

На правах рукописи

Швецов Дмитрий Анатольевич

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ
В ТОНКИХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СЛОЯХ ЖИДКОСТИ
НА КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ ПОКРЫТИЯХ**

1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискании ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск - 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН
Павленко Александр Николаевич

Официальные оппоненты: Попов Игорь Александрович – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Академии наук Республики Татарстан, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ», профессор кафедры теплотехники и энергетического машиностроения

Кузнецов Гений Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», профессор Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Защита состоится 21 февраля 2024 года в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.1.129.01, созданного на базе ИТ СО РАН, по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИТ СО РАН: www.itp.nsc.ru. Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просьба отправлять на имя ученого секретаря диссертационного совета 24.1.129.01 по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1. (e-mail: dissovet@itp.nsc.ru).

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н., профессор РАН

Терехов Владимир Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования.

Быстрое развитие технологий во многих отраслях промышленности предъявляет все более высокие требования к управлению тепловыми потоками в различных устройствах. Кипение позволяет отводить высокие плотности теплового потока при низкой разнице температур между горячей поверхностью и охлаждающей средой. В целом ряде технологий, разнообразных схемных решениях, относящихся к существующим и перспективным системам охлаждения, теплообмен при испарении и кипении осуществляется в тонких слоях жидкостей (термосифоны, паровые камеры и тепловые трубы, слои жидкости заданной толщины во вращающихся системах, тонкопленочные теплообменники, некоторые конструкции диффузионных паромасляных насосов). Применение режима кипения в тонких слоях жидкости позволяет уменьшить расход теплоносителя и снизить массогабаритные характеристики теплообменных аппаратов. На настоящий момент исследования, направленные на изучение интенсификации теплообмена при испарении и кипении в тонких горизонтальных слоях жидкостей, немногочисленны. Экспериментальные данные о переходных режимах теплообмена от кипения в тонких слоях жидкости к кипению в большом объеме для различных жидкостей при разных приведенных давлениях также крайне ограничены.

Модификация поверхности нагрева дает возможность существенно уменьшить температурный напор и увеличить критический тепловой поток, делая способ охлаждения в режиме кипения намного более эффективным и безопасным. В последние годы благодаря развитию аддитивной технологии 3D-печати (селективное лазерное плавление/спекание SLM/SLS) появилась возможность создания микроструктурированных капиллярно-пористых покрытий с практически любой заданной формой. Поиск оптимальной формы микроструктурированных поверхностей осложнен тем, что и на сегодняшний день нет общепринятых универсальных модельных подходов к описанию механизмов интенсификации теплообмена при кипении в таких условиях, а результаты экспериментов различных авторов в ряде случаев носят противоречивый характер. В работах, в которых исследовались основные механизмы, приводящие к интенсификации теплообмена при кипении, проводились, в основном, при атмосферном давлении и, как правило, в условиях большого объема жидкости. Влияние геометрических характеристик и теплопроводности материала микроструктурированных капиллярно-пористых покрытий на интенсификацию теплообмена при кипении для различных жидкостей изучено недостаточно. Процессы испарения и кипения, протекающие на микроструктурированных покрытиях при различных приведенных давлениях, также практически не исследованы. Работы по изучению теплообмена и кризисных явлений при кипении в тонких горизонтальных слоях жидкости различной толщины на микроструктурированных капиллярно-пористых поверхностях отсутствуют.

Целью данной работы являлось экспериментальное исследование теплообмена и критического теплового потока при испарении и кипении на микроструктурированных капиллярно-пористых покрытиях в широких диапазонах изменения высоты горизонтального слоя жидкости и давления.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Исследование влияния геометрических характеристик и теплопроводности микроструктурированных капиллярно-пористых покрытий на теплообмен при испарении и кипении жидкости. В работе применялись покрытия, полученные по технологии 3D-печати методом селективного лазерного плавления/спекания (SLM/SLS). Материалы покрытий, нержавеющая сталь и бронза, значительно различаются по теплопроводности. Покрытия из бронзы различаются длиной волны модуляции профиля.

2. Исследование влияния высоты слоя жидкости и давления на теплообмен и критический тепловой поток на микроструктурированных капиллярно-пористых покрытиях с одинаковыми геометрическими характеристиками, но с различной теплопроводностью, и на покрытиях с одинаковой теплопроводностью, но с различной длиной волны модуляции. Диапазон изменения высоты слоя жидкости: от 1.4 мм до 10 мм. Диапазон изменения приведенного давления P/P_{cr} : от $2 \cdot 10^{-5}$ до 10^{-2} .

3. Проведение сравнительного анализа экспериментальных результатов по теплообмену, полученных на поверхностях с микроструктурированными капиллярно-пористыми покрытиями, с результатами, полученными на гладкой поверхности.

4. Проведение сравнительного анализа данных по критическим тепловым потокам, полученных на гладкой поверхности и на микроструктурированных капиллярно-пористых покрытиях, с известными расчетными зависимостями для условий кипения в большом объеме жидкости.

Научная новизна изложенных в диссертационной работе результатов заключается в следующем:

1. Впервые исследовано влияние геометрических характеристик и теплопроводности микроструктурированных капиллярно-пористых покрытий на теплообмен при испарении и кипении в тонких горизонтальных слоях жидкости.

2. Впервые исследовано влияния высоты слоя жидкости и давления на теплообмен при испарении и кипении на поверхностях с микроструктурированными капиллярно-пористыми покрытиями с различными геометрическими характеристиками и теплопроводностью. Впервые исследован теплообмен в условиях очень низких приведенных давлений ($P_s/P_{cr} \sim 10^{-5}$).

3. Получены новые результаты по критическому тепловому потоку на поверхностях с микроструктурированными капиллярно-пористыми покрытиями в широком диапазоне высоты слоя жидкости и давления. Впервые исследованы переходные режимы теплообмена от кипения в тонких

слоях жидкости к кипению в большом объеме на микроструктурированных капиллярно-пористых покрытиях. Проведено сравнение новых экспериментальных данных с известными расчетными зависимостями.

Научная и практическая значимость работы.

Полученная в проведенных исследованиях экспериментальная информация может использоваться для проектирования микроструктурированных покрытий с целью повышения коэффициента теплоотдачи и критического теплового потока при кипении в тонких слоях жидкости. В работе выявлен сложный характер влияния геометрических характеристик и теплопроводности капиллярно-пористых покрытий на теплообмен и критический тепловой поток. Результаты анализа экспериментальных данных о влиянии высоты слоя жидкости и приведенного давления позволили выделить механизмы интенсификации теплообмена и изучить условия перехода теплообмена от кипения в тонких слоях жидкости к кипению в большом объеме. Экспериментальные данные могут применяться для прогнозирования наиболее приемлемых режимных параметров (давление, высота слоя жидкости, плотность теплового потока) с целью интенсификации теплообмена и повышения критического теплового потока на модулированных по толщине капиллярно-пористых покрытиях с различными геометрическими характеристиками и теплопроводностью. Полученные результаты могут применяться при создании термосифонов, тепловых труб и паровых камер различного назначения.

Достоверность полученных результатов подтверждается применением сертифицированного и тарированного оборудования и средств измерения с соответствующим уровнем точности, оценкой неопределенностей измерений, использованием современных программных комплексов и компьютерных технологий и техники для обработки данных, сравнением с результатами для базовой гладкой поверхности, публикациями в рецензируемых научных журналах.

На защиту выносятся:

1. Результаты экспериментального исследования влияния геометрических характеристик (длины волн модуляции 1.75 мм и 3.5 мм) и теплопроводности (для нержавеющей стали $\lambda_c \approx 20$ Вт/(м·К), для бронзы $\lambda_c \approx 89$ Вт/(м·К)) микроструктурированных капиллярно-пористых покрытий на теплообмен при испарении и кипении в горизонтальных слоях жидкости.

2. Результаты экспериментального исследования влияния высоты горизонтального слоя жидкости в диапазоне значений от 1.4 мм до 10 мм и влияния приведенного давления P/P_{cr} в диапазоне от $2 \cdot 10^{-5}$ до 10^{-2} на теплообмен и критический тепловой поток при испарении и кипении для микроструктурированных капиллярно-пористых покрытий с различными геометрическими характеристиками и теплопроводностью.

3. Результаты сравнения экспериментальных данных по коэффициентам теплоотдачи и критическому тепловому потоку при испарении и кипении в горизонтальных слоях жидкости, полученных на микроструктурированных капиллярно-пористых покрытиях, с

соответствующими данными, полученными для гладкой поверхности, и с известными расчетными зависимостями для условий кипения в большом объеме жидкости.

Личный вклад соискателя. Основные научные результаты, включенные в диссертацию и выносимые на защиту, получены соискателем лично. Вклад автора состоял в проектировании и сборке узлов экспериментального стенда и рабочих участков, отладке экспериментальных методик, подготовке и проведении всех представленных в диссертационной работе экспериментов. Совместно с к.т.н. В.И. Жуковым и инженером А.Е. Брестером автор проводил обработку и анализ опытных данных при подготовке статей для публикации в рецензируемых журналах и докладов на конференциях. Постановка цели и задач исследования была сформулирована соискателем совместно с руководителем диссертационной работы чл.-корр. РАН д.ф.–м.н. А.Н. Павленко и к.т.н. В.И. Жуковым.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Международный семинар с элементами научной школы для молодых ученых (ISHM V, VI) (Новосибирск, 2016 г.; 2017 г.); Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 2017 г.; 2019 г., диплом третьей степени; 2020 г.; 2021 г.; 2022 г., диплом второй степени); III Международная Российско-Казахстанская научно-практическая конференция «Химические технологии функциональных материалов» (Новосибирск, 2017 г.); Интерэкспо Гео-Сибирь (Новосибирск 2018 г.); Российская национальная конференция по теплообмену (РНКТ – 7, 8) (Москва, 2018 г.; 2022 г., диплом за лучшую работу); Научно-практическая конференция аспирантов и магистрантов «Science. Research. Practice» (Новосибирск, 2017 г.); III международная конференция «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (Москва, 2020 г.); Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (Екатеринбург, 2021 г., диплом за лучшую работу; Казань, 2023 г.); XXXVII Сибирский теплофизический семинар, посвященный Году науки и технологий Российской Федерации и 60-летию первого полёта человека в Космос, (Новосибирск, 2021 г., диплом за лучшую работу); XVII Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Актуальные Вопросы Теплофизики и Физической Гидрогазодинамики» (Шерегеш, 2023 г., диплом за лучшую работу).

