

на правах рукописи

Белов Кирилл Иванович

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВСКИПАНИЯ НЕДОГРЕТОЙ ВОДЫ НА ПЕРЕГРЕТЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Специальность 01.04.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук.

Москва – 2010

Работа выполнена в Объединенном институте высоких температур
Российской Академии Наук

Научный руководитель: канд. техн. наук, с.н.с.
Ивочкин Юрий Петрович

Научный консультант: докт. техн. наук, с.н.с.
Зейгарник Юрий Альбертович

Официальные оппоненты:

Докт.техн.наук , с.н.с. Болтенко Эдуард Алексеевич

Докт.техн.наук , доцент Дедов Алексей Викторович

Ведущее предприятие: Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО
РАН

Защита состоится 24.12.2010 в 10 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д.212.157.04 при Московском энергетическом институте (техническом университете) по адресу г. Москва, ул. Красноказарменная, д.17, корп. Т, каф. ИТФ, ауд. Т-206.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МЭИ (ТУ)

Отзывы на автореферат, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 111250, г.Москва, ул. Красноказарменная, дом 14, Ученый Совет МЭИ (ТУ).

Автореферат разослан «___» _____ 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н., доцент

Мика В.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Процесс вскипания недогретой воды на горячих поверхностях играет важную роль во многих технологических процессах и физических явлениях, например при паровом взрыве на стадии его инициирования. Паровой взрыв (ПВ) – сложное явление, сопровождающее прямой контакт горячей жидкости с охладителем, и характеризующееся образованием высокоинтенсивных импульсов давления (амплитудой до нескольких сотен атмосфер), вызванных резким ростом интенсивности парообразования в условиях быстропротекающей фрагментации горячего теплоносителя. Подобные процессы могут иметь место при тяжелых авариях на атомных электростанциях, сопровождающихся плавлением активной зоны реактора и взаимодействием корриума (жидкая смесь ядерного топлива (оксидов урана) и материалов конструкции реактора (сталь, окись циркония и т.п.)) с охладителем – холодной водой; в металлургии, при варке целлюлозы; при операциях с сжиженными газами.

Следует отметить, что если первые работы, применительно к проблемам атомной энергетики и металлургии, были направлены на экспериментальное воспроизведение отдельных стадий парового взрыва в лабораторных условиях, то затем основное внимание исследователей было перенесено на создание расчётных кодов. Эти коды описывают процесс парового взрыва в целом и опираются, в основном, на результаты исследований, выполненных на крупномасштабных установках. Сложные вопросы, связанные с пониманием физики инициирования парового взрыва оказались «законсервированными», а их решение оставлено до лучших времен. Лишь в относительно недавнее время стало ясно, что без глубоких знаний механизмов протекающих процессов нельзя построить достоверные численные коды, что привело к возобновлению интереса к первоначальной постановке вопроса.

Цели и задачи исследования.

Главной целью диссертационной работы являлось получение новой экспериментальной информации по ряду неясных и неоднозначно трактуемых в литературе вопросов, связанных с особенностями протекания пленочного кипения недогретой жидкости и его кризиса, применительно к стадии дробления одиночной жидкометаллической капли. Для достижения поставленных целей необходимо:

1. Разработать методики проведения опытов (включая создание программных продуктов для измерения и обработки данных) с целью изучить процессы, связанные с кризисом пленочного кипения недогретой жидкости, исчезновением паровой плёнки и прямым контактом холодной жидкости с сильно перегретой поверхностью. Решить ряд метрологических вопросов, связанных с измерением площади и времени контакта охладителя с горячим телом, а так же особенностями применения датчиков различных физических величин в сложных условиях проводимых экспериментов.

2. Разработать и создать экспериментальные установки, позволяющие в лабораторных условиях на простых моделях с жидкой и твердой нагретой поверхностями реализовать эти методики.
3. На жидкометаллических и твердотельных моделях изучить особенности поведения плёнки пара и получить экспериментальные данные по вскипанию охладителя применительно к задаче определения механизмов фрагментации жидкометаллических капель.

Научная новизна настоящей работы заключается в том, что получен оригинальный опытный материал, позволяющий прояснить механизмы ряда эффектов, важных для понимания протекания процесса фрагментации жидкометаллических капель. В частности, результаты исследований поведения паровой пленки около нагретой поверхности позволили выдвинуть и подтвердить на основе балансных полуэмпирических соотношений предположение, что отсутствие взрывной фрагментации падающих жидкометаллических капель при недогревах охладителя(воды) $\Delta T_{\text{н}} \sim 20$ °С может быть вызвано интенсивным испарением охлаждающей жидкости и резким увеличением толщины парового слоя. Разработанные методики позволили провести оригинальные измерения характеристик процесса динамического соприкосновения охладителя с горячим телом и дали возможность определить основополагающие для механизма фрагментации значения величин площади и времени начального контакта. Детальное изучение параметров пульсаций давления в среде охладителя и в паровой пленке позволило выявить ряд важных закономерностей, связанных с зависимостью амплитуды и формы пакетов импульсов давления, генерируемых при взрывном разрушении паровой пленки, от температуры и свойств нагретой поверхности.

Практическая ценность результатов работы обусловлена необходимостью решения важной для атомной энергетики, металлургии и химической промышленности задачи – определение условий возникновения и методов противодействия спонтанному паровому взрыву.

Полученные результаты способствуют более глубокому пониманию исследуемых явлений и создают основу для разработки экспериментально обоснованной теории фрагментации жидкометаллического теплоносителя, позволяющей, помимо прочего, оптимизировать параметры различных технологических процессов, включая разработку получения аморфных металлов.

Достоверность полученных результатов достигается с помощью применения в опытах прецизионных датчиков и современной вторичной измерительной аппаратуры. Надежность опытных данных подтверждается тщательным анализом погрешностей и детальной проработкой методических вопросов, связанных с корректным применением измерительных преобразователей в условиях проводимых экспериментов.

Основные положения работы, выносимые на защиту:

1. Результаты методических разработок:
 - оценки воздействия импульсов температуры на показания пьезоэлектрических преобразователей давления;

- исследования параметров соприкосновения охладитель – нагретое тело с помощью метода, основанного на совместном использовании датчиков давления и электрического контакта.
2. Результаты экспериментальных исследований влияния температур охладителя и нагретого тела на характеристики паровой плёнки в режиме плёночного кипения недогретой воды и при его кризисе. Интерпретацию появления низкочастотных колебаний паровой полости как индикатора возникновения особого режима плёночного кипения недогретой воды, характеризующегося интенсивным испарением жидкости в плёнку пара.
 3. Результаты экспериментальных исследований процесса контакта холодного теплоносителя с горячей стенкой.

Основное **содержание диссертации** опубликовано в 14 печатных работах, в том числе в двух статьях в рецензируемых журналах, включенных в список ВАК.

Апробация работы.

Вопросы, изложенные в диссертации, были доложены на трёх крупных международных конференциях по теплообмену (5th European Thermal-Sciences Conference, 2008, Eindhoven, 7th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, 2009, Krakow, 14th International Heat Transfer Conference, Washington, 2010), а также обсуждены на IV Российском совещании «Метаустойчивые состояния и флуктуационные явления» (Екатеринбург, Институт теплофизики УрАН, 2007) и 5ой Российской Национальной Конференции по Теплообмену (Москва, МЭИ(ТУ), 2010). Результаты проведенной работы были также представлены на четырех молодежных конференциях (школа-семинар акад. А.И. Леонтьевым, г. Жуковский 2009; Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск, 2007 и 2008 гг; Институт атомной энергии им. акад. И.В. Курчатова, Москва, 2009).

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №08-08-00792).

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, и списка цитируемой литературы. Текст иллюстрируют 86 рисунков и три таблицы, список использованной библиографии составляет 135 пункта. Общий объём диссертации составляет 163 машинописных страниц.

