

На правах рукописи

Кузнецов Денис Владимирович

**ВЛИЯНИЕ ПОРИСТЫХ ПОКРЫТИЙ НА ТЕПЛООБМЕН И
РАЗВИТИЕ КРИЗИСНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ КИПЕНИИ
АЗОТА, ВКЛЮЧАЯ РЕЖИМЫ НЕСТАЦИОНАРНОГО
НАГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ**

1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск - 2025

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

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

**Официальные
оппоненты:** Васильев Николай Викторович,
кандидат технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Объединенный институт
высоких температур Российской академии наук,
заведующий лабораторией теплообмена в
энергетических установках

Попов Игорь Александрович,
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А.Н. Туполева -
КАИ», профессор кафедры теплотехника и
энергетическое машиностроение

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет
«МЭИ» (г. Москва)

Защита состоится 12 ноября 2025 года в 9.30 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, заверенный печатью организации, просьба отправлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1 (e-mail: dissovet@itp.nsc.ru).

Автореферат разослан «___» сентября 2025 г.

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



Терехов Владимир
Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования.

Как известно, кипение жидкости является одним из наиболее эффективных способов отвода тепла от теплонапряженной поверхности. В связи с этим процессы кипения широко используются в различных отраслях промышленности, таких как атомная и теплоэнергетика, химическая и пищевая промышленность. В последнее время отдельное внимание исследователей в данной области уделяется изучению диэлектрических жидкостей, которые могут быть использованы при охлаждении электронных систем. Кроме того, с расширением приложений высокотемпературной сверхпроводимости, непосредственный интерес представляет развитие исследований кипения криогенных жидкостей, в частности, жидкого азота для термостабилизации ВТСР-устройств.

Интенсивность теплоотдачи является результатом взаимосвязи внутренних характеристик кипения, таких как плотность центров парообразования, отрывные диаметры пузырей, критический радиус зародышеобразования и т.д. Наиболее сильное влияние на внутренние характеристики пузырькового кипения и, как следствие, на коэффициенты теплоотдачи оказывает изменение давления. Исследователями отмечается, что влияние увеличения давления носит лишь количественный характер, в то время как при кипении жидкости в области субатмосферных давлений процесс теплообмена претерпевает значительные качественные изменения. В то же время, количество систематизированных работ по изучению теплообмена при кипении в области как атмосферных, так и пониженных давлений относительно невелико, особенно для криогенных жидкостей.

Одной из наиболее важных величин для практических приложений при исследовании теплообмена является значение критического теплового потока (КТП) при заданных параметрах системы. На сегодняшний день для оценки данной величины используется модель Кутателадзе-Зубера, хорошо зарекомендовавшая себя при кипении широкого спектра различных жидкостей. Однако, модель справедлива при кипении в условиях стационарного тепловыделения. В то же время в реальных теплообменных аппаратах могут возникать достаточно мощные возмущения и колебания того или иного режимного параметра во времени. Для ряда жидкостей (в частности, жидкого азота) при резком набросе тепла наступление кризиса может возникать при существенно меньших тепловых потоках, чем в условиях стационарного тепловыделения. По этой причине также важны исследования процесса кипения жидкости при нестационарном тепловыделении.

Стремительное развитие технологий способствует увеличению значений тепловых потоков, которые необходимо снимать с поверхности теплонапряженного оборудования. В связи с этим широко ведутся исследования по поиску методов интенсификации теплообмена и увеличению критических тепловых потоков в системах с фазовыми переходами. На сегодняшний день одними из наиболее перспективных методов в данной области, являются пассивные методы, связанные с прямой модификацией теплообменных поверхностей за счет создания на них различных структур и покрытий.

Несмотря на широкое разнообразие технологий создания функциональных поверхностей, в настоящее время ведётся активный поиск наиболее оптимальных методов модификации, а также морфологии поверхности и геометрических параметров структур при заданных параметрах системы. Кроме того, на сегодняшний день практически отсутствуют исследования по влиянию таких модификаций на развитие кризисных явлений при кипении жидкости в условиях нестационарного тепловыделения.