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 11 печатных изданиях, в том числе, в 7 статьях в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 3 статьях в изданиях Web of Science, 7 статьях в изданиях Scopus и в 20 тезисах докладов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 157 страниц с 72 рисунками и 3 таблицами. Список литературы содержит 124 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность полученных результатов и описан личный вклад автора работы.

В **первой главе** приведен обзор и анализ литературы, посвященной теме диссертации. В *разделе 1.1* проведен обзор работ, в которых исследовалось влияние высоты слоя жидкости на теплообмен при кипении на гладких и модифицированных поверхностях. Показано, что при определенной высоте слоя, которая для каждой жидкости отличается, могут достигаться более высокие значения коэффициента теплоотдачи (КТО), чем в большом объеме. В экспериментах авторов [1–3] установлено, что в диапазоне высот слоя от одной до нескольких капиллярных постоянных жидкости при заданных плотностях теплового потока достигаются максимальные КТО, а в более толстых слоях жидкости варьирование высоты практически не влияет на значения КТО. Недостатком использования тонких слоев жидкости является то, что значения критических тепловых потоков (КТП) могут сильно уменьшаться из-за недостаточной подпитки жидкостью поверхности нагрева. Показано, что зависимость значений КТО и КТП от высоты слоя жидкости на модифицированных поверхностях при разных приведенных давлениях для различных жидкостей изучена недостаточно.

В *разделе 1.2* представлен анализ литературных данных, посвященных исследованию влияния геометрических характеристик, размера частиц и теплопроводности материала капиллярно-пористых покрытий на теплообмен при кипении. Показано, что оптимальные параметры модифицированных поверхностей связаны с теплофизическими свойствами рабочей жидкости через значения капиллярной постоянной l_c и диапазона размеров активных центров парообразования r_c .

В *разделе 1.3* рассмотрено явление инверсии кривой кипения, при котором температурный напор уменьшается с ростом теплового потока. В ходе анализа литературы установлено, что для возникновения инверсии кривой кипения необходимо, чтобы покрытие имело соответствующий для рабочей жидкости диапазон размеров потенциальных центров парообразования, а по высоте покрытия обеспечивался большой температурный градиент [4]. Влияние давления на инверсию кривой кипения различных жидкостей, в том числе, при кипении в тонких слоях жидкости, практически не изучено.

В *разделе 1.4* приводятся известные модели кризиса кипения в большом объеме жидкости и экспериментальные зависимости для величины КТП. Анализ литературы показал, что различия в экспериментальных зависимостях значений КТП от высоты слоя для различных жидкостей связаны с размером поверхности нагрева и способом её подпитки

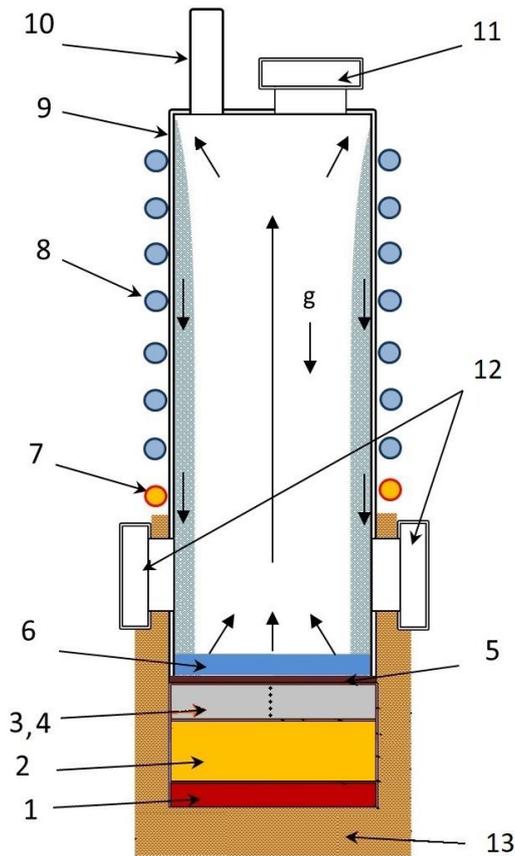
жидкостью. Работы, в которых экспериментально исследуется КТП на модифицированных поверхностях в широких диапазонах изменения давления и высоты слоя жидкости, на данный момент отсутствуют.

На основе проведенного в первой главе анализа литературных данных были сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

Во **второй главе** представлены: описание экспериментального стенда (*раздел 2.1*), параметры микроструктурированных капиллярно-пористых покрытий (*раздел 2.2*), теплофизические свойства рабочей жидкости (*раздел 2.3*), методика получения экспериментальных данных (*раздел 2.4*), оценка неопределенности измерений (*раздел 2.5*), оценка тепловых потерь (*раздел 2.6*) и сравнение значений КТО, полученных в слое жидкости на базовой гладкой поверхности, с расчетными зависимостями (*раздел 2.7*).

Рабочая камера выполнена в виде цилиндрического сосуда из стали 12Х18Н10Т с толщиной стенок 1 мм, внутренним диаметром 120 мм и высотой 300 мм (Рисунок 1). Нагрев дна рабочей камеры осуществляется электронагревателем с мощностью 1 кВт. Для равномерного распределения теплового потока, направленного к поверхности нагрева, между электронагревателем и дном рабочей камеры расположена латунная пластина толщиной 30 мм. Зазор между дном и латунной пластиной заполнен специальной пастой с высокой теплопроводностью. Для измерения плотности теплового потока в нижней части установки сбоку на различной высоте просверлено 5 отверстий диаметром 1.5 мм, в которые вставляются медь–константановые термопары в нержавеющей капиллярах. Плотность теплового потока q рассчитывается по уравнению Фурье из температурного градиента, измеренного вдоль центральной вертикальной линии верхней части дна, с использованием линейной аппроксимации выходного сигнала пяти термопар. Расчетная ошибка определения теплового потока составляет около $\pm 16\%$ при тепловом потоке $q = 10^3$ Вт/м², около $\pm 10\%$ при $q = 10^4$ Вт/м² и $\pm 6\%$ при $q = 10^5$ Вт/м². Температуру поверхности T_w определяли по показаниям термопары, находившейся под поверхностью нагрева, с учетом измеренного температурного градиента. Общая погрешность измерения температуры поверхности составляет около $\pm 0.8^\circ\text{C}$ при $q \sim 10^5$ Вт/м². Тепловые потери при $Q > 1$ кВт составляют $\sim 5\text{--}10\%$.

В рабочей камере давление измерялось с помощью двух вакуумметров. Деформационно–ионизационный вакуумметр Setra-730 используется в диапазоне давлений от 33 Па до 1.2 кПа. Погрешность измерения этого датчика составляет $\pm 0.5\%$ от текущего значения. Деформационно–мембранный вакуумметр ASG Edwards имеет диапазон измерений от 133 Па до $2 \cdot 10^5$ Па. Погрешность измерения составляет $\pm 0.2\%$ от общей шкалы. Этот датчик использовался для измерения давления выше 1.2 кПа.



(a)



(б)

Рисунок 1 – (а) – схема экспериментальной установки: 1 – трубчатый электронагреватель; 2 – латунная пластина; 3, 4 – дно установки с отверстиями для термопар; 5 – капиллярно-пористые покрытие; 6 – слой жидкости; 7 – змеевик нагрева; 8 – змеевик охлаждения; 9 – корпус; 10 – патрубок для крепления насосной системы; 11, 12 – смотровые окна; 13 – теплоизоляция; (б) – фотография стенда.

Для каждого микроструктурированного капиллярно-пористого покрытия были изготовлены геометрически подобные камеры. Покрытия из нержавеющей стали LPW 155 (15-5PH) и из бронзового порошка AISI C836000 наносились на дно из нержавеющей стали с использованием технологии 3-D печати SLM/SLS-методом (селективное лазерное плавление/спекание). В диссертационной работе были рассмотрены регулярные структуры с синусоидальной зависимостью локальной толщины покрытия от поперечной координаты. Пространство между гребнями над остаточным слоем обеспечивало свободное организованное удаление паровой фазы при кипении, а внутри покрытия осуществлялся проток жидкости через массив гребней в зоны остаточного слоя между гребнями. Длина волны модуляции пористых покрытий λ_m составляла от одной до двух значений капиллярной постоянной рабочей жидкости l_c . Размер частиц порошков нержавеющей стали и бронзы составлял (20–40) мкм. Профилограммы и фотографии исследуемых капиллярно-пористых покрытий представлены на Рисунках 2–3.