Содержание работы.

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели работы, описана её структура, изложены положения, которые выносятся на защиту, а также апробация работы.

В **Главе 1** диссертации приведён критический обзор литературы, касающейся вопросов взрывного взаимодействия расплав – охладитель. Показана определяющая роль кипения на стадиях предварительного перемешивания и инициирования взрыва, вызванного дроблением капель расплава. Подчеркивается, что этап тонкой фрагментации жидкометаллической капли, связанный с разрушением окружающей ее паровой оболочки и прямым контак-

том холодной жидкости с горячей каплей – ключевой в понимании механизма развития спонтанного парового взрыва.

В обзоре перечислены основные модели фрагментации жидкометаллической капли и отмечается, что в настоящее время не существует единого универсального механизма, объясняющего все экспериментально наблюдаемые явления, связанные с этим процессом. Наиболее разработанные гипотезы основаны на предположениях, что диспергирование капли происходит либо посредством проникновения в нее струй охладителя (теория проникающих струй), либо в результате резкого охлаждения и растрескивания поверхностного слоя (термомеханическая модель разрушения), либо в результате возникновения в капле многократно отражающихся волн разрежения, вызванных пузырьковым кипением на ее поверхности. Основываясь на этих моделях можно лишь частично объяснить влияние внешнего давления, температур горячего тела и охладителя на процесс инициирования парового взрыва посредством фрагментации отдельной капли.

Проведена классификация экспериментальных установок и описаны их конструкции. Показано, что физическое моделирование процесса инициирования парового взрыва проводилось как на жидкометаллических, так и твердых поверхностях, причем горячие и холодные теплоносители могли либо перемещаться друг относительно друга, либо опыты были выполнены на неподвижной капле (в условиях свободной конвекции). Наиболее близки к реалиям парового взрыва опыты с падающей в охладитель каплей, фрагментирующей в процессе падения. Однако этой методике присущ ряд принципиальных недостатков, связанных с существенными затруднениями при измерениях физических параметров капли (температура, состояние поверхности) в момент непосредственно предшествующий фрагментации. Поэтому для детального синхронного изучения процесса дробления с помощью видеокамер и различных датчиков приходится использовать внешний импульс давления, который может существенным образом исказить естественное протекание процесса фрагментации. В связи с этим обстоятельством наиболее информативными и перспективными для исследований представляются опыты, в которых фрагментирующий теплоноситель или горячее тело неподвижны относительно исследователя.

В этой же главе представлены основные экспериментальные результаты работ отечественных и зарубежных авторов по фрагментации одиночных капель расплава и тесно связанных с этим вопросом исследований по режиму пленочного кипения недогретых жидкостей. Описаны материалы по визуальным наблюдениям схода паровой плёнки, размерам и формам осколков, образующихся в результате дробления капли, влиянию температур горячего и холодного теплоносителей на характер вскипания охладителя, импульсам давления и параметрам паровой пленки.

Было отмечено, что экспериментальные данные по характеристикам явлений, сопровождающих взрывное взаимодействие капли горячего расплава с охладителем, во многом неполны и в определённой степени противоречивы. Имеющиеся данные по импульсам давления в охладителе получены с

помощью пьезоэлектрических преобразователей, на показания которых могут оказать существенное влияние температурные импульсы, вызванные воздействием парожидкостных струй.

Большой интерес для понимания фрагментации капли, окружённой паровой оболочкой, представляют процессы, непосредственно предшествующие этому явлению, а именно, характеристики первичного контакта горячего тела и охладителя. Анализ литературы свидетельствует о довольно ограниченном объеме опытных данных в этой области. В частности, в литературе отсутствует надежная информация по характеристикам паровой пленки и параметрам «пятна» соприкосновения (площадь, характерный размер и время соприкосновения) горячих и холодных теплоносителей.

В заключительной части обзорной главы на основе проведенного анализа литературы сформулированы задачи, методы и подходы исследования. Основное внимание в диссертации уделяется: изучению причин отсутствия фрагментации при относительно высоких значениях температуры охладителя (малых недогревах охладителя до температуры насыщения); изучению параметров соприкосновения горячего и холодного теплоносителей и характеристик пятна контакта; изучению параметров импульсов давления при взрывном вскипании жидкости. Опыты предполагается провести на установках с неподвижными (относительно наблюдателя) рабочими участками, поскольку именно в этих условиях поставленные задачи решаются наиболее просто, а воспроизводимость результатов является достаточно высокой.

В **Главе 2** приведено описание экспериментальных установок и методик проводимых измерений. Установки были двух типов. На рис. 1 показана установка с жидкометаллической оловянной каплей, подвешенной в объеме охладителя. При проведении опытов олово, засыпанное внутрь нержавеющей трубки с намотанным электрическим нагревателем, расплавлялось и немного выдавливалось из отверстия до образования полусферического объема. В целях удержания расплава в подвешенном состоянии и регулирования его формы использовалось устройство, состоящее из сильфона и регулировочного винта, позволяющего создавать разряжение в полости над жидкометаллической поверхностью и тем самым компенсировать действие силы тяжести. Затем подвешенная на капилляре жидкометаллическая полусфера опускалась в охладитель, при этом на ее поверхности происходило формирование режима устойчивого плёночного кипения. Проведенные эксперименты подтвердили возможность фрагментации жидкометаллического теплоносителя в устройствах подобного типа, однако сильная окисляемость поверхности жидкого олова (процесс, который трудно поддается контролю) во время проведения опытов обусловила слабую воспроизводимость получаемых результатов.

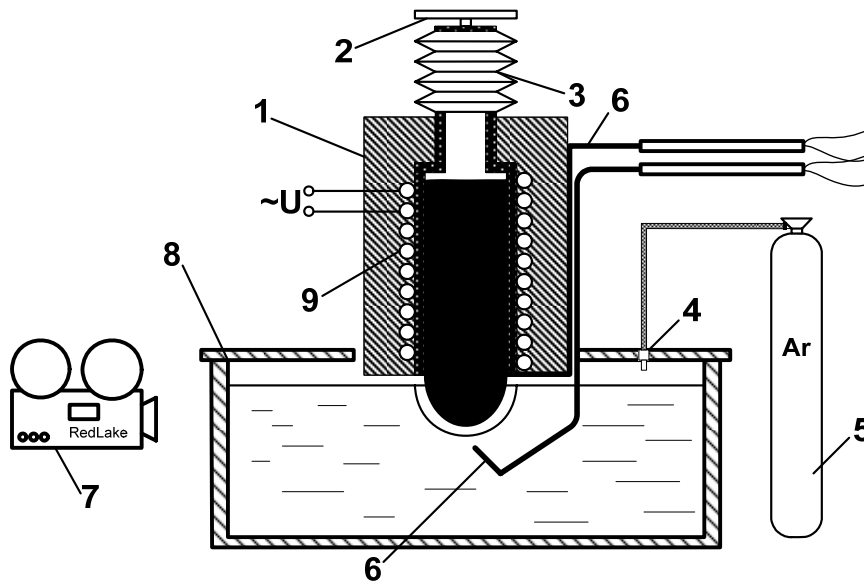


Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования поведения паровой плёнки на жидкометаллической поверхности. 1- корпус рабочего участка, 2- регулировочный вентиль сильфона, 3- сильфон, 4- подача аргона, 5- баллон с аргоном, 6- термопара, 7-скоростная камера, 8- сосуд с водой, 9-нагреватель

