

На правах рукописи

Васильев Николай Викторович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИПЕНИЯ
ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ТЕЧЕНИИ НЕДОГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ**

Специальность 01.04.14 –

Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана) и в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенном институте высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН).

Научный руководитель:

Вараксин Алексей Юрьевич
член-корреспондент РАН, профессор,
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты:

Ягов Виктор Владимирович
доктор технических наук, профессор
кафедры Инженерной теплофизики
ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»

Готовский Михаил Абрамович
доктор технических наук, главный
научный сотрудник ОАО «НПО ЦКТИ»
им. И.И. Ползунова

Ведущая организация:

ФГБУН Институт теплофизики им. С.С.
Кутателадзе Сибирского отделения
Российской академии наук (ИТ СО РАН)

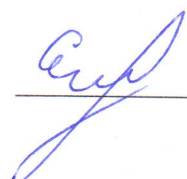
Защита состоится «17» октября 2018 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.141.08 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Лефортовская набережная, д. 1, ф-т «Энергомашиностроение» ауд. 202э.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.08.

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.08
кандидат технических наук, доцент

 Егоров К.С.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Кипение недогретой жидкости представляет собой тип кипения, который имеет место, когда жидкость, с температурой ниже температуры насыщения, приходит в контакт с поверхностью нагревателя достаточно горячей, чтобы вызвать кипение. При этом, попав в область холодной жидкости, паровые пузырьки конденсируются, и не происходит результирующего отвода (накопления) паровой фазы в объем жидкости или ядро потока.

Недогретое кипение (или поверхностное кипение, поскольку паровые пузыри локализованы непосредственно у поверхности нагревателя) широко используется в технологических процессах, связанных с отводом высоких, в том числе экстремальных, тепловых потоков. Оно применяется в ракетной технике, пучковых мишенях, металлургии, импульсных МГД-установках, термоядерных реакторах. Реализуемые при этом коэффициенты теплоотдачи (КТО) для воды могут достигать сотен $\text{kВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и существенно превышать аналогичные значения, достижимые другими методами теплообмена. Очень высоки и плотности критических тепловых потоков (КТП).

Сегодня имеющихся экспериментальных данных по недогретому кипению и описывающих их расчетных соотношений в целом достаточно для практического инженерного конструирования систем охлаждения, использующих данный метод теплоотвода. В то же время существующие описания механизма кипения сильно недогретой жидкости в значительной степени следуют из умозрительных заключений, опирающихся преимущественно на интегральные характеристики процесса (КТО, КТП, перепад давления в канале). Однако конкретных данных по поведению паровых пузырей, структуре потока, особенно при больших плотностях тепловых потоков и высоких недогревах, явно недостаточно для успешной разработки феноменологических моделей явления, не говоря уже о его математическом описании. Поэтому сегодня актуальными являются экспериментальные исследования с целью получения новой информации о таких характеристиках процесса, как плотность центров парообразования, регулярность их функционирования, размеры пузырей, продолжительность отдельных фаз жизни и эволюция формы пузырей.

Для обеспечения надежной работы оборудования в режиме недогретого кипения необходимо достоверно знать значения КТП, что связано с пониманием механизма наступления кризиса теплопередачи. На сегодня имеются модели КТП, обеспечивающие неплохие результаты для определенных жидкостей в ограниченных диапазонах недогревов и скоростей потока. Однако общепризнанной теории кризиса кипения недогретой жидкости в канале нет. Количество экспериментальных данных для верификации имеющихся либо разработки новых более универсальных моделей КТП ограничено. Поэтому важной задачей является исследование взаимосвязанных и взаимообусловленных процессов изменения структуры

течения при кипении недогретой жидкости в канале и величины критического теплового потока.

В повседневной инженерной практике чаще используется кипение жидкости, нагретой до температуры насыщения. Уже достаточно давно начали предприниматься многочисленные попытки интенсифицировать теплоотдачу при кипении жидкости при температуре насыщения. Среди методов интенсификации теплоотдачи при кипении одним из наиболее часто применяемых является модификация поверхности с использованием микро- и наноструктур различного типа путем создания поверхностей с регулярной или нерегулярной шероховатостью. Кипение сильно недогретой воды уже само по себе отличается повышенной интенсивностью теплоотдачи и очень высокими КТП. Принципиально отличается от кипения жидкости при температуре насыщения и механизм кипения сильно недогретой жидкости. Возникает естественный вопрос, можно и целесообразно ли с помощью тех или иных модификаций структуры поверхности кипения дополнительно интенсифицировать теплоотдачу при кипении недогретой жидкости.

Задачи отвода тепловых потоков q до 100 Вт/см^2 (1 МВт/м^2) в электронике достаточно уверенно решаются путем использования однофазного конвективного охлаждения водой. Однако, существует гипотетическая (но отнюдь не нулевая) угроза больших экономических потерь при выходе системы из строя вследствие электрического замыкания в случае пробоя в системе водяного охлаждения. Особенно это может быть ощутимо в таких устройствах, как например, суперкомпьютеры и статические преобразователи и суперконденсаторы киловольтного и мегаваттного диапазона. Использование охладителя с существенно более высокими диэлектрическими характеристиками, нежели дистиллированная вода, например такого, как жидкость Noves 649 компании 3М способно решить эту проблему. Такие охладители имеют существенно более низкие теплопроводность и теплоемкость, что исключает сохранение системы однофазного конвективного охлаждения. При недогретом кипении по сравнению с кипением жидкости при температуре насыщения можно достичь намного больших КТО, а также отсутствует унос паровых пузырей в ядро потока, ведущий к росту гидравлического сопротивления канала и другим нежелательным последствиям. Поэтому применительно к поставленному выше вопросу актуальным является исследование кипения недогретой диэлектрической жидкости Noves 649 в условиях вынужденного течения.

Цели работы

1. Используя современные измерительные средства и методы, в частности высокоскоростную видеосъемку процесса расширить базу данных по статистическим характеристикам процесса недогретого кипения, таким как: распределение и устойчивость центров парообразования, плотность центров на единицу площади греющей поверхности, распределение пузырей по размерам, частота возникновения пузырей, длительность фаз жизни и эволюция формы пузырей в условиях кипения на гладких и искусственно

структурированных типах греющих поверхностей в широком диапазоне плотностей тепловых потоков и недогревов до температуры насыщения.

2. Экспериментально показать возможность исследования динамики паровых пузырей при кипении недогретой воды в области высоких тепловых потоков (более 1 МВт/м^2), посредством изучения поведения одиночного пузыря, получаемого путем локализованного лазерного нагрева поверхности, и при её наличии провести такое исследование.

3. Сопоставить полученные результаты с известными моделями кипения недогретой жидкости, и оценить их эффективность.

4. Провести исследование динамики крупных паровых пузырей (агломератов) при приближении к кризису кипения недогретой жидкости.