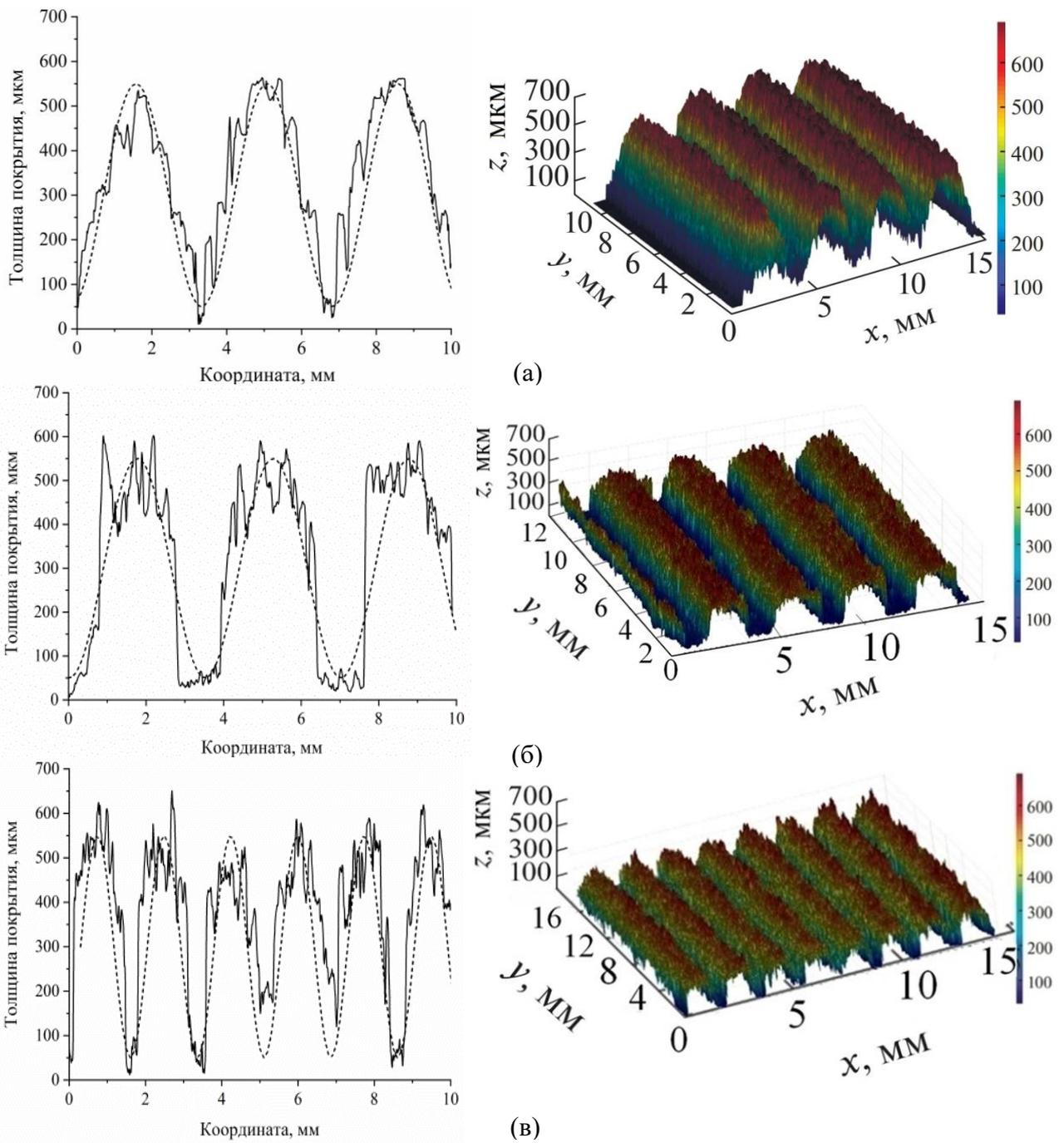


Рисунок 2 – Профилограммы покрытий: (а) – образец 1; (б) – образец 2; (в) – образец 3.

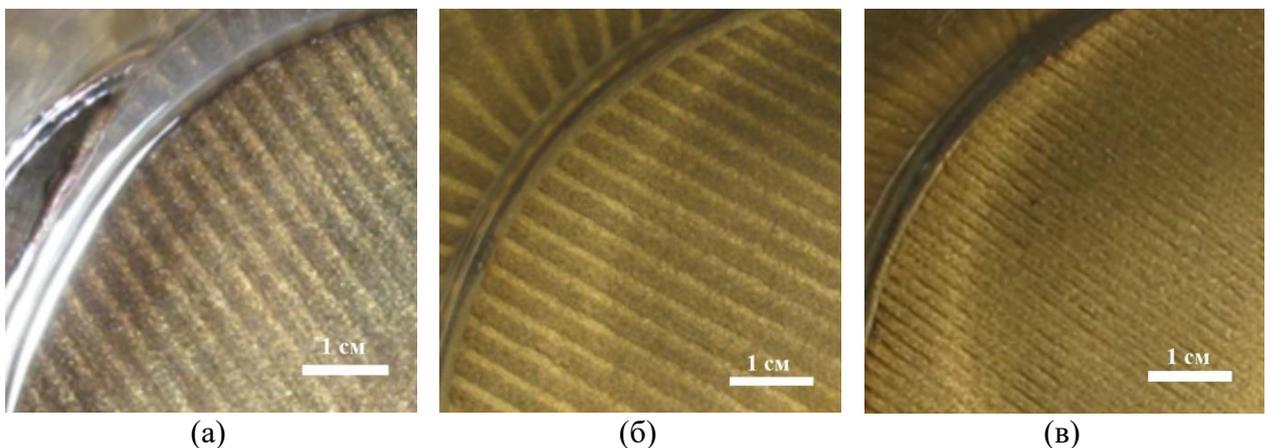
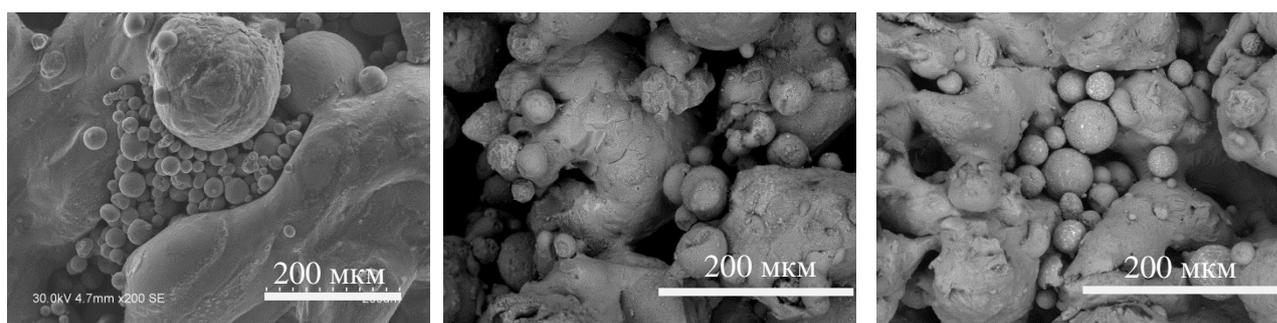


Рисунок 3 – Фотографии покрытий: (а) – образец 1; (б) – образец 2; (в) – образец 3.

Параметры покрытий представлены в Таблице 1. SEM–изображения покрытий представлены на Рисунке 4.

Таблица 1 – Параметры капиллярно-пористых покрытий.

Параметр	Образец 1	Образец 2	Образец 3
Материал порошка покрытия	Нержавеющая сталь LPW 155 (15-5PH)	Бронза AISI C836000	Бронза AISI C836000
Теплопроводность материала, Вт/(м·К)	$\lambda_c \approx 20$ [5]	$\lambda_c \approx 89$ [6]	$\lambda_c \approx 89$ [6]
Пористость	$\varepsilon = 44-46 \%$	$\varepsilon = 44-46 \%$	$\varepsilon = 44-46 \%$
Макс. высота, мкм	$\delta_w = 550$	$\delta_w = 550$	$\delta_w = 550$
Мин. высота, мкм	$\delta_0 = 50$	$\delta_0 = 50$	$\delta_0 = 50$
Уравнение профиля	$z = (A/2) \cdot \sin(2\pi x/\lambda_m) + A/2 + \delta_0$		
Амплитуда, мкм	$A = \delta_w - \delta_0 = 500$	$A = \delta_w - \delta_0 = 500$	$A = \delta_w - \delta_0 = 500$
Длина волны модуляции, мм	$\lambda_{m1} = 3.5$	$\lambda_{m2} = 3.5$	$\lambda_{m3} = 1.75$



(а)

(б)

(в)

Рисунок 4 – SEM–изображения покрытий: (а) – образец 1; (б) – образец 2; (в) – образец 3.

В качестве рабочей жидкости был использован н-додекан (молярная масса 170.32 г/моль, критическое давление $P_{cr} = 18.13 \cdot 10^5$ Па, критическая температура $T_{cr} = 385.14$ °С, температура кипения при атмосферном давлении $T_s = 216.14$ °С). Теплофизические свойства н-додекана рассчитывались по формулам, рекомендованным в справочнике [7]. Перед началом экспериментов на дно рабочей камеры наливали определенное количество рабочей жидкости, необходимое для создания слоя нужной высоты. Жидкость обезгаживалась путем кипячения при пониженном давлении в течение нескольких часов.

В ходе экспериментов реализовывался ряд стационарных режимов теплообмена, при которых регистрировались температуры по толщине обогреваемой стенки, давление над слоем жидкости в объеме, и одновременно проводилась видеосъемка процесса высокоскоростной видеокамерой. КТП фиксировался по резкому росту показаний термопар и визуальным наблюдениям с использованием высокоскоростной камеры.

Безразмерные высоты слоя жидкости (h/l_σ) определены при давлении 133 Па (при соответствующей этому давлению температуре насыщения 52 °С значение капиллярной постоянной $l_\sigma = 1.78$ мм) и используются для удобства представления экспериментальных данных: h (h/l_σ): 1.4 мм (0.81), 1.7 мм (0.99), 2.5 мм (1.45), 4 мм (2.32), 10 мм (5.56). Основная часть экспериментов на капиллярно-пористых покрытиях проводилась при давлениях над слоем: P_s (P_s/P_{cr}): 33 Па ($1.84 \cdot 10^{-5}$), 67 Па ($3.68 \cdot 10^{-5}$), 133 Па ($7.35 \cdot 10^{-5}$), 400 Па ($2.2 \cdot 10^{-4}$), 667 Па ($3.68 \cdot 10^{-4}$), 1 кПа ($5.5 \cdot 10^{-4}$), 1.2 кПа ($6.62 \cdot 10^{-4}$), 5 кПа ($2.76 \cdot 10^{-3}$), 10 кПа ($5.5 \cdot 10^{-3}$), 20 кПа ($1.1 \cdot 10^{-2}$).