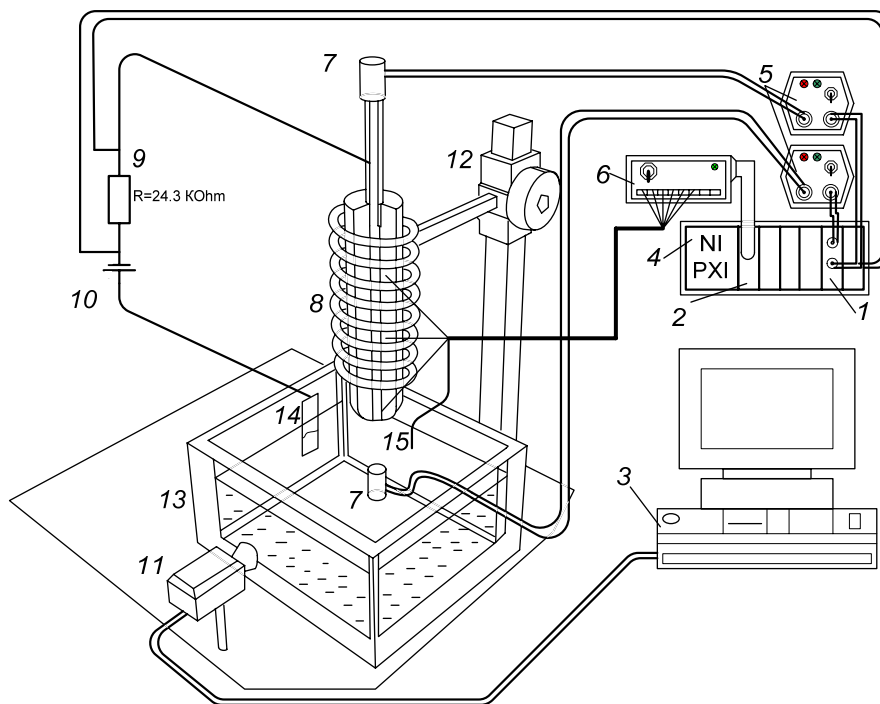


Рис. 2. Общая схема экспериментальной установки и измерений. 1- осциллограф NI PXI 5122, 2- АЦП NI PXI-6070E, 3- компьютер для записи видеосъёмки, 4- крейт PXI, 5 - модуль датчика давления, 6 - термопарный усилитель, 7- датчик давления Kistler, 8 - рабочий участок с нагревателем, 9- резистор (24,3 кОм), 10- батарея типа Крона 9 В, 11- видеокамера, 12- штатив, 13- сосуд с водой, 14- электрод в воде, 15- термопары.

Поэтому жидкая полусфера была заменена нагретой твердой поверхностью. Схема этой установки приведена на рис. 2. Рабочий образец имел форму цилиндра с полусферическим или плоским торцевым окончаниями. Характерный размер греющей поверхности, контактирующей с водой (диаметр сферы или круга), мог варьироваться от 5 мм до 20 мм. Хромель-алюмелевые термопары были расположены в телах образца и рабочего участка, а также в охлаждающей жидкости. Координаты термопар были известны, что позволяло оценить температурные поля и тепловые потоки внутри образца и на его рабочей поверхности.

Эксперименты осуществлялись следующим образом. В исходном (поднятом) положении наконечник сначала в течение

нескольких десятков секунд нагревался с помощью пропановой горелки. Это

приводило к образованию на поверхности наконечника окисной пленки и отложений. Затем образец остывал и вновь нагревался уже с помощью электрического нагревателя в атмосфере аргона. После этого электрический нагреватель отключался, а горячий рабочий участок с помощью специального координатного устройства со скоростью несколько миллиметров в секунду погружался в заполненную дистиллированной водой ванну на глубину радиуса полусферы. Начальное значение температуры полусферы, близкое к ~ 500 °С, выбиралось из соображений получения режима устойчивого пленочного кипения, а применяемая методика нагрева позволила простым способом реализовать в опытах взрывной сход паровой пленки с нагретой поверхности. В опытах использовалась дистиллированная вода, с различной степенью недогрева, дегазированная посредством двухчасового кипячения.

Для проведения многофункциональных исследований был создан на базе аппаратуры фирмы National Instruments измерительный комплекс, позволяющий с частотой оцифровки до 10^6 изм./с проводить синхронные измерения сигналов с нескольких преобразователей, включая датчики температуры и давления. В качестве последних использовались прецизионные пьезоэлектрические датчики Kistler (Швейцария) и PCB (США), а также оригинальные волоконно-оптические преобразователи, разработанные в ОИВТ РАН. Волоконная оптика использовалась также для изучения характеристик паровой пленки. Помимо зондовых измерений в опытах проводились визуальные наблюдения с применением скоростных (Redlike MotionScope 1000) и обычных (Canon MV500i) цифровых видеокамер.

В диссертации был исследован ряд методических вопросов. С целью оценки времени и площади соприкосновения охладителя с нагревательной поверхностью был разработан и экспериментально обоснован электроконтактный метод их определения. Исследовано возможное влияние паразитного электрического тока, возникающего при резком изменении толщины паровой пленки, на результаты измерений площади контакта. Показано, что паразитный сигнал не превышает 1% от его полезного значения.

С помощью специально проведенных опытов экспериментально исследовано влияние импульсного воздействия температуры на показания пьезоэлектрических мембранных датчиков давления. Показано, что это воздействие приводит к генерации «паразитного» знакопеременного сигнала, который можно ошибочно трактовать как низкочастотные знакопеременные пульсации давления. Поэтому необходимо к получаемым с помощью таких датчиков результатам относиться с некоторой осторожностью.

Проведена оценка приборных погрешностей измерений давления и теплового потока, которые, как показали полученные результаты, не превышают 4 и 30 %, соответственно.

В **Главе 3** представлены результаты проведенных экспериментальных исследований. Опыты по изучению фрагментации подвешенных оловянных капель подтвердили возможность дробления перегретого жидкометаллического теплоносителя при контакте с холодной водой в этих условиях (см. рис. 3). Установлено, что для нагретых на воздухе (в течение нескольких секунд и

более) оловянных каплей сход паровой пленки носит спокойный характер, не приводящий к дроблению расплава. Фрагментация при нагреве оловянной капли в воздушной среде наблюдается только в случае соприкосновения охладителя со «свежей» поверхностью расплава, выдавленного из капилляра. Результаты опытов с жидкометаллическими каплями характеризуются плохой воспроизводимостью, что вызвано воздействием ряда неконтролируемых факторов, главным из которых является окисление нагретой поверхности.

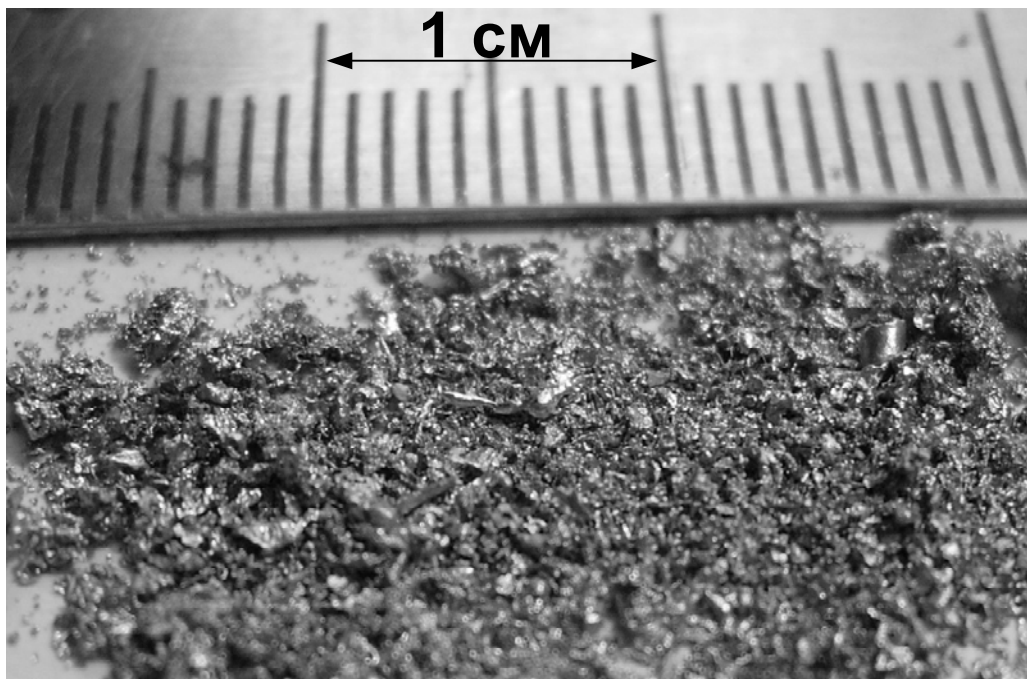


Рис. 3. Фотография «тонкой» фрагментации оловянной капли после схода паровой пленки.