Целью диссертационной работы является экспериментальное исследование влияния пористых покрытий, полученных различными методами, на теплообмен и величину критического теплового потока при пузырьковом кипении жидкого азота в условиях стационарного тепловыделения, а также на развитие теплообмена и кризисных явлений при ступенчатой подаче тепловой нагрузки и в режимах повторного смачивания при пленочном течении. Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Разработка и изготовление отдельных узлов экспериментальной установки для проведения опытов на различных типах нагревателей в широком диапазоне приведенных давлений.
2. Анализ микроструктурных характеристик пористых покрытий, полученных с использованием метода направленного плазменного напыления, 3D-печати и микродугового оксидирования (МДО).
3. Исследование интенсивности теплообмена и величины критического теплового потока при кипении на гладких и модифицированных нагревателях в условиях стационарного тепловыделения при атмосферном и пониженных давлениях.
4. Изучение влияния трехмерных капиллярно-пористых (ТКП) покрытий, полученных методом направленного плазменного напыления, на динамику парообразования и развитие кризиса теплоотдачи в условиях ступенчатого тепловыделения.
5. Исследование влияния ТКП-покрытия на динамику повторного смачивания сильно перегретой пластины при пленочном течении азота.
6. Проведение сравнительного анализа полученных экспериментальных данных с существующими моделями и данными других авторов.

Научная новизна изложенных в работе результатов заключается в следующем:

1. Проведено комплексное изучение теплообмена и критических тепловых потоков (КТП) при кипении жидкого азота в диапазоне давлений (0.017–0.1) МПа на поверхностях с пористыми покрытиями, полученными тремя методами: направленным плазменным напылением, 3D-печатью и микродуговым оксидированием (МДО) с существенно различающимися микроструктурными параметрами.
2. Получены новые данные по интенсивности теплоотдачи в широком диапазоне тепловых потоков вплоть до кризисных значений на модифицированных нагревателях при кипении азота в условиях стационарного тепловыделения. Показано влияние отдельных микроструктурных параметров пористых покрытий на степень интенсификации теплообмена и увеличение КТП относительно гладких нагревателей. На основе данных высокоскоростной видеосъемки

предложены основные механизмы, влияющие на интенсификацию теплообмена.

3. Показано, что существенное снижение давления может приводить к уменьшению степени интенсификации теплообмена на исследованных пористых покрытиях по сравнению с гладким нагревателем и даже к отсутствию эффекта от модификации поверхности для метода микродугового оксидирования.
4. Получены новые опытные данные по динамике парообразования и развития кризиса теплоотдачи в условиях ступенчатого тепловыделения на нагревателях, модифицированных методом направленного плазменного напыления. Впервые показано, что наличие ТКП-покрытий на теплоотдающей поверхности приводит к вырождению нестационарного критического теплового потока, а быстрый переход к режиму устойчивого пленочного кипения, минуя стадию развитого пузырькового кипения, для модифицированных образцов наблюдается при тепловых потоках, более чем в 2 раза превышающих величину критического теплового потока при стационарном тепловыделении.
5. Получены новые экспериментальные данные по динамике повторного смачивания сильно перегретой пластины с ТКП-покрытием при пленочном охлаждении жидким азотом. Показано значительное сокращение (более чем в 3 раза) времени полного охлаждения модифицированной пластины относительно гладкого нагревателя.

Теоретическая и практическая значимость.

Полученные в работе новые экспериментальные данные важны в первую очередь для разработки и изготовления функциональных поверхностей применительно к задаче интенсификации теплообмена и увеличения критических тепловых потоков при кипении жидкости. Исследование различных методов модификации, а также микроструктурных параметров покрытий, позволяет выработать рекомендации для определения наиболее оптимальных геометрических параметров структур и морфологии поверхностей при заданных приведенных давлениях в системах с фазовыми превращениями. Изучение азота в качестве рабочей жидкости позволяет использовать полученные экспериментальные данные при разработке систем охлаждения и термостабилизации высокотемпературных сверхпроводящих устройств. Особенно актуальными в данной области являются результаты, полученные на МДО-покрытиях, ввиду их высоких электроизоляционных и прочностных свойств. Кроме того, полученное вырождение нестационарного критического теплового потока при кипении азота на ТКП-покрытиях позволяет разрабатывать теплообменные системы, в которых отсутствует более раннее наступление кризиса теплоотдачи (и, как следствие, термическое разрушение оборудования) по сравнению с рассчитанными значениями в условиях стационарного тепловыделения.