Полученные экспериментальные результаты сравнивались с экспериментальными данными [8], полученными для н-додекана на гладкой поверхности. Эксперименты на гладкой поверхности без покрытия (шероховатость поверхности – $R_z = 3.2$ мкм) проводились при тех же давлениях, за исключением режимов теплообмена при давлениях P_s (P_s/P_{cr}): 400 Па ($2.2 \cdot 10^{-4}$), 667 Па ($3.68 \cdot 10^{-4}$), 1.2 кПа ($6.62 \cdot 10^{-4}$), 5 кПа ($2.76 \cdot 10^{-3}$).

В третьей главе приводится описание результатов экспериментального исследования теплообмена при кипении на микроструктурированных капиллярно-пористых покрытиях.

В разделе 3.1 представлены кривые кипения, полученные при давлении $P_s = 20$ кПа ($P_s/P_{cr} = 1.1 \cdot 10^{-2}$) в слое н-додекана высотой $h = 10.0$ мм ($h/l_\sigma = 5.56$). Установлено, что на всех капиллярно-пористых покрытиях наблюдалась значительная интенсификация теплообмена при кипении по сравнению с гладкой поверхностью. На Рисунке 5 представлено сравнение кривых кипения, полученных на образцах капиллярно-пористых покрытий.

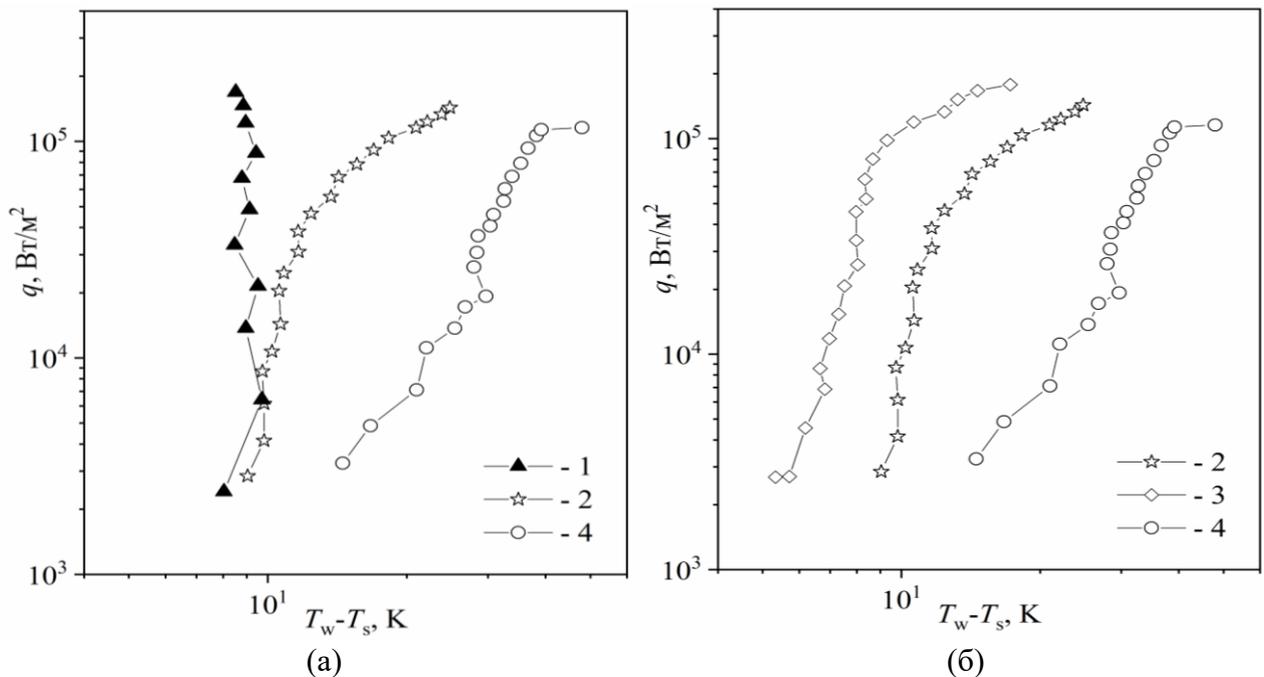


Рисунок 5 – Зависимость плотности теплового потока от температурного напора при давлении $P_s = 20$ кПа ($P_s/P_{cr} = 1.1 \cdot 10^{-2}$) в слое н-додекана $h = 10.0$ мм ($h/l_\sigma = 5.56$): (а) – образцы с одинаковыми геометрическими характеристиками; (б) – образцы с одинаковой теплопроводностью. Цифровые обозначения: 1 – образец 1; 2 – образец 2; 3 – образец 3; 4 – гладкая поверхность.

На образце 3 из бронзы с длиной волны модуляции $\lambda_{m3} = 1.75$ мм, соответствующей численно одной капиллярной постоянной для рабочей жидкости l_{σ} , были получены более низкие значения температурного напора при всех заданных плотностях теплового потока по сравнению с образцом 2 ($\lambda_{m2} = 3.5$ мм). Значения КТП, полученные на образце 3, также были выше, чем на образце 2. На образце 1 из нержавеющей стали температурный напор слабо изменялся с ростом плотности теплового потока. При значениях q от 2 кВт/м^2 до 10 кВт/м^2 температурный напор на образцах 1 и 2 существенно не отличался. При $q > 90 \text{ кВт/м}^2$ на кривой кипения, полученной для образца 1 из нержавеющей стали, наблюдалась инверсия – происходило уменьшение температурного напора с ростом плотности теплового потока. По-видимому, снижение температурного напора происходило за счет активации дополнительных центров парообразования внутри капиллярно-пористой структуры образца 1 вследствие низкой теплопроводности нержавеющей стали. Значительный перепад температур от основания до вершины гребня при увеличении плотности теплового потока мог приводить к постепенному прогреву и активации более широкого диапазона размеров центров парообразования внутри низкотеплопроводного покрытия.

Для расчета эффективного коэффициента теплопроводности капиллярно-пористого покрытия k_{eff} в работе [9] получена формула для случаев, когда теплопроводность жидкости намного меньше теплопроводности материала покрытия: $k_{eff} = (2 - 3 \varepsilon) \lambda_c / 2$. Оценка диапазона размеров активных центров парообразования на капиллярно-пористых покрытиях в зависимости от k_{eff} предложена в работе Лью и др. [10]:

$$\begin{cases} r_{c,\min} \\ r_{c,\max} \end{cases} = \frac{\delta \sin(\theta)}{2(1 + \cos(\theta))} \left[1 \mp \sqrt{1 - \frac{8\sigma(1 + \cos(\theta))(k_{eff}T_w + \delta\alpha_i T_s)}{h_{lg}\rho_v \alpha_i (T_w - T_s)\delta^2}} \right], \quad (1)$$

$$\alpha_i = \frac{2\zeta}{2 - \zeta} \sqrt{\frac{M}{2\pi RT_s}} \frac{h_{lg}^2 \rho_v}{T_s} \left(1 - \frac{P_s}{2h_{lg}\rho_v} \right), \quad (2)$$

$$\delta = \frac{4\sigma T_s (1 + \cos(\theta))}{h_{lg}\rho_v (T_w - T_s)} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{k_p T_w h_{lg}\rho_v (T_w - T_s)}{2(1 + \cos(\theta))\sigma\alpha_i T_s^2}} \right), \quad (3)$$

где $r_{c,\min}$ и $r_{c,\max}$ – минимальные и максимальные радиусы активных впадин, соответственно, м; δ – толщина теплового пристенного слоя жидкости, м; θ – краевой угол смачивания, °; σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м; k_{eff} – эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); T_w , T_s – температуры поверхности нагрева и насыщения жидкости, соответственно, К; α_i – эффективный коэффициент теплоотдачи на границе раздела фаз жидкость–пар, Вт/(м²·К); h_{lg} – теплота парообразования, Дж / кг, ρ_v – плотность пара, кг/м³; ζ – коэффициент аккомодации; M – молярная масса, кг/моль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); P_s – давление насыщения, Па.

В работе [10] показано, что при значении высоты слоя жидкости меньше величины δ не происходит образования пузырей, а существует только испарение с поверхности микроструктурированных покрытий. На Рисунке 6 представлены диапазоны размеров активных впадин, рассчитанные по модели [10] при $P_s = 20$ кПа ($P_s/P_{cr} = 1.1 \cdot 10^{-2}$).

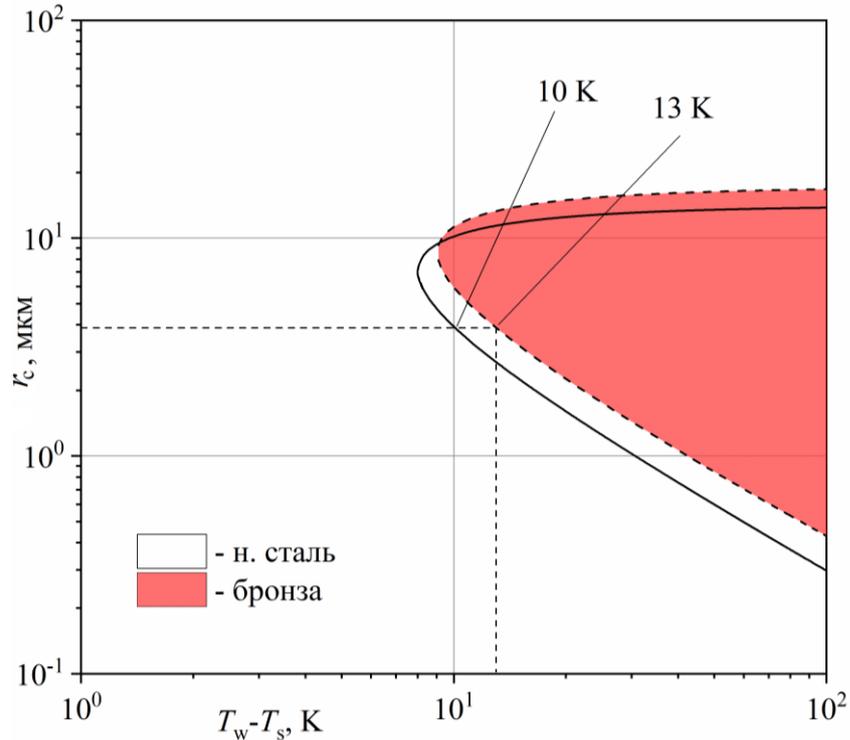


Рисунок 6 – Диапазоны размеров активных впадин, рассчитанные по модели [10] для образцов 1 и 2 в условиях $P_s = 20$ кПа ($P_s/P_{cr} = 1.1 \cdot 10^{-2}$).