5. Получить дополнительную информацию о влиянии растворенного в жидкости газа на величину критического теплового потока.

6. Уточнить степень влияния структурирования греющей поверхности на статистические характеристики процесса и интенсивность теплоотдачи при кипении недогретой жидкости.

7. В качестве практической реализации технологии охлаждения поверхностей нагрева кипением недогретого охладителя, исследовать возможность отвода плотностей теплового потока до 1 МВт/м^2 с помощью кипения недогретой диэлектрической жидкости Noves 649, заметно отличающейся в худшую сторону от воды по теплофизическим свойствам, но обеспечивающей повышенную надежность работы электроники.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Получен массив опытных данных по характеристикам процесса кипения недогретой жидкости: распределению и устойчивости центров парообразования, плотности центров на единицу площади греющей поверхности, распределению пузырей по размерам, частоте возникновения пузырей, длительности фаз их жизни, размерам и эволюции формы пузырей в условиях кипения на гладких и искусственно структурированных греющих поверхностях.

2. Выявлено хаотическое пространственное распределение центров парообразования при кипении недогретой воды, и показана полная деактивация действующих центров как на технически гладких, так и на искусственно структурированных греющих поверхностях.

3. Показана возможность изучения динамики парового пузыря при кипении недогретой воды в области высоких тепловых потоков q (больше 1 МВт/м^2) посредством получения одиночного пузыря с помощью локализованного лазерного нагрева поверхности.

4. Продемонстрировано, что в условиях больших недогревов структурирование поверхности слабо влияет на статистические характеристики и интенсивность теплоотдачи.

5. Показана возможность накопления при кипении недогретой жидкости неконденсирующегося газа у греющей поверхности, вызывающего существенное снижение критических тепловых нагрузок.

6. Разработана методика экспериментального исследования посредством синхронизированных скоростных видеосъемок в двух взаимно перпендикулярных поверхностях эволюции крупных паровых пузырей (агломератов) при приближении к кризису кипения недогретой жидкости.

7. Экспериментально показана возможность отвода плотности теплового потока $q = 1 \text{ МВт/м}^2$ с помощью кипения в условиях вынужденного течения недогретой диэлектрической жидкости Noves 649, что важно для обоснования новых систем охлаждения электроники.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается использованием современных аттестованных средств измерения и тщательной отработкой методов определения параметров, оценкой неопределенностей измерений, согласием полученных результатов с надежными данными других экспериментов в совпадающих диапазонах режимных параметров.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что разработанные экспериментальные методики и массив полученных данных должны обеспечить и более глубокое понимание механизма кипения недогретой жидкости и выявить наиболее достоверную модель процесса, что необходимо для построения расчетных соотношений для проектирования систем охлаждения на основе данной технологии. Поскольку кипение недогретой жидкости является одним из наиболее интенсивных методов отвода тепла, при котором достигаются максимально высокие критические плотности тепловых потоков, то это имеет практическую значимость для технологических процессов, связанных с отводом экстремальных тепловых потоков.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика исследования и конструкция экспериментальной установки для изучения кипения недогретой воды в канале, а также методики проведения экспериментов по изучению динамики парового пузыря в области высоких тепловых потоков q (больше 1 МВт/м^2) посредством получения одиночного пузыря с помощью локализованного лазерного нагрева поверхности и эволюции паровых агломератов посредством синхронизированных скоростных видеосъемок в двух взаимно перпендикулярных поверхностях.

2. Полученная в результате экспериментов база данных по статистическим характеристикам кипения недогретой воды: плотности центров на единицу площади греющей поверхности, устойчивости центров кипения, распределению пузырей по размерам, эволюции формы и размеров пузыря во времени, хаотическому пространственному распределению центров парообразования при кипении недогретой воды и полной деактивации действующих центров.

3. Экспериментально обнаруженное слабое влияние в условиях больших недогрева структурирования греющей поверхности на статистические характеристики и интенсивность теплоотдачи.

4. Полученные данные по влиянию растворенного в жидкости газа на критические тепловые нагрузки при недогретом кипении в большом объеме, а также вероятный механизм наступления «газового» кризиса кипения.

5. Экспериментально показанная возможность отвода теплового потока плотностью $q = 1 \text{ МВт/м}^2$ посредством кипения недогретой диэлектрической жидкости Noves 649 в условиях вынужденного течения.

Личный вклад автора

Все положения, выносимые на защиту, получены лично автором или при его определяющем участии. Автором осуществлена постановка целей и задач исследования; он принимал непосредственное участие в модернизации экспериментальной установки, планировании и проведении экспериментальных исследований; в обработке и анализе полученных данных; в подготовке публикаций по выполненной работе.

Апробация работы. Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, были представлены на: XX и XXI Школах-семинарах молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (Звенигород, 2015г.; Санкт-Петербург, 2017г.); 9th International Conference on Multiphase Flow (Florence, Italy, 2016г.); XV Минском международном форуме по тепло- и массообмену (Минск, Беларусь, 2016 г.); XIV Всероссийской школе-конференции молодых ученых с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Новосибирск, 2016г.); XIV Международной научно-технической конференции «Быстрозакаленные материалы и покрытия» (Москва, 2016г.); Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (Москва, 2017г.). Отмечены Дипломами за лучший доклад первой степени на XX Школе-семинаре молодых учёных и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (Звенигород, 2015г.) и второй степени на XIV Всероссийской школе-конференции молодых ученых с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Новосибирск, 2016г.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 12 научных работ (5 статей, 7 тезисов докладов и материалов конференций), из них 4 статьи в журналах из списка ВАК РФ, 4 – в журналах, цитируемых в базах Web of Science, Scopus, общим объемом 4 п.л.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертация включает введение, пять глав, заключение и список литературы (119 наименований). Работа изложена на 139 страницах машинописного текста, содержит 62 рисунка и 7 таблиц.

Содержание работы

Во введении отмечена актуальность диссертационной работы, ее теоретическая и практическая значимость, поставлены цели исследования,

отражена научная новизна, дана общая характеристика работы и кратко описано ее содержание.

В первой главе представлен аналитический обзор работ, посвящённых основным моделям механизма недогретого кипения, исследованию статистических характеристик процесса, характеристик теплоотдачи и кризиса кипения, влиянию морфологии греющей поверхности на кипение жидкости.

По результатам обзора сделаны следующие выводы:

1. Существующая база данных по статистическим характеристикам кипения недогретой жидкости нуждается в расширении, уточнении и детализации, и это целесообразно делать, используя расширившиеся инструментальные возможности, прежде всего увеличение скорости и разрешения видеосъемки, а также уменьшение времени экспозиции.

