



СИРОТКИНА АЛЕКСАНДРА ЛЬВОВНА

**КРИЗИС КИПЕНИЯ НАНОДИСПЕРСНОЙ ЖИДКОСТИ В
ЭЛЕМЕНТАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ») на кафедре «Атомная и тепловая энергетика».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,
член-корреспондент РАН
Сергеев Виталий Владимирович

Официальные оппоненты: **Кузма-Кичта Юрий Альфредович**
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет
«МЭИ», профессор кафедры Инженерной
теплофизики

Беленький Михаил Яковлевич
кандидат технических наук, доцент,
Открытое акционерное общество «Научно-
производственное объединение по исследованию и
проектированию энергетического оборудования им.
И.И. Ползунова», ведущий научный сотрудник
лаборатории теплотехнических процессов в
оборудовании АЭС

Ведущая организация: Обнинский институт атомной энергетики – филиал
федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего
образования «Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ» (ИАТЭ НИЯУ
МИФИ)

Защита диссертации состоится «24» октября 2017 г. в 16 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.229.06 при ФГАОУ ВО «СПбПУ Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт - Петербург, ул. Политехническая, дом 29, Главное здание, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «СПбПУ Петра Великого» и на сайте <http://www.spbstu.ru/science/defences.html>

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.229.06
кандидат технических наук, доцент



Талалов Виктор Алексеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационного исследования

Тенденция к увеличению мощности энергетического оборудования при уменьшении (или, по крайней мере, сохранении) его размеров приводит к необходимости отвода все большего количества теплоты с единицы поверхности. Когда речь идет о ядерной энергетике, эффективный теплоотвод и недопущение перегрева и пережога поверхностей нагрева, например, тепловыделяющих элементов ядерных реакторов, являются необходимыми условиями безопасной эксплуатации и предупреждения тяжелых аварий с выходом радиоактивности за пределы барьеров безопасности.

Одним из наиболее эффективных способов теплоотвода является кипение, особенно пузырьковое; при этом имеются ограничения по отводимому тепловому потоку, связанные с возникновением кризиса теплообмена (здесь и далее речь идет о кризисе 1го рода). Задача учета свойств поверхности, на которой происходит кипение, при его исследовании и использовании как механизма теплоотвода, а также увеличения критической плотности теплового потока (КТП) является чрезвычайно актуальной в России и за рубежом, о чем свидетельствует большой размах работ в этой области.

В частности, это связано с появлением новых типов теплоносителей, модифицирующих поверхность теплообмена. К таким теплоносителям относят нанодисперсные жидкости (наножидкости, НЖ) – чаще всего водные (либо на основе различных органических жидкостей) дисперсии наночастиц (НЧ) - частиц с размерами 100 нм и менее. По результатам экспериментальных исследований было выявлено, что при кипении подобных дисперсий на поверхности нагрева образуется пористый слой (покрытие), который является основной причиной роста КТП в НЖ. Теории образования этого слоя и его влияния на процесс кипения и кризиса кипения до сих пор не создано; не отслежено влияние режимных параметров кипения на формирующуюся структуру слоя и, как следствие, на КТП.

Для модификации высоконапряженных поверхностей нагрева в энергетическом оборудовании (например, оболочек твэлов, трубок парогенераторов и испарителей) необходимо тщательное исследование кипения и кризиса кипения наножидкостей, и следовательно поставленные в настоящей диссертационной работе задачи являются актуальными, имеют большое значение как для теории, так и для практических аспектов приложения этой теории.

Степень разработанности проблемы

Исследования кипения и кризиса кипения в НЖ носят, в основном, экспериментальный характер - см., например, следующие работы:

- Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux / S.J. Kim [et al] // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2007. - №50. – P. 4105-4116;

- Измерение критической плотности теплового потока при кипении наножидкостей на цилиндрическом нагревателе / А.В. Минаков [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2014. – 13 (40) – С.44-51.

Было замечено, что основной причиной роста КТП в НЖ является покрытие из наночастиц, образующееся в ходе кипения. Влияние этого слоя сводится к увеличению шероховатости и смачиваемости поверхности за счет специфической морфологии, дополнительному подсосу жидкости к поверхности нагрева, обусловленному капиллярными силами; кроме того, само нанопокрывание является дополнительным термическим сопротивлением на границе жидкость-нагреватель из-за своей невысокой теплопроводности.

Исследования этих вопросов, носящие, как правило, сугубо эмпирический характер, ограничиваются измерением краевого угла смачивания и фиксацией зависимости величины КТП от этого угла (как это было сделано, например, в работе Study of two-phase heat transfer in nanofluids for nuclear application / S.J. Kim [et al]// Proceedings of ICAPP'06: Paper 6005. – Reno, NV USA, 2006. – P. 1573-1580), а также констатацией наличия нанослоя на поверхности, максимум с указанием его примерной толщины.

Цель и задачи исследования

Основная **цель** диссертационной работы – выявление закономерностей формирования и влияния свойств пористого слоя, образующегося на обогреваемой поверхности в ходе кипения наножидкости, на величину критической плотности теплового потока (КТП) в элементах энергетического оборудования.

Для достижения цели в ходе работы решаются следующие **задачи**:

1. Анализ опубликованных данных по влиянию свойств поверхности на теплообмен при кипении и кризис кипения. Анализ моделей, предлагаемых для описания формирования нанослоя при кипении и получения расчетных корреляций для определения КТП.