Из Рисунка 6 следует, что верхние и нижние границы диапазонов размеров активных впадин отличаются в зависимости от теплопроводности материала покрытий. Согласно расчету, на менее теплопроводном покрытии из нержавеющей стали при заданных значениях температурного напора способны активироваться впадины меньших размеров, чем на покрытии из бронзы. Например, для активации впадин с радиусом 4 мкм на покрытии из нержавеющей стали требуется температурный напор в 10 К, а для покрытия из бронзы требуется 13 К. Теоретическая оценка диапазона размеров активных впадин по модели Лью [10] позволяет объяснить инверсию кривой кипения, полученную на образце 1, активацией впадин меньшего размера внутри капиллярно-пористого покрытия из нержавеющей стали по сравнению с образцами 2 и 3 из бронзы. Таким образом, экспериментально установлено, что теплопроводность материала покрытий λ_c влияет на размер активных центров парообразования при кипении в тонких горизонтальных слоях жидкости.

В разделе 3.2 рассмотрено влияние на теплообмен высоты слоя жидкости и давления. Установлено, что при давлениях 5, 10 и 20 кПа ($P_s/P_{cr} = 2.76 \cdot 10^{-3}$; $5.5 \cdot 10^{-3}$; $1.1 \cdot 10^{-2}$) при всех исследованных значениях высоты слоя жидкости наблюдалось пузырьковое кипение. Влияние

теплопроводности материала покрытий на диапазон размеров активных центров парообразования было установлено при исследовании теплообмена в слое жидкости высотой 1.4 мм ($h/l_\sigma = 0.81$). Кривые кипения и фотография пузырькового кипения на образце 1 представлены на Рисунке 7. Визуально установлено, что при $q \sim 24$ кВт/м² в межреберных впадинах на образце 1 из нержавеющей стали в отличие от других образцов и гладкой поверхности образовывались микропузырьки. В результате данного процесса происходило заметное уменьшение температурного напора при $q \sim 24$ кВт/м², что может говорить об активации диапазона очень мелких центров парообразования на менее теплопроводном покрытии.

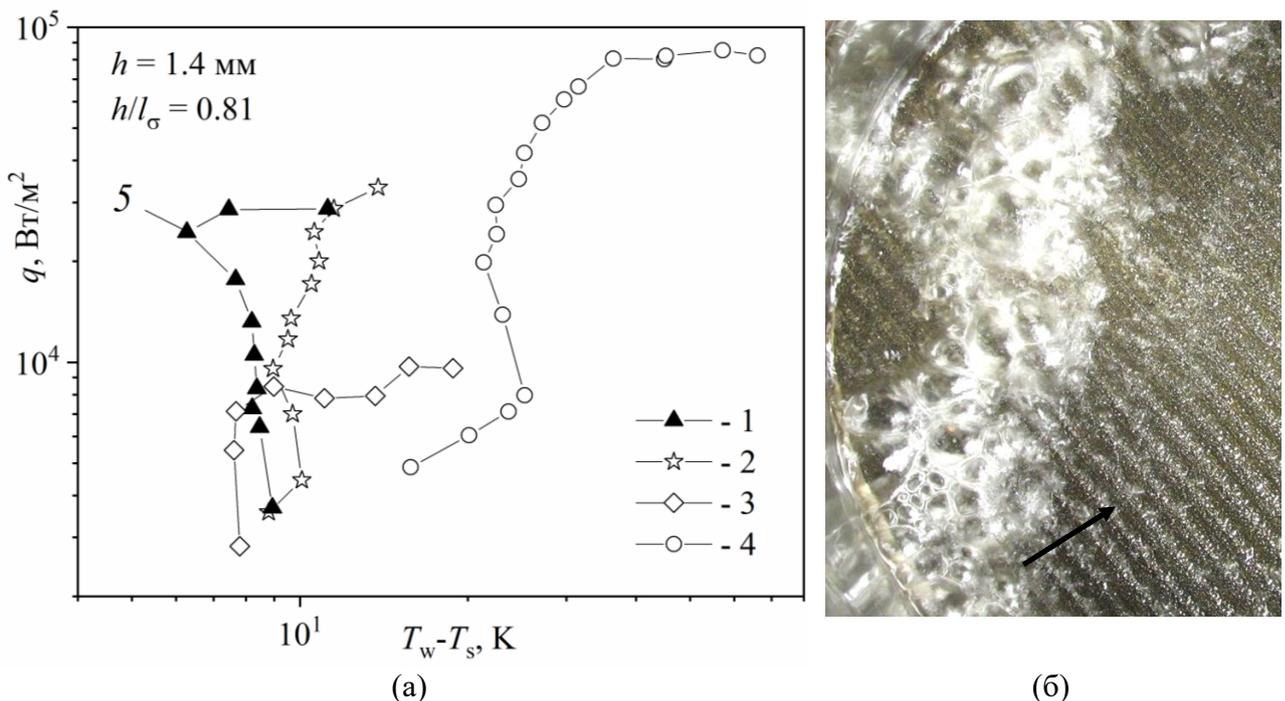


Рисунок 7 – Экспериментальные данные: (а) – зависимость плотности теплового потока от температурного напора при давлении $P_s = 20$ кПа ($P_s/P_{cr} = 1.1 \cdot 10^{-2}$) в слое н-додекана $h = 1.4$ мм ($h/l_\sigma = 0.81$); (б) – фотография процесса теплообмена на образце 1, $q = 24.4$ кВт/м², $T_w - T_s = 6.3$ К. Цифровые обозначения: 1 – образец 1; 2 – образец 2; 3 – образец 3; 4 – гладкая поверхность; 5 – режим кипения с образованием микропузырей. Стрелкой отмечены микропузыри между гребнями покрытия.

В области низких приведенных давлений ($2.2 \cdot 10^{-4} \leq P_s/P_{cr} \leq 6.62 \cdot 10^{-4}$) пузырькового кипение возникало на всех микроструктурированных капиллярно-пористых покрытиях только при достижении большого значения температурного напора. В этой области приведенных давлений в слоях жидкости высотой 1.4 мм и 1.7 мм на образцах 1 и 3 кризис осушения поверхности возникал сразу после режима конвекции. В слоях жидкости высотой 2.5, 4.0 и 10.0 мм при достижении высоких плотностей теплового потока ($q > 70$ кВт/м²) на всех образцах покрытий наблюдался интенсивный капельный унос.

При давлениях 33, 67 и 133 Па ($P_s/P_{cr} = 1.84 \cdot 10^{-5}$; $3.68 \cdot 10^{-5}$; $7.35 \cdot 10^{-5}$) пузырьковое кипение отсутствовало при всех исследованных значениях

высоты слоя жидкости. На Рисунке 8 показаны кривые, полученные для слоя высотой 4.0 мм ($h/l_\sigma = 2.32$) при давлении 133 Па. Из Рисунка 8 видно, что значения температурного напора, полученные на всех образцах покрытий при заданных плотностях теплового потока, существенно больше, чем на гладкой поверхности.

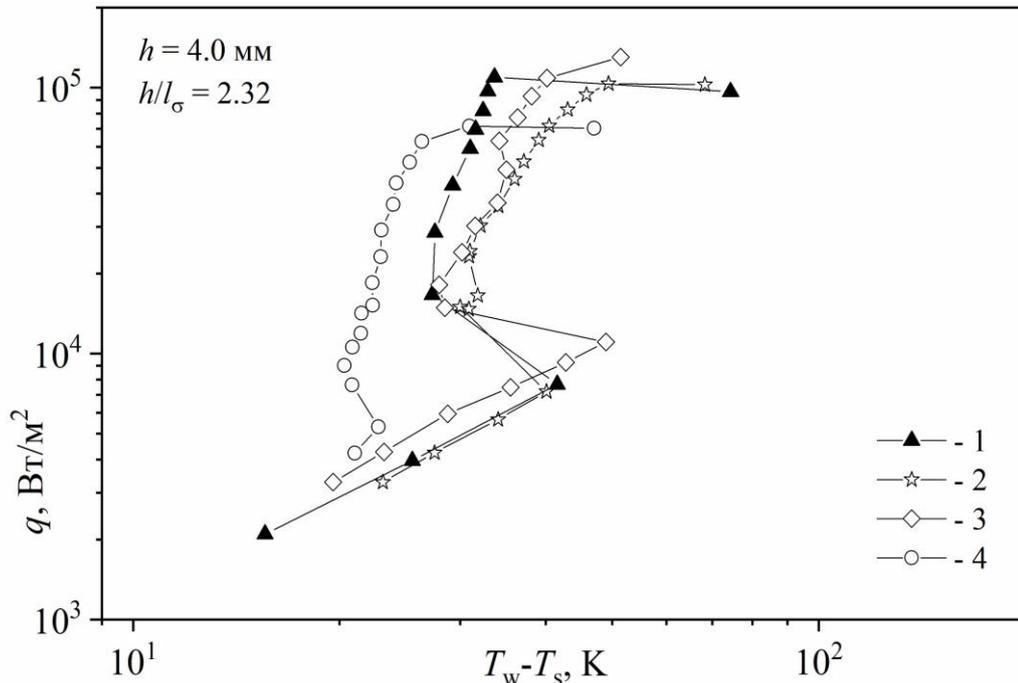


Рисунок 8 – Зависимость плотности теплового потока от температурного напора при $P_s = 133 \text{ Па}$ ($P_s/P_{cr} = 7.35 \cdot 10^{-5}$) в слое н-додекана $h = 4.0 \text{ мм}$ ($h/l_\sigma = 2.32$): 1 – образец 1; 2 – образец 2; 3 – образец 3; 4 – гладкая поверхность.