2. Наиболее вероятный механизм процесса недогретого кипения описывается моделью Снайдера-Берглеса, согласно которой в основании парового пузыря происходит испарение микрослоя жидкости, а у его купола - конденсация образовавшегося пара с передачей тепла обтекающему пузырь потоку жидкости (Рисунок 1). При этом сами паровые пузыри в процессе их жизненного цикла не отрываются от стенки в поток жидкости.

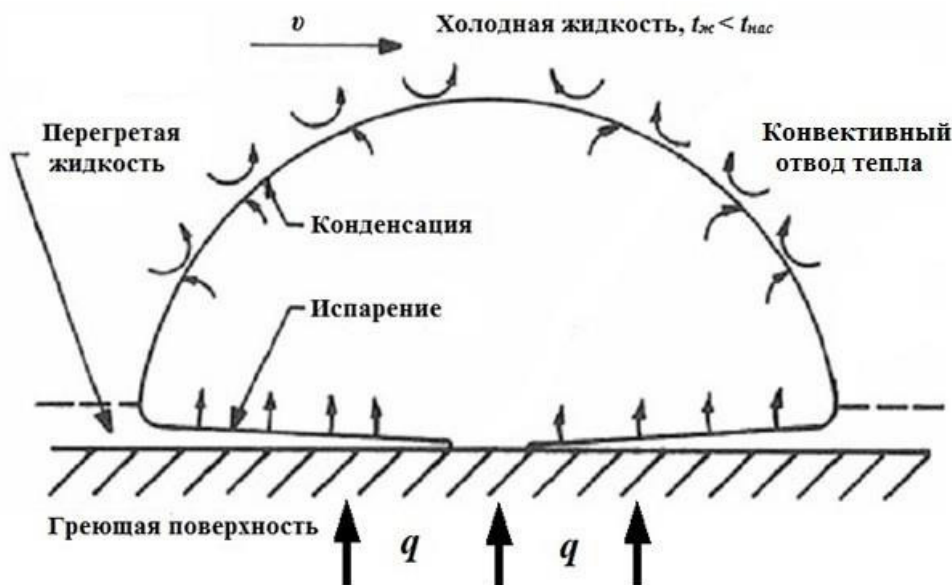


Рисунок 1. Модель теплоотдачи при кипении недогретой жидкости Снайдера-Берглеса.

3. На сегодня не имеется общепризнанной теории кризиса кипения недогретой жидкости в канале. Существует ограниченное количество экспериментальных данных для верификации имеющихся либо разработки новых более универсальных моделей. Поэтому требуется разработка надежных методик исследования структуры парожидкостного потока (в том числе крупных паровых агломератов) при приближении к кризису кипения. Ограничены данные по механизму влияния растворенного в жидкости газа на величину критического теплового потока.

4. Анализ исследований влияния модификации греющей поверхности на кипение жидкости при температуре насыщения показывает, что таким способом достижима интенсификация теплоотдачи. Данных по эффективности покрытий при кипении недогретых жидкостей существенно меньше. Практически отсутствуют данные по механизму процесса в этих условиях. В связи с этим, требуются дополнительные исследования влияния модификации греющей поверхности на кипение недогретых жидкостей.

5. Существуют технологии, использующие кипение недогретой жидкости, в интересах которых исследования коэффициента теплоотдачи стоит продолжать. В частности, системы охлаждения электроники диэлектрическими жидкостями (ввиду нечастого, но и не бессмысленного требования исключения возможности электрического пробоя), заметно отличающимися в худшую сторону от воды по теплофизическим свойствам.

Во второй главе приведено описание экспериментальной установки, методики проведения экспериментов и обработки полученных данных. Представлены результаты исследования статистических характеристик процесса кипения недогретой воды на греющей поверхности большой площади и динамики одиночного пузыря, полученного с помощью локализованного лазерного нагрева поверхности.

Схема экспериментальной установки приведена на Рисунке 2. Рабочий участок установки (канал) имел прямоугольное поперечное сечение шириной 21, высотой 5 и длиной 70 мм и вертикальное расположение. К съемной задней стенке опытного участка приклеивалась, выполняющая роль теплоотдающей поверхности металлическая пластина длиной между токоподводами 30, шириной 3–4 и толщиной 0,1–0,2 мм (из нержавеющей стали или нихрома). Нагрев осуществлялся выпрямленным электрическим током. При фиксированных параметрах режима (массовой скорости жидкости, недогрева и плотности теплового потока) с помощью высокоскоростной камеры Photron Fastcam SA4 производилась видеосъемка процесса кипения по нормали к поверхности нагрева. Максимальная частота кадров составляла 100 кГц, время экспозиции – 3 мкс. Неопределенности измерений параметров режима рассчитывались в соответствии со стандартом ГОСТ Р 54500.3—2011. Кадры, полученных видеосъемок, обрабатывались с помощью специально разработанной программы, написанной в среде MATLAB.

В результате были получены данные по статистическим характеристикам кипения недогретой воды: плотности центров на единицу площади греющей поверхности, устойчивости центров кипения, распределению пузырей по размерам и др. при давлении $P = 0,1$ МПа в следующем диапазоне параметров: массовых скоростей потока ρv до $650 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, недогревов $\Delta t_{\text{нед}} = 35\text{--}75 \text{ }^\circ\text{C}$, плотностей тепловых потоков $q = 0,7\text{--}5 \text{ МВт}/\text{м}^2$.

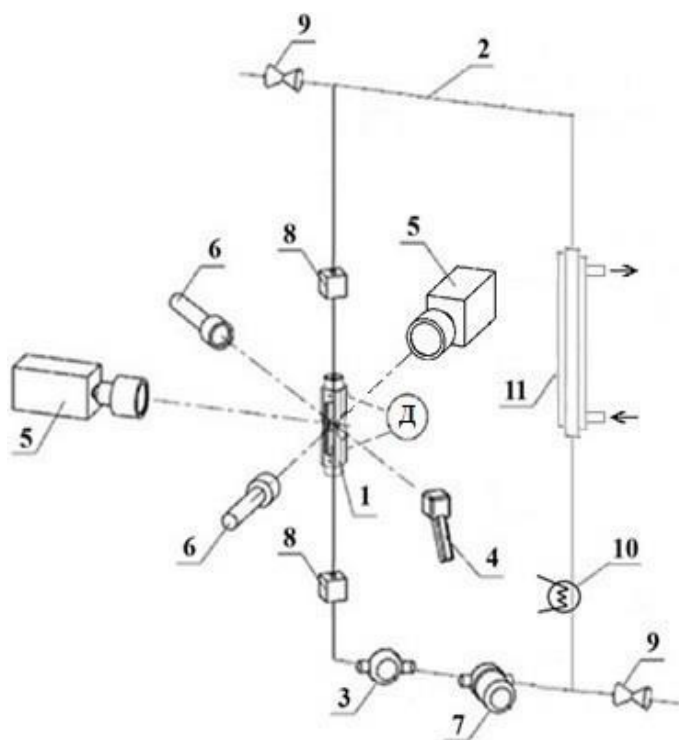


Рисунок 2. Схема экспериментальной установки:
 1 – рабочий участок;
 2 – замкнутый контур с охладителем;
 3 – расходомер (Flow-X3);
 4 – тепловизор (SDS Hotfind-DX);
 5 – скоростные видеокамеры;
 6 – подсветка;
 7 – циркуляционный насос (ARGAL TMB 35);
 8 – датчики температуры воды (TCM-0979);
 9 – вентили;
 10 – электрический подогреватель;
 11 – теплообменник-охладитель;
 Д – датчики давления (БД ПД-Р).