2. Для исследования механизма образования слоя и его влияния на КТП проведение серии опытов по кипению наножидкостей с различными концентрациями частиц, при различном времени выдержки (экспозиции) при некоторых начальных значениях плотности теплового потока, соответствующих развитому пузырьковому кипению в целях управляемого формирования нанопокрывания на поверхности нагревателя.

3. Исследование морфологии покрытия, образованного на нагревателе в ходе кипения, выявление зависимости таких параметров, как толщина, среднее расстояние между впадинами (порами на поверхности) и их средний радиус от режимных параметров кипения.

4. Разработка теоретической модели образования нанопокрyтия на поверхности нагревателя в ходе кипения.

5. Разработка расчетной корреляции, связывающей параметры НЖ и режимы кипения со сформированным на поверхности нагревателя слоем наночастиц и изменением КТП.

6. Оценка повышения эффективности охлаждения корпуса реактора в условиях протекания запроектной аварии, сопровождаемой плавлением активной зоны, при использовании наножидкости как теплоносителя системы безопасности или при предварительном нанесении нанопокрyтия на поверхность корпуса.

В качестве объекта исследования выбрана нанодисперсная жидкость на основе дистиллированной воды с частицами ZrO_2 средним размером около 100 нм. Предметом исследования являются образование покрyтия из наночастиц на поверхности нагрева в ходе кипения НЖ в элементах энергетического оборудования, а также кризис кипения НЖ.

Научная новизна исследования

1. Впервые получены экспериментальные данные по влиянию режимных параметров кипения и свойств наножидкости (времени выдержки, начальной величины плотности теплового потока в режиме выдержки, концентрации частиц в дисперсии) на КТП и морфологию покрyтия из наночастиц на обогреваемой поверхности.

2. Определены закономерности формирования нанослоя и разработана новая модель, описывающая влияние режимных параметров кипения на КТП.

3. Разработана оригинальная модель образования нанопокрyтия на обогреваемой поверхности в ходе кипения НЖ.

Теоретическая и практическая значимость исследования

Теоретическая значимость исследования заключается в создании модели образования нанопокрyтия на обогреваемой поверхности и влияния морфологии этого покрyтия на кризис теплообмена, что является также вкладом в развитие теории влияния свойств поверхности на кризис кипения.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования полученных корреляций для расчета КТП в НЖ в элементах энергетического оборудования, что продемонстрировано выполненной оценкой повышения эффективности работы системы охлаждения корпуса реактора в запроектных авариях, сопровождаемых плавлением активной зоны (критическая плотность теплового потока, лимитирующая надежный теплоотвод от поверхности, при использовании наножидкости и наноструктурированных поверхностей может быть повышена на 30-50%). Кроме того, результаты работы могут быть полезными для дальнейшего изготовления поверхностей с покрyтием оптимальной для достижения

наивысшего значения КТП морфологией и толщиной, для использования в различных высоконапряженных узлах, что позволит повысить их надежность и снизить металлоемкость.

Методология и методы исследования

Экспериментальное исследование кризиса кипения в НЖ проводилось на установке, моделирующей кипение в условиях естественной конвекции. Для установления «базового» значения КТП предварительно проводились опыты с дистиллятом. В ходе экспериментов по кипению НЖ варьировались: концентрация частиц в дисперсии, начальное значение плотности теплового потока и время выдержки (экспозиции). Для каждого случая исследовалась морфология поверхности с использованием сканирующей электронной микроскопии. **Разработка модели** формирования нанопокрyтия на обогреваемой поверхности при кипении НЖ и влияния морфологии покpытия на КТП проводилась с использованием полученных в ходе экспериментов результатов и опубликованных в литературе данных.

Основные положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся:

- результаты экспериментальных исследований по влиянию режимных параметров кипения и свойств наножидкости (времени выдержки, начальной величины плотности теплового потока в режиме выдержки, концентрации частиц в дисперсии) на КТП и морфологию покpытия из наночастиц на обогреваемой поверхности;
- модель образования нанопокpытия на обогреваемой поверхности в ходе кипения наножидкости;
- соотношение, описывающее влияние режимных параметров кипения на морфологию нанопокpытия и на критическую плотность теплового потока (КТП).

Степень достоверности и апробация результатов

По результатам работы опубликовано 6 статей, из них 2 в журналах, входящих в перечни ВАК и/или входящих в базу Web of Science.

Достоверность полученных экспериментальных данных подтверждается использованием общепринятых экспериментальных методик, надежностью оборудования и расчетом неопределенности измерений. Разработанная модель базируется на полученных экспериментальных данных и опубликованных в литературе данных.

Основные результаты работы были представлены на: Международной научно-практической конференции «Неделя науки СПбПУ Петра Великого», СПб (2015), Зимней школе ПИЯФ им. Б.П. Константинова, Рошино (2015, 2016), конференции «Техногенные системы и экологический риск» (2015), а также обсуждались на научно-технических семинарах кафедры «Атомная и тепловая энергетика» СПбПУ Петра Великого и кафедры «Физическая химия» СПбГЭТУ ЛЭТИ.

Личный вклад автора

Экспериментальные исследования по изучению кризиса кипения НЖ, анализ морфологии образцов покрытия после кипения НЖ с использованием сканирующей электронной микроскопии проведены автором лично. Разработка модели образования нанопокрyтия на поверхности нагрева в ходе кипения НЖ и разработка соотношения, описывающего влияние режимных параметров кипения на морфологию нанопокрyтия и, в конечном итоге, на КТП выполнены автором лично.