Достоверность результатов подтверждается использованием сертифицированного и калиброванного измерительного оборудования, современных АЦП плат с соответствующим программным обеспечением, высокоскоростных методов измерения, анализом неопределенностей, сравнением с экспериментальными результатами и моделями других авторов, а также воспроизводимостью опытных данных.

Защищаемые результаты:

1. Результаты экспериментального исследования теплообмена, величины критического теплового потока и динамики парообразования при кипении азота на гладких и модифицированных методом направленного плазменного напыления трубчатых нагревателях различного диаметра при стационарном тепловыделении и атмосферном давлении.
2. Результаты экспериментального исследования теплообмена и величины критического теплового потока при кипении азота на гладких плоских нагревателях из меди и дюралюминия, а также на модифицированных методами 3D-печати и микродугового оксидирования при стационарном тепловыделении в условиях атмосферного и пониженных давлений.
3. Результаты экспериментального исследования развития кризисных явлений при кипении азота в условиях ступенчатой подачи тепловой нагрузки на гладких трубчатых нагревателях и нагревателях с покрытиями, полученными методом направленного плазменного напыления.
4. Результаты экспериментального исследования динамики повторного смачивания сильно перегретой гладкой медной пластины и пластины с плазменным покрытием при пленочном охлаждении жидким азотом.

Личный вклад автора. Постановка задач исследований проводилась автором как лично, так и совместно с научным руководителем чл.-корр. РАН Павленко А.Н. и с.н.с., к.ф.-м.н. Суртаевым А.С. Автор участвовал в подготовке и проведении всех представленных в работе экспериментов, лично провел модернизацию стенда для проведения опытов в условиях субатмосферных давлений, а также разрабатывал и изготавливал рабочие области для проведения опытов на нагревателях с различной геометрией. Все экспериментальные данные, их обработка и анализ получены либо лично автором, либо при непосредственном участии в составе научного коллектива. Публикация в научных журналах и представление на конференциях результатов исследования осуществлялись соискателем совместно с Павленко А. Н. и Суртаевым А.С.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Всероссийская конференция «Сибирский теплофизический семинар» (г. Новосибирск, 2024, 2023, 2022, 2021, 2020, 2018, 2017 г. Получены: диплом II степени в 2017 г., диплом I степени в 2018 г., диплом II степени в 2023 г.); Российская национальная конференция по теплообмену (РНКТ-8) (г. Москва, 2022 г.); Школа семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (г. Екатеринбург, г. Санкт-Петербург, 2021, 2017г.); Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: Всероссийская школа-конференция молодых ученых (г. Новосибирск – г. Шерегеш, 2020); International Seminar «Topical issues of heat and mass transfer at phase transformations and multiphase flows in modern chemical technology apparatuses and energy equipment» (г. Новосибирск, Россия, 2018, 2017, 2016 г.); International Heat Transfer Conference (ИНТС-16) (г. Пекин, Китай, 2018 г.); Всероссийская школа-конференция молодых ученых с международным участием «Актуальные Вопросы Теплофизики и Физической Газодинамики» (г. Новосибирск, 2016 г.); Школа-семинар молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова (г. Казань, 2016 г.); Минский международный форум по

теплообмену (г. Минск, Беларусь, 2016 г.); 9-th International Symposium on Heat Transfer (ISHT-9) (г. Пекин, Китай, 2016 г.).

Публикации. Материалы диссертации полностью изложены в 29 публикациях, 14 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК.

