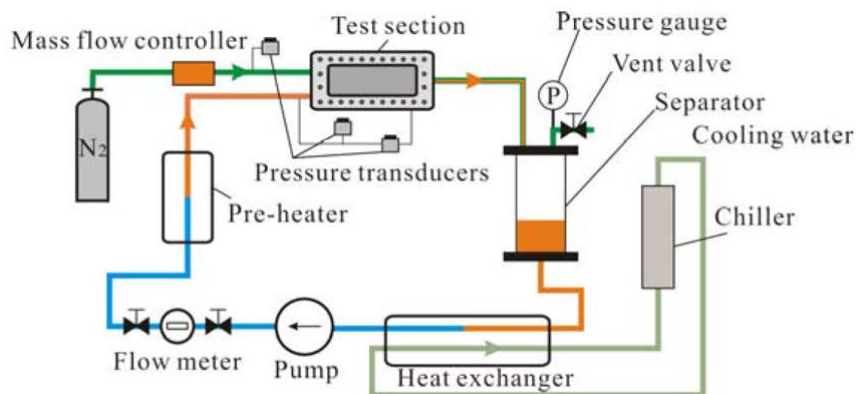


Fig. 1 Outline of test loop.

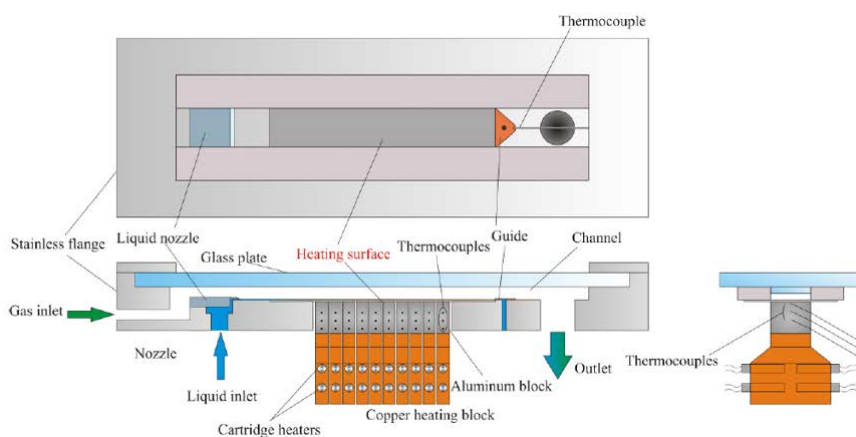


Fig. 2 Structure of test section.

Рис. 7. Схема установки и рабочего участка, разработанные иностранным партнером.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1) Разработан и создан экспериментальный образец испарительной системы охлаждения теплонатяженных элементов с использованием однокомпонентных двухфазных потоков. Испытания показали его работоспособность в полном соответствии с ТЗ. Патент подтверждает новизну разработки.
- 2) После окончания проекта экспериментальный образец испарительной системы охлаждения продолжал использоваться для исследований, а также обучения и повышения квалификации студентов и аспирантов. С использованием данного образца опубликовано 5 статей в рецензируемых изданиях. Кроме того, образец использовался для выполнения проектов РФ и РФФИ.
- 3) В рамках международного сотрудничества, иностранным партнером (Проф. Охта, Япония) был создан новый экспериментальный стенд и выполнены исследования двухфазных потоков при нагреве от протяженного нагревателя. Написано 3 совместных статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Kabov O.A., Kuznetsov V.V. and Legros J-C., “Heat transfer and film dynamic in shear-driven liquid film cooling system of microelectronic equipment”, Proc. II Int. Conf. on Microchannels and Minichannels, Rochester, pp. 687-694, 2004.
2. Zaitsev D.V. and Kabov O.A., Flow patterns and CHF in a locally heated liquid film shear-driven in a minichannel // Proceedings of ASME 2010 8th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels Collocated with 3rd Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting, August 1-5, 2010, Montreal, Canada, ISBN: 978-0-7918-3880-8, Paper FEDSM-ICNMM2010-31209, ICNMM2010, (PARTS A AND B), pp. 375-382. 2010.
3. Патент № 2807853 на изобретение «Двухфазная однокомпонентная система» от 07.07.2023 г., авторы: Кабов О.А., Зайцев Д.В., Быковская Е.Ф., патентообладатель: ИТ СО РАН;
4. Eloyan K.S., Zaitsev D.V. Thin film evaporative cooling system for high heat flux applications // IOP Publishing IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1105 (2018) 012084.
5. Karapet Eloyan, Alexey Kreta and Egor Tkachenko, Two-phase cooling system with controlled pulsations, EPJ Web of Conferences, 2019, Vol. 196, paper No. 00021.
6. Eloyan K S and Kreta A S Influence of controlled pulsations of a liquid flow on the surface temperature of heater with a high heat flux // TPH-2019, Journal of Physics: Conference Series 1359 (2019) 012028, doi:10.1088/1742-6596/1359/1/012028
7. Karapet S. Eloyan, Alexey S. Kreta Influence of Controlled Pulsations on the Heat Transfer in the Two-phase System with a Local Heat Source // AIP Conference Proceedings 2135, 020021 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5120658>
8. Элоян К.С., Крета А.С., Влияние контролируемых пульсаций на теплообмен в двухфазной системе в миниканале прямоугольного сечения, IV Всероссийская научная конференция с элементами школы молодых ученых «Теплофизика и физическая гидродинамика». Ялта, Республика Крым, отель «Ливадийский», 15-22 сентября 2019, Тезисы докладов, с. 95.
9. Tomoki Hirokawa, Masahiko Murozono, Oleg Kabov, Haruhiko Ohta. Experiments on heat transfer characteristics of sheardriven liquid film in co-current gas flow // Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT), 5, 17 (2014). DOI: 10.5098/hmt.5.17.
10. Tomoki Hirokawa, Haruhiko Ohta, Oleg A. Kabov. Experimental investigation on behaviors and heat transfer in shear-driven liquid film flow // Interfacial Phenomena and Heat Transfer, 3 (3): 303–317 (2015).

МЛАДШИЙ НАУЧНЫЙ СОТРУДНИК, КАНДИДАТ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК, ДМИТРИЙ ЮРЬЕВИЧ КОЧКИН

СТАРШИЙ НАУЧНЫЙ СОТРУДНИК, КАНДИДАТ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК, ДМИТРИЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ ЗАЙЦЕВ

СТАРШИЙ НАУЧНЫЙ СОТРУДНИК, КАНДИДАТ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК, СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ ДИМОВ

ВЕДУЩИЙ ИНЖЕНЕР, КАНДИДАТ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК, МАКСИМ ВАЛЕРЬЕВИЧ ПУХОВОЙ

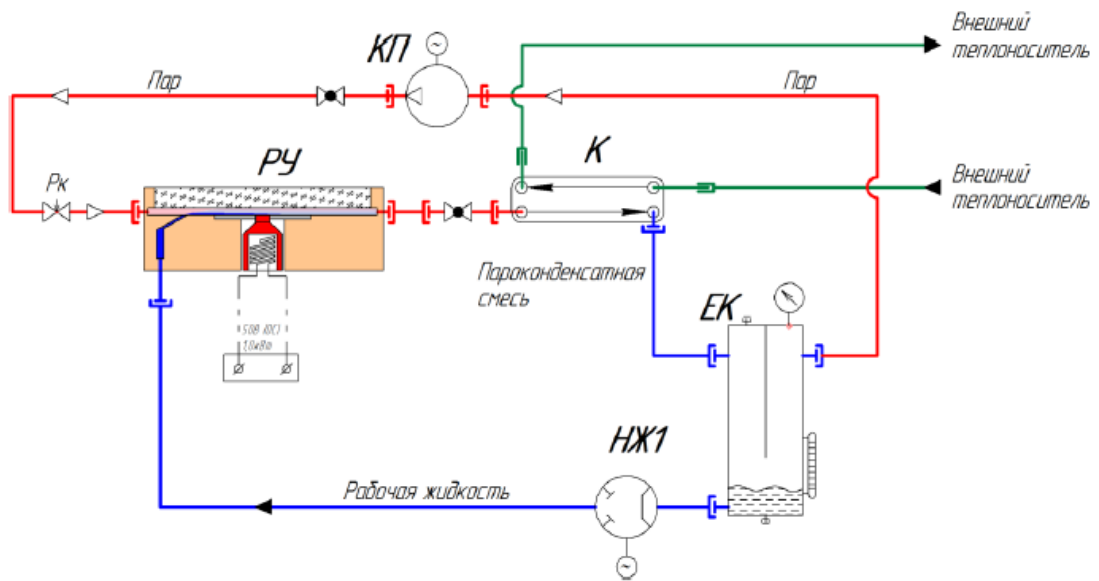
ВОССОЗДАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА ИСПАРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ. СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ОБЛАСТИ ЛИНИИ КОНТАКТА. ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
Лаврентьева, 1, Новосибирск, Россия*

Работа посвящена воссозданию экспериментального образца испарительной замкнутой системы охлаждения, изготовленного в рамках проекта ФЦП, выполняемого в лаборатории интенсификации процессов теплообмена в 2014-2016 годах. В ходе испытания стенда в стационарном режиме был отведен тепловой поток более 1 кВт/см². Также в работе описывается экспериментальный стенд для исследования теплообмена в области линии контакта, созданный в рамках того же проекта ФЦП.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ОБРАЗЕЦ ИСПАРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

В рамках проекта ФЦП, выполняемого в лаборатории интенсификации процессов теплообмена в 2014-2016 годах был создан экспериментальный образец испарительной замкнутой системы охлаждения (Рис.1.).



а)



б)

Рис. 1. Схема (а) и фото (б) станда, приведенные в отчете по этапу-5 (2016 г.) проекта ФЦП № 14.613.21.0011, соглашение от 27.08.2014 г.

В соответствии с приказом директора ИТ СО РАН экспериментальный стенд был воссоздан в ноябре 2023 года (Рис. 2). Экспериментальный стенд работает в соответствии со схемой, представленной на Рис.1., и состоит из рабочего участка, газового и жидкостного контуров. Непосредственно рабочий участок представляет собой плоский миниканал шириной 10 мм и высотой, варьируемой в пределах от 0,1 до 2 мм. Нижней стенкой канала является подложка из нержавеющей стали с вмонтированным заподлицо медным нагревателем размером 10 на 10 мм, подвод тепла к которому осуществляется при помощи картриджных электрических нагревателей. Верхней стенкой канала является стекло плотно притягиваемое к нижней стенке канала для обеспечения герметичности. Подвод жидкости в миниканал осуществляется насосом через плоскую щель на нижней стенке канала. Для снижения пульсаций расхода жидкости перед входом в канал устанавливается пневмокомпенсатор (не указан на Рис.1), его наличие не влияет на работоспособность станда. Подача газа в канал осуществляется при помощи компрессора. Парогазовая смесь из рабочего участка попадает через конденсатор в бак-сепаратор и цикл замыкается. Тепловой поток контролируется подаваемой электрической мощностью и определяется по показаниям термопар, встроенным в медный нагреватель и подложку из нержавеющей стали.