Постановка задачи, анализ и интерпретация результатов проведены при консультации д.т.н., проф. В.Б. Хабенского (НИТИ им.А.П. Александрова) и д.т.н., проф. Е.Д. Федоровича (СПбПУ Петра Великого); по физико-химической части работы – к.х.н. В.И. Альмяшева (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»).

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из Введения, пяти глав и Заключения, Перечня сокращений и условных обозначений, Списка литературы из 87 наименований. Работа изложена на 137 стр., содержит 31 рисунок и 8 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность темы, рассматриваются основные причины важности развития теорий пузырькового кипения и кризиса кипения в элементах энергетического оборудования, особенности наножидкостей как теплоносителей. Кратко описывается состояние работ по тематике кризиса кипения в наножидкостях в настоящее время, цель и задачи данной диссертационной работы, ее научная новизна и практическая ценность.

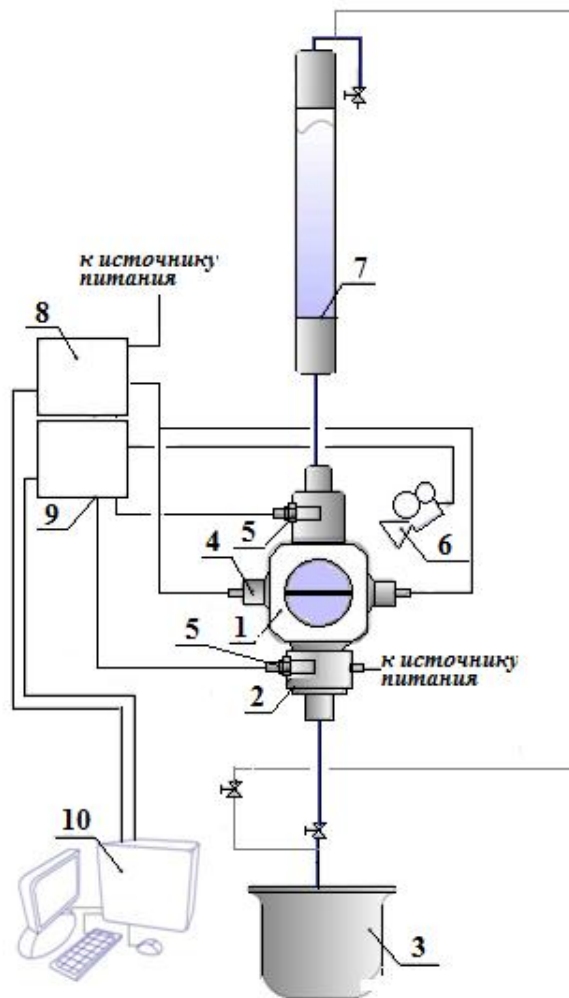
В Главе 1 представлен анализ публикаций и научно-технической литературы по тематике проведенной работы, в котором использовано 87 источников, из которых 45 посвящены особенностям наножидкостей, их теплофизическим свойствам и однофазному конвективному теплообмену в наножидкостях; 28 – кипению и кризису кипения в наножидкостях; 6 источников являются научно-технической литературой по общим вопросам теплообмена; 3 – научно-технической литературой по методам физико-химического анализа и физике поверхностей; 5 источников посвящены особенностям кипения «чистых» жидкостей на различных поверхностях.

Основным выводом из анализа рассмотренных источников и научно-технической литературы является недостаточность изученности процесса кипения и кризиса кипения в НЖ – например, не отслежено влияние режимных параметров кипения на характеристики нанопокрyтия и КТП.

В Главе 2 приведено описание экспериментальной установки, методики проведения эксперимента, включая приготовление наножидкости, проведение экспериментов по исследованию кризиса кипения и методику постэкспериментального анализа покрытия на нагревателе.

Экспериментальные исследования, направленные на изучение увеличения критической плотности теплового потока при кипении наножидкостей, проводились на экспериментальной установке, принципиальная схема которой приведена на рисунке 1.

Тип исследуемого нагревательного элемента – проволока из нихрома (марка Х15Н60) диаметром 0,17 мм. Длина рабочего участка – 30 мм. Объем рабочей ячейки – 170 мл. Для установления «базового» значения КТП в условиях используемой установки была проведена серия экспериментов с дистиллятом.



1 – рабочая ячейка; 2 – нагреватель; 3 – сливной сосуд; 4 – токовводы; 5 – каналы термодпар; 6 – видеокамера; 7 – конденсатор; 8,9 – блок автоматики и измерений; 10 - ПК

Рисунок 1. Экспериментальная установка

Методика проведения экспериментов состояла в следующем: ячейка (поз.1) заполнялась наножидкостью заданной концентрации (от 0,001%об. до 0,1%об). С использованием нагревателя (поз.2) производился подогрев НЖ до ~95°C (не более - во избежание закипания НЖ на нагревателе). Затем нагреватель (поз.2) выключался. На исследуемый проволочный нагреватель подавалась нагрузка, соответствующая начальной плотности теплового потока (варьировалась от 0,5 МВт/м² до 1,2 МВт/м²). Эта нагрузка выдерживалась в течение времени, соответствующего времени экспозиции (от 1,5 мин до 30 мин). Далее нагрузка плавно повышалась в быстром темпе до достижения кризиса. Критическая плотность теплового потока фиксировалась по пережогу проволоки.

Неопределенность измерений КТП рассчитывалась как стандартная неопределенность (выборочная) для каждой точки (каждого сочетания параметров) согласно ГОСТ 54300.3-2011; ее величина приведена на графиках.