Результаты научных исследований, представленных в данной диссертационной работе, были получены в рамках выполнения следующих проектов: РФФИ № 15-08-03221, РФФИ № 15-38-20982 мол_а_вед., РФФИ № 18-08-00402 А., РНФ № 19-19-00180, Минобрнауки РФ № 075-15-2020-770, проект РАН III.18.2.3 – исполнитель; РФФИ № 18-38-00726 мол_а – руководитель.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 145 страниц, содержит 38 рисунков и 3 таблицы. Список литературы состоит из 141 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В **первой главе** приведены обзор и анализ литературы, посвященной теме диссертации, а также общее описание режимов кипения по мере изменения мощности тепловыделения. В *разделе 1.1* представлены наиболее известные аналитические и полуэмпирические модели описания внутренних характеристик кипения, влияющих на интегральный теплообмен, такие как критический радиус парообразования, отрывные диаметры пузырей, плотность активных центров парообразования и т. д., а также их развитие по мере накопления экспериментальной базы. *Раздел 1.2* посвящен описанию экспериментальных работ по изучению влияния различных параметров системы на теплообмен при кипении жидкости: материал нагревателя, шероховатость поверхности, тип используемой жидкости и величина приведенного давления. В *разделе 1.3* кратко представлено описание наиболее известных и успешно зарекомендовавших себя моделей для расчёта теплоотдачи и величины критического теплового потока при кипении, включая режим нестационарного тепловыделения. *Раздел 1.4* посвящен описанию современных экспериментальных работ по исследованию интенсификации теплообмена и увеличения критических тепловых потоков за счет создания на поверхности нагревателей структур и пористых покрытий принципиально отличающимися методами. Также затронут вопрос о интенсификации кипения жидкости в условиях нестационарного тепловыделения.

В выводах к главе 1 (*раздел 1.5*) представлены основные положения анализа приведенного обзора литературы, посвященного тематике диссертационной работы. Отмечено, что:

- Разнообразие моделей, представленных в литературе, а также в значительной степени их эмпирический характер, свидетельствуют о чрезвычайно сложной постановке задачи для аналитического решения,

учитывающего огромное количество параметров системы, влияющих на процесс кипения. В этой связи до сих пор ведется активное экспериментальное исследование внутренних характеристик пузырькового кипения при варьировании системных параметров (сочетание жидкость/материал нагревателя, давление, шероховатость поверхности и т. д.) для верификации имеющихся моделей и разработки новых;

- Наиболее сильное влияние на внутренние характеристики пузырькового кипения и, как следствие, коэффициенты теплоотдачи, оказывает изменение давления. По исследованиям кипения жидкости в области субатмосферных давлений опубликован относительно небольшой массив теоретических и экспериментальных работ, который продолжает увеличиваться на сегодняшний момент. Такой интерес исследователей в первую очередь связан с практической значимостью, поскольку снижение давления позволяет уменьшить температуру кипения жидкости и, как следствие, снимать необходимые тепловые потоки с энергонапряженных устройств, не опасаясь перегрева оборудования;

- В связи с развитием приложений высокотемпературной сверхпроводимости и открытием новых материалов, способных функционировать при относительно высоких температурах, непосредственный интерес представляет развитие исследований теплообмена при кипении таких криогенных жидкостей, как азот. Однако на сегодняшний день количество современных работ в данной области, особенно системных, крайне ограничено;

- Несмотря на широкое разнообразие технологий создания функциональных поверхностей применительно к задаче интенсификации теплообмена и увеличения критических тепловых потоков при кипении за счет их постоянного усовершенствования, а также наличия определенных недостатков отдельно взятого метода, в настоящее время ведётся активный поиск наиболее оптимальных для практического использования методов модификации, а также морфологии поверхности и геометрических параметров структур применительно к системам с фазовыми переходами различных жидкостей при заданных приведенных давлениях;

- В реальных теплообменных аппаратах могут возникать достаточно мощные возмущения режимных параметров во времени, при которых поверхность нагрева будет находиться в нестационарных условиях теплообмена с жидкостью, что создает специфические условия для развития кризиса теплоотдачи по сравнению со стационарными процессами. Несмотря на определенное количество экспериментальных и теоретических работ, посвященных изучению динамики парообразования при нестационарном тепловыделении, в литературе практически отсутствует информация о влиянии микроструктуры поверхности, а также микропористых покрытий, на динамику развития теплообмена и кризисных явлений в данных условиях.