Воспроизводимый взрывной сход паровой пленки был осуществлен на перегретых полусферических образцах, изготовленных из нержавеющей стали. Проведенные исследования позволили установить особенности развития и разрушения паровой пленки при атмосферном давлении и диапазонах изменения температур нагревателя и охлаждающей воды $150 - 700$ °C и $15 - 95$ °C, соответственно. Выявлено существенное различие сходов пленки при больших (≤ 80 °C) и малых значениях температуры охлаждающей воды ($20 - 80$ °C). Показано, что остывание полусферы при взрывном вскипании жидкости сходно с процессом остывания слабоокисленной оловянной капли, а темп её охлаждения (~ 300 °C/c) существенно (~ 3 раза) выше, чем при спокойном разрушении парового слоя.

С помощью визуальных наблюдений обнаружен и описан режим со стабильными колебаниями парового слоя. Показано, что эти колебания, имеющие характерную частоту несколько десятков Гц и амплитуду ~ 200 мкм, могут возникать только при определённых соотношениях температур нагретой поверхности и охладителя, и не ведут к взрывному сходу паровой плёнки. Посредством экспериментов, выполненных с использованием нагревателей, имеющих плоскую поверхность нагрева, подтверждено предполо-

жение, что причина возникновения этих колебаний имеет тепловую, а не гидродинамическую природу.

С помощью фотосъемки под микроскопом (увеличение $\times 500$) исследовано состояние поверхностей нагрева до и после разрушения парового слоя и предположено, что возникновение взрывного режима обусловлено образованием на поверхности оксидных покрытий, обладающих специфическими (по сравнению с чистыми металлами) физическими свойствами, а именно, малой теплопроводностью и повышенной смачиваемостью.

В проведённых опытах было замечено, что растворенные в воде газы и находящиеся в ее объеме частицы окалина уменьшают устойчивость парового слоя и приводят к преждевременному разрушению (сходу) паровой пленки при более высоких значениях температуры нагретой поверхности. Специально поставленные эксперименты по измерению давления внутри паровой полости выявили характерные низкочастотные пульсации этой величины, связанные, по-видимому, с вбросом в паровую полость газов, растворенных в охладителе.

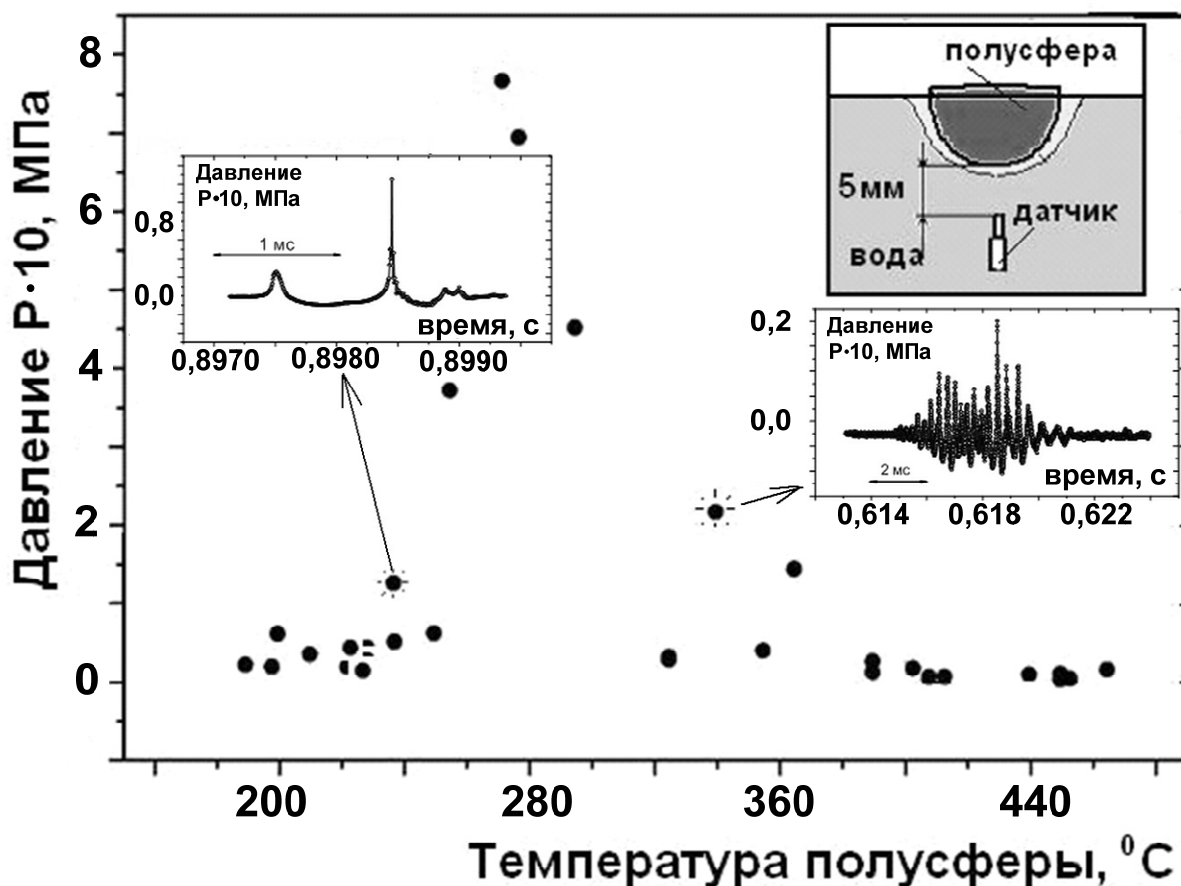


Рис. 4. Зависимость максимального значения импульсов давления от температуры нагретой полусферы. Эксперименты выполнены на образцах из нержавеющей стали. Температура воды $- 20^{\circ}\text{C}$

В экспериментах было установлено, что процессу взрывного разрушения паровой оболочки около горячего тела (полусферы) сопутствуют пульсации знакопеременного давления, имеющие, в зависимости от температуры нагретой поверхности, форму одиночных пиков или пакетов импульсов. Зна-

чения максимальных импульсов в пакете пульсаций давления при смене режимов кипения, в зависимости от температуры нагретой поверхности и температуре охлаждающей воды 20°C показаны на рис. 4. Кроме того, в представленной работе отмечено, что вне зависимости от температуры воды, импульсы давления достигают максимальных значений при температуре полусферы близкой к температуре предельного перегрева охладителя $T_{\text{пп}}$. Так же как в опытах с охлаждающей водой, имеющей температуру 20°C , при других (более высоких) ее значениях наблюдается эффект определяющего влияния температуры нагретой поверхности на характер и вид осциллограмм давления. При температурах поверхности вблизи и ниже $T_{\text{пп}}$ пульсации давления представляют собой отдельные положительные пики давления, разделённые относительно продолжительными ($\sim 1\text{мс}$) временными интервалами. При температурах поверхности больших, чем $T_{\text{пп}}$ датчик фиксирует пакеты закоперенных импульсов давления, частота которых увеличивается с ростом температуры нагретой поверхности.