Исследовалось влияние диаметра нагревателя на КТП в НЖ: проводилась серия измерений с нагревателем диаметром 0,30 мм. Кроме того, для выявления влияния качества приготовления (размеров агломератов) дисперсии на КТП были проведены опыты с различным временем ультразвукового перемешивания.

Потери тепла через стенки установки в режиме кипения на проволочном нагревателе составляли менее 2% от подводимого теплового потока. О равномерности распределения температуры по длине рабочего участка косвенно свидетельствует равномерность распределения центров парообразования (рис. 2).



Рисунок 2. Распределение центров парообразования по длине рабочего участка

В работе был использован двухэтапный процесс приготовления наножидкости. Для приготовления НЖ использовался порошок частиц диоксида циркония ZrO_2 (производитель – «HWNANO», Гонконг) и дистиллированная вода однократной перегонки. Ультразвуковое перемешивание дисперсии производилось в установке «S15H Elmasonic». Доэкспериментальный анализ (характеризация) нанопорошка производился с использованием методов рентгеновской дифрактометрии и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с целью выявления среднего размера частиц и элементного состава порошка. Постэкспериментальный анализ состоял в исследовании свойств и морфологии покрытия из НЧ, образующегося в ходе кипения на поверхности нагревательного элемента, с помощью сканирующего электронного микроскопа «Supra 55VP-25-78», установленного в НИЛ "Микроскопия и микроанализ" СПбПУ Петра Великого.

В Главе 3 изложены результаты экспериментальных исследований кризиса кипения и результаты доэкспериментального анализа нанопорошка.

На рисунках 3 – 4 приведены результаты опытов по определению относительной величины изменения КТП в НЖ при изменении различных параметров. На рисунке 5 представлено сравнение полученных результатов с опубликованными в литературе по исследованию кризиса кипения в водных дисперсиях с частицами диоксида циркония.

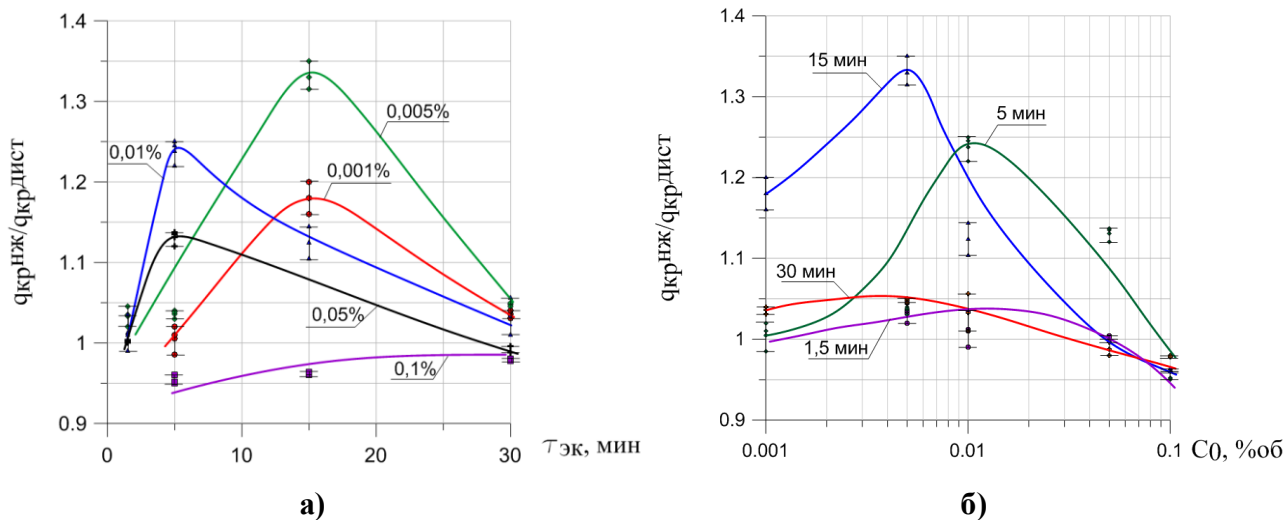


Рисунок 3. Изменение $q_{кр}^{нж} / q_{кр}^{дист}$ при начальной плотности теплового потока $q_0 = 1,0 \text{ МВт/м}^2$ (а) от времени экспозиции $\tau_{эк}$ для различных объемных концентраций наночастиц C_0 , %об.; (б) от объемной концентрации НЧ C_0 , %об., для различных экспозиций