Теплообмен при давлениях 33, 67 и 133 Па ($P_s/P_{cr} = 1.84 \cdot 10^{-5}$; $3.68 \cdot 10^{-5}$; $7.35 \cdot 10^{-5}$) в слоях жидкости высотой 1.4 мм и 1.7 мм ($h/l_\sigma = 0.81$; 0.99) характеризовался интенсивным испарением с поверхности капиллярно-пористых покрытий без пузырькового кипения. Значения КТП на образце 2 были выше, чем на других образцах. На образце 3 режим конвекции сразу сменялся кризисом осушения поверхности при низкой плотности теплового потока ($q \sim 5 \text{ кВт/м}^2$).

В разделе 3.3 дополнительно исследованы особенности теплообмена, связанные со временем эксплуатации образца 1 из нержавеющей стали и направлением изменения плотности теплового потока при различных давлениях. На Рисунке 9(а) показано сравнение данных, полученных на образце 1 и гладкой поверхности при давлении $P_s = 20 \text{ кПа}$ ($P_s/P_{cr} = 1.1 \cdot 10^{-2}$) в слое 4.0 мм ($h/l_\sigma = 2.32$). При увеличении плотности теплового потока выше величины, соответствующей точке a на кривой 1 ($q = 92 \text{ кВт/м}^2$), наблюдалось значительное снижение температурного напора по сравнению с предыдущими точками с меньшими значениями плотности теплового потока. При $q = 195 \text{ кВт/м}^2$ наблюдалось пятикратное снижение температурного напора по сравнению с данными, полученными на поверхности без покрытия (кривая 3).

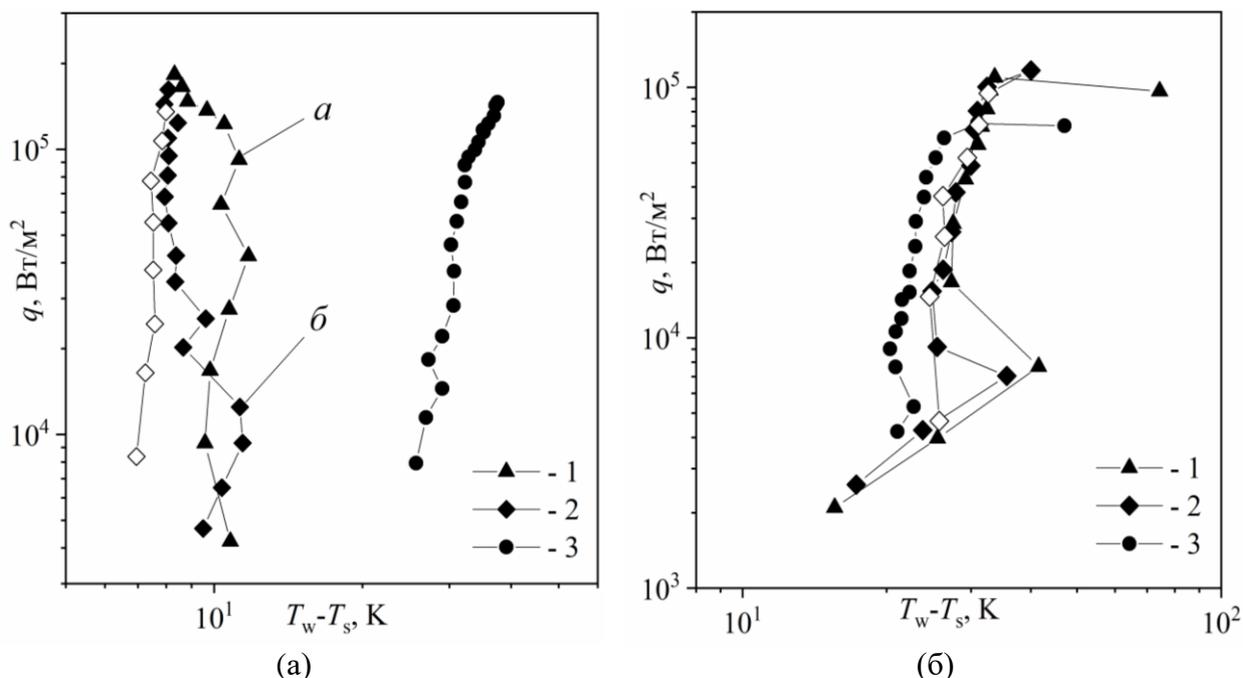


Рисунок 9 – Зависимости плотности теплового потока от температурного напора при различных давлениях в слое жидкости $h = 4.0$ мм ($h/l_{\sigma} = 2.32$): (а) – $P_s = 20$ кПа ($P_s/P_{cr} = 1.1 \cdot 10^{-2}$), (б) – $P_s = 133$ Па ($P_s/P_{cr} = 7.35 \cdot 10^{-5}$). Цифровые обозначения: 1 – данные, полученные на образце 1 до приработки; 2 – данные после приработки; 3 – данные, полученные на поверхности без покрытия. Черными обозначены точки при нагреве (прямой ход), белыми – при охлаждении (обратный ход). Буквами обозначены точки начала инверсии кривой кипения.

Эксперимент на приработанном покрытии проводился сначала при повышении мощности, подаваемой на нагреватель (прямой ход), а затем при постепенном её снижении (обратный ход). Прямой ход на Рисунке 9 обозначен черными символами, обратный ход – белыми. В точке *б* на кривой 2 ($q = 12$ кВт/м²) видно, что начало инверсии кривой кипения на приработанном покрытии происходит при меньшей в 7 раз плотности теплового потока по сравнению с точкой *а*. При давлении 133 Па ($P_s/P_{cr} = 7.35 \cdot 10^{-5}$) эксперимент со слоем жидкости 4.0 мм ($h/l_{\sigma} = 2.32$) также проводился сначала при повышении мощности, подаваемой на нагреватель, а затем при постепенном её снижении (Рисунок 9(б)). Значения температурного напора на образце 1 были больше, чем на гладкой поверхности. При отсутствии пузырькового кипения инверсии кривой не наблюдалось, гистерезис также отсутствовал, и точки, полученные при прямом и обратном ходе, практически совпадали.

В четвертой главе представлен анализ экспериментальных данных по значениям КТО и КТП, полученных на образцах капиллярно-пористых покрытий при различных давлениях и высотах слоя жидкости, и сравнение с расчетными зависимостями.

В разделе 4.1 представлены все полученные на капиллярно-пористых покрытиях зависимости плотности теплового потока от температурного напора при различных давлениях в слоях н-додекана высотой $h = 10.0$ мм ($h/l_{\sigma} = 5.56$) и $h = 1.4$ мм ($h/l_{\sigma} = 0.81$). По модели Лью [10] были рассчитаны

диапазоны размеров активных впадин при различных давлениях и проведено сравнение с экспериментальными данными.

В разделе 4.2 представлены графики зависимостей КТО от высоты слоя жидкости при заданной плотности теплового потока. При разных давлениях на капиллярно-пористых покрытиях достигались различные значения КТО (Рисунок 10). В области умеренных приведенных давлений $2.76 \cdot 10^{-3} < (P_s/P_{cr}) < 1.1 \cdot 10^{-2}$ при низкой плотности теплового потока ($q = 5 \text{ кВт/м}^2$) высота слоя жидкости влияет незначительно на величину КТО как для нагревателей с покрытиями, так и для гладкой поверхности. При высокой плотности теплового потока ($q = 100 \text{ кВт/м}^2$) наиболее высокие значения КТО были получены на образце 1 в слое 4.0 мм.

В области низких приведенных давлений, когда пузырьковое кипение отсутствовало ($P_s/P_{cr} \leq 7.35 \cdot 10^{-5}$), на гладкой поверхности при высоких плотностях теплового потока достигались более высокие значения КТО, чем на капиллярно-пористых покрытиях. При $q = 5 \text{ кВт/м}^2$ наибольшие значения КТО были получены в слое 1.4 мм ($h/l_\sigma = 0.81$) на образце 1 из нержавеющей стали, а в слоях высотой $h/l_\sigma > 1$ значения КТО на всех образцах практически не отличались, т.к. наблюдался режим конвекции.