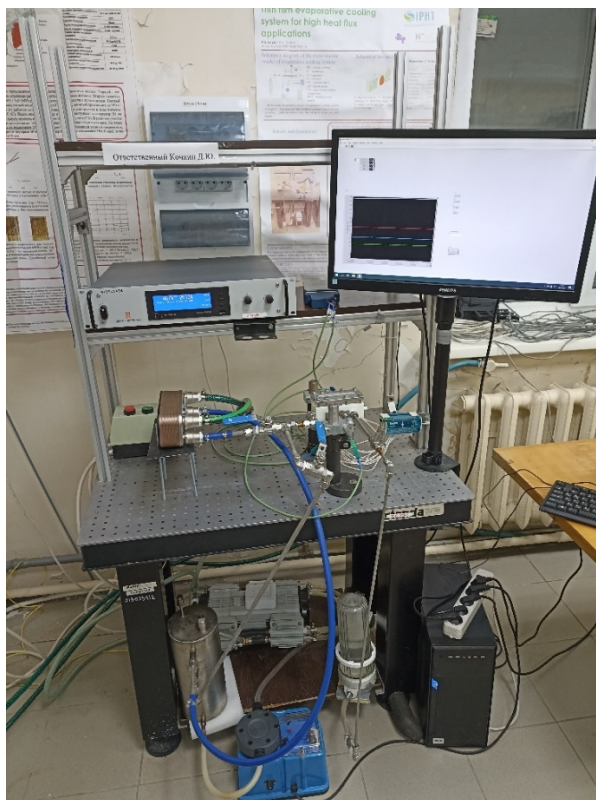


Рис. 2. Фото экспериментального стенда, воссозданного в соответствии с приказом директора ИТ СО РАН, март 2024 года.

Экспериментальный стенд способен работать как на парогазовой смеси, так и на чистом паре. В последнем варианте неконденсируемые газы постепенно сбрасываются в атмосферу заменяясь паром, генерируемым непосредственно в канале. При воссоздании стенда все требования ТЗ (Табл. 1) выполнены, что подтверждается актом проведения испытаний от 23 декабря 2023 года. Стоит отметить, что в настоящий момент данный стенд полностью соответствует первоначальному варианту и является единственным в лаборатории стендом, работающим в замкнутом режиме и по газу, и по жидкости.

Табл.1. Требования технического задания

Наименование параметра	Ед.изм.	Измеренные значения
Число Рейнольдса жидкости	Безразм.	1-100
Размер нагревателя	мм*мм	10*10
Число Рейнольдса газа	Безразм.	10-3000
Высота канала	мм	0,1-2,0
Максимальный тепловой поток	кВт/см ²	1,0
Погрешность измерения температуры	К	1,0
Погрешность определения теплового потока	%	20%

В ходе испытания стенда в стационарном режиме был отведен тепловой поток более 1 кВт/см². Электрическая мощность нагрева составляла 1220 Вт, растечки тепла численно рассчитывались на основании показаний термопар, встроенных в рабочий участок, и составляли не более 15%, расход жидкости и газа в замкнутых контурах оценивался как 600 мл/мин и 60 л/мин, соответственно. При этом температура нагревателя составляла всего 126°С, что говорит о не полностью раскрытом потенциале данной системы по отводу высоких тепловых потоков. Таким образом, все требования ТЗ, а также цель проекта ФЦП

по отведению теплового потока 1 кВт/см^2 выполнены, при этом экспериментальный стенд воссоздан в точности по проекту ФЦП для демонстрации работоспособности именно в этом виде.

2. СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ОБЛАСТИ ЛИНИИ КОНТАКТА

Также в ходе выполнения проекта ФЦП, выполняемого в лаборатории интенсификации процессов теплообмена в 2014-2016 годах был создан экспериментальный стенд для исследования теплообмена в области линии контакта (Рис. 3). Концепция стенда заключалась в исследовании процессов в области линии контакта, образованной прозрачной нагреваемой подложкой и парогазовым пузырем, находящимся под ней (Рис. 4). Уникальность данного подхода заключается в возможности получить в качестве объекта исследования контролируемую контактную линию как стационарную, так и динамическую, для определения локальных значений тепловых потоков в области контактной при помощи сверхточных методик. В рамках проекта при помощи консультаций с международным партнером была создана подложка, позволяющая проводить тепловые измерения с высокой точностью.

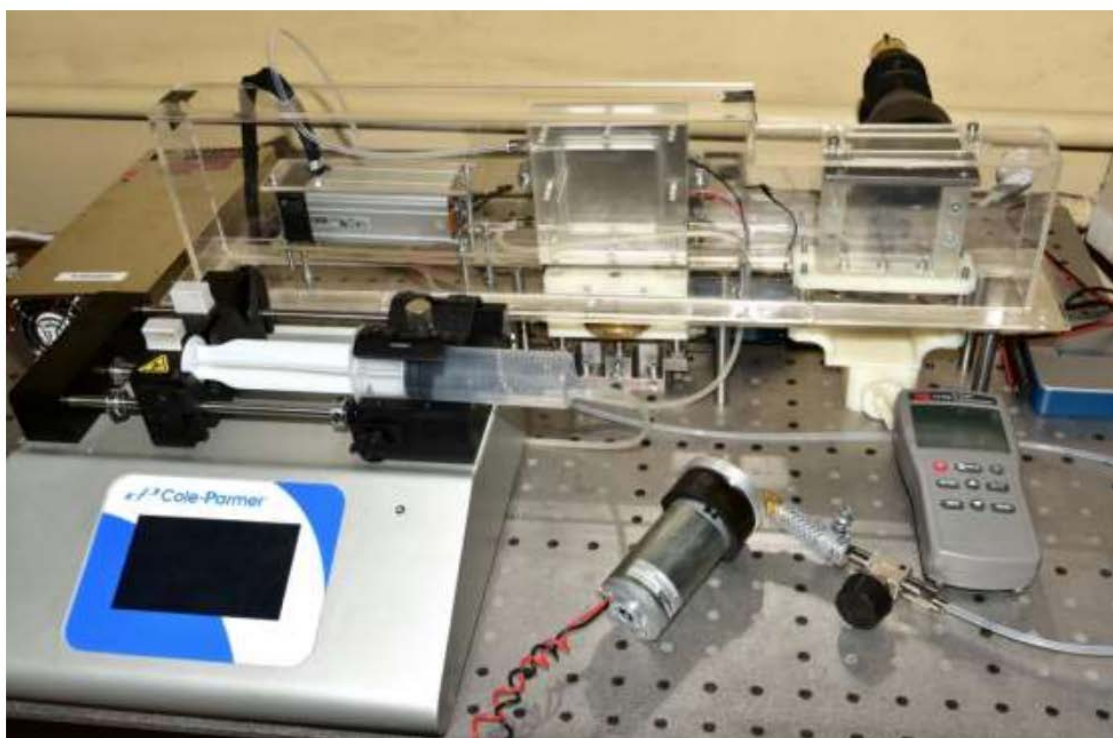


Рис. 3. Фото стенда, приведенное в отчете проекта ФЦП № 14.613.21.0011, соглашение от 27.08.2014 г.

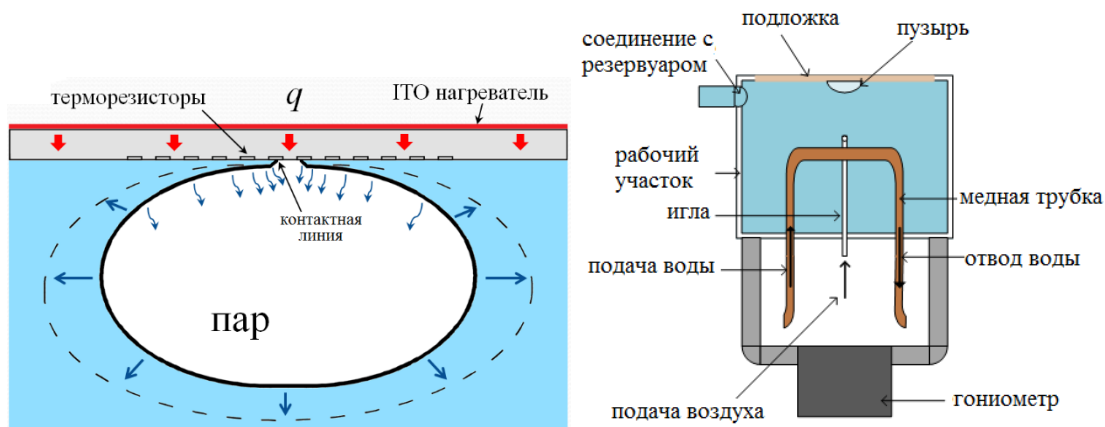


Рис. 4. Концепция стенда.

В дальнейшем экспериментальный стенд модернизировался и использовался для выполнения проектов РНФ 19-19-00695 (2019-2023), РФФИ 21-58-53050 (2021-2022) (Рис. 5). Модернизация стенда заключалась в использовании различных методов визуализации и измерений, при этом концепция экспериментального стенда оставалась неизменной. На стенде выполняли свои работы студенты и аспиранты Деревянников И.А., Мунгалов А.С. и Сибиряков Н.Е. [1-4]. Для интерпретации экспериментальных данных полученных методом тонкой фольги было осуществлено сотрудничество с Институтом математики им Соболева, в частности с профессором Карчевским А.Л..

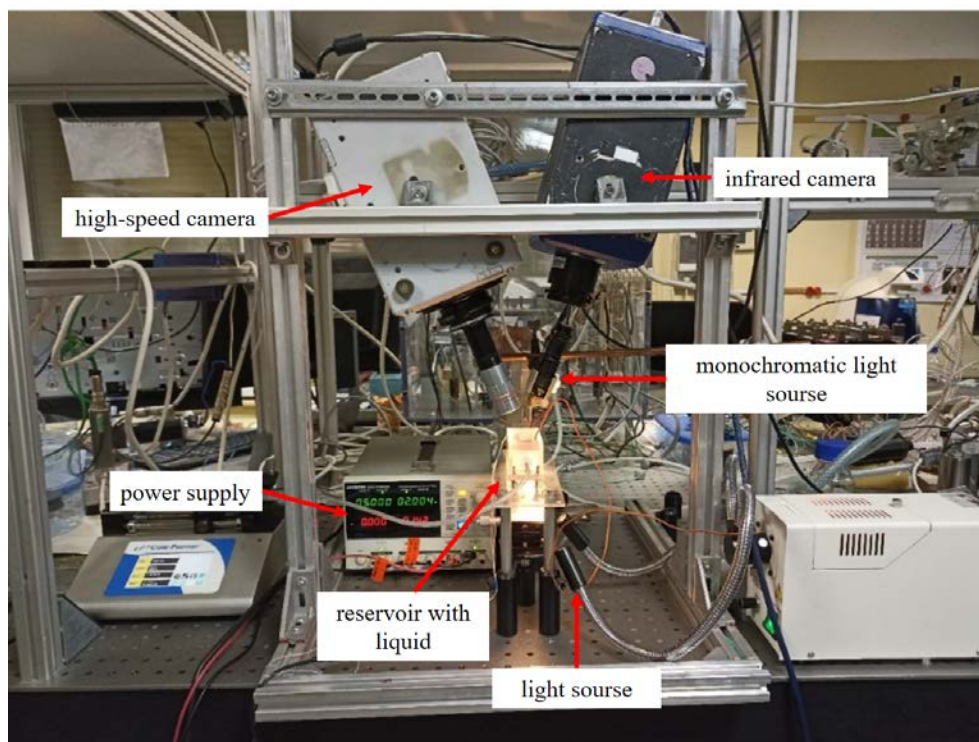


Рис. 5. Фото экспериментального стенда в ходе выполнения проекта РФФИ (2022 год).