Из Рисунка 3 видно, что при недогреве $\Delta t_{нед} = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $q = 1,3\text{ МВт/м}^2$ в течение 1 с на 1 см^2 греющей поверхности возникают и заканчивают свое существование около 125 тысяч паровых пузырьков. А при увеличении q до $3,6\text{ МВт/м}^2$ число пузырьков достигает значения 350 тысяч. На Рисунке 4 видно, что с уменьшением недогрева воды распределения пузырей по размерам смещаются в область больших диаметров.

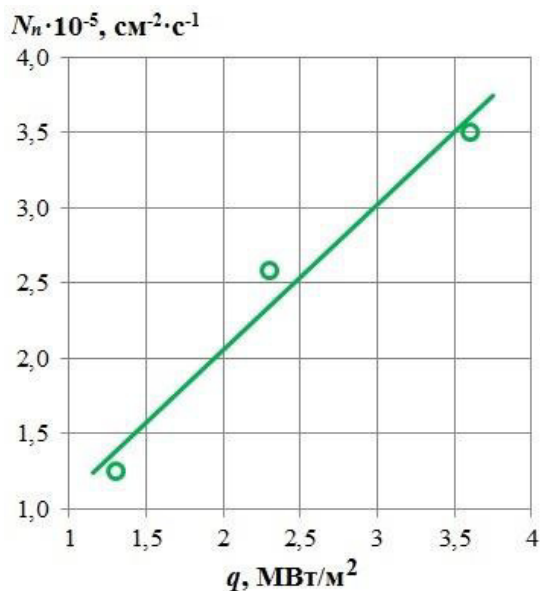


Рисунок 3. Зависимость числа пузырей на 1 см^2 в секунду от плотности теплового потока, $\Delta t_{нед} = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\rho v = 650\text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$.

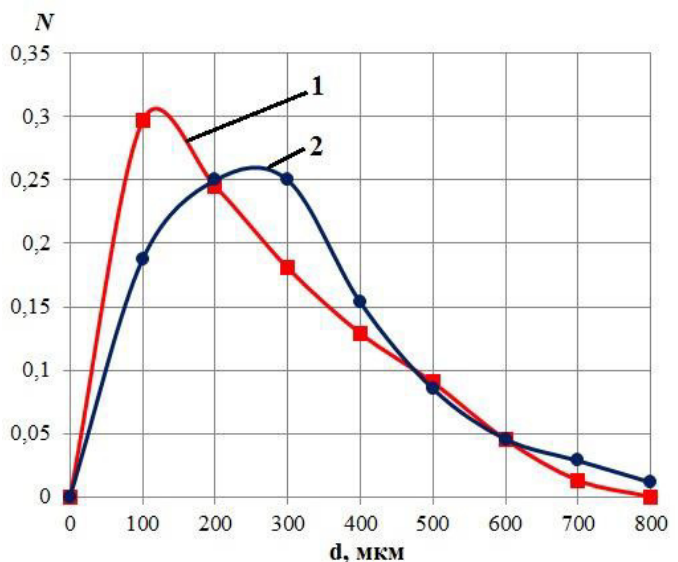


Рисунок 4. Распределение пузырей по размерам, $\rho v = 650\text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$, N – доля от полного количества пузырей:
 1 – $\Delta t_{нед} = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$, $q = 2,3\text{ МВт/м}^2$;
 2 – $\Delta t_{нед} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $q = 1,8\text{ МВт/м}^2$.

В результате проведенных экспериментов было выявлено хаотическое пространственное распределение пузырей на греющей поверхности во времени, то есть, отсутствие постоянно действующих центров парообразования, характерных для кипения жидкости при температуре насыщения. Можно полагать, что большой недогрев кипящей жидкости до температуры насыщения деактивирует действующие центры парообразования после конденсации (схлопывания) парового пузыря. Скорее всего, это объясняется тем, что при схлопывании парового пузыря в недогретой жидкости во впадине, которая являлась центром парообразования, не остается пузырька малого размера, как при кипении жидкости при температуре насыщения.

Для получения наибольшей информации об эволюции формы и размеров парового пузыря во времени была разработана методика высокоскоростной видеосъемки в профиль одиночного пузыря (Рисунок 5), получаемого с помощью локализованного лазерного нагрева поверхности. Переход к исследованию одиночного пузыря был обусловлен тем, что в условиях высоких q , соответствующих развитому пузырьковому кипению, при электронагреве поверхности большой площади невозможно проследить динамику парового пузыря, вследствие затенения пузырями друг друга.

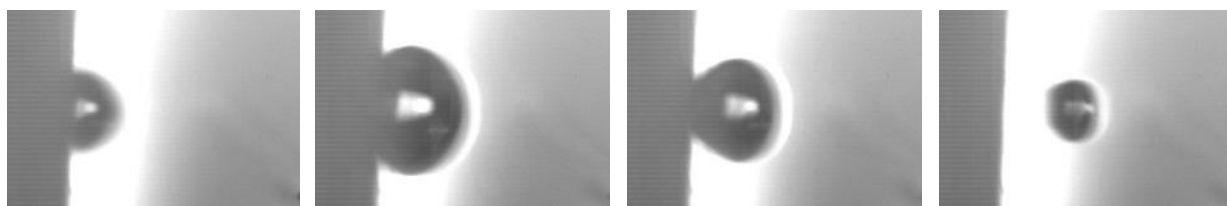


Рисунок 5. Эволюция одиночного парового пузыря. Интервал между кадрами – 140 мкс, экспозиция – 20 мкс: $\Delta t_{нед} = 59\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\rho\nu = 0\text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$; $q = 1,4\text{ МВт}/\text{м}^2$. Размер кадра 0,8 x 1,2 мм.

Сравнение таких характеристик, как средний максимальный размер, время жизни, длительность фаз жизни и эволюция размеров одиночного пузыря с результатами статистической обработки массива пузырьков, сформированных на греющей поверхности большой площади, показало их хорошее соответствие. Отсюда можно сделать вывод, что данные, полученные для одиночного пузырька, по-видимому, могут быть распространены на реальный случай кипения на протяженных поверхностях. С помощью данной методики были получены новые данные о поведении парового пузыря; такие, как уменьшение пятна контакта с греющей поверхностью на этапе стагнации перед началом уменьшения размера пузыря, начало процесса схлопывания в донной части пузыря и перемещение фрагментов нагретой жидкости, остающихся после конденсации пузырей.