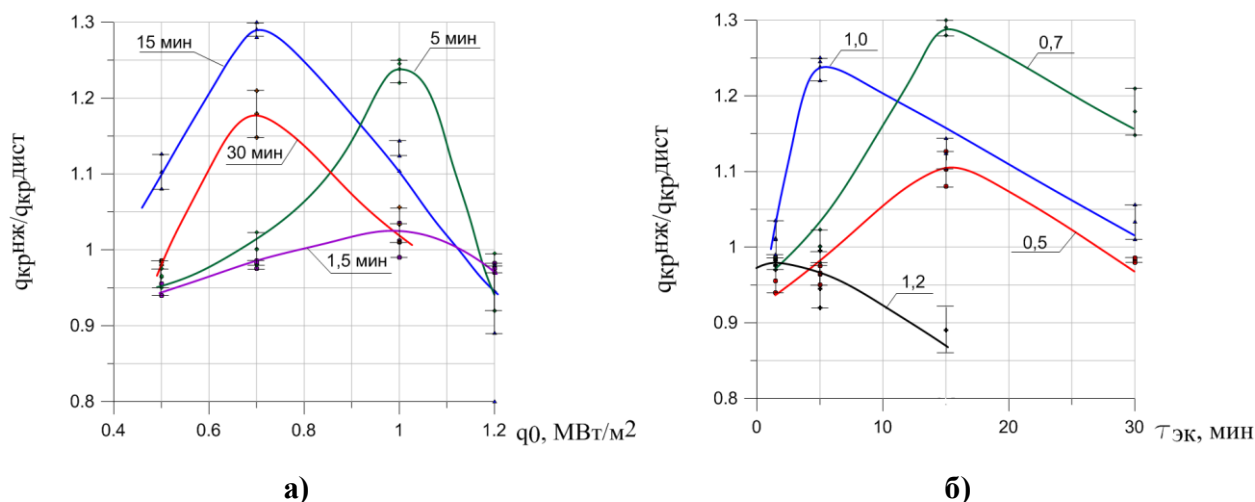


Рисунок 4. Изменение $q_{кр}^{нж} / q_{кр}^{дист}$ при объемной концентрации наночастиц $C_0 = 0,01\%об.$ (а) от начальной величины плотности теплового потока q_0 , МВт/м^2 , для различных экспозиций $\tau_{эк}$, мин; (б) от времени экспозиции $\tau_{эк}$, мин, для различной начальной плотности теплового потока q_0 , МВт/м^2

Поскольку варьирование каждым из перечисленных параметров в сторону увеличения приводит к увеличению толщины слоя наночастиц, то достижение величиной $q_{кр}^{нж} / q_{кр}^{дист}$ максимального значения при одних и тех же значениях параметров может свидетельствовать, во-первых, о **линейном влиянии** каждого из параметров на толщину нанослоя; и, во-вторых, максимальное значение $q_{кр}^{нж} / q_{кр}^{дист}$ с большой вероятностью соответствует оптимальной толщине и морфологии нанопокрывтия – обеспечивающих максимальное уменьшение угла смачивания, небольшое термическое сопротивление и достаточную для капиллярного подсоса воды пористость.

По рис.5 видно, что характер изменения КТП в НЖ при увеличении концентрации аналогичен полученному для НЖ с частицами ZrO_2 некоторыми другими авторами – имеет место ярко выраженный максимум. С другой стороны, более низкое значение относительного увеличения КТП в данной работе может объясняться большим размером частиц (около 100 нм в среднем).

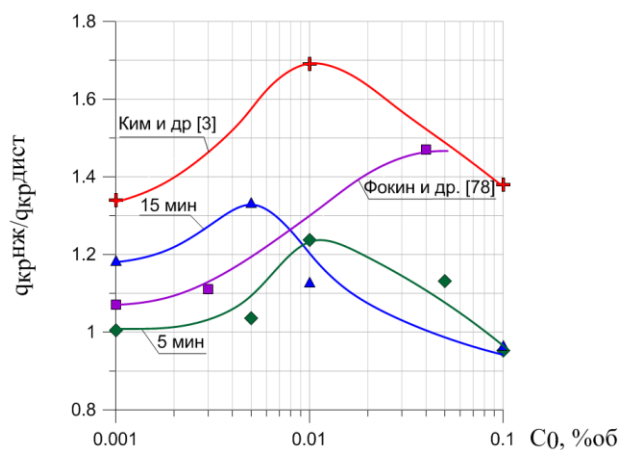


Рисунок 5. Сравнение полученных результатов с опубликованными в литературе

Увеличение времени ультразвукового перемешивания дисперсии приводит к росту КТП, однако, если разница между 5 мин и 10 мин существенна, то значения при 10 мин и 20 мин практически идентичны.

В Главе 4 приведены результаты постэкспериментального анализа структуры и морфологии покрытия из наночастиц, образованного на обогреваемой поверхности в ходе кипения.

В ходе анализа морфологии поверхности выявлены:

1. Основные особенности процесса формирования нанослоя

- покрытие образуется из отдельных зерен, характерные размеры которых сравнимы с размерами наночастиц в дисперсии, что свидетельствует о том, что при кипении НЖ частицы оседают на поверхность поодиночке;

- как правило, покрытие образуется не равномерно по всей поверхности проволочного нагревателя, а пятнами. По мере нарастания покрытия эти пятна становятся областями более плотного строения покрытия; вокруг них имеет место покрытие более рыхлого строения (рис.6):