Во **второй** главе представлено подробное описание экспериментального стенда (*раздел 2.1*), конструкции рабочих областей и нагревателей (*раздел 2.2*), методов создания покрытий на рабочих участках и анализ основных микроструктурных характеристик модифицированных поверхностей (*раздел 2.3*), а также проведен анализ неопределённостей измерений (*раздел 2.4*).

На рисунке 1 приведена принципиальная схема экспериментальной установки для изучения теплообмена и развития кризисных явлений при кипении жидкого азота. Основным элементом стенда является криостат,

представляющий собой колонну с внутренним диаметром 0.2 м и высотой 1.25 м. Для исключения притоков тепла через боковую поверхность криостата криогенная емкость защищена вакуумированной полостью, охлаждаемыми радиационными экранами и внешней азотной ванной. В качестве рабочей жидкости использовался жидкий азот, полученный с помощью ожижительной установки Cryomech LNP120, производящей жидкий азот с чистотой 99.9% и выше.

Экспериментальный стенд позволяет проводить эксперименты как при атмосферном, так и при пониженных давлениях. Для создания субатмосферного давления рабочего объема криостата в верхнем фланце установлен разъем, к которому подсоединяется криогенный трубопровод, ведущий к вакуумному насосу, откачивающему пары жидкого азота. Контроль давления внутри криостата осуществлялся с использованием образцового вакуумметра, установленного в верхней части криогенной емкости.

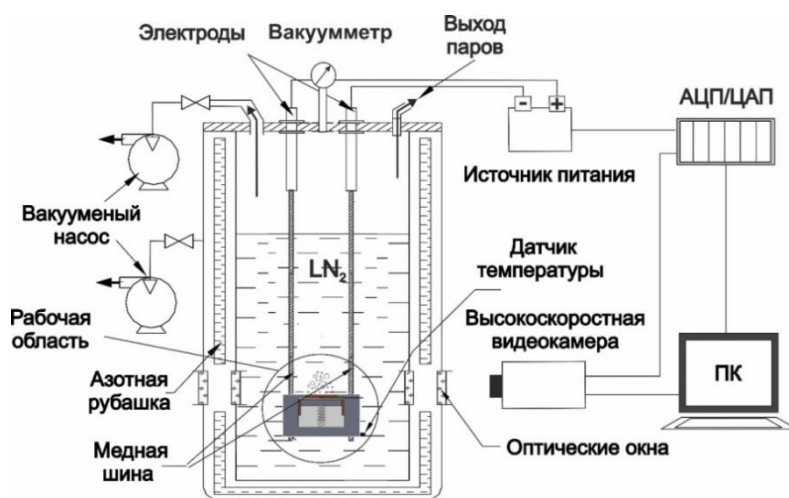


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Нагрев рабочих участков осуществлялся либо непосредственным пропусканием электрического тока, либо косвенным методом через константановую фольгу, плотно прилегающую к образцам. Для подачи тепловой нагрузки во всех проведенных опытах использовался программируемый импульсный источник питания ГОРН-К-12/600, обеспечивающий максимальную выходную мощность 7,2 кВт при токе до 600 А с фронтом нарастания не более 1 мс.

Высокоскоростная видеосъемка кипения и переходных процессов осуществлялась через оптические окна криостата с диаметром 45 мм с помощью цифровой видеокамеры Phantom VEO 410 высокого временного и пространственного разрешений. Частота записи в экспериментах варьировалась в интервале от 200 до 15000 кадров в секунду с максимальным разрешением 1 pix.~ 0.02 мм. Высокие временное и пространственное разрешения камеры позволяли регистрировать динамику роста и отрыва паровых пузырей от теплоотдающей поверхности, поведение двухфазного слоя вблизи поверхности нагревателя при высоких тепловых нагрузках, динамику распространения самоподдерживающегося фронта испарения и развитие кризисных явлений при различных законах тепловыделения.