На рисунках 6-9 представлены некоторые результаты, полученные на данном экспериментальном стенде. При помощи прозрачного нагревателя была исследована динамика роста пузырей, сухих пятен, а также микрослоя под нагреваемой подложкой (Рис. 6-8). При помощи метода тонкой фольги была определена локальная плотность теплового

потока под пузырьком, при этом максимальное значение теплового потока наблюдалось в области трехфазной линии контакта (Рис. 9).

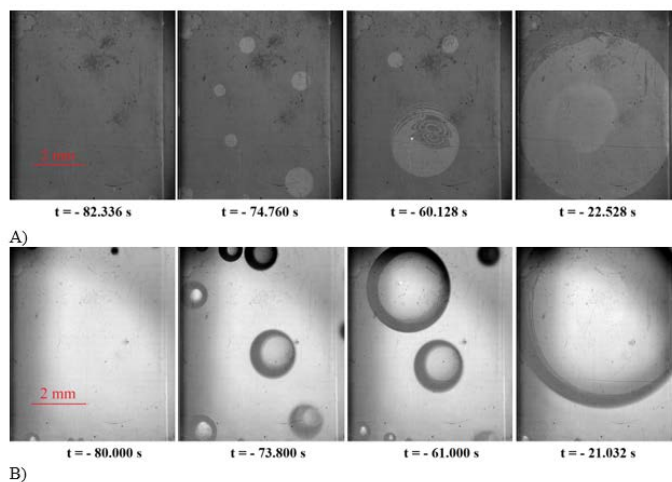


Рис. 6. Последовательность изображений динамики парогазовых пузырьков под прозрачной нагреваемой подложкой [4].

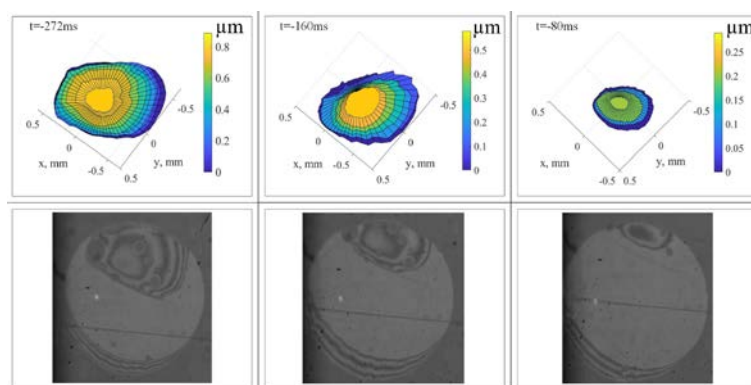


Рис. 7. Восстановленный профиль микрослоя, образовавшегося при слиянии двух пузырьков (вверху), интерференционные изображения (внизу) [4].

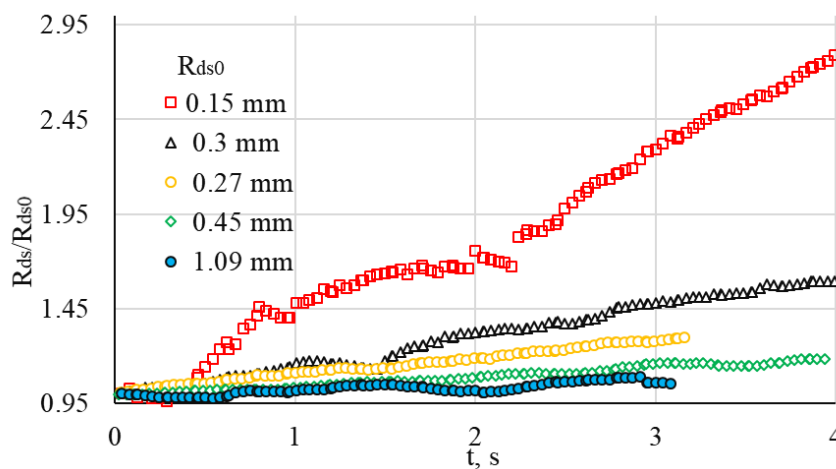


Рис. 8. Динамика контактной линии при мощности нагрева 1,22 Вт [4].

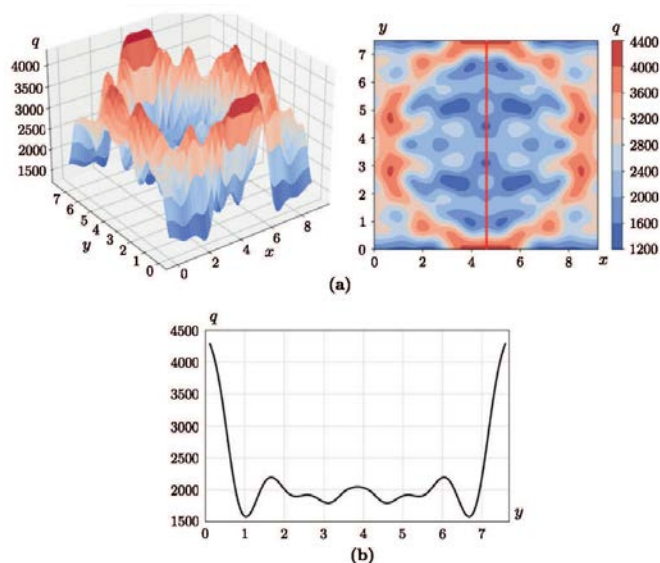


Рис. 9. Локальный тепловой поток, вычисленный методом тонкой фольги. плотность теплового потока существенно возрастает вблизи линии контакта газ–жидкость–твёрдое тело [1].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1) Подтверждается достижение цели проекта по созданию экспериментального образца испарительной системы охлаждения;
- 2) Показано, что образец работоспособен и в состоянии отводить тепловой поток 1000 Вт/см². Остальные требования по ТЗ также выполнены;
- 3) Предполагается использовать стенд для выполнения проектов, а также для госбюджетной тематики, в частности исследований в интересах создания 2й очереди проекта СКИФ совместно с ЦКП СКИФ.
- 4) Стенд для исследования теплообмена в области линии контакта был изготовлен и использован в ходе выполнения проекта ФЦП, а также использовался и после него. На нем получены важные результаты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Sibiryakov, N.E., Kochkin, D.Y., Kabov, O.A., Karchevsky, A.L.. Determining the Heat Flux Density in the Area of a Contact Line during the Evaporation of Liquid into a Bubble. *J. Appl. Ind. Math.*, 2023, Vol. 17, p. 628–639.
2. Kochkin D Y, Mungalov A S, Derevyannikov I A, Dynamics of bubble growth under a heated substrate, *Journal of Physics: Conference Series*, 012134, 2021
3. Кочкин Д.Ю., Мунгалов А.С., Деревянников И.А. Динамика парогазового пузыря под нагреваемой подложкой, *Сибирский теплофизический семинар 2022*
4. A.S. Mungalov, I.A. Derevyannikov, D.Yu. Kochkin, O.A. Kabov, I.V. Marchuk, Z. Luo, C. Sun, B. Bai, Dynamics of bubbles and dry spots under the heated downward-facing substrate, *Experimental Thermal and Fluid Science*, направлена в журнал

ДИСКУССИЯ

ВОПРОС - ГОГОНИН И.И.: Скажите, пожалуйста, у вас везде маленькие расходы жидкости. Чем и как вы измеряете расходы? Какие расходы жидкости у вас?

ОТВЕТ - КОЧКИН Д.Ю.: Здесь расходы не маленькие, типичные для данной технологии охлаждения. Чтобы определить расход, в специальном тарифовочном эксперименте стенд размыкали и для заданной нагрузки на насос по объему измеряли расход жидкости.

ВОПРОС - ПОКУСАЕВ Б.Г.: Это первый вопрос, но потом я обязательно выступлю, потому что все очень интересно. Вопрос о влиянии самой поверхности теплообмена, поскольку изучаются микроразмерные процессы. Имеют место малые толщины пленок, возникновение сухих пятен, линии контакта, поэтому можно ожидать, что данные процессы должны сильно зависеть от качества поверхности. Проводилось ли исследования влияния качества и свойств поверхности на исследуемые процессы?

ОТВЕТ - КОЧКИН Д.Ю.: Моя кандидатская диссертация как раз была посвящена исследованию динамики контактной линии на подложках с различной шероховатостью и смачиваемостью. Одним из результатов диссертации оказалось то, что смачиваемость может достаточно сильно влиять на динамику контактной линии. На подложках с худшей смачиваемостью скорость контактной линии намного превышает скорость контактной линии на подложках с хорошей смачиваемостью.

ВОПРОС - ПОКУСАЕВ Б.Г.: Понятно. Но все-таки, сформулированы ли в общем виде требования к нагреваемой поверхности, поскольку у Вас просматривается выход на практические приложения ?

ОТВЕТ - ЗАЙЦЕВ Д.В.: Во всех этих исследованиях, т.е. при высоких тепловых потоках, в рамках проекта и после проекта в течение нескольких лет мы влияние поверхности на теплообмен детально не исследовали, но тщательно ее характеризовали. Во всех наших экспериментах поверхность имела небольшую, контролируемую шероховатость. Во-первых, поверхность во всех опытах была медной и имела среднеквадратичную шероховатость примерно 500 нанометров. Во-вторых, мы сознательно ее не варьировали, т.к. у нас и так достаточно много варьируемых параметров. Но в самые последние годы мы действительно стали уделять достаточно много внимания исследованиям влияния поверхности на теплообмен. Сейчас мы работаем с полированными поверхностями, шероховатыми, пористыми, покрытыми графеном, и действительно, мы получаем разные коэффициенты теплоотдачи, разные критические тепловые потоки. Но эти эксперименты свежие и о них здесь речь не идет. Они даже еще полностью не опубликованы. Но вопрос справедливый, действительно, влияние есть.