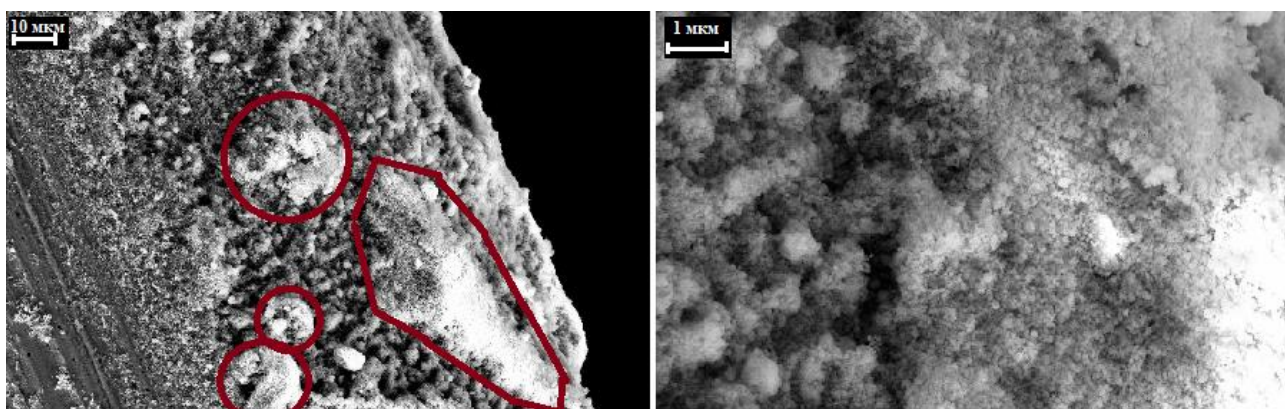


Рисунок 6. Неравномерность образованного в ходе кипения покрытия

Сам факт присутствия в покрытии областей с более "рыхлой" и более плотной упаковкой может говорить о том, что изначально на поверхности имеются некоторые центры парообразования, вокруг которых начинается кипение и формирование нанослоя. Области вокруг этих центров начинают покрываться частицами раньше, чем остальная обогреваемая поверхность, соответственно, они покрыты более плотно упакованным слоем.

2. Изменение характеристик покрытия при варьировании параметров кипения

Ниже для примера приведены характерные изменения морфологии нанослоя на поверхности нагревателя при изменении параметров при варьировании начальной плотности теплового потока и постоянных концентрации $C_0 = 0,01\%$ об. и времени экспозиции $\tau_{эк} = 30$ мин (рис.7):

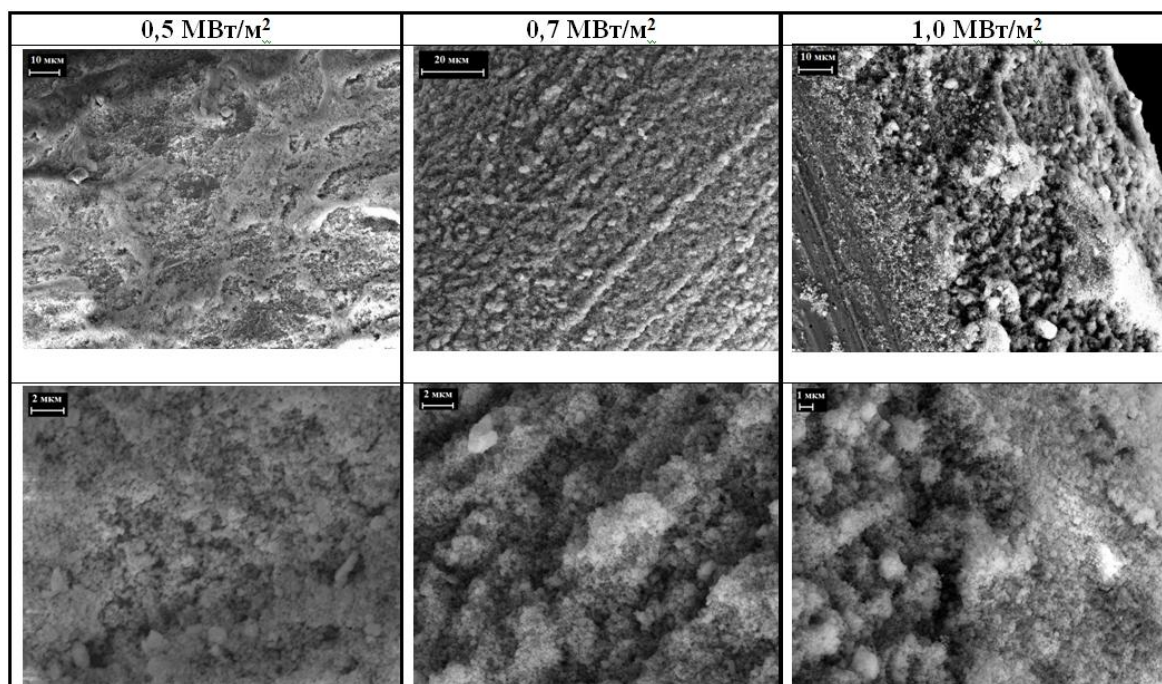


Рисунок 7. Изменение рельефа поверхности при увеличении начальной плотности теплового потока

Варьирование каждым из параметров в сторону увеличения приводит сначала к увеличению глубины регулярных впадин на поверхности покрытия, и уменьшению краевого угла смачивания; при дальнейшем увеличении рельеф поверхности нанослоя становится неоднородным, переменной толщины, микроструктура – нерегулярной. Кроме того, увеличивается толщина покрытия и термическое сопротивление. Эти факторы обуславливают снижение КТП вплоть до уровня, соответствующего (либо ниже) КТП в дистилляте. Оптимальное покрытие с точки зрения достижения максимума КТП содержит преимущественно «рыхлые» зоны с регулярной шероховатостью.

Толщина покрытия, средняя по длине рассматриваемого участка каждого образца, при увеличении каждого из варьируемых параметров растет приблизительно **линейно**. **Оптимальная** (соответствующая максимуму КТП) толщина покрытия составляет в среднем

2 мкм. Диаметр впадин (средний) около (1 – 1,5) мкм, что сравнимо с удвоенной величиной критического радиуса парового зародыша R^* , вычисленного для соответствующих условий.

Глава 5 данной работы посвящена вопросам повышения эффективности отвода тепла в элементах энергетического оборудования путем повышения КТП благодаря использованию наножидкостей. Глава 5 содержит две части: первая - модель образования нанопокртытия на обогреваемой поверхности в ходе кипения наножидкости и модифицированную модель кризиса кипения Теофануса-Дина; вторая - оценка по полученной корреляции повышения эффективности работы системы охлаждения корпуса в запроектных авариях с плавлением активной зоны.