Помимо мониторинга температуры охладителя и нагретого тела, в опытах одновременно проводились синхронные (точность синхронизации 1мкс) измерения площади смоченной поверхности и давления в момент схода (разрушения) паровой пленки. Подобные измерения позволяют получить

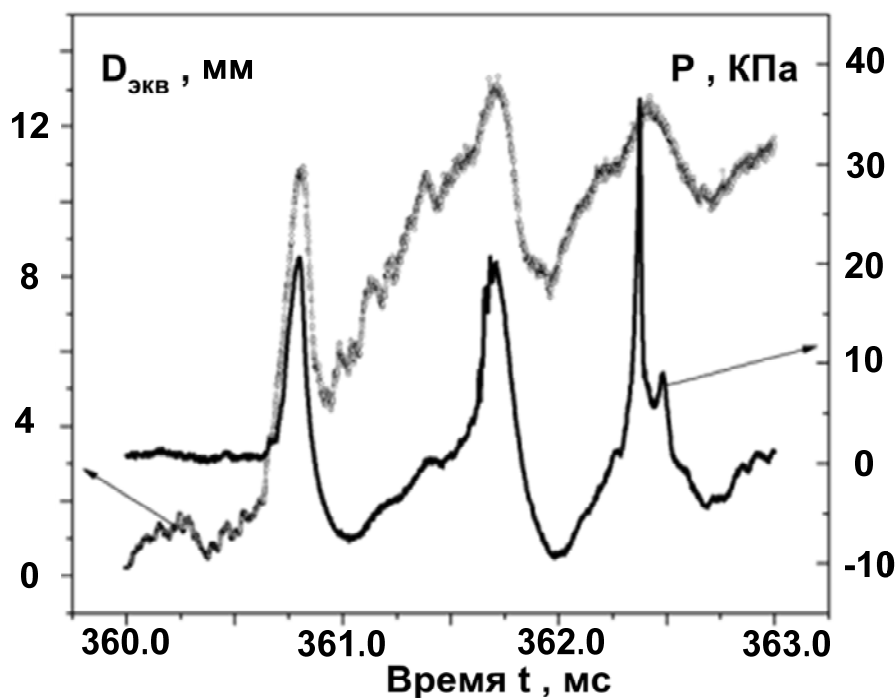


Рис. 5. Совместные осциллограммы давления и эквивалентного диаметра пятна контакта. Образец полусферы из нержавеющей стали. Температура полусферы при взрывном сходе (разрушении) паровой пленки приблизительно 270°C , температура воды 60°C .

дополнительную количественную информацию о механизмах соприкосновения охладителя с горячей стенкой, касающуюся, в частности, времени прогрева холодной жидкости перед ее вскипанием и процесса образования пузырей пара. Полученные данные представлены на рис. 5.

В опытах по измерению давления отмечено также, что с увеличением температуры охладителя уменьшается значение максимальной амплитуды в пакете

температуры охладителя уменьшается значение максимальной амплитуды в пакете

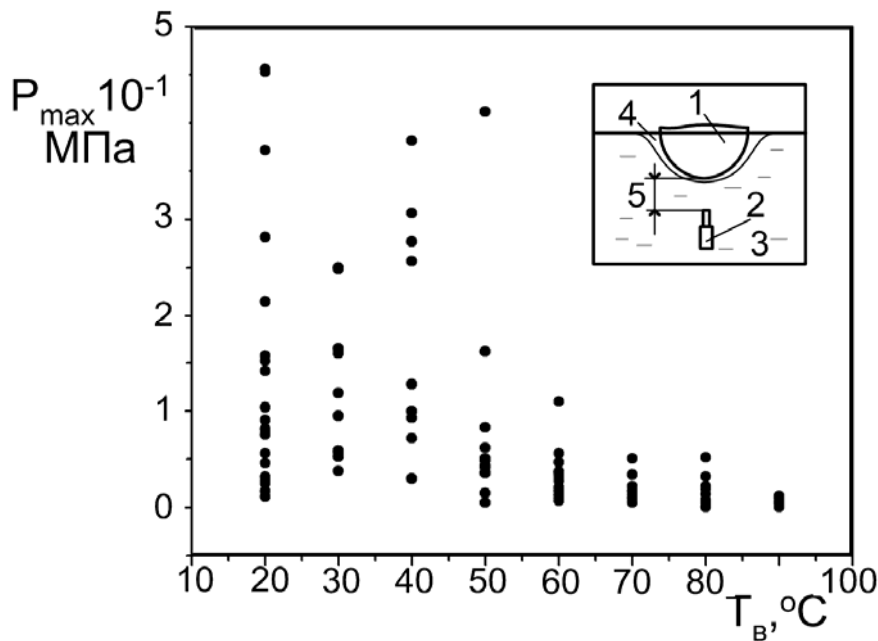


Рис. 6. Зависимость максимального импульса давления от температуры воды. Эксперименты выполнены на образцах из нержавеющей стали: 1 – полусфера, 2 – датчик давления, 3 – вода, 4 – паровая прослойка.

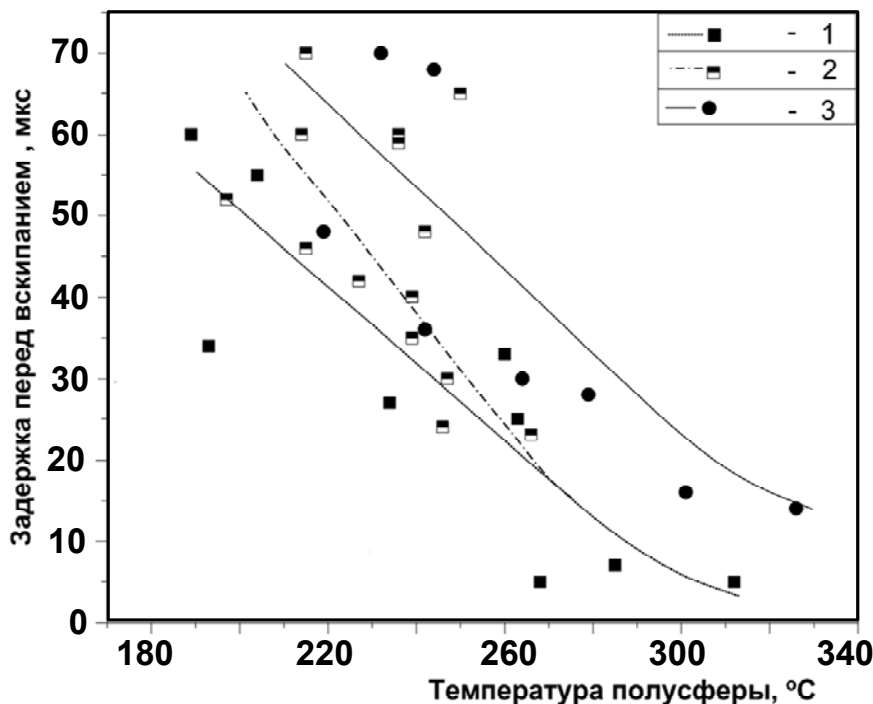


Рис. 7. Зависимость времени прогрева холодной воды (температура воды 1-20, 2-60, 3-80 °C) перед ее вскипанием при соприкосновении с горячей поверхностью от температуры полусферы.

сти, в том числе превышающих так называемую температуру предельного перегрева. Скорость распространения фронта смачивания достигает 70 м/с.