ВОПРОС - НИГМАТУЛИН Б.И.: Я прослушал все с удовольствием, очень интересно. Вам задаю вопрос как физикам. Первое. Покусаев Б.Г. сказал правильно, нужны правильные критерии. Понятно, что Вы работаете с одной и той же поверхностью. Но у Вас разные жидкости, разные поверхностные натяжения, разные состояния газовой фазы, чистый пар, парогазовая смесь. Поэтому хочется увидеть какие-то оценки величин и получить некие закономерности. Далее. У вас разные режимы течения двухфазного потока. Есть режим с микроразрывами, очевидно, что это очень хороший режим. Есть режим критического теплового потока, когда видимо уже нет микроразрывов. Когда приходит кризис, у вас получается переход из одного состояния в другое состояние. Здесь должны быть некий

критерий? Как сделав ограниченное число экспериментов, получить законченную корреляцию? Как вы идете в этом направлении?

ОТВЕТ - ЗАЙЦЕВ Д.В.: Да, поскольку у нас система многопараметрическая, очень сложно придумать какие-то безразмерные критерии. Но, тем не менее, Олег Александрович Кабов в своем докладе показывал пару графиков. Действительно, у нас механизмы кризиса разные. При малых расходах, при малых тепловых нагрузках, у нас термокапиллярный механизм кризиса теплообмена. При высоких тепловых нагрузках у нас испарительный механизм кризиса. Как раз в случае испарения, там действительно есть безразмерные критерии, когда мы критический тепловой поток делим на тепловой поток полного испарения жидкости. Ну и также используем безразмерный расход, т.е. число Рейнольдса. Это первая попытка критериального обобщения. Но мы планируем в этом разбираться дальше.

ВОПРОС - НИГМАТУЛИН Б.И.: По-видимому задача сегодняшнего дня это сделать программу исследований, в которой вы выясните все эти критерии, или хотя бы те, при которых возникает кризис теплоотдачи.

ОТВЕТ - КОЧКИН Д.Ю.: Да, мы работаем над этим. В данный момент мы ожидаем результаты оценки проекта, который был подан на конкурс по этой тематике, и там были заложены идеи, которые были получены, в том числе, и в результате выполнения проекта ФЦП № 14.613.21.0011.

ОТВЕТ - ЗАЙЦЕВ Д.В.: Я хотел бы добавить. На самом деле в этих исследованиях проблема не только отвести высокие тепловые потоки. Проблемой является также создать такой рабочий участок, который бы не перегорал во время кризиса теплообмена. Недавно мы как раз создали такой рабочий участок, мощностью 3 кВт. Сейчас с его помощью от поверхности 1 см^2 мы уже отводим 1.5 кВт.

ВОПРОС - ПАВЛЕНКО А.Н.: У меня такой вопрос. Поскольку проект посвящен разработке однокомпонентной двухфазной системы, как вы ответите на вопрос, какова должна быть скорость потока недогретой жидкости при отсутствии газа, чтобы достичь требуемого в рамках технического задания (далее - ТЗ) 1 кВт/см^2 . Почему такой вопрос? Потому что, когда используется обычный однофазный поток воды (широко используется вода), достигают 8 тысяч Вт на сантиметр квадратный. То есть, грубо говоря, должен был бы быть получен ответ, какие параметры по жидкости при нагреве воды должны быть, чтобы получить 1 кВт на квадратный сантиметр. При этом сравнение двухфазных, т.е. систем с кипением, и двухкомпонентных систем было показано при идентичных расходах жидкости. Возможно поэтому для кипящих систем и ниже получается, чем для пленки и газа. Сравнить желательно при одинаковых перепадах давления на канале. Как вы ответите на эти два вопроса? В докладе Олега Александровича я понял, что был получен тепловой поток 900 Вт на 1 см^2 . Поэтому я хотя бы на уровне расчётов хочу услышать ответ. Какая скорость жидкости? Так вот 8000 Вт на 1 см^2 достигается каким образом? Это тот недогрев до температуры насыщения, который примерно у вас используется 70-80 градусов, нужен достаточно высокоскоростной поток, и завихритель потока для интенсификации. Вот три составляющих интенсификации в этом случае. Что у вас должно было быть, чтобы достичь 1 кВт на сантиметр квадратный?

ОТВЕТ - КОЧКИН Д.Ю.: Целью проекта было создание однокомпонентной двухфазной системы. Однокомпонентной не в том смысле, что на вход в канал подается только жидкость. Однокомпонентной в том смысле, что подается и жидкость, и пар как газовая фаза. Для создания расслоенного режима течения. В дальнейшем была предложена система

работы не на чистом паре. Поскольку система на чистом паре имеет недостатки. В моем докладе я отметил, что на экспериментальном образце был получен тепловой поток 1200 Вт на 1 см². На других стендах в лаборатории мы сейчас уже отводим 1500 Вт на 1 см². Олег Александрович отметил, что в одной из работ опубликованной в 2018 г. на другом стенде получено 935 Вт на 1 см² с учетом потерь тепла.

ВОПРОС - ПАВЛЕНКО А.Н.: В однокомпонентной двухфазной системе Вы начинаете подогревать пленку за счет пара, а значит, вы часть запасенного «холода» в жидкости уже теряете, что видимо бессмысленно?

ОТВЕТ - МАРЧУК И.В.: Александр Николаевич, это у Вас уже не вопрос, а суждение. Но в последнем Вы абсолютно правы. Это еще один недостаток однокомпонентной двухфазной системы. Нужно иметь ввиду, что система охлаждения разрабатываемая в проекте ФЦП предполагает почти полное испарение рабочей жидкости и тем самым обеспечивает высокую эффективность. Системы, о которых Вы упомянули предполагают испарение всего нескольких процентов жидкости. Это большая разница.

ВОПРОС - АЛЕКСЕЕНКО С.В.: Давайте, пока не дискутировать. Выступления будут позднее. У меня такой вопрос. Поскольку одна из главных целей действительно получить большие отводы тепла, тогда естественный вопрос: если сухое пятно вызывает кризис теплообмена, то как его избежать? Вы об этом думали? До каких тепловых потоков нужно доходить, чтобы не достичь кризиса?

ОТВЕТ - КОЧКИН Д.Ю.: это очень интересный вопрос. Но для такого ответа требуются систематические эксперименты. И это большой объем работы. В проекте стояла задача именно создание экспериментального стенда и его тестирование. Была получена принципиальная возможность отвода 1 кВт с квадратного сантиметра. Дальнейшее улучшение параметров системы требует дополнительных исследований. Но могу сказать, что есть два типа сухих пятен. Сухие пятна мелкомасштабные, которые улучшают теплообмен, а есть сухие пятна крупные, которые его ухудшают.

ВОПРОС - АЛЕКСЕЕНКО С.В.: поскольку в какой-то момент может быть переход между двумя типами сухих пятен, поэтому и возникает опасность кризиса теплообмена, так?

ОТВЕТ - КОЧКИН Д.Ю.: Да, это так. Мы активно продолжаем исследования по различным аспектам формирования сухих пятен в различных условиях и в ближайшее время надеемся ответить на многие вопросы.

ВОПРОС - КУЗНЕЦОВ Г.В.: Как выбирались размеры конденсатора и на каких размерах в итоге вы остановились для вашего экспериментального образца?

ОТВЕТ - ЗАЙЦЕВ Д.В.: В проекте мы исследовали разные типы конденсаторов. В частности, о чем говорил Олег Александрович, для небольших расходов, которые пригодны для невесомости. Но поскольку у нас высокие тепловые потоки, мы в образце использовали в качестве конденсатора стандартный пластинчатый теплообменник, который заведомо способен отводить более одного киловатта тепла.

ВЫСТУПЛЕНИЕ

**ДОКТОРА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК, ГЛАВНОГО НАУЧНОГО СОТРУДНИКА
ИНСТИТУТА ТЕПЛОФИЗИКИ ИМ. С.С. КУТАТЕЛАДЗЕ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИВАНА ИВАНОВИЧА ГОГОНИНА**

Уважаемые коллеги, во-первых, хочется сказать, что доклад, который сделал сегодня Олег Александрович (*Кабов), очень понравился. Великолепный совершенно доклад. Он показал великолепное знание предмета, которым он занимается и которым он руководит. Великолепные публикации, великолепное количество патентов. Даже слишком много. Но я согласен с Булатом (*Б.И. Нигматулин), что Академию наук просто принизили до обычного учреждения. Академия всегда была самостоятельной организацией. А сейчас она превратилась в какую-то второсортную контору, с которой можно делать все, что заблагорассудится. И вот получают такие экспертизы, с которыми мы имеем дело. Понимаете, когда человек, в принципе не знающий ничего о физике, которую исследует Кабов О.А., начинает вдруг писать с точностью до сотых долей процентов – 37,76% - вычислять достоверность исследований... смешно на все это смотреть. И грустно, к несчастью. Очень грустно. Я еще раз хочу поддержать то, что сказал Булат (*Б.И. Нигматулин). Членам Академии нужно серьезно поставить вопрос перед Правительством о том, чтобы восстановили Академию наук в прежних правах. Потому что нельзя ее в таком состоянии держать. Иначе так и будет все продолжаться.

Во-вторых, на экскурсии в лабораторию Интенсификации процессов теплообмена я познакомился со стендом для исследования теплообмена в области линии контакта газ-жидкость-твердое тело, который был спроектирован и изготовлен в проекте ФЦП № 14.613.21.0011 (2014-2016). Эксперименты, проведенные на этом стенде с применением имеющихся методик, имеют несомненную ценность. Важно, что эксперименты проводятся на тонкой поверхности. Однако надо иметь в виду, что толщина самой стенки влияет на теплообмен. т.к. занижаются значения тепловых потоков, которые могли бы получить, если бы поверхность была толстостенной.

В 1965 году я делал эксперименты по теплообмену. Я получил на тонкостенном нагревателе критический тепловой поток на воде 600000 Вт/м^2 , в то время, когда я всегда получал на толстостенном нагревателе $1240000 - 1400000 \text{ Вт/м}^2$, и сильно удивился. Я думал, что что-то испортилось. Несколько раз повторил опыт. Все так. Тогда я стал систематически менять толщину стенки и вышел на полку, где получил результат 1400000 Вт/м^2 . Тогда еще я не понимал, что есть зависимость от толщины стенки. Сама теория тогда не предполагала вообще, что стенка участвует в теплообмене. Считалось, что только жидкость, пар и температура стенки играют роль.

В 1966 г. С.С. Кутателадзе приехал из Чикаго с конференции и привез статью с экспериментами ученого Бернаса. Они были опубликованы в 1960 г. в трудах второразрядной конференции и не были известны в литературе широко. В статье Бернаса зависимость толщины стенки на кризис теплообмена при кипении уже была видна. Но у него тоже не было никаких объяснений. В 1965 году я сделал подобные эксперименты не зная его опыта. Теперь у меня есть обобщение результатов экспериментов многих авторов, где показано, что на тонкостенном нагревателе кризис падает до четырех раз.

В кандидатской диссертации академика Клименко есть эксперименты, где он, меняя толщину стенки, показал, что этот факт начинает сказываться на теплоотдачу. Более того, сама зависимость коэффициента теплоотдачи от ΔT меняет наклон. При кипении на латунной стенке она сначала ведет себя при малых тепловых потоках как толстостенная поверхность, а при больших тепловых потоках начинает отклоняться вправо. ΔT сильно

растут и в логарифмических координатах получается не прямая линия, а ломаная. Это надо иметь в виду.