Сбор опытных данных, управление источником питания, а также синхронизация видеосъемки и протекающих процессов в нестационарных условиях осуществлялись с использованием АЦП/ЦАП и соответствующего программного обеспечения, что позволяло регистрировать быстротекущие процессы и наблюдать “историю” показаний датчиков в процессе проведения экспериментов в условиях стационарного тепловыделения. Добавление внешних модулей (сосудов Дьюара с жидким азотом, криогенных трубопроводов, внешних насосов), изменение оснастки и конструкции рабочей области позволило провести эксперименты как в условиях кипения в большом объеме для нагревателей различной геометрии, так и при пленочном течении азота в режиме повторного смачивания.

Модификация поверхности теплообмена на нагревателях с различной геометрией осуществлялась тремя методами. Для наглядности на рисунке 2 представлены характерные фотографии сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) каждого типа покрытия.

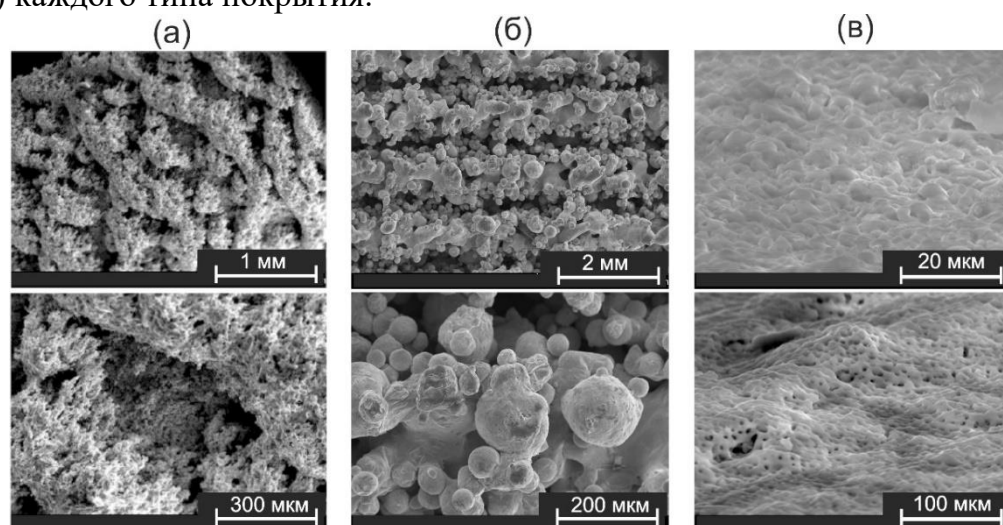


Рис. 2. Структура покрытий (СЭМ): (а) направленное плазменное напыление; (б) 3D-печать; (в) микродуговое оксидирование.

Методом направленного плазменного напыления создавались трехмерные капиллярно-пористые (ТКП) покрытия из бронзы (БрАМц 9-2) на трубчатых нагревателях из стали (диаметр $D = 3$ мм) и меди (диаметр $D = 16$ мм). В отличие от традиционного газотермического напыления, покрытия, созданные таким способом, одновременно сочетают как высокую пористость, так и структурированность поверхности. Такие структуры представляют собой квазиупорядоченные пористые гребни и каналы (рисунок 1а). Следует отметить, что в поперечном направлении гребни имеют пологую поверхность с одной стороны и более крутую с отрицательным углом наклона с другой стороны (полузакрытые). Для всех нагревателей с таким типом покрытий были проведены эксперименты по изучению теплообмена и величины первого критического теплового потока ($q_{кр}$) при стационарном тепловыделении и атмосферном давлении. Для некоторых образцов дополнительно проводились опыты в условиях ступенчатого наброса тепла. Основные микроструктурные характеристики покрытий и условия проведения экспериментов представлены в Таблице 1, где λ_m – среднее расстояние между соседними гребнями (длина волны модуляции структуры), δ – средняя по высоте гребней толщина покрытия, h –

толщина остаточного слоя (слой равномерного пористого покрытия), ε – пористость, $q_{кр}$ – величина критического теплового потока. Также было проведено исследование влияния ТКП-покрытия на динамику повторного смачивания сильно перегретой медной пластины.