импульсов давления, которое при температуре воды 90°C не превышало 10⁴ Па. Данные представлены на рис. 6. Как видно имеет место существенный разброс опытных значений (при одинаковой температуре охладителя эксперименты повторялись 10 – 15 раз), что связано со случайным характером процесса соприкосновения охладителя с нагретой поверхностью в широком (190 – 350°C) диапазоне изменения ее температуры. В опытах установлено, что взрывное вскипание перегретой жидкости предваряется прямым контактом жидкости с перегретой поверхностью. Время задержки вскипания составляет несколько десятков микросекунд. Контакт наблюдается в широком диапазоне температур горячей поверхности.

Полученный и описанный в этой главе экспериментальный материал позволяет по-новому взглянуть на некоторые особенности протекания режимов кипения применительно к вопросу о взрывном взаимодействии расплав – охладитель.

В Главе 4 проведён анализ полученных экспериментальных результатов. Численные оценки, выполненные на основе известного критериального соотношения для теплоотдачи при свободной конвекции типа

$$Nu = 0,5(Gr \cdot Pr)^{0,25} \left(\frac{Pr}{Pr_c} \right)^{0,25},$$

где $Nu = \alpha D / \lambda$ – число Нуссельта; Gr , Pr , Pr_c – соот-

ветственно, числа Грасгофа и Прандтля (при температуре холодной воды и 100°C); D – диаметр полусферы; λ – коэффициент теплопроводности воды, подтвердили предположение, что колебательный режим существования па-

ровой пленки возникает в условиях, когда невозможно все тепло, поступающее от нагревателя к поверхности раздела фаз пар – жидкость отвести в охладитель посредством механизмов конвективного теплообмена (см. рис.8). Сходство в температурных условиях возникновения колебаний паровых полостей около нагретых поверхностей и фрагментации горячих жидкометаллических капель, падающих

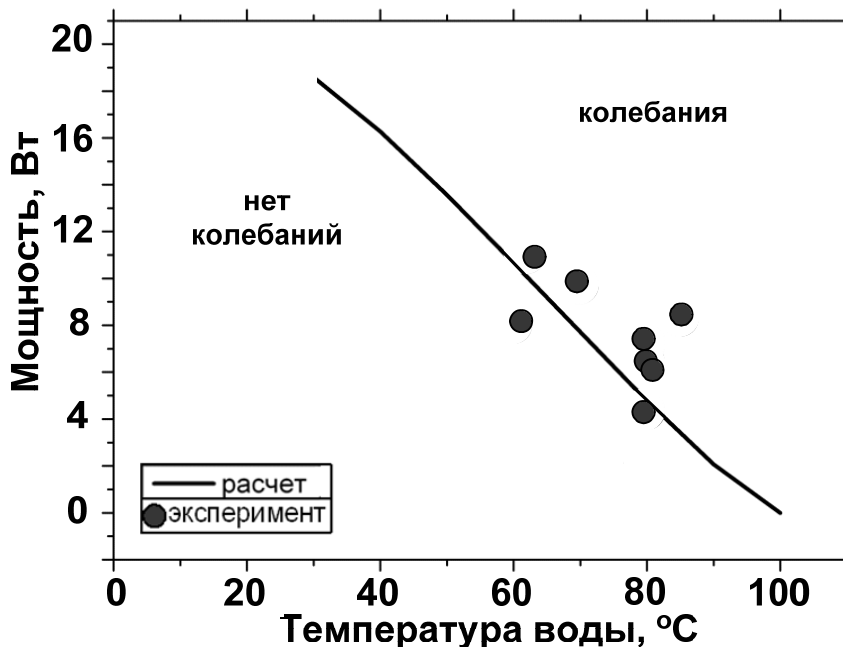


Рис. 8. Сравнение расчетных и экспериментальных значений тепловой мощности при пленочном кипении на горячей полусфере, необходимых для возникновения колебаний паровой оболочки.

в воду, позволяет предположить, что отсутствие дробления капель при малых недогревах теплоносителя может быть обусловлено увеличением толщины парового слоя и, тем самым, затруднением возможности прямого контакта холодной жидкости и горячей поверхности. Проведены численные расчёты нестационарных температурных полей нагретого образца в режимах пленочного и переходного кипения. Установлено (см. рис. 9), что совпадение экспериментальных и расчетных данных имеет место при значениях $\alpha \approx 270 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ и $\alpha \approx 10^6 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ в условиях спокойной пленки и при ее взрывном разрушении. Последний результат предполагает, что в режиме переходного ки-

пения плотность теплового потока, отводимого от нагретой поверхности достигает $\sim 10^8 \text{ Вт/м}^2$. Измеряемые в опытах пульсации давления связаны с изменением по времени τ объема паровой полости V соотношением типа:

$$P_r(\tau) - P_\infty = \frac{\rho}{4\pi r} \frac{\partial^2 V}{\partial \tau^2} \text{ где } (P_r - P_\infty) = p(\tau) - \text{измеряемое датчиком избыточное давление,}$$

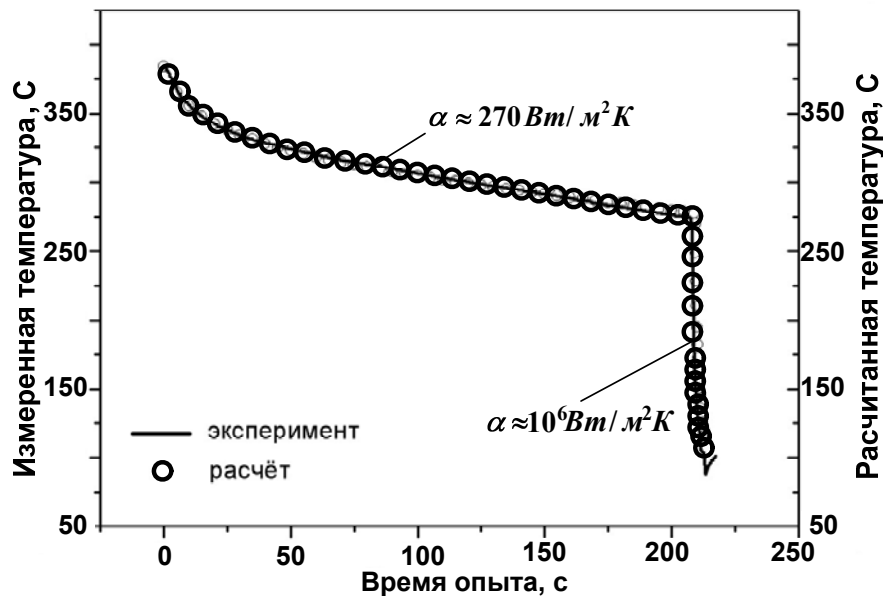


Рис. 9. Расчетные и измеренные в опытах осциллограммы температур в центре полусферы при плёночном и переходном режиме кипения воды, недогретой до температуры кипения. Температура воды 20°C

ление, P_r и P_∞ — давления в жидкости на расстоянии r и атмосферное давление, ρ — плотность воды, r — расстояние между паровым пузырем и датчиком. Следовательно, с точностью до линейного члена объем паровой полости повторяет во времени поведение величины двойного интеграла от пульсаций избыточного давления

$$\frac{4\pi r}{\rho} \int \int_0^\tau p(\tau) d\tau \text{ (со-}$$

вмещенные характерные графики временных осциллограмм давления и двойного интеграла этих пульсаций показаны на рис. 10), что позволяет с известной осторожностью воссоздать схему соприкосновения воды с перегретой поверхностью (рис.11). При опускании горячего образца в холодную жидкость, вокруг полусферы образуется паровая пленка, причем, как показали результаты специально проведенных экспериментов, при относительно медленной ($\sim 0.2 \text{ мм/с}$) скорости погружения не наблюдается непосредственного касания горячего тела и холодной жидкости и поток пара со свободной поверхности жидкости образует паровую прослойку между телом и жидкостью. Толщина паровой прослойки достигает максимального значения, а затем, в процессе остывания полусферы (стадия 1 на рис.11), начинает утончаться. Время остывания может доходить до нескольких десятков минут. На поверхности раздела пар-жидкость развиваются волны (преобладают капиллярные волны). В какой-то момент времени (стадия 2) по случайным причинам возникает контакт этой поверхности раздела жидкость — пар с нагретой стенкой. В нашем случае наиболее вероятным местом этого соприкосновения представляется нижняя часть полусферы, поскольку именно там толщина па-