В вашей лаборатории (* лаборатория Интенсификации процессов теплообмена ИТ СО РАН) вы много чего видите, чего в мире не видят и не знают. Это очень важно. Могу еще раз сказать, что у вас прекрасные приборы, прекрасные методики и это очень важно. Лаборатория без приборов – это не лаборатория. Спасибо.

Д.т.н., г.н.с. И.И. Гогонин

ВЫСТУПЛЕНИЕ

**ДОКТОРА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК, ПРОФЕССОРА, ГЛАВНОГО НАУЧНОГО
СОТРУДНИКА ИНСТИТУТА ТЕПЛОФИЗИКИ ИМ. С.С. КУТАТЕЛАДЗЕ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ВИКТОРА ИВАНОВИЧА ТЕРЕХОВА**

Уважаемые коллеги, я, может быть, скажу несколько путанно, поскольку волнуюсь, но тем не менее, постараюсь как-то отразить свое отношение к этой работе и к ситуации в целом. Знаете, за мою долгую историю работы, в институте, это первый случай, когда мы публично разбираем инцидент, причем с далеко идущими последствиями. Вы сами прекрасно понимаете, какими. Кому бы я там ни говорил, никто в это не верит. Я не могу быть таким эмоциональным внешне, как Булат Искандерович (*Нигматулин), но у меня в душе примерно такое же отношение.

Теперь по науке. Мы много занимались проблемами охлаждения и не понаслышке все это знаем. Все показанные сегодня трудности и сложности. Правда, для других объектов, для летательных аппаратов. Конечно, есть здесь свои большие особенности, на которые надо, обращать внимание. Но прежде всего мы всегда делали какую-то интегральную оценку: а возможно ли? Сколько надо, скажем, рабочего тела для того, чтобы снять те или иные потоки? Какие нужны температуры, расходы и так далее? Вот даже в ответах на вопросы сегодня докладчики не очень четко это себе представляют. Может быть, они и имеют такие данные, но тем не менее это не очень четко и убедительно прозвучало. Вы знаете, проект этот, в общем-то, не столько фундаментальный, сколько он имеет прикладную компоненту. И она достаточно серьезная. То есть нужно было создать установку для демонстрации тех или иных эффектов. Вот в этой связи я хотел бы предостеречь молодежь, и не только молодежь, что надо быть очень аккуратным при выборе того или иного исследовательского процесса проекта. Это понятно почему. Все это началось давным-давно, когда мы были нищими такими, что и есть не на что было. И мы брались за любую работу. Какую? Ну, например, я приезжаю в Томск, ищу своего коллегу и мне говорят, «он в пристройке экспериментом занимается». Захожу в эту пристройку, а там стоит небольшая пилорама, и он лес там пилит. Вот какими вещами научный сотрудник занимался. И мы тоже занимались подобными вещами. Что мы только ни делали. Конечно, нас загнали ниже плинтуса, и при этом еще говорили, что нет, ваша фундаментальная наука никому не нужна, а нам нужно прикладные вещи делать. Прикладные вещи - это совершенно другая материя. Мы к ней не приспособлены. Мы можем придумать что угодно, но на практике это может просто не пойти из-за какой-то там одной мелочи. Так гайка не помещается, и все... Да, я согласен с Булатом Искандеровичем (*Нигматулиным), что надо биться за свои права, но мы ограничены рамками нашей бюрократии. То есть, что написано в документе, мы обязаны выполнить. И против закона никуда не поперешь. Вот вам простой пример. Приезжала к нам не так давно, комиссия по проверке мегагранта. Вы знаете, мы были ошарашены. Мы говорим, что получены прекрасные результаты, написаны монографии и т.д. Они говорят: «Нам не нужны ваши монографии. Вот здесь в плане написано: «Должна быть создана база экспериментальных данных». Где эта база экспериментальных данных? Мы говорим, вот статьи, там базы экспериментов и прочее. «Нет, это не база. База должна быть соответствующим образом оформлена. Она должна быть такой-то, там должны стоять печать». Какого уровня должна печать? «Самого высокого». Должна стоять печать Министерства, чтобы это действительно приняли за базу какую-то. Или еще, было написано: «Изготовить образец материала с фазоизменяемыми

свойствами». Так, хорошо. «Вот здесь написано, несите материал. Где этот у вас материал? На каком складе? В каком количестве?». Мы отвечаем: «Да вы что шутите, что ли? Всего на всего маленький кусочек». Они: «Так вот вы в ТЗ должны были написать и готовить материал в количестве 20 грамм. А когда этого не написано, значит это **мы** должны диктовать условия». Вот эти все тонкости, нас загоняют в такие вот узкие и жесткие бюрократические рамки, что надо быть чрезвычайно осторожным и аккуратным.

Я могу точно сказать, что многие из нас вполне могли бы разделить судьбу исследователей (* проекта ФЦП № 14.613.21.0011). На самом деле это так. Поэтому вот такое у меня предостережение. Что же касается сегодняшнего доклада и материалов, то это, конечно, без сомнения - это передний край науки. Не вдаваясь в детали, об этом уже Сергей Владимирович сегодня говорил, в тонкости соответствия выполнения плана надо детально садиться и разбираться. То-то выполнено, то-то не выполнено. Но то, что это серьезная работа с серьезными результатами в виде статей, патентов, новых идей, это все не вызывает сомнения. Еще что я хочу, и мечтаю, чтобы мы больше не собирались вот по таким поводам.

Конечно, в том, что мы сегодня обсуждали, огромная роль принадлежит экспертам. Многие из нас являются экспертами. Все лежит на совести самого эксперта: правильно понять работу, дать правильную оценку. Обратного механизма влияния на необъективного эксперта у нас пока нет. Из своей практики, могу привести пример. Мы подали на продолжение и на новый проект РФФ один и тот же текст, слово в слово. На один пришел отзыв – «Великолепно, это – прорыв», а на второй - абсолютно отрицательный отзыв. Как такое может быть? Вот что делать? Мне кажется, что надо подготовить предложение об ответственности экспертов за их решения и принять его законодательно. Не знаю, как это будет действовать, но, честно говоря, это беда всей нашей России. Поэтому надо что-то делать по этому поводу. Спасибо, Сергей Владимирович.

Д.т.н., профессор, г.н.с. В.И. Терехов

**ВЫСТУПЛЕНИЕ
ДОКТОРА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК,
ПРОФЕССОРА ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ГЕНИЯ ВЛАДИМИРОВИЧА КУЗНЕЦОВА**

Сергей Владимирович, я рвался выступить потому, что у меня через две минуты лекция должна начаться. Поэтому я прошу меня извинить, если я кого-то опередил. Я считаю целесообразным сказать, как человек со стороны, нас двое, таких присутствует отдаленных участников семинара, что в течение последних примерно 10-11 лет я регулярно на конференциях, которые проходят в Российской Федерации, слушал доклады сотрудников Института теплофизики (*ИТ СО РАН), работающих в той области, о которой сегодня идет разговор. Они всегда вызывали большой интерес у аудитории и никогда не возникало какого-то сомнения в их новизне и фундаментальности. То есть оценки всегда были высокие, люди слушали с большим интересом, вопросы были очень заинтересованные. У меня сложилось впечатление, что, вообще говоря, Институт теплофизики в этой сфере занимает лидирующее положение не только в Российской Федерации, но и в мире, по крайней мере не уступает зарубежным коллегам в уровне исследований и качестве результатов. Это, я считаю, все-таки главное.

Ну а эти детали, о которых Виктор Иванович (*Терехов) говорил, конечно, это связано с тем, что программа-то называется «Исследования и разработки...», а я по своему собственному опыту знаю, мне приходилось выполнять достаточно объемные опытно-конструкторские работы, и я могу с уверенностью сказать, что «исследование» и «разработки» — это два разных вида, скажем так, деятельности. Вообще для того, чтобы получить какое-то изделие, надо пройти стадии научно-исследовательских работ, опытно-конструкторских работ, эскизного проектирования, рабочего проектирования. И вот тут, когда такого рода программы «Федеральные исследования и разработки», скажем так, запускаются, там, конечно, регламент, наверное, не очень конкретно сформулирован. Поэтому остаются какие-то вот такие большие зазоры, в которых люди могут просто ошибиться при формулировке каких-то положений, цели, задач, ну и так далее. Тут беда в этом как раз получилась. Ну, а в заключении я повторю то, что я сказал вначале. Институт теплофизики бесспорно занимает лидирующее положение не только в Российской Федерации, но и в мире по той тематике, о которой сегодня говорили. Спасибо за внимание.

Д.ф.-м.н., профессор Г.В. Кузнецов

**ВЫСТУПЛЕНИЕ
ДОКТОРА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК, ПРОФЕССОРА,
ГЕНЕРАЛЬНОГО ДИРЕКТОРА ИНСТИТУТА ПРОБЛЕМ ЭНЕРГЕТИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (Г. МОСКВА),
БУЛАТА ИСКАНДЕРОВИЧА НИГМАТУЛИНА**

Уважаемые коллеги! Я кризисом много занимался. То, что сегодня мы услышали, а именно - динамическое движение сухих пятен, новые эффекты с микропятнами, и вообще, саму возможность физики посмотреть переход от одного условия охлаждения к другому условию охлаждения, более эффективному, получили инструмент для исследования, спутный поток, и с точки зрения явлений: и однокомпонентность, и неконденсирующий газ, и так далее. Это инструменты, которыми можно исследовать явления в тонких плёнках и сухих пятнах. Я сейчас вспоминаю, Борис (*обращение к Б.Г. Покусаеву), это была переводная работа примерно в 70-х годах японских ученых, где эти явления тонких плёнок и сухих пятен были впервые упомянуты. Ну, конечно, мне работа (*Кабова ОА) очень понравилась. Конечно. Безусловно, появился инструмент, который может исследовать это достаточно сложное явление. И появился **факт**, то есть появился новый результат. Но пожелание такое. Здесь есть целая масса работ, чтобы дальше вы довели этот результат до того, чтобы можно сделать инженерные корреляции, инженерные изделия, инженерные системы, для того чтобы снимать высокие тепловые потоки, чтобы это было приложено как раз в микроэлектронике или в других приложениях.