В третьей главе приведены результаты экспериментального исследования процессов, предшествующих кризису кипения недогретой жидкости.

Раздел 3.1 посвящен исследованию поведения крупных паровых пузырей (агломератов) перед наступлением кризиса кипения недогретой воды в условиях вынужденного течения. Методика включала видеосъемки процесса с частотой кадров 2 кГц в двух взаимно перпендикулярных поверхностях на скоростные видеокамеры ВидеоСпринт/С/G4 (в фас) и ВидеоСпринт/G2 (в профиль) (Рисунок 2), синхронизированные между собой и с системой сбора данных (ССД) фирмы National Instruments, на которую велась запись величин силы тока и падения напряжения на греющей пластине с частотой 1 кГц. Синхронизация осуществлялась посредством импульса амплитудой 5 мВ длительностью 25 мкс, испускаемого генератором марки Г5-54. Для управления ССД была написана оригинальная программа в среде LabVIEW. Эксперименты проводились при динамическом повышении тепловой нагрузки от $q^* = q/q_{кр} = 0,5 - 0,6$ до $q^* = 1$ (пережог теплоотдающей пластины) при $P = 0,1$ МПа, $\rho\nu = 660$ кг/(м²·с) и трех степенях недогрева воды: $\Delta t_{нед} = 70$ °С; 43 °С и 23 °С.

При достижении значительной величины теплового потока ($q^* \approx 0,75 - 0,8$) появлялись агломераты несферической формы. Общий характер поведения таких агломератов оставался тем же, что и у менее крупных пузырей: они зарождались хаотично в произвольных точках греющей поверхности и после различной (также хаотичной) эволюции размеров и формы отрывались от стенки и схлопывались. Количество и размеры паровых агломератов увеличивались с ростом q и при уменьшении $\Delta t_{нед}$. При недогреве $\Delta t_{нед} = 23$ °С такие крупные пузыри имели вид «пробки», занимающей почти всё сечение канала над обогреваемой поверхностью. При $\Delta t_{нед} = 70$ °С их средние размеры составляли: в длину $l = 4,5$ мм, в высоту $h = 2,25$ мм и в ширину $b = 2$ мм (Рисунок 6).

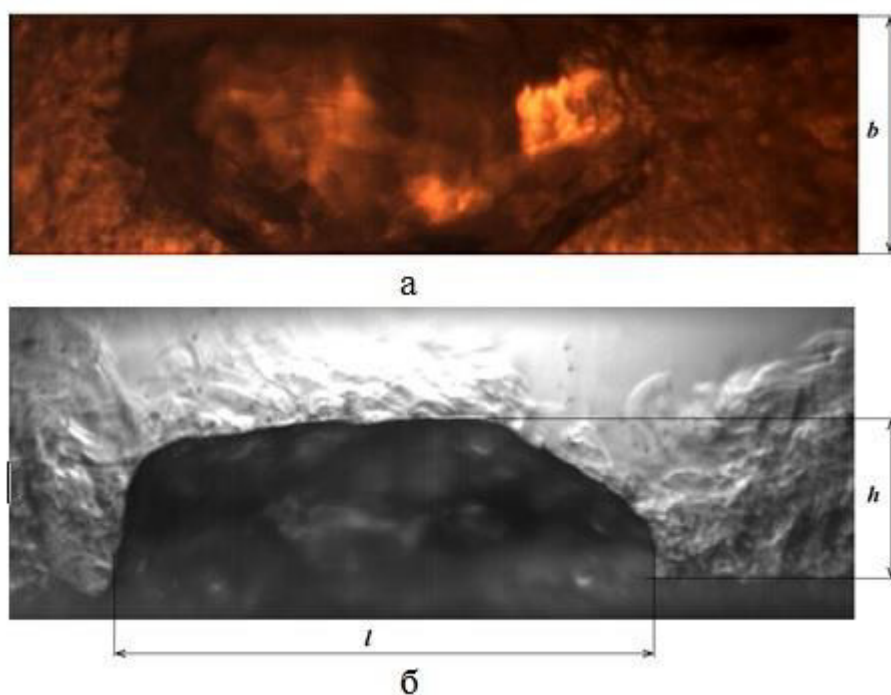


Рисунок 6. Паровые агломераты:
а – вид в фас, размер кадра 3 x 10,6 мм;
б – вид в профиль, размер кадра 4,0 x 10,6 мм.
 $\Delta t_{нед} = 70$ °С;
 $\rho\nu = 660$ кг/(м²·с);
 $P = 0,1$ МПа;
 $q^* = 0,95$.

При малых недогревах крупные пузыри оккупировали всю греющую поверхность. Напротив, при больших недогревах наблюдались относительно небольшие пузыри, занимающие лишь малую часть греющей поверхности. В то же время $q_{кр}$ при больших $\Delta t_{нед}$ заметно выше. Это указывает на различный механизм наступления кризиса теплоотдачи. Если в случае малых недогревов он, скорее всего, происходит вследствие высыхания жидкой плёнки под большими или близко расположенными паровыми агломератами, согласно модели высыхания жидкостного подслоя, то в случае высоких недогревов – к кризису, по-видимому, ведёт исчерпание потенциала отвода тепла конденсации от куполов пузырьков турбулентной конвекцией в поток жидкости, согласно модели Ягова.

В разделе 3.2 описана методика и представлены результаты исследования влияния растворенного в воде газа на КТП при недогретом кипении в условиях большого объема. В качестве поверхности кипения использовался капилляр из нержавеющей стали 1X18H9T диаметром 1 мм, толщиной стенки 0,1 мм и длиной 22 мм, помещенный в емкость с жидкостью объемом 1 литр. Нагрев осуществлялся электрическим током. Эксперименты проводились при динамическом повышении q вплоть до пережога капилляра. С помощью цветной скоростной видеокамеры ВидеоСпринт/C/G4 проводилась съемка процесса кипения с частотой кадров 2 кГц при экспозиции 50–400 мкс. Синхронизировано с видеосъемкой осуществлялась запись значений силы тока и падения напряжения на капилляре на ССД. В работе использовалась вода трех видов: насыщенная CO_2 до ~0,3% по массе, дистиллированная недегазированная, деаэрированная четырехчасовым кипячением (дегазированная). Эксперименты проводились при атмосферном давлении в диапазоне недогревов $\Delta t_{нед} = 49–96$ °C.