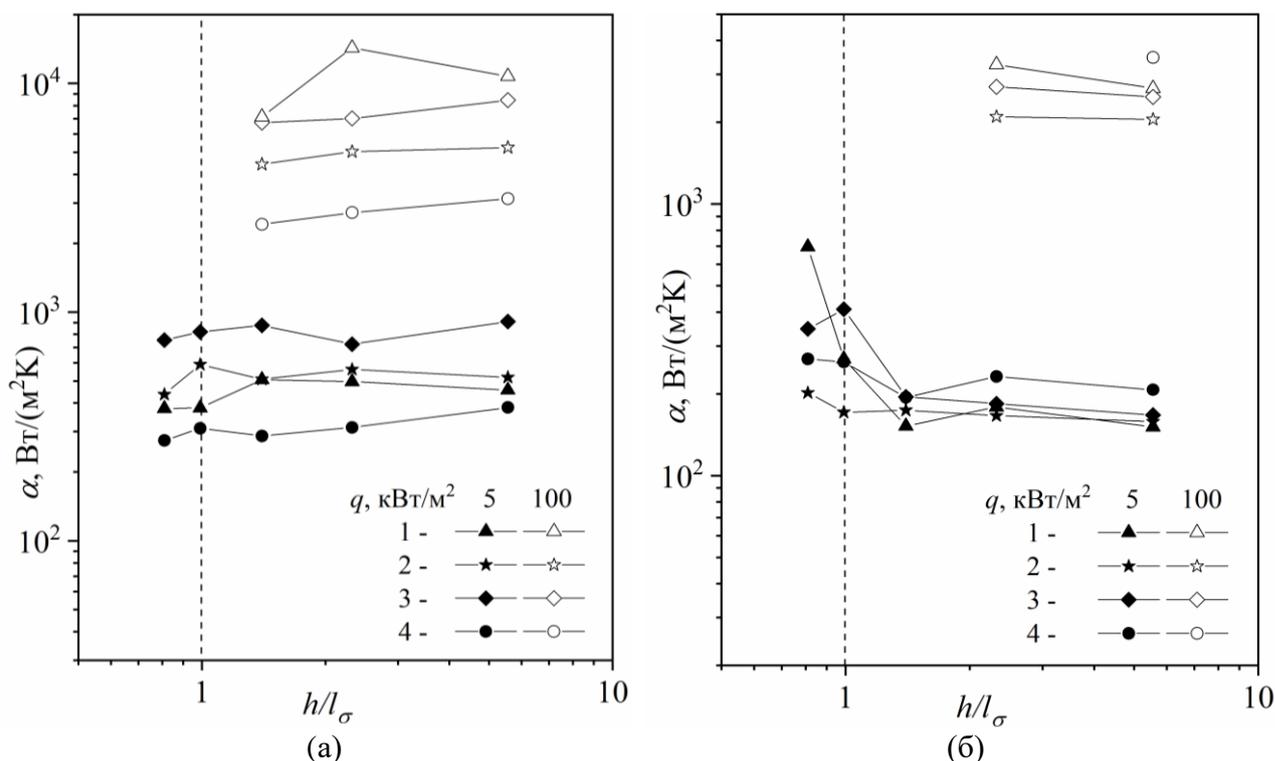


Рисунок 10 – Зависимости КТО от относительной высоты слоя жидкости при двух заданных плотностях теплового потока (5 кВт/м^2 и 100 кВт/м^2): (а) – при давлении $P_s = 10 \text{ кПа}$ ($P_s/P_{cr} = 5.5 \cdot 10^{-3}$); (б) – $P_s = 133 \text{ Па}$ ($P_s/P_{cr} = 7.35 \cdot 10^{-5}$). Цифровые обозначения: 1 – образец 1; 2 – образец 2; 3 – образец 3; 4 – гладкая поверхность.

В разделе 4.3 представлены экспериментальные данные по КТП и сравнение с расчетными зависимостями, разработанными для условий кипения в большом объеме жидкости: модель гидродинамического кризиса кипения Кутателадзе [11]; модель необратимо растущих сухих пятен

Ягова [12]; модель Литера и Кавиани для модулированных по высоте пористых покрытий [13]; модель неустойчивости Ландау для слоя жидкости бесконечной глубины [14].

На Рисунке 11 показана зависимость КТП от приведенного давления в слое н-додекана высотой 10.0 мм ($h/l_{\sigma} = 5.56$). Из Рисунка 11 видно, что в диапазоне давлений (5–20) кПа ($P_s/P_{cr} = 2.76 \cdot 10^{-3} - 1.1 \cdot 10^{-2}$) значения КТП в слое жидкости высотой 10.0 мм ($h/l_{\sigma} = 5.56$) для всех исследованных образцов были выше расчетных значений по формулам Кутателадзе [11] и Ягова [12]. Значения КТП для образцов 1 и 2 больше примерно на (30–50)% значений КТП, полученных на гладкой поверхности. Значения КТП для образца 3 были больше примерно на (50–70)%, чем на гладкой поверхности.

Из Рисунка 11 видно, что на образце 3 в области низких давлений (400–1200) Па ($P_s/P_{cr} = 2.2 \cdot 10^{-4} - 6.62 \cdot 10^{-4}$) были получены на (60–70)% более высокие значения КТП, чем расчетные по формуле Ягова [12]. На образцах 1 и 2 экспериментальные значения КТП были в среднем на (10–15)% больше, чем по прогнозу формулы [12]. Тем не менее, следует заключить, что формула Ягова [12] правильно описывает тенденцию изменения КТП в области низких приведенных давлений в отличие от других расчетных зависимостей. При кипении в слоях жидкости высотой 4.0 мм и 10.0 мм ($h/l_{\sigma} = 2.32; 5.56$) значения КТП в области давлений (400–1200) Па практически не изменялись. В области очень низких давлений (33–133) Па ($P_s/P_{cr} = 1.84 \cdot 10^{-5} - 7.35 \cdot 10^{-5}$) на всех образцах значения КТП снижались с уменьшением давления и высоты слоя жидкости. Значения КТП в этой области давлений ограничивались сверху расчетом по зависимости Ландау [14], полученной из условий развития неустойчивости межфазной поверхности жидкость–пар в условиях интенсивного испарения.

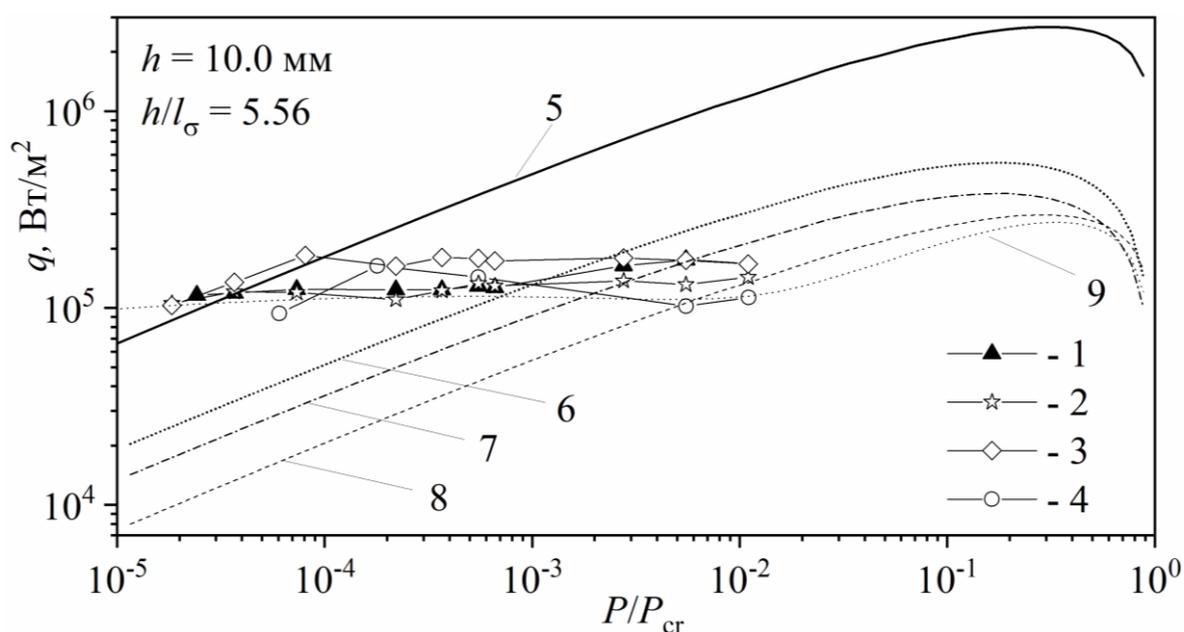


Рисунок 11 – Зависимость КТП от приведенного давления в слое н-додекана $h = 10.0$ мм ($h/l_{\sigma} = 5.56$): 1 – образец 1; 2 – образец 2; 3 – образец 3; 4 – гладкая поверхность; 5 – расчет КТП по Ландау [14]; 6 – по формуле Литера и Кавиани [13] для $\lambda_m = 1.75$ мм; 7 – по формуле [13] для $\lambda_m = 3.5$ мм; 8 – по формуле Кутателадзе [11]; 9 – по формуле Ягова [12].

Сравнение экспериментальных данных с расчетами по зависимости Литера и Кавиани [13] показывает тенденцию, что уменьшение длины волны модуляции покрытий с $\lambda_m = 2l_\sigma$ до $\lambda_m = l_\sigma$ позволяет увеличить значения КТП, но во всем диапазоне приведенных давлений модель [13] не отражает, как видно из Рисунка 11, общую закономерность изменения КТП.

В тонких слоях жидкости высотой 1.4 мм и 1.7 мм ($h/l_\sigma = 0.81; 0.99$) экспериментальные значения КТП меньше практически всех расчетных значений. В области давлений (5–10) кПа ($P_s/P_{cr} = 2.76 \cdot 10^{-3} - 5.5 \cdot 10^{-3}$) наблюдались максимальные КТП для данных высот слоя жидкости на всех образцах покрытий (Рисунок 12). При повышении давления до $P_s = 20$ кПа ($P_s/P_{cr} = 1.1 \cdot 10^{-2}$) значения КТП на всех покрытиях уменьшались. В области давлений (667–1200) Па ($P_s/P_{cr} = 3.68 \cdot 10^{-4} - 6.62 \cdot 10^{-4}$) режим конвекции на всех образцах покрытий при высоких значениях температурного напора сменялся резким появлением быстрорастущих пузырей с выбросом жидкости и переходом к кризису осушения поверхности.

В области давлений (33–400) Па ($P_s/P_{cr} = 1.84 \cdot 10^{-5} - 2.2 \cdot 10^{-4}$) в слоях жидкости высотой 1.4 мм и 1.7 мм наибольшие значения КТП достигались на образце 2. В области давлений $P_s/P_{cr} < 6.62 \cdot 10^{-4}$ на образцах 1 и 3 были получены значения КТП существенно ниже, чем на образце 2 и гладкой поверхности. Установлено, что на образцах 1 и 3 при $P_s/P_{cr} < 6.62 \cdot 10^{-4}$ в слоях жидкости высотой меньше величины δ , как показано в модели Лью [10], не происходит образования пузырей, а существует только испарение с поверхности капиллярно-пористых покрытий.