По разрабатываемой в настоящей работе модели, процесс образования нанопокртытия на поверхности нагревателя в ходе кипения наножидкости можно разделить на четыре стадии:

1. **Исходное состояние.** Рассматривается система, состоящая из обогреваемой поверхности (изначально гладкой с равномерно распределенными центрами парообразования, например, адатомами /молекулами газов), перегрев которой достаточен для начала пузырькового кипения и водной дисперсии наночастиц (наножидкости) малой концентрации (до 0,1%). Ее теплофизические свойства пренебрежимо мало отличаются от свойств воды. Дисперсия прогрета до температуры насыщения.

На данном этапе осаждения частиц на поверхность нет (что подтверждается собственными наблюдениями и опубликованными в литературе данными по однофазной конвекции в наножидкостях).

2. **Первые паровые пузыри.** Возникновение парового пузыря равновероятно в любом месте обогреваемой поверхности. При испарении дисперсии в пузырь частицы, находившиеся в испарившемся объеме, частично переходят под пузырь в жидкий микрослой. Количество частиц, переходящих вокруг/под пузырь, учитывается коэффициентом ξ , равным отношению времени образования монослоя на поверхности нагревателя при 100%-ном оседании частиц к реальному времени образования слоя, вычисленным с использованием экспериментальных данных. По оценкам, повышение концентрации НЖ в микрослое под пузырем не приводит к ощутимому изменению теплофизических свойств дисперсии в этой области.

3. **Образование первого слоя, взаимодействие типа «частица – поверхность».** В качестве допущения принято, что, находясь во взвешенном состоянии, частицы не слипаются между собой, а на поверхность оседают поодиночке. Это подтверждается при анализе СЭМ-снимков поверхности с осадком из НЧ, образованным в ходе кипения наножидкости.

При разработке модели было получено следующее выражение для времени, когда нагреватель полностью покрывается слоем из частиц:

$$\tau = \frac{2}{9} \cdot 10^{-7} \frac{F_{\text{пов}} \cdot D_0 (\rho'' \cdot r)^3 \Delta T^2}{q \sigma^2 T_{\text{нас}}^2},$$

где $F_{\text{пов}}$ – площадь поверхности нагревателя; D_0 – отрывной диаметр пузыря; ρ'' – плотность насыщенного пара; r – удельная теплота парообразования; ΔT – перегрев поверхности относительно температуры насыщения; q – плотность теплового потока; σ – коэффициент поверхностного натяжения; $T_{\text{нас}}$ – температура насыщения.

4. Образование второго и далее слоя, взаимодействие типа «частица – частица».

Из параметров образовавшихся в ходе формирования нанослоя впадин (из геометрических соображений) получено выражение, связывающее коэффициент шероховатости ψ (суть – отношение площади «шероховатой» и «гладкой» поверхностей) и краевой угол смачивания:

$$\psi = \frac{\pi \cdot d_{\kappa}^2}{4 \cdot \delta_{\text{вп}}^2} \left[\sqrt{\frac{1}{\text{tg}^2 \theta} + 1} - 1 \right] + 1 = \frac{\pi \cdot d_{\kappa}^2}{4 \cdot \delta_{\text{вп}}^2} \left[\frac{1}{\sin \theta} - 1 \right] + 1,$$

где d_{κ} – средний диаметр устья впадины; $\delta_{\text{вп}}$ – среднее расстояние между впадинами.

Коэффициент ξ вычислялся путем сравнения с экспериментальными данными по толщине нанослоя, соответствующей различным режимным параметрам кипения. Было получено, что для концентрации 0,01% и времени экспозиции 15 минут вне зависимости от плотности теплового потока $\xi \approx 0,001\%$; с ростом концентрации коэффициент растет до величины $\xi \approx 0,003\%$ при $C_0 = 0,1\%$ об.

Модификация модели Теофануса – Дина состояла в замене в выражении для поправочного коэффициента κ величины краевого угла смачивания θ через произведение режимных параметров кипения ($q_0 \cdot C_0 \cdot \tau_{\text{эк}}$) путем подстановки приведенного выше коэффициента шероховатости, выраженного через данные параметры $\psi = K_1 \cdot (q_0^n \tau_{\text{эк}} C_0^m)^2 \cdot \left[\sqrt{K_2 \cdot (q_0^n \tau_{\text{эк}} C_0^m) + 1} - 1 \right] + 1$ в коэффициент κ :

$$\kappa^{-0,5} = 2,8 \cdot \left[1 - \frac{\sqrt{1 - K_3^2 \psi^2}}{2} - \frac{\frac{\pi}{2} - \arccos(K_3 \psi)}{2K_3 \psi} \right]^{0,25}.$$

Числовые константы подбирались исходя из экспериментальных данных. Было получено, что в некоторой области изменения параметров выведенная формула достаточно хорошо описывает характер экспериментальных данных (рис. 8).