На Рисунке 7 представлены полученные опытные данные по КТП. Степень дегазации воды существенно влияет на величину $q_{кр}$. Каждая единица объема испаряющейся в пузырь воды приносит с собой определенное количество растворенного в ней газа. При недогретом кипении, будучи неспособным конденсироваться, этот газ сохраняется в жидкости после конденсации пара. Таким образом, в случае кипения насыщенной газом воды, создаются условия для образования длительно существующих крупных газовых агломератов (диаметром до нескольких мм), экранирования ими греющей поверхности и затруднения доступа к ней «свежих» порций жидкости, что можно видеть на кадрах видеосъемки развития кризиса кипения (Рисунок 8). Вследствие чего под крупными газовыми пузырями формируется перегретая зона, ведущая к пережогу капилляра в этом месте. В отличие от недогретого кипения, при кипении жидкости при температуре насыщения, отрывающиеся от греющей стенки пузыри уносят с собой и выделившийся газ, то есть, накопление пузырьков газа у поверхности нагрева есть специфика недогретого кипения жидкости, содержащей растворенный газ. Однако представленный выше анализ неправомерно в полной мере распространять на условия вынужденного течения, так как поток жидкости

способствует сносу газовых пузырей с поверхности нагрева. Можно полагать, что с ростом $\rho\nu$ степень влияния концентрации растворенного газа на $q_{кр}$ будет снижаться, так как накопление газа у греющей стенки потребует более продолжительного отрезка времени.

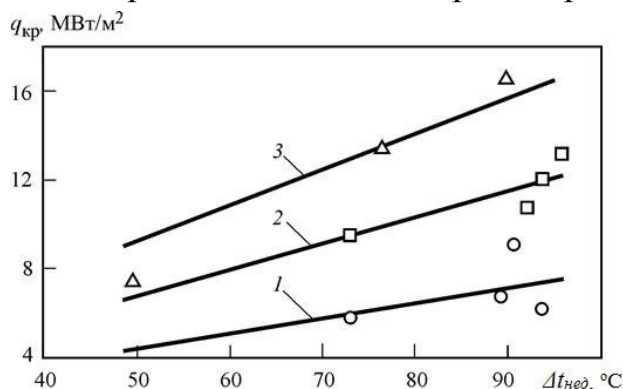


Рисунок 7. Влияние растворенного газа на $q_{кр}$ при кипении недогретой воды в большом объеме на капилляре: 1 – вода, насыщенная углекислым газом; 2 – недегазированная вода; 3 – дегазированная вода.

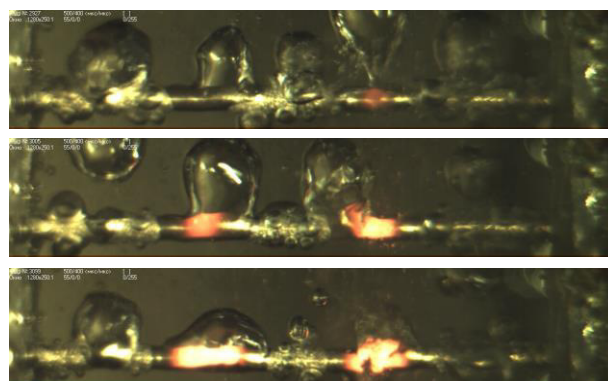
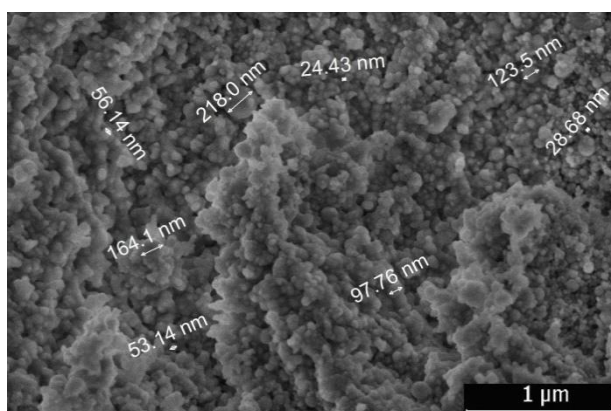
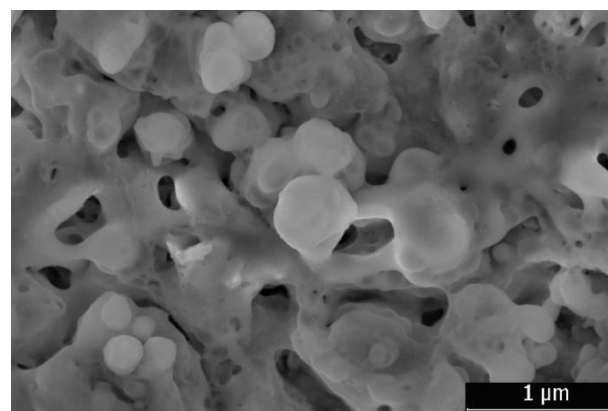


Рисунок 8. Развитие кризиса кипения в насыщенной углекислым газом воде (интервал между кадрами 45 мс): $P = 0,1$ МПа, $\Delta t_{нед} = 90^\circ\text{C}$, $q_{кр} = 6,4$ МВт/м²; $d_{кан} = 1$ мм.

В четвертой главе приведены результаты исследования влияния модификации греющей поверхности на статистические характеристики и теплоотдачу при кипении недогретой воды. В качестве модифицированных использовались поверхности с нанесенными покрытиями двух типов. Первое – покрытие из наночастиц Al_2O_3 толщиной 1–3 мкм, образованное осаждением частиц при кипении наножидкости (средний размер частиц – 100 нм, концентрация по массе 0,001%) на поверхности нихрома X20H80 (Рисунок 9а). Второе – из TiO_2 толщиной 10 мкм, нанесенное на поверхность титана VT1-0 методом микродугового оксидирования (МДО) (Рисунок 9б).



а



б

Рисунок 9. Микрофотографии покрытий: а – образованного осаждением частиц Al_2O_3 при кипении наножидкости на поверхности нихрома; б – из TiO_2 , сформированного с помощью МДО-технологии.

На поверхностях с покрытиями также было обнаружено хаотическое пространственное распределение центров парообразования (Рисунок 10). Можно предположить, что наличие в структурированных поверхностях углублений сложной геометрии, включая впадины «резервуарного» типа (их достаточно много на поверхностях, образованных по технологии МДО) также не препятствует деактивации действующих центров парообразования.