ровой пленки минимальна и составляет согласно измерениям ~20 мкм. Далее (стадия 3) контактирующая жидкость прогревается (в течение нескольких десятков микросекунд) и вскипает в нижней части полусферы (образуется одиночный пузырь). Это приводит к инициированию импульсов давления и одновременному увеличению скорости и площади смачивания охладителем

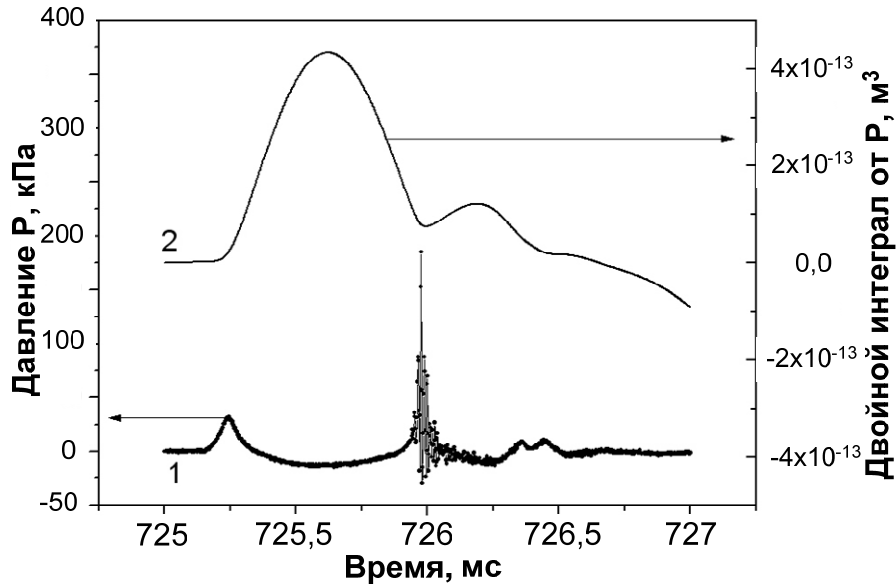


Рис. 10. Совместные осциллограммы давления $p(\tau)$ – 1 и значения величины (пропорциональной объёму) $\frac{4\pi r}{\rho} \int_0^\tau p(\tau) d\tau$ – 2. Образец полусферы из нержавеющей стали.

нагретой поверхности. Далее, по мере снижения давления в жидкости, наблюдается кратковременный (несколько десятков микросекунд) процесс отеснения воды от горячей поверхности (стадия 4). Затем снова наблюдается рост площади смачиваемой поверхности, одновременно с которым происходит нагрев контактирующей жидкости (стадия 5).

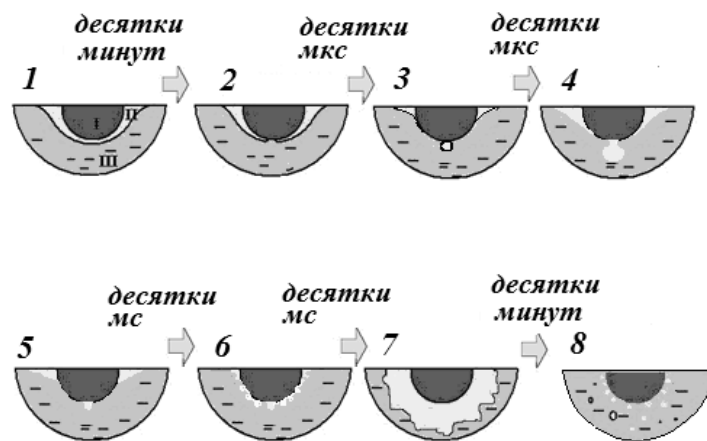


Рис.11. Возможная схема протекания процесса соприкосновения охладителя с перегретой поверхностью

Дальнейший характер процесса, а именно, образование одного или нескольких пузырей, т.е. единичных всплесков или пакета импульсов давления, определяется соотношением скорости смачивания и плотности теплового по-

тока, подводимого к жидкости (стадия 6). Затем жидкость, контактирующая по всей поверхности полусферы, вскипает (стадия 7), что приводит к образованию общего парового объёма. Длительность перехода от стадии 7 к режиму развитого пузырькового кипения (стадия 8) с последующим развитием режима свободной конвекции может составить несколько секунд.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В процессе подготовки диссертации выполнен был ряд инженерно-конструкторских и научно-исследовательских работ, позволивших получить следующие основные научные результаты.

1. Проведен анализ литературных данных по влиянию режимов кипения на процесс фрагментации капель горячего теплоносителя в жидкости, существенно недогретой до температуры насыщения. Проанализированы существующие гипотезы диспергирования крупных (порядка сантиметра) перегретых капель при разрушении окружающих их паровых пленок. Результаты проведённого анализа свидетельствуют о том, что в настоящее время отсутствуют достаточно обоснованные теории, объясняющие процесс спонтанной тонкой фрагментации капель горячей жидкости в холодном теплоносителе. Для углубленного понимания этого процесса необходимы дополнительные опытные данные по характеристикам явлений, предшествующих и сопутствующих разрушению паровой пленки.

2. Применительно к задаче изучения начальной стадии парового взрыва разработаны методики и созданы экспериментальные установки для исследования локальных тепловых и гидродинамических процессов, протекающих при смене режимов кипения на горячих твердых и жидкометаллических поверхностях.

3. На базе современной измерительной и вычислительной аппаратуры создана система синхронизированного мониторинга процесса разрушения парового слоя, включающая в себя, помимо набора обычных и скоростных видеокамер, прецизионные высокочастотные пьезоэлектрические датчики давления, высокочувствительные микрофоны, малоинерционные термопары, а также оригинальные волоконно-оптические преобразователи давления и толщины пленки собственной разработки и изготовления. Предложен и реализован на практике электрический метод контроля наличия и оценки площади и времени соприкосновения холодной воды с горячей поверхностью, позволяющий определять динамические параметры контакта при характерных временах процесса несколько микросекунд.

4. Решен ряд методических вопросов, связанных с использованием пьезоэлектрических датчиков давления в условиях переменного температурного воздействия на поверхность чувствительного элемента, а также влиянием изменения емкостных параметров среды на точность электроконтактных измерений.

5. Установлено, что характер разрушения паровой пленки (спокойный или взрывной) определяется наличием и толщиной слоя окислов на нагретой поверхности. Для неокисленных поверхностей или поверхностей с

толстым малотеплопроводным покрытием типичен спокойный переход от пленочного кипения к пузырьковому, а для окисленных (или поверхностей с тонким малотеплопроводным покрытием) – взрывной с выбросом струй и импульсами давления.

6. Экспериментально показано, что для малых (менее $\sim 20^\circ\text{C}$) недогревов воды до температуры насыщения характерно возникновение колебаний поверхности раздела «паровая пленка – жидкость» значительной амплитуды. Эти колебания связаны с интенсификацией испарения с поверхности раздела вследствие исчерпания возможности отвода тепла от поверхности раздела вглубь воды. Тем не менее, эти колебания не приводят к контакту жидкости с греющей поверхностью, поскольку одновременно существенно возрастает толщина пленки. Выдвинуто предположение, что отсутствие фрагментации капель при малых недогревах в реальных условиях связано с этим увеличением толщины парового слоя, исключаящим контакт холодной жидкости с каплей.