На счёт нелепости я хочу сказать. Я помню, как раньше кровавые споры были. Но это между учеными! Тогда в нашу научную среду не могли влезть непонятные люди. Эти 60-е, 70-е, 80-е, 90-е годы... Просто таких людей не было. Я разобрался с экспертными заключениями на проект ФЦП № 14.613.21.0011 и дал свой ответ (*См. папку: <https://drive.google.com/drive/folders/1iFRDKZDxMSZKb9Xml7BgqmXVA8VZ5Zth?usp=sharing>). Раз в нашей среде, возникают такие нелепые экспертизы и нелепая система, которая произошла, то среда наша должна противодействовать. Иначе начнется время мракобесия. Почему это прошло? Потому что попала в научную среду целая группа людей, которые к науке не имеют никакого отношения, или имеющие косвенное отношение. И второе, эта группа людей живет по принципу «чего изволите-с?». Попросили сделать? Любую экспертизу сделали. Что угодно! Вот это, это огромная беда в нашей среде. И это должно быть абсолютно нетерпимым! Да, везде, во всех странах есть школы и прочее, но, когда экспертизу делает абсолютный непрофессионал в соответствующей науке, это нетерпимо. Здесь как раз об этом идет речь. Что человек, который официально материаловедением занимающийся, взялся за теплофизику и газовые потоки, и это воспринимается в академическом сообществе? Такие клеветнические экспертизы бросают тень и грязь как на Институт (*ИТ СО РАН), так и на Республиканский центр экспертизы (*РИНКЦЭ). А, надо сказать, что уровень у Института теплофизику им. С.С. Кутателадзе СО РАН – мировой! Спасибо.

Д.т.н., профессор Б.И. Нигматулин

ВЫСТУПЛЕНИЕ

**ДОКТОРА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК, ВЕДУЩЕГО НАУЧНОГО
СОТРУДНИКА ИНСТИТУТА ТЕПЛОФИЗИКИ ИМ. С.С. КУТАТЕЛАДЗЕ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
СЕРГЕЯ АНДРЕЕВИЧА НОВОПАШИНА**

Уважаемые коллеги, должен сказать, что доклад мне очень понравился, но я не являюсь специалистом этой области и хотел бы высказать мнение о формальной стороне. У меня было много проектов ФЦП, и всю процедуру от написания проекта до оформления отчетов, я очень хорошо знаю. Конкретно, при подготовке отчетов на каждом этапе есть следующие процедуры: при изготовлении установки подписываются акты изготовления; если нужно получить технические характеристики, то подписывается протокол испытаний конкретных образцов в нужном количестве, в нужном месте и так далее. Все технические характеристики, которые указаны в техническом задании прописаны, и это утверждается как комиссиями института, так и испытателями, которые это делают. Кроме того, отчеты на каждом этапе рассматриваются научно-техническим советом, который утверждает и подписывает его, после этого документы отправляются в Дирекцию ФЦП. Там есть несколько экспертов по разным направлениям, есть технические, которые требуют соответствия оформления в соответствии с ГОСТами как текстовых документов, так и чертежей. Это осуществляется достаточно придирчиво. Эксперты вообще высокого уровня. Многократно нам заворачивали и заставляли переделывать отчеты. Но, кроме этого, есть и научные эксперты. Несколько раз мне приходилось высылать ответы на их вопросы, даже ездить в Москву, чтобы научным экспертам объяснять, почему то-то и то-то. Научные эксперты, конечно, не такого высокого уровня, чем технические, потому что они не могут быть близки к той области знаний, которой мы занимаемся. Но, насколько я понял, в данном проекте, который мы обсуждаем, все процедуры, включая институтские и Дирекции ФЦП были пройдены, все документы были оформлены в соответствии с требованиями ФЦП и отчетные документы были приняты как техническими, так и научными экспертами, и проект был, в конце концов, принят. Вот поэтому, мне кажется, что формальных претензий к Олегу (*Кабову О.А.) как с научной точки зрения, так и соответствия формальным требованиям быть не может. Это относится ко всем стадиям, начиная с проекта и кончая финальным отчетом. Все, спасибо.

Д.ф.-м.н., в.н.с. С.А. Новопашин

**ВЫСТУПЛЕНИЕ
ЧЛЕНА-КОРРЕСПОНДЕНТА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК,
ЗАВЕДУЮЩЕГО ЛАБОРАТОРИЕЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕПЛОФИЗИКИ
ИНСТИТУТА ТЕПЛОФИЗИКИ ИМ. С.С. КУТАТЕЛАДЗЕ СИБИРСКОГО
ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК,
ДОКТОРА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК
АЛЕКСАНДРА НИКОЛАЕВИЧА ПАВЛЕНКО**

Коллеги, я начал в своих конкретных вопросах к исполнителям проекта “за упокой”. Немножко можно и “за здравие” сказать. Я буду говорить исключительно по науке, поскольку я не являюсь сотрудником Департамента Минобрнауки и четкий, детальный анализ степени выполнения задач и достижения целей обсуждаемого проекта не входит в мои обязанности. Тематика данного проекта, здесь я согласен с Борисом Григорьевичем (*Покусаев) и Булатом Искандеровичем (*Нигматулин), конечно, очень актуальна. Безусловно. Основная задача при разработке систем охлаждения для микроэлектроники и для силовой микроэлектроники - это, конечно, выбор и реализуемость конкретных условий эксплуатации, обоснование практичного, обоснованного по энергетическим и экономическим затратам режима устойчивого охлаждения. То есть, в зависимости от требуемых условий, это либо иммерсионное (погружное) охлаждение, либо спрейно-струйные режимы охлаждения, которые сейчас очень широко исследуются и уже создаются реальные системы, либо каналные системы с вводом недогретой, либо насыщенной (находящейся на линии насыщения) жидкости. Причем, реальные каналные системы охлаждения, вот как сегодня много уже обсуждалось в вопросах и ответах на вопросы, являются однокомпонентными, то есть жидкость принудительно подается в канал, а пар генерируется вследствие фазового перехода при кипении. То есть, тогда, когда в канал вводится жидкий поток или с какими-то начальными значениями недогрева жидкости или паросодержания, но без ввода другого газа. И, конечно, обсуждаемый проект “Создание технологии охлаждения теплонапряженных элементов с использованием однокомпонентных двухфазных потоков”, главным образом, должен был быть именно на это направлен. Как бы я выполнял этот проект - я не буду на этом собрании обсуждать. Но с точки зрения требований технического задания (ТЗ), конечно, необходимо было четко придерживаться всех основных (принципиальных) пунктов задания. Поэтому здесь, оставаясь в рамках научного обсуждения, я в виде рекомендаций, может быть, скажу несколько слов, поскольку это чисто научный семинар, и я имею право здесь это сделать. Первое - это касается выбора жидкости. Микроэлектроника - это область, где, как правило, как было отмечено в первом докладе (руководителя проекта), температуры на охлаждаемой кремниевой поверхности (не внутри чипа) должны быть не более ~ (55-65) градусов С. И только тогда внутри чипа на транзисторах при характерных на сегодня плотностях тепловых потоков, если оценить для кремниевых пластин используемой толщины, это будет не более требуемых ~ (80-85) градусов С, соответственно. Поэтому, в этом смысле, конечно, нужно развивать практические исследования с использованием именно тех жидкостей, которые реально должны и могут использоваться в сегодняшней микроэлектронике. Это - либо диэлектрические жидкости, либо фреоны, поскольку при использовании воды (при атмосферном давлении) при подходе к критическому тепловому потоку температура даже на теплоотдающей поверхности (а не внутри чипа), как следует из представленных сегодня экспериментальных данных, уже составляет около 132 градуса С. Есть, конечно, системы с транзисторами другого типа при использовании в космической технике, в другой силовой электронике, где достигаются перегревы вплоть до ~ (400-500) градусов С., но я не думаю, что предлагаемая исполнителями проекта разомкнутая система с вводимым высокоскоростным газом практически может использоваться, или, где, например, при

возврате газового потока размеры конденсатора для парогазовой смеси будут больше размеров всего космического корабля.

Далее - по части физики, исследуемых механизмов теплообмена в обсуждаемых режимах. Много было сегодня в докладах сказано о различных физических аспектах данной проблемы, в особенности, о появлении “сухих” пятен, динамике их развития, плотности их распределения на теплоотдающей поверхности. Несколько слов касательно того, что Олег Александрович в его докладе постарался сегодня показать - какие же физические механизмы обеспечивают передачу высоких плотностей тепловых потоков в исследованных режимах при течении пленки жидкости, увлекаемой высокоскоростным газовым потоком? Здесь, конечно, я не соглашусь с докладчиком и поясню мои соображения и аргументы касательно физики образования и влияния “сухих” пятен. Если мы проанализируем исследуемый режим течения пленки жидкости, то убедимся, что рабочая жидкость (вода) кипит в данном случае непосредственно перед кризисом при температуре теплоотдающей поверхности около 132 градусов С. Это соответствует перегреву при развитом пузырьковом кипении воды в условиях большого объема. Именно при этих значениях перегрева толщина пленки уже не сказывается с точки зрения количества активных центров парообразования. Если мы возьмем представленные докладчиком данные, то вы увидите, что они точно совпадают со значениями плотности центров парообразования при развитом пузырьковом кипении воды. Поэтому считаю, что говорить о том, что это новый тип теплообмена, а тем более “открытие”, не уместно и необоснованно. Все определяет, как при обычном развитом пузырьковом кипении, активация центров парообразования, соответствующая степень перегрева с учетом градиента температуры на масштабе готовых центров парообразования. То есть, при этих перегревах не достигается, хорошо известный специалистам по кипению, эффект подавления кипения в пленке жидкости. А пленка довольно тонкая, поэтому любые быстрорастущие пузырьки (а это десятки микросекунд при данных перегревах), быстро создают “сухие” пятна (как происходит осушение поверхности под паровыми пузырями при обычном пузырьковом кипении в условиях большого объема жидкости). Я впервые критическим образом обращал внимание Олега Александровича (*Кабова) на это, когда шла дискуссия на международной конференции лет 15 назад после его доклада о представлении данного способа отвода тепла тонкой пленкой жидкости, увлекаемой высокоскоростным газовым потоком: природа не создала ничего лучшего, чем пузырьковое кипение, поскольку это большая совокупность устойчивых мелкомасштабных “сухих” пятен с соответствующими микрорегионами высокоинтенсивного отвода тепла при испарении.

Теперь, что касается выбора оптимальных систем охлаждения и сравнительной составляющей при их сопоставлении. Безусловно, когда анализируется система с вводом в канал/миниканал обычной существенно недогретой воды без газа, я сегодня уже отмечал это, легко может быть достигнута плотность теплового потока более 8 тысяч Вт/см². Это в 8 раз превышает то, о чем мы сегодня говорили в рамках обсуждения достигнутых в ходе выполнения обсуждаемого проекта результатах. Достигается это за счет высокой скорости, глубокого недогрева жидкости, но, кстати, недогрев здесь такой же, как в экспериментах у авторов проекта. В частности, можно добавить, это уже было показано ранее, что при охлаждении в условиях кипения однокомпонентных потоков недогретой воды достигнуты даже и плотности теплового потока вплоть до 27600 Вт/см². При этом опыты, где было достигнуто это рекордное значение критического теплового потока (исследование Mudawar I. и др., 1999), были проведены не на больших диаметрах труб, как ошибочно утверждают авторы ответа, а на капиллярном канале диаметром 0.4 мм. И, конечно, необходимо использование интенсификаторов. Спираль можно вставить, сделать микрооребрение, покрытия, еще что-то. Поэтому здесь, конечно, надо было при выполнении проекта просто получить, найти те значения расходных характеристик по жидкости, поскольку недогрев тот же самый, в том числе, с интенсификаторами, чтобы уверенно получить 1000 Вт/см².