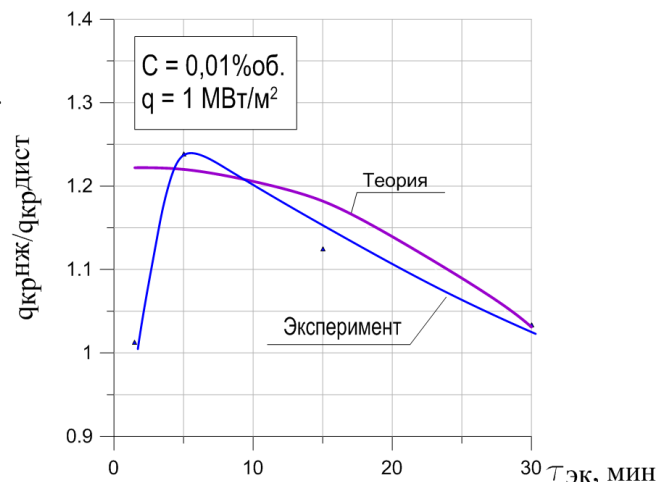


Рисунок 8. Сравнение теоретических и экспериментальных значений

Оценка повышения надежности охлаждения корпуса реактора в ходе запроектных аварий с использованием полученных данных и корреляции показала, что и при использовании наножидкости как теплоносителя может быть достигнуто более чем 50% увеличение КТП; при предварительном нанесении нанопокровов на поверхность корпуса - более чем 30% увеличение КТП. Увеличения КТП на 30-50% достаточно для того, чтобы обеспечить стабильное охлаждение стенок корпуса в режиме пузырькового кипения (без перехода в пленочное кипение с существенно более низкими коэффициентами теплоотдачи).

В Заключении сформулированы основные выводы по работе:

1. Каждый из варьируемых параметров (концентрация НЖ, время выдержки, плотность теплового потока в режиме выдержки) влияет на толщину слоя линейно; варьирование каждым из них приводит сначала к увеличению КТП, затем к его уменьшению; следовательно, имеется некоторая оптимальная толщина и структура нанослоя; этот оптимум соответствует следующим условиям (на примере проволочного нагревателя из нихрома диаметром 0,17мм): концентрация (0,005 – 0,01)% об., время выдержки (5 – 15) мин, начальная величина плотности теплового потока в режиме выдержки (0,7 – 1,0) МВт/м².

2. Нанослой на поверхности нагревателя образуется неравномерно – имеют место области (пятна) более рыхлого и более плотноупакованного осадка; покрытие, соответствующее максимуму КТП, имеет относительно регулярную микроструктуру, больше площадь рыхлых областей, чем плотноупакованных, толщину порядка 2 мкм и регулярные впадины средним диаметром около 1,5 мкм; частицы при кипении оседают поодиночке.

3. Результаты численных оценок по предложенной в работе модели показывают, что повышение концентрации НЖ в жидком микрослое под пузырьком из-за перехода туда частиц из дисперсии в ходе парообразования незначительно и не может привести к существенному изменению теплофизических свойств в этой области. Предложенная корреляция для КТП с достаточной точностью описывает часть полученных в ходе работы экспериментальных данных, позволяет вычислить коэффициент шероховатости по известному углу смачивания и наоборот.

4. Оценка повышения надежности охлаждения корпуса реактора в ходе запроектных аварий показала:

- при использовании наножидкости как теплоносителя системы может быть достигнуто более чем 50% увеличение критической плотности теплового потока, по сравнению с теплоносителем – дистиллятом;

- при использовании предварительного нанесения нанопокровов на поверхность корпуса реактора может быть достигнуто более чем 30% увеличение КТП по сравнению с теплоносителем – дистиллятом.

Увеличения КТП на 30-50% достаточно для того, чтобы обеспечить стабильное охлаждение стенок корпуса в режиме пузырькового кипения (без перехода в пленочное кипение с существенно более низкими коэффициентами теплоотдачи).

В целом, можно заключить, что применение наножидкостей в качестве теплоносителя (рабочего тела) в системах и энергетическом оборудовании, в частности, в системах безопасности реакторных установок АЭС, а также предварительная модификация высоконапряженных поверхностей нагрева путем формирования на них нанопокрывтия с заданными параметрами является перспективным решением для увеличения надежности и расширения границ безопасной эксплуатации энергетического оборудования и станций.

Формирование нанопокрывтий с заданными параметрами, соответствующими оптимальному увеличению критической плотности теплового потока, путем осаждения при кипении нанодисперсии позволяет достигать вышеозначенных результатов (увеличения надежности и расширения границ безопасной эксплуатации) с небольшими затратами относительно прочих методов формирования развитых поверхностей нагрева.

Список публикаций автора по теме диссертации:

1. А.Л. Сироткина, Е.Д. Федорович, В.В. Сергеев Теплообмен в наножидкостях (обзор исследований). Часть 1. Однофазный теплообмен // Тепловые процессы в технике. 2017. №2 (9). С.60-65. (**перечень ВАК**)
2. А.Л. Сироткина, Е.Д. Федорович, В.В. Сергеев Теплообмен в наножидкостях (обзор исследований). Часть 2. Кипение и кризис кипения // Тепловые процессы в технике. 2017. №3 (9). С. 106-112. (**перечень ВАК**)
3. А.Л. Сироткина К вопросу о влиянии пленки из наночастиц на поверхности нагрева на процесс кипения наножидкости // Научный альманах. 2015. №8 (10). С.885-888.
4. А.Л. Сироткина Наножидкости как перспективные теплоносители // Техногенные системы и экологический риск: Тезисы докладов XII Региональной научной конференции. Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2015. С.20-22.
5. А.Л. Сироткина Критический тепловой поток при кипении водной дисперсии наночастиц // Неделя науки СПбПУ: материалы форума с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем. Часть 1. СПб: Изд-во Политехнического ун-та, 2015. С.158-160.
6. A.L. Sirotkina, E.N. Nikonova. Unusual behaviour of nanofluids: thermal conductivity and critical heat flux enhancement // Неделя науки СПбПУ: материалы форума с международным участием. Гуманитарный институт. Часть 1. СПб: Изд-во Политехнического ун-та, 2016. С.117-119.