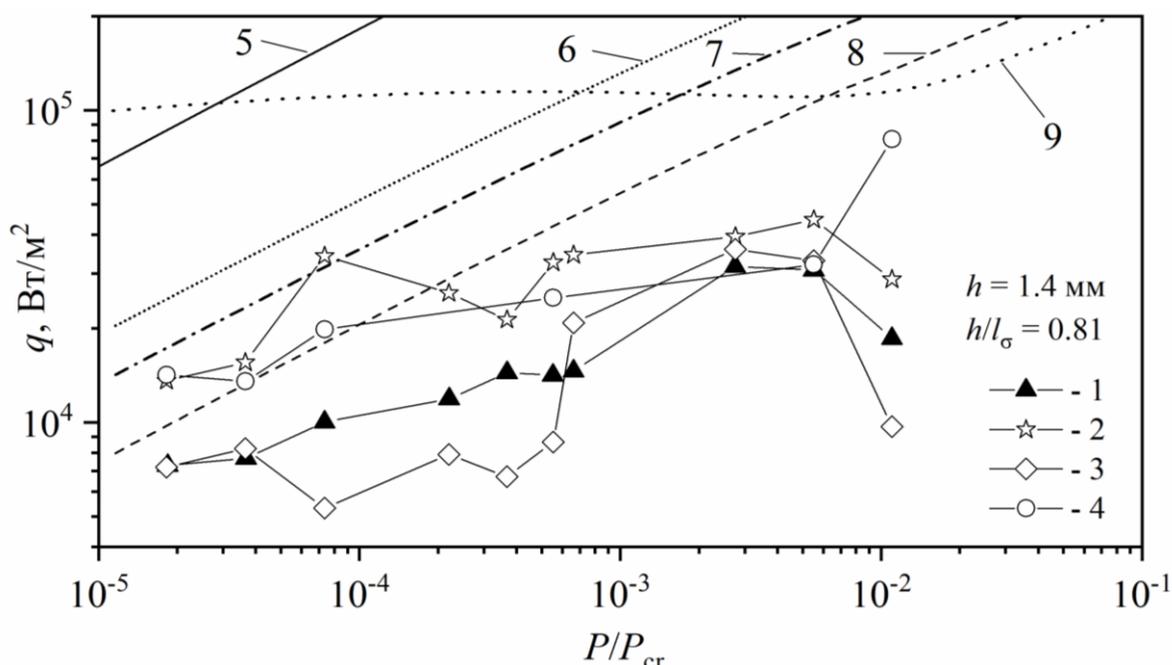


Рисунок 12 – Зависимость КТП от приведенного давления в слое *n*-додекана $h = 1.4$ мм ($h/l_\sigma = 0.81$): 1 – образец 1; 2 – образец 2; 3 – образец 3; 4 – гладкая поверхность; 5 – расчет КТП по Ландау [14]; 6 – по формуле Литера и Кавиани [13] для $\lambda_m = 1.75$ мм; 7 – по формуле [13] для $\lambda_m = 3.5$ мм; 8 – по формуле Кутателадзе [11]; 9 – по формуле Ягова [12].

В заключении приведены основные результаты работы:

1. В данной работе впервые представлены результаты исследования теплообмена при испарении и кипении в тонких горизонтальных слоях жидкости на микроструктурированных капиллярно-пористых покрытиях с разными геометрическими характеристиками и теплопроводностью при различных приведенных давлениях. Установлено, что во всем диапазоне исследованных давлений переход режимов теплообмена от кипения в тонких слоях жидкости к кипению в большом объеме по значениям КТО и КТП происходит при высоте слоя более двух капиллярных постоянных.

2. Экспериментально показано влияние геометрических характеристик микроструктурированных капиллярно-пористых покрытий на теплообмен. На покрытии с длиной волны модуляции равной капиллярной постоянной l_c для рабочей жидкости ($\lambda_m = 1.75$ мм) достигались более высокие значения КТО и КТП, чем на покрытии с длиной волны модуляции, равной двум капиллярным постоянным ($\lambda_m = 3.5$ мм).

3. Показано влияние теплопроводности материала капиллярно-пористых покрытий на теплообмен при испарении и кипении в тонких слоях жидкости. Установлено, что на покрытиях из бронзы происходит активация крупных пор, а на менее теплопроводном покрытии из нержавеющей стали активируются также поры и меньшего размера. Благодаря активации пор меньшего размера при большем температурном градиенте от основания до вершины покрытия на образце из нержавеющей стали наблюдалась инверсия кривой кипения, которая приводила к наибольшей интенсификации теплообмена (до 5 раз по сравнению с гладкой поверхностью).

4. Экспериментально установлено, что инверсия кривой кипения на приработанном капиллярно-пористом покрытии из нержавеющей стали начиналась при меньшей в 7 раз плотности теплового потока. При отсутствии пузырькового кипения в области давлений $P_s/P_{cr} < 7.35 \cdot 10^{-5}$ значения КТО на покрытии из нержавеющей стали до и после приработки не отличались.

5. В области низких приведенных давлений $P_s/P_{cr} \leq 6.62 \cdot 10^{-4}$ в слоях жидкости высотой 2.5, 4 и 10 мм понижение давления приводило к увеличению интенсивности капельного уноса и уменьшению значений КТО при кипении на всех капиллярно-пористых покрытиях. В слоях 1.4 мм и 1.7 мм режим конвекции сменялся выбросом жидкости и переходом к кризису осушения поверхности. Установлено, что при $P_s/P_{cr} < 7.35 \cdot 10^{-5}$ из-за отсутствия пузырькового кипения на всех капиллярно-пористых покрытиях наблюдались меньшие значения КТО, чем на гладкой поверхности.

6. Показано, что на капиллярно-пористом покрытии из бронзы с длиной волны модуляции равной капиллярной постоянной в слое жидкости 10 мм ($h/l_c = 5.56$) достигались наибольшие значения КТП во всем диапазоне приведенных давлений (увеличение достигает до 70% по сравнению с гладкой поверхностью). Значения КТП, полученные в слоях жидкости 4 мм и 10 мм в области низких приведенных давлений на всех капиллярно-пористых покрытиях, превышали предсказания большинства расчетных моделей, прогнозирующих КТП для условий большого объема жидкости.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

1. Павленко А.Н., Жуков В.И., Швецов Д.А. Кризисные явления и интенсификация теплообмена при кипении и испарении в горизонтальных пленках жидкости // Теплоэнергетика. – 2022. – № 11. – С. 1–18.
2. Швецов Д.А., Павленко А.Н., Брестер А.Е., Жуков В.И. Инверсия кривой кипения на микроструктурированных пористых покрытиях // Теплофизика высоких температур. – 2023. – Т. 61, № 3. – С. 405–409.
3. Zhukov V.I., Pavlenko A.N., Shvetsov D.A. The effect of pressure on heat transfer at evaporation/boiling in horizontal liquid layers of various heights on a microstructured surface produced by 3D laser printing // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2023. – Vol. 163. – P. 120488.
4. Shvetsov D.A., Pavlenko A.N., Brester A.E., Zhukov V.I. Maps of hydrodynamic regimes of evaporation and boiling in the thin horizontal liquid layer on the modified surface // Journal of Physics Conference Series. – 2020. – Vol. 1683, № 2. – P. 22085.
5. Zhukov V.I., Brester A.E., Pavlenko A.N., Butko A.S., Shvetsov D.A. Heat transfer on a capillary-porous surface during evaporation / boiling of a thin layer of liquid at low pressures // Journal of Physics Conference Series. – 2020. – Vol. 1683. – P. 022086.
6. Shvetsov D.A., Pavlenko A.N., Brester A.E., Zhukov V.I. A map of regimes of evaporation and boiling in the horizontal liquid layer on the modified surface // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2039, № 1. – P. 012033.
7. Shvetsov D.A., Pavlenko A.N., Brester A.E., Zhukov V.I. Experimental study of heat transfer during boiling in a thin layer of liquid on surfaces with structured porous coatings // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2119. – P. 012082.

Цитируемая литература

1. Григорьев В.А., Павлов Ю.М., Аметистов Е.В. Кипение криогенных жидкостей. – М.: Энергия, 1977. – 289 с.
2. Толубинский В.И., Антоненко В.А., Иваненко Г.В. Влияние толщины слоя жидкости на критические тепловые нагрузки при кипении // Промышленная теплотехника. – 1988. – Т. 10, № 2. – С. 3–6.
3. Shukla M.Y., Kandlikar S.G. Influence of liquid height on bubble coalescence, vapor venting, liquid return, and heat transfer in pool boiling // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2021. – Vol. 173. – P. 121261.
4. Kruse C., Tsubaki A., Zuhlke C., Anderson T., Alexander D., Gogos G., Ndao S. Secondary pool boiling effects // Applied physics letters. – 2016. – Vol. 108, № 5. – P. 051602.
5. Зубченко А.С., Колосков М.М., Каширский Ю.В. и др. Марочник сталей и сплавов. 2-е изд., доп. и испр. / Под ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
6. Осинцев О.Е., Федоров В.Н. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: справочник. – М.: Машиностроение, 2004. – 336 с.
7. Yaws C. L. Handbook of Thermodynamic and Physical Properties of Chemical Com-pounds. – NY: Knovel, 2003. – 597 p.
8. Zhukov V.I., Pavlenko A.N. Heat transfer and critical phenomena during evaporation and boiling in a thin horizontal liquid layer at low pressures // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2018. – Vol. 117. – P. 978–990.
9. Bodla K.K., Murthy J.Y., Garimella S.V. Direct simulation of thermal transport through sintered wick microstructures // J. Heat Transfer. – 2012. – Vol. 134. – P. 012602.
10. Liu X., Zou Q., Yang, R. Theoretical analysis of bubble nucleation in liquid film boiling // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2022. – Vol. 192. – P. 122911.
11. Кутателадзе С.С. Гидродинамическая модель кризиса теплообмена в кипящей жидкости при свободной конвекции // Журн. техн. физики. – 1950. – Т. 20, № 11. – С. 1389–1392.
12. Yagov V.V. Is a crisis in pool boiling actually a hydrodynamic phenomenon? // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2014. – Vol. 73. – P. 265–273.
13. Liter S.G., Kaviany M. Pool-boiling CHF enhancement by modulated porous-layer coating: theory and experiment // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2001. – Vol. 44, № 22. P. 4287–4311.
14. Ландау Л.Д. К теории медленного горения // ЖЭТФ. – 1944. – Т. 14. – С. 240–245.