Считаю, что это был бы хороший и практически важный результат при выполнении проекта. При этом, что важно и совершенно очевидно, сопоставление параметров однокомпонентной системы и системы с вводом высокоскоростного потока газа должно проводиться не при одинаковых расходах жидкости, а при одинаковых перепадах давления (гидравлических потерях, и, соответственно, энергетических затратах) на канале. Потому что разработчиков системы, а в рамках данного проекта речь идет именно об экспериментальном образце, интересуют только гидравлические потери при заданных технических параметрах по температуре теплоотдающей поверхности и достигнутой плотности теплового потока. Поэтому я считаю, что однокомпонентная система охлаждения будет здесь, безусловно, выигрышной.

Здесь много молодых научных сотрудников, которые, в частности, трудятся и в лаборатории, где выполнялся проект- необходимо думать и в тех направлениях, которые показывают обоснованное сопоставление, применимость различных перспективных систем охлаждения. Поэтому в этом отношении, то, что мы сегодня здесь собрались на научном семинаре, будет очень всем полезно.

Чл.-корр. РАН, зав. лабораторией А.Н. Павленко

**ВЫСТУПЛЕНИЕ
ЧЛЕНА-КОРРЕСПОНДЕНТА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК,
ДОКТОРА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК, ПРОФЕССОРА
БОРИСА ГРИГОРЬЕВИЧА ПОКУСАЕВА**

Уважаемые коллеги, мне доклад О.А. Кабова очень понравился. Я как старый “пленочник” и еще более древний “кипятильщик”- в удивлении. Действительно, когда в процессе кипения возникают режимы с появлением сухих пятен, мы знаем, что это кризис кипения и это плохо! И здесь, вдруг в этих оригинальных исследованиях обнаруживаются режимы испарения тонких пленок жидкости с появлением значительного числа микросухих пятен, что приводит к значительной интенсификации теплоотдачи. Какие-то наметки таких эффектов, если мне не изменяет память, встречались в японских работах прошлого века. Но, возможно, я ошибаюсь.

Но вот здесь нам представлен развернутый, очень интересный фундаментальный результат. Более того представлен также оригинальный экспериментальный стенд в металле, который оснащен соответствующей методикой и аппаратурой.

Теперь несколько слов о той “мышинной возне”, которая возникла вокруг этого проекта. Просто удивительно! Это нелепость какая-то! Научный результат, доложенный нам и отраженный в публикациях высокого уровня, несомненно является выдающимся как с фундаментальной, так и, с заявленной в проекте, практической точек зрения.

Я сам вел много проектов РФФИ, РФФИ, ГЗ, являюсь экспертом и могу ответственно заявить, что работы этого коллектива по этому направлению исследований находятся на самом высоком мировом уровне.

P.S. Особо хочу отметить, что оценивать такие работы с помощью необоснованных, высосанных из пальца каких-то количественных коэффициентов – это нелепость!

Чл.-корр. РАН Б.Г. Покусаев

**ВЫСТУПЛЕНИЕ
ЧЛЕНА-КОРРЕСПОНДЕНТА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК,
ДОКТОРА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК, ГЛАВНОГО НАУЧНОГО СОТРУДНИКА
ИНСТИТУТА ГИДРОДИНАМИКИ ИМ. М.А. ЛАВРЕНТЬЕВА СИБИРСКОГО
ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ВЛАДИСЛАВА ВАСИЛЬЕВИЧА ПУХНАЧЕВА**

Уважаемые коллеги, прежде всего, я хочу сказать, что мне очень понравился доклад Олега Александровича (*Кабова). Хочу поздравить его и коллектив, которым он руководит, с выполнением очень сложной задачи, имеющей прикладное значение и научное тоже. И позвольте мне немножко сказать о тех научных вопросах, которые возникают в процессе выполнения этой работы и сопутствующих работ. Я могу сказать, что мы хорошо знакомы с кандидатской диссертацией Дмитрия Юрьевича Кочкина. Когда говорят о сухих пятнах, считается, что это явление нежелательное. Иногда просто можно с этим смириться, иногда нужно бороться. Но, мне кажется, в этой диссертации впервые динамика развития сухого пятна была исследована очень детально. И сделан фундаментальный вывод сделан: колоссальная роль в смачивании поверхности, по которой распространяется это тепло. Может быть, это не имеет такого прямого отношения к задачам проекта, но результат сам по себе высокого класса, научный результат. Я думаю, что и дальше он получит развитие.

А второе, это не вошло в доклад, потому что это не имеет прямого отношения к проекту, но один из результатов, полученных в коллективе – это движение линии трёхфазного контакта по плоскости с образованием капельного пластыря. Вот представьте себе, как образуются эти капли. Это что? Конденсация перегретого пара, или это каким-то образом капли выпрыгивают, преодолевая свободную поверхность и несутся вместе к линии контакта? Это просто явление природы, которое требует своего объяснения. У меня нет каких-то предположений, но мне кажется, что вот такие вопросы, которые, на первый взгляд, может быть, не имеют практического значения, они стимулируют развитие науки.

Я хочу сказать, что целый ряд результатов в этом проекте (*ФЦП № 14.613.21.0011) стимулировал работы теоретиков и вычислителей, которые этим занимаются, в Барнауле и в Красноярске. Недавно в вашем Совете защищалась диссертация И.А. Шефера, где исследовалась устойчивость двухфазного течения с температурой, переменной вниз по потоку. Вот если такого рода исследования (* как проект ФЦП № 14.613.21.0011) будут дальше стимулировать развитие как прикладных, так и теоретических исследований, это можно только приветствовать. И я хочу сказать, что те контакты, которые так или иначе складываются между сотрудниками Института теплофизики и других организаций, они, конечно же, пойдут всем на пользу. Я готов, чтобы наши контакты развивались, и мы друг другу ставили задачи и помогали бы друг другу их решать. Спасибо.

Чл.-корр. РАН, д.т.н., г.н.с. В.В. Пухначев

РЕШЕНИЕ ОБЪЕДИНЕННОГО СЕМИНАРА

На основании заслушанных выступлений, обсуждений и комментариев по теме «Охлаждение высоконапряженных по тепловым потокам электронных компонентов посредством интенсивно испаряющейся тонкой пленки жидкости с динамическими микроразрывами» решили:

1. Научно-технический задел лаборатории Интенсификации процессов теплообмена по теме «Охлаждение высоконапряженных по тепловым потокам электронных компонентов посредством интенсивно испаряющейся тонкой пленки жидкости с динамическими микроразрывами» был создан во многом в рамках проекта ФЦП № 14.613.21.0011, в ходе выполнения которого получены выдающиеся фундаментальные результаты, которые легли в основу дальнейших исследований вплоть до настоящего времени.
2. На основании проведенного исследования впервые в данном проекте был предложен новый эффективный метод интенсификации теплообмена в пленочных системах, основанный на формировании в жидкости короткоживущих разрывов малого размера. За время выполнения проекта опубликовано 23(21) статьи в жестко рецензируемых журналах, получено 5(5) патентов, сделано 22(14) выступления по материалам исследования на различных Российских и международных конференциях, поддержана и обеспечена защита 5(5) кандидатских диссертаций (в скобках указаны плановые показатели Соглашения, подписанного с Министерством образования и науки).
3. До начала работ по проекту предложенный метод интенсификации теплообмена в пленочных системах был неизвестен авторам проекта, поэтому о нем не сказано ни в заявке на право выполнения проекта, ни в статьях коллектива авторов, опубликованных до начала проекта. Таким образом этот выдающийся результат является прямым итогом работы по проекту. Задача, поставленная перед исполнителями проекта, отвести тепловые потоки до 1000 Вт/см^2 с использованием высокоэффективных пленочных технологий и близком к полному испарению теплоносителя, не имела простого технического решения. Авторам проекта удалось собрать необходимый объем новой информации, который позволил предложить принципиально новый метод интенсификации теплообмена. Такая идея была революционной для применения в пленочных аппаратах, т.к. в промышленных технологиях появление сухих пятен всегда является проблемой.
4. В рамках проекта ФЦП № 14.613.21.0011 была сформулирована и обоснована новая научная идея экспериментальной установки для исследования испарения в области контактной линии (далее – стенд), которая бы позволила выполнять исследования процессов теплообмена в области линии контакта газ – жидкость – твердое тело, включая методику измерений и исследований. К настоящему времени на стенде получен целый ряд прорывных результатов, которые опубликованы в высокорейтинговых журналах. В частности, измерена локальная плотность теплового потока в области линии контакта.
5. Разработан и создан экспериментальный образец испарительной системы охлаждения теплонапряженных элементов, полностью замкнутый по жидкости и

газу. Испытания показали его работоспособность, т.е. что экспериментальный образец может использовать как чистый пар, так и парогазовую смесь и в состоянии отводить тепловой поток более 1000 Вт/см^2 , чем подтверждается достижение цели проекта по разработке и созданию экспериментального образца испарительной системы охлаждения теплонапряженных элементов с использованием однокомпонентных двухфазных потоков. Патент № 2807853 «Двухфазная однокомпонентная система охлаждения» от 21 ноября 2023 года подтверждает новизну разработки вплоть до настоящего времени. Таким образом изначальные требования к экспериментальному образцу как к системе, работающей на однокомпонентной жидкости, были полностью выполнены и предложена более универсальная и надежная система по сравнению с системой, работающей только на чистом паре. Причем добавление неконденсируемого газа в систему используется для интенсификации теплообмена и повышения эффективности и эксплуатационных качеств системы в целом.

6. После окончания проекта экспериментальный образец продолжал использоваться для исследований, а также для обучения и повышения квалификации студентов и аспирантов. С использованием экспериментального образца опубликовано 5 статей в рецензируемых изданиях. Кроме того, экспериментальный образец использовался для выполнения проектов РФФИ и РФФИ в период с 2017 до 2019 годы, где было подтверждено, что он способен отводить тепловой поток 1480 Вт/см^2 .
7. Экспериментальный образец был восстановлен в 2023 году в оригинальной версии в соответствии с конструкторской документацией по проекту и в соответствии с описанием в отчете № 5 с. 14-16 на основании Приказа директора ИТ СО РАН № 103 о/д от 21.08.2023. Предполагается что экспериментальный образец будет активно использоваться в ближайшее время для проведения исследований, в частности, по государственному заданию, для работ в интересах создания второй очереди проекта СКИФ (Сибирский Кольцевой Источник Фотонов) совместно с ЦПК СКИФ.
8. В ходе выполнения проекта предложена не одна, как это предполагалось в Соглашении, а пять новых концепций систем охлаждения высокопроизводительных электронных компонент. Три из них были защищены патентами РФ в ходе выполнения проекта. На одну из пяти предложенных систем разработана детальная техническая документация, которая представлена в отчете № 5. На эту систему также получен патент уже после окончания проекта. Одна из систем создана в виде экспериментального образца, испытана и запатентована после окончания проекта. Одна из запатентованных систем, основанная на совместном использовании пленочных и капельных потоков, была создана в рамках проекта РФФИ-19-19-00695 (2019-2021 гг.) и позволила отводить тепловой поток 1200 Вт/см^2 с учетом растечек тепла.
9. Обнаружено новое, ранее неизвестное явление в физике жидкостей - факт самоорганизации течения в интенсивно нагреваемой тонкой пленке жидкости, движущейся под действием спутного потока газовой фазы с массовым образованием короткоживущих малоразмерных разрывов слоя жидкости. Следствием указанного процесса является формирование протяженных динамических линий контакта газ – жидкость – твердое тело, в окрестности которых происходит сверхинтенсивное

испарение жидкости. При этом условная средне-интегральная толщина пленки на нагревателе может составлять порядка 2-3 микрон. Итогом обнаруженного нового явления является интенсификация теплообмена в пленках жидкости в 10-20 раз. Есть основания полагать, что обнаружена возможность реализации процесса теплообмена более эффективного чем кипение. Процесс сверхинтенсивного испарения происходит не внутри пузырьков, а в тонкой пленке жидкости увлекаемой потоком газовой фазы, т.е. образовавшийся пар беспрепятственно уносится быстро движущейся газовой фазой, что также существенно интенсифицирует теплообмен. Продолжение исследований в данном направлении подтвердило сделанные в проекте выводы. Таким образом фактически сделано открытие.