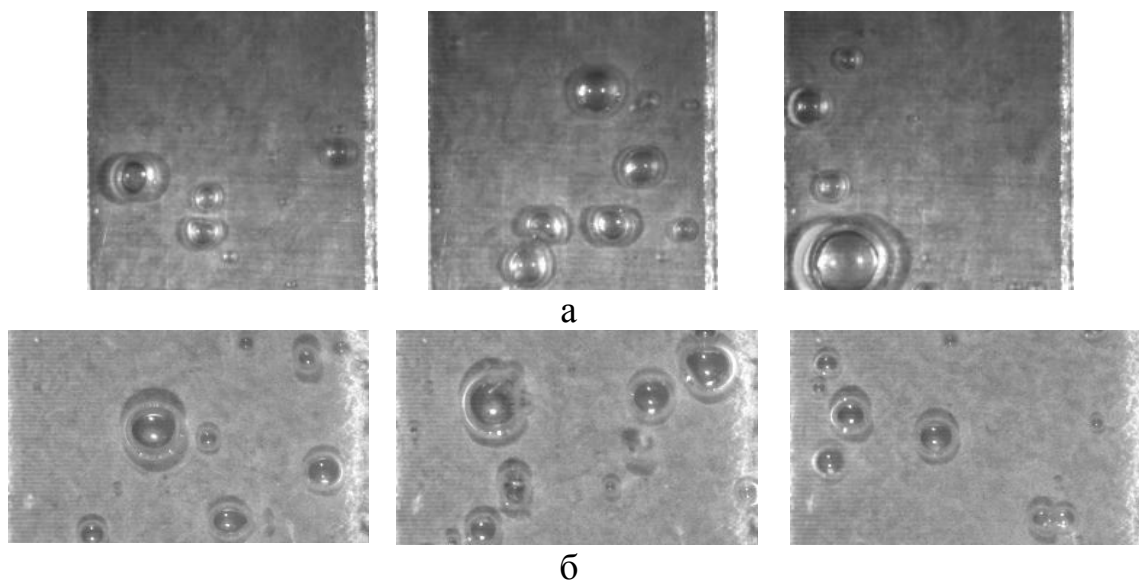


Рисунок 10. Распределение центров парообразования, $\Delta t_{нед} = 75$ °С, $\rho v = 650$ кг/(м²·с): а – гладкая поверхность из нержавеющей стали, $q = 2,3$ МВт/м², размер кадра 3 x 3 мм; б – МДО-покрытие, $q = 2,7$ МВт/м², размер кадра 4 x 2,5 мм. Представлены кадры, снятые последовательно через 1 мс.

Количество паровых пузырей несильно менялось при переходе от гладких к структурированным греющим поверхностям. Наиболее вероятно, что наблюдаемое слабое отличие в количестве пузырей при кипении недогретой жидкости обусловлено деактивацией активных центров парообразования. Распределения пузырей по размерам на поверхностях с покрытиями также слабо отличались от гладких поверхностей. Размер пузырей определялся режимом охлаждения: скоростью течения жидкости, величиной недогрева.

Исходя из результатов исследования статистических характеристик недогретого кипения на поверхностях с покрытиями, можно было ожидать, что структура греющей поверхности не окажет сильного влияния и на интенсивность теплоотдачи. Прежде всего, обращает на себя внимание высокий уровень теплоотдачи, значения КТО достигают 10^5 Вт/(м²·К) и более, как на поверхностях с покрытиями, так и на гладких образцах (Рисунок 11). Видно также, что покрытие, сформированное методом МДО, интенсифицирует теплоотдачу (значение КТО возрастает примерно на 20-30%), тогда как структурированная поверхность, нанесенная осаждением частиц Al_2O_3 при кипении наножидкости, оказывает отрицательное влияние – теплоотдача снижается. Видимо, это связано с более хорошим термическим

контактом между элементами покрытия и между покрытием и подложкой в случае создания структурированной поверхности методом МДО.

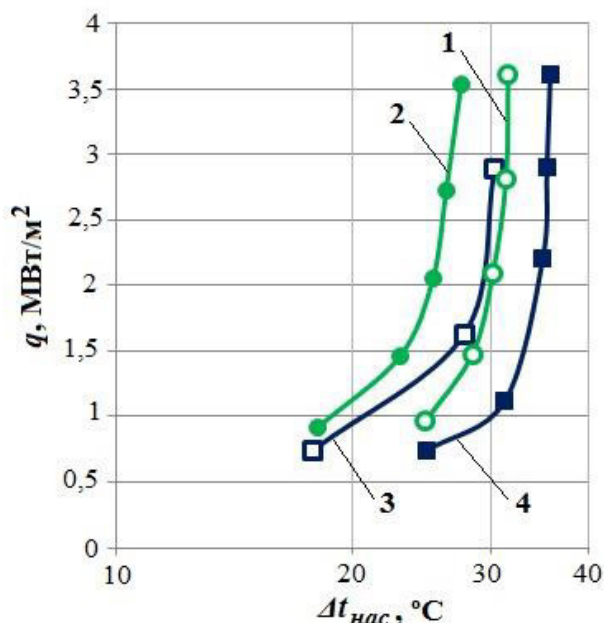


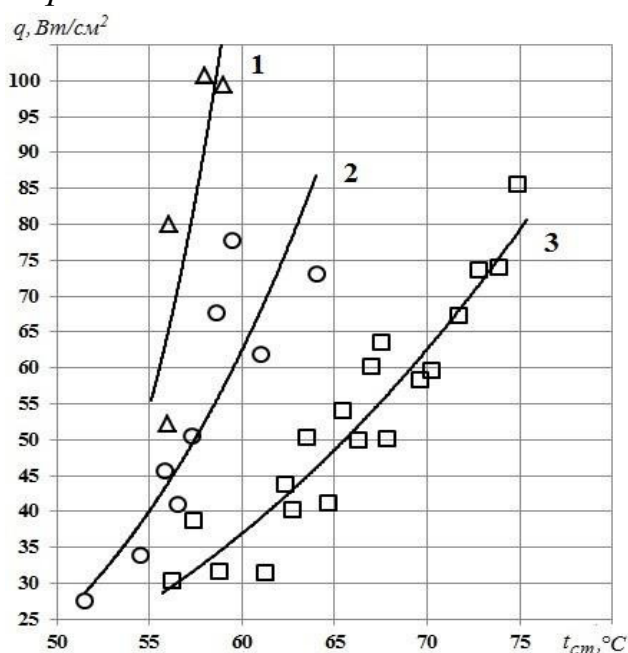
Рисунок 11. Кривые кипения недогретой воды при $P = 0,1$ МПа, $\Delta t_{нед} = 75$ °С, $\rho v = 650$ кг/(м²·с):
1 – титан;
2 – титан (МДО-покрытие);
3 – нихром;
4 – нихром (покрытие из наночастиц Al_2O_3).

В пятой главе рассматривается потенциальная возможность отвода тепловых потоков до 100 Вт/см² (1 МВт/м²) посредством кипения недогретого до температуры насыщения диэлектрического охладителя Noves 649 в элементах суперкомпьютеров, а также в статических преобразователях и суперконденсаторах киловольтного и мегаваттного диапазона. Проблема исследовалась применительно к решению вопроса о гипотетической (но отнюдь не нулевой) угрозе больших экономических потерь при выходе системы из строя вследствие электрического замыкания в случае пробоя в системе водяного охлаждения.