7. Показано, что взрывному сходу паровой пленки предшествует прямой контакт жидкости с греющей поверхностью, после которого с выдержкой в несколько десятков микросекунд возникает импульс (пакет импульсов) давления. В течение этой временной задержки происходит прогрев тонкого пристенного слоя жидкости до температуры предельного перегрева (кинетический переход в метастабильное состояние) и его взрывное вскипание. Прямой контакт жидкости с горячей поверхностью наблюдался при температуре поверхности до 460°C .

8. Максимальное значение амплитуды импульсов давления ($\sim 1\text{МПа}$) наблюдается в диапазоне температур горячего тела, близких к «стационарной» температуре предельного перегрева охладителя. Согласно имеющимся данным этого импульса давления достаточно для инициирования (триггеринга) тонкой фрагментации группы соседних капель горячей жидкости. Определены зависимости амплитуды и формы пакетов импульсов давления от температуры и свойств нагретой поверхности. Получены зависимости для скорости растекания жидкости по поверхности полусферы после возникновения контакта между ними.

9. Описана наиболее вероятная схема протекания начального этапа соприкосновения воды с перегретой поверхностью.

СПИСОК ПЕЧАТНЫХ РАБОТ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Жилин В.Г., Зейгарник Ю.А., Ивочкин Ю.П., Оксман А.А., Белов К.И. Экспериментальное исследование характеристик взрывного вскипания недогретой воды на горячей поверхности при смене режимов кипения // Теплофизика высоких температур. 2009. Т.47, №6, С.891 – 898.**
2. **Белов К.И., Ивочкин Ю.П., Пузина Ю.Ю. «Исследование процесса соприкосновения охладителя с горячей поверхностью при вскипании недогретой жидкости» // Вестник МЭИ, 2010, №3, С. 44–50.**

3. Zeigarnik Yu. A., Ivochkin Yu. P., Kryukov A. P., Puzina Yu. Yu., Belov K. I. Pressure pulsations during the growth and collapse of vapor cavities in a subcooled liquid // Proceedings of 5th European Thermal-Sciences Conference, Eindhoven, The Netherlands, 2008. CD – room, Paper № TPF_16, 8 pages.
Зейгарник Ю.А. , Ивочкин Ю.П., Крюков А.П., Пузина Ю.Ю., Белов К.И. Импульсы давления во время роста и схлопывания паровой каверны в недогретой жидкости // Труды 5-ой Европейской конференции по теплотехнике. Эйндохвен, Нидерланды. 2008. Публикация на компакт диске, доклад № TPF_16, 8 с.
4. Zeigarnik Yu. A., Ivochkin Yu. P., Kryukov A. P., Puzina Yu. Yu., Belov K. I. Pressure pulsations during the growth and collapse of vapor cavities in a subcooled liquid // Books of Abstracts. 5th European Thermal-Sciences Conference , Eindhoven, The Netherlands, 2008, P.148.
Зейгарник Ю.А. , Ивочкин Ю.П., Крюков А.П., Пузина Ю.Ю., Белов К.И. Импульсы давления во время роста и схлопывания паровой каверны в недогретой жидкости»// Сборник тезисов 5-ой Европейской конференции по теплотехнике. Эйндохвен, Нидерланды. 2008, С.148.
5. Zeigarnik Yu., Ivochkin Yu., Oksman A., Belov K., Kryukov A., Puzina Yu. Study of characteristics of explosion boiling-up of subcooled liquid on a hot surface. // Proceedings of 7th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics. Krakow, Poland. 2009, P.849-856.
Зейгарник Ю., Ивочкин Ю., Оксман А. Белов К., Крюков А., Пузина Ю. Изучение характеристик взрывного вскипания недогретой жидкости на горячих поверхностях. // Труды 7-ой Всемирной конференции по экспериментальному теплообмену, гидродинамике и термодинамике. Краков, Польша. 2009. С.849-856.
6. Zeigarnik Yu., Ivochkin Yu., Oksman A., Belov K., Kryukov A., Puzina Yu. Study of characteristics of explosion boiling-up of subcooled liquid on a hot surface. // Book of Abstracts of 7th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, 2009, Krakow, Poland. 2009. P.67.
Зейгарник Ю., Ивочкин Ю., Оксман А. Белов К., Крюков А., Пузина Ю. Изучение характеристик взрывного вскипания недогретой жидкости на горячих поверхностях // Сборник тезисов 7- ой Всемирной конференции по экспериментальному теплообмену, гидродинамике и термодинамике, Краков, Польша. 2009. С.67.
7. Белов К.И., Ивочкин Ю.П., Кубриков К.Г. Исследование особенностей плёночного и переходного кипения недогретой жидкости применительно к проблеме инициирования парового взрыва // Сборник тезисов докладов Всероссийской школы-семинара молодых учёных «Физика неравновесных процессов в энергетике и наноиндустрии» 2007, Новосибирск, СО РАН ИТФ им. С.С. Кутателадзе. С.23-24.
8. Григорьев В.С., Зейгарник Ю.А., Ивочкин Ю.П., Кубриков К.Г., Белов

- К.И. Исследование теплогидравлических процессов, сопровождающих взрывной переход от плёночного режима кипения к пузырьковому // В Сб. Метастабильные состояния и фазовые переходы. г. Екатеринбург. Вып.9. 2008. ИТФ УрАН. С.75 – 84.
9. Григорьев В.С., Зейгарник Ю.А., Ивочкин Ю.П., Кубриков К.Г., Белов К.И. Исследование теплогидравлических процессов, сопровождающих взрывной переход от плёночного режима кипения к пузырьковому // Сборник тезисов докладов IV Российского совещания «Метастабильные состояния и флуктуационные явления» ИТФ УрО РАН, 2007г, с. 21.
 10. Белов К.И., Вавилов С.Н., Жатухин А.В., Кубриков К.Г. «Экспериментальное исследование механизма смены плёночного режима кипения недогретой жидкости» // Труды всероссийской школы-конференции молодых учёных «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидродинамики» Новосибирск, 2008, СО РАН ИТФ им. С.С. Кутателадзе. С.44-45
 11. Белов К.И., Вавилов С.Н., Жатухин А.В., Оксман А.А. «Экспериментальное исследование особенностей плёночного и переходного режимов кипения недогретой жидкости» // Труды семнадцатой школы - семинара молодых учёных и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в аэрокосмических технологиях» г. Жуковский, 2009, ЦАГИ. С. 150
 12. Белов К.И., Вавилов С.Н., Жатухин А.В. «Исследование (применительно к проблеме парового взрыва) характеристик процессов, сопровождающих взрывную смену режимов кипения» // Сборник тезисов докладов. «7-ая Курчатовская молодежная научная школа» РНЦ «Курчатовский институт» Москва, Россия, 2009г. С. 19.
 13. Belov K.I., Ivochkin Yu.P., Kubrikov K.G., Oksman A.A., Vavilov S.N., Zeigarnik Yu.A., Zhilin V.G. Experimental study of the vapor film behavior on a highly heated surface immersed into subcooled water.// Proceedings of the 14th International Heat Transfer Conference. Washington, USA, 2010. CD – room. Paper № 22202. (7 pages).
Белов К.И., Ивочкин Ю.П., Кубриков К.Г., Оксман А.А., Вавилов С.Н., Зейгарник Ю.А., Жилин В.Г. Экспериментальное исследование поведения паровой плёнки на сильноперегретых поверхностях погружены в недогретую воду. // Труды 14ой международной конференции по теплообмену, Вашингтон, США. 2010. Публикация на компакт диске. Доклад № 22202. 7 с.
 14. Белов К.И., Жилин В.Г., Зейгарник Ю.А., Ивочкин Ю.П. О температурной области устойчивого существования паровой плёнки при кипении недогретой жидкости» // Труды 5-ой Российской национальной конференции по теплообмену. Т.4.– М.: Издательский дом МЭИ, 2010. С.53 – 56.