10. Благодаря участию иностранного партнера в работе проекта достигнуты:

- 1) «значительное расширение географии международного сотрудничества научно – исследовательских организаций и университетов;
- 2) развитие новых перспективных направлений исследований и прикладных разработок за счет привлечения к совместным работам ведущих международных специалистов;
- 3) взаимовыгодный информационный и научно-технический обмен между странами-партнерами».

Иностранный партнер (Проф. Охта, Япония) вкладывал в совместный проект значительные собственные средства (в соответствии с Соглашением № 14.613.21.0011 о предоставлении субсидии от 27 августа 2014 г), создавал новые стенды и рабочие участки, проводил исследования и предоставлял российской стороне отчет на каждом этапе. Были опубликованы 3 совместные статьи, сделано 2 совместных доклада на международных конференциях, в том числе на конференции, проходящей в 2016 г в ИТ СО РАН по теме проекта. В рамках международного сотрудничества, иностранным партнером был создан новый экспериментальный стенд и выполнены исследования двухфазных потоков при нагреве от протяженного нагревателя, что нашло отражение в его аннотационных отчетах по каждому этапу проекта.

11. Выполнение проекта дало толчок исследованию ряда задач в течении последующих лет. Например, обнаружение остаточного слоя сверхтонкой пленки (5 - 10 микрон) перед разрывом слоя жидкости было более детально изучено в работах аспиранта Д.Ю. Кочкина, и стало одним из основных результатов его диссертации кандидата физико-математических наук, защищенной в 2023 г. Обнаружение того факта, что микрокапли конденсата могут левитировать не только над смоченной поверхностью нагревателя, но перелетают через линию контакта и левитируют над «сухой» поверхностью нагревателя, привело к целому циклу систематических, фундаментальных исследований по динамике микрокапель в окрестности линии контакта газ – жидкость – твердое тело. Результаты признаны мировым сообществом и опубликованы в целом ряде высокорейтинговых журналов, в том числе в журнале «Annual Review of Fluid Mechanics», который занимает первую строку в мировом рейтинге журналов по механике жидкости и газа.

12. Полученные при выполнении проекта научные и научно-технические результаты имеют важное практическое значение и особо могут быть востребованы в случае ускоренного развития электронной промышленности Российской Федерации. Предложенный метод интенсификации теплообмена на новых физических

принципах в перспективе позволяет перейти к разработке сверхкомпактного энергетического оборудования с плотностью тепловыделения до 10 МВт/м².

13. Фундаментальные результаты и разработки, выполненные в рамках проекта в период с 2014 по 2016 годы, позволяют создать системы охлаждения самой быстродействующей и теплонагруженной электроники, что становится особенно актуальным в сложившихся в последние годы геополитических условиях.
14. На основе вышесказанного можно заключить, что ИТ СО РАН бесспорно занимает лидирующее положение не только в Российской Федерации, но и в мире по производству фундаментальных результатов в области теплофизики и механики двухфазных систем и, в частности, в области создания технологии охлаждения теплонагруженных элементов с использованием двухфазных потоков.

Председатель объединенного семинара
научный руководитель ИТ СО РАН академик С.В. Алексеенко

Ученый секретарь объединенного семинара
заведующий лабораторией ИТ СО РАН, к.ф.-м.н. В.В. Чеверда

**ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНОЕ СЛОВО НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ
ИНСТИТУТА ТЕПЛОФИЗИКИ ИМ. С.С. КУТАТЕЛАДЗЕ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
АКАДЕМИКА РАН СЕРГЕЯ ВЛАДИМИРОВИЧА АЛЕКСЕЕНКО**

Уважаемые коллеги, подведем итоги. Я думаю, самое главное то, и это радует, что у нас есть научное сообщество, в котором есть взаимопонимание, и которое действительно может выработать квалифицированное мнение. Проблема, конечно, возникает в экспертизе. Это не только в данном случае. Решение по конкретной работе может полностью зависеть от эксперта, рецензента. И по научным конкурсам, и по принятию статей к публикации. При любой экспертизе должны выполняться два требования. Первое, должны быть квалифицированные эксперты, причем еще и осознающие свою ответственность.

А второе, при наличии противоречий и сомнений должна быть возможность оспаривания и дискуссии. В последнее время сильно занижена роль Российской академии наук. Наиболее важные вопросы в стране проходят без обсуждения с РАН, хотя ей вменяются экспертные функции. В то же время, члены РАН и ведущие научные сотрудники чрезмерно перегружаются ненужными и мало значимыми экспертизами, в частности, по госзаданиям. Поэтому с этим действительно надо что-то решать. Но в данном случае выводы очевидны. Все признают научную и практическую значимость результатов, значимость работы группы и вообще данной лаборатории, поскольку эта лаборатория была в числе первых, кто в Институте теплофизики стал организовывать престижные научные международные конференции. Институт стал хорошо звучать на международном уровне. И сейчас связи с зарубежными учеными остаются очень плотными. Все это означает, что есть квалифицированная оценка данной работы со стороны. Это наглядно видно по множеству рейтинговых публикаций и патентов.

Главное замечание внешней экспертизы проекта было по установкам. Но совершенно очевидно, что все основные результаты получены исключительно благодаря качественно спроектированным и хорошо оснащенным экспериментальным установкам. Есть установка - есть результат, нет установки – вообще нет ничего, одни разговоры. И это все отмечено в состоявшейся дискуссии. Поэтому мне остается только поблагодарить участников семинара за плодотворную дискуссию, за полезные советы и поддержку обсуждаемых исследований. И, конечно, в целом за общность взглядов. Всем спасибо!

Академик РАН С.В. Алексеенко

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаем благодарность всем участникам проекта ФЦП № 14.613.21.0011 «Создание технологии охлаждения теплонагруженных элементов с использованием однокомпонентных двухфазных потоков», выполнявшегося с 2014 по 2016 годы в лаборатории Интенсификации процессов теплообмена Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, за их вклад в развитие отечественной науки, за совместное получение перспективного нового знания, за осуществление международного сотрудничества несмотря на форс-мажорные обстоятельства в мире.

Выражаем благодарность создателям и разработчикам экспериментального образца испарительной системы охлаждения теплонапряженных элементов с использованием однокомпонентных двухфазных потоков, положившим начало новой научной тематике лаборатории Интенсификации процессов теплообмена Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, за реализацию идей проекта и создание инструментальной базы для дальнейших исследований.

Выражаем благодарность сотрудникам лаборатории Интенсификации процессов теплообмена Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН за проведенные исследования на экспериментальном образце испарительной системы охлаждения теплонапряженных элементов с использованием однокомпонентных двухфазных потоков в период 2017-2019 годы и за полученные результаты, подтвердившие теоретические идеи, смоделированные в рамках проекта ФЦП № 14.613.21.0011 «Создание технологии охлаждения теплонагруженных элементов с использованием однокомпонентных двухфазных потоков».

Благодарим сотрудников лаборатории Интенсификации процессов теплообмена Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН за восстановление экспериментального образца испарительной системы охлаждения теплонапряженных элементов с использованием однокомпонентных двухфазных потоков в 2023 году для проведения дальнейших исследований и для применения экспериментального образца в качестве учебно-демонстрационных целей в образовательном процессе.

Благодарим секции № 1, № 4, № 5 Ученого совета ИТ СО РАН за плодотворную научную дискуссию и заданные вопросы в рамках нового направления исследований по теме объединенного семинара.

Выражаем особую признательность всем участникам объединенного семинара, сотрудникам иных научных организаций Российской Федерации, принявших участие очно и онлайн, специалистам в области теплофизики и теоретической теплотехники, в области механики жидкости и газа за их участие в семинаре и выражение своего экспертного мнения.

ПРИЛОЖЕНИЕ № 1

История создания и использования
экспериментального образца испарительной
системы охлаждения теплонапряженных
элементов
при помощи однокомпонентных двухфазных
ПОТОКОВ.

1. Фото экспериментального образца

*2. Статьи 2017-2019 гг. с результатами
экспериментов, полученных с использованием
экспериментального образца*

*3. Восстановление экспериментального образца
в 2023 г.*

ПРИЛОЖЕНИЕ № 2

1. Кабов О.А. «Создание технологии охлаждения теплонагруженных элементов с использованием двухфазных потоков» (видео-запись лекции, презентация, стенограмма)
2. Зайцев Д.В. «Разработка и создание экспериментального образца испарительной системы охлаждения теплонапряженных элементов с использованием однокомпонентных двухфазных потоков» (видео-презентация, стенограмма)
3. Кочкин Д. Ю. «Восстановление экспериментального образца испарительной системы охлаждения. Стенд для исследования теплообмена в области линии контакта. Перспективы исследований» (видео-презентация, стенограмма)
4. Видео-демонстрация работы экспериментального образца испарительной системы охлаждения теплонапряженных элементов при помощи однокомпонентных двухфазных потоков.
5. Видео-демонстрация стенда для исследования теплообмена в области линии контакта газ-жидкость-твердое тело.

**Материалы из ПРИЛОЖЕНИЯ №2
можно скачать с Диска по ссылке**



УДК 536.2

ББК 31.31

Под редакцией

академика РАН Д.М. Марковича,

академика РАН С.В. Алексеенко

Материалы объединенного семинара Ученого совета ИТ СО РАН

«Охлаждение высоконапряженных по тепловым потокам

электронных компонентов посредством интенсивно

испаряющейся тонкой пленки жидкости с динамическими микроразрывами»

под ред. ак. РАН Д.М. Марковича,

ак. РАН С.В. Алексеенко. – Новосибирск:

ИТ СО РАН, 2024. – 196 с.:

QR код электронных материалов семинара.

Тираж 50 экземпляров

ISBN 978-5-89017-084-2

© Институт теплофизики СО РАН, 2024