На рисунке 12 представлена полученная по результатам экспериментов зависимость q от температуры поверхности нагрева при различных значениях $\Delta t_{нед}$ и скорости потока охладителя – v . Видно, что увеличение скорости и недогрева охладителя позволяют увеличить $q_{кр}$. При $v = 7,4$ м/с и $\Delta t_{нед} = 35$ °С была достигнута величина $q = 100$ Вт/см².

Рисунок 12. Зависимость плотности теплового потока на стенке от температуры поверхности нагрева:

1 – $t_{жс} = 15,5$ °С, $\Delta t_{нед} = 35$ °С,
 $v = 7,4$ м/с, $P = 0,105$ МПа;
2 – $t_{жс} \approx 15$ °С, $\Delta t_{нед} \approx 36$ °С,
 $v = 6$ м/с, $P = 0,107$ МПа;
3 – $t_{жс} \approx 21$ °С, $\Delta t_{нед} \approx 32,5$ °С,
 $v = 6,5$ м/с, $P = 0,119$ МПа.



В исследованном диапазоне параметров кипение охладителя Novex 649 не сопровождалось заметным ростом паросодержания потока, что исключает возникновение кризисных явлений в системе охлаждения. Гидравлическое сопротивление канала оставалось таким же, как и при течении охладителя без кипения – фактор, чрезвычайно важный для надежной работы разветвленных гидравлических схем. Пятая глава выполнена при поддержке Минобрнауки России (соглашение № 14.604.21.0178, уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI60417X0178).

Основные результаты и выводы:

1. Выполнен обзор современного состояния исследований кипения недогретой жидкости в каналах. Показано, что существующая база данных по характеристикам процесса нуждается в расширении и развитии, что важно для уточнения феноменологической модели процесса и совершенствования методов расчета систем охлаждения.

2. В соответствии с целями работы модернизирован экспериментальный стенд для исследования характеристик недогретого кипения в канале; система измерений стенда включает в себя высокоскоростную видеосъемку в двух перпендикулярных поверхностях, тепловизионные измерения температуры греющей поверхности и возможность локализованного лазерного нагрева.

3. Проведены эксперименты по кипению недогретой воды в канале при $P = 0,1$ МПа на гладких и структурированных поверхностях в диапазоне параметров: ρv до $650 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, $\Delta t_{\text{нед}} = 35\text{--}75 \text{ }^\circ\text{C}$. Получены данные по статистическим характеристикам кипения недогретой воды: плотности центров парообразования, их устойчивости, распределению пузырей по размерам, эволюции формы и размеров пузыря во времени, расширяющие имеющуюся базу данных. Выявлены хаотическое пространственное распределение центров парообразования при кипении недогретой воды, полная деактивация действующих и активация новых центров. Получены данные по влиянию $\Delta t_{\text{нед}}$ и величины q на характеристики паровых пузырей.

4. Показана возможность и правомерность исследования динамики паровых пузырей при кипении недогретой воды в области высоких q (более $1 \text{ МВт}/\text{м}^2$), посредством изучения поведения одиночного пузыря, получаемого с помощью локализованного лазерного нагрева поверхности.

5. Полученные экспериментальные данные по статистическим характеристикам процесса кипения недогретой воды, работе центров парообразования и эволюции паровых пузырей вплоть до их схлопывания в целом хорошо коррелируют с феноменологическим описанием Снайдера-Бергlesa механизма этого процесса.

6. Продемонстрировано, что в условиях высоких недогревов структурирование поверхности слабо влияет на статистические характеристики и интенсивность теплоотдачи, при этом во всех случаях значения КТО весьма высоки (на уровне десятков-сотни $\text{кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ для воды). В ряде случаев это ставит под сомнение экономическую

целесообразность применения покрытий при использовании технологии кипения недогретой жидкости.

7. Установлено, что наступлению кризиса кипения недогретой воды в канале предшествует кардинальное изменение структуры течения - появление в потоке жидкости крупных паровых агломератов, что несет в себе угрозу гидравлической разверки аппарата, и возможность наступления аварийной ситуации ещё до кризиса кипения.

8. Показана возможность накопления при кипении недогретой жидкости неконденсирующегося газа у греющей поверхности, вызывающего существенное снижение критических тепловых нагрузок.

9. Экспериментально продемонстрирована возможность отвода $q = 1 \text{ МВт/м}^2$ с помощью недогретого кипения диэлектрического хладагента Novac 649, что важно для обоснования новых систем охлаждения электроники.

Основные положения диссертационной работы изложены в следующих работах:

1. О природе «газового» кризиса кипения /Н.В. Васильев [и др.] // Теплофизика высоких температур. 2015. Т. 53. № 6. С. 881–884. (0,55 п.л./0,3 п.л.).

2. Экспериментальные данные по кипению недогретой до температуры насыщения воды на поверхностях с мезорельефом /Н.В. Васильев [и др.] // Тепловые процессы в технике. 2016. № 3. С. 98–104. (1 п.л./0,5 п.л.).

3. Experimentally studying of the effect of the heating surface morphology on characteristics of highly subcooled water boiling /N.V. Vasiliev [et al.] // Proc. 9th International Conference on Multiphase Flow. 2016. № 281. (0,9 п.л./0,6 п.л.).

4. Васильев Н.В., Зейгарник Ю.А., Ходаков К.А. Кипение недогретой воды: механизм процесса // Тезисы докладов и сообщений XV Минского международного форума по тепло- и массообмену. 2016. Т. 1. С. 299–302. (0,3 п.л./0,15 п.л.).

5. Экспериментальное исследование характеристик кипения воды, сильно недогретой до температуры насыщения, на структурированных поверхностях /Н.В. Васильев [и др.] // Тезисы докладов XIV Всероссийской школы-конференции молодых ученых с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики». Новосибирск. 2016. С. 116–117. (0,35 п.л./0,2 п.л.).

6. Vasiliev N.V., Zeigarnik Y.A., Khodakov K.A. Evolution of steam-water flow structure under subcooled water boiling at smooth and structured heating surfaces // Journal of Physics: Conference Series. 2017. V. 891. 012008. (0,65 п.л./0,35 п.л.).

7. Характеристики кипения воды, недогретой до температуры насыщения на структурированных поверхностях /Н.В. Васильев [и др.] // Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 55. № 6. С. 712–719. (1,3 п.л./0,8 п.л.).

8. Перспективы использования кипения недогретых диэлектрических жидкостей для охлаждения суперкомпьютеров /Н.В. Васильев [и др.] // Доклады академии наук. 2018. Т. 478. № 6. С. 646–648. (0,4 п.л./0,2 п.л.).