Таблица 1. Параметры образцов с ТКП-покрытиями.

№	D , мм	δ , мкм	λ_m , мкм	h , мкм	Ширина каналов, мкм	ε , %	$q_{кр}$, Вт/см ²	Экспериментальные условия
Гладкий	3	-	-	-	-	-	15.8	
3-1	3	200	330	-	110	55	16.4	Стационарное тепловыделение
3-2	3	380	460	30	240	76	22.7	
3-3	3	700	1080	200	510	48	21.0	
3-4	3	1000	1600	200	850	42	14.9	
3-5	3	400	530	50	320	59	16.6	Стационарное/ ступенчатое тепловыделение
3-6	3	800	1800	100	800	47	17.8	
3-7	3	1390	2600	250	890	55	19.4	
Гладкий	16	-	-	-	-	-	13.1	
16-1	16	200	350	50	120	50	18.2	Стационарное тепловыделение
16-2	16	350	460	100	240	64	23.2	
16-3	16	1270	1410	700	450	30	16.7	

Вторым способом модификации поверхностей нагревателей являлся аддитивный метод 3D-печати. Данный метод отличается хорошей воспроизводимостью получаемых структур, а также высокой точностью при изменении различных микроструктурных параметров. На плоские медные участки наносился порошок с содержанием меди более 98% и создавалась пористая структура с синусоидальной зависимостью распределения локальной толщины покрытия от поперечной координаты (рисунок 16). Эксперименты по исследованию теплообмена и величины КТП проводились в условиях стационарного тепловыделения при атмосферном и пониженном давлениях. Основные морфологические характеристики покрытий приведены в таблице 2. Указанные значения критических тепловых потоков соответствуют давлениям, при которых проводились опыты.

Таблица 2. Параметры образцов с покрытиями, полученными методом 3D-печати.

№	δ , мкм	λ_m , мкм	h , мкм	Ширина каналов, мкм	ε , %	$q_{кр}$, Вт/см ²	Давление, МПа
Гладкий	-	-	-	-	-	16.9; 12.2	0.1; 0.017
1	480	2010	70	1140	30	21.7; 12.8	
2	430	3510	50	1820	34	16.8; 10.3	

Для последнего типа пористых покрытий использовались плоские нагреватели из дюралюминия Д16Т, которые модифицировались методом микродугового оксидирования (МДО). Данный метод широко используется в

качестве создания высокопрочных электроизоляционных и коррозионностойких покрытий и представляет непосредственный интерес при охлаждении ВТСП-устройств. За счет изменения состава электролита, плотности тока, длительности импульсов, времени обработки и т. д. с использованием данного метода было создано два покрытия с различной микроструктурой и толщиной:

образец № 1: электролит – КОН 4 г/л + жидкое стекло 8 г/л; токи анодный/катодный 24/24 А/дм²; частота импульсов 1500 Гц; время обработки 10 мин;

образец № 2: электролит – Na₅P₃O₁₀ 20 г/л; токи анодный/катодный 5/3 А/дм²; частота импульсов 500 Гц; время обработки 40 мин.

Покрытие образца № 1 представляет собой шероховатую поверхность с отдельными порами диаметром (2–5) мкм, а толщина покрытия варьируется в диапазоне (2–20) мкм (рисунок 1в сверху). Для образца № 2 наблюдается гораздо более ярко выраженная пористость на поверхности с высокой плотностью пор, однако их размеры существенно меньше, чем для участка № 1, и лежат в диапазоне (1–2) мкм. Толщина покрытия также значительно ниже для образца № 2 и составляет (1–6) мкм. На данных типах модифицированных нагревателей были проведены эксперименты по изучению теплообмена и величины КТП в условиях стационарного тепловыделения при давлениях 0.1, 0.05 и 0.017 МПа.

Третья глава посвящена описанию результатов экспериментального исследования теплообмена и кризиса теплоотдачи при пузырьковом кипении азота в большом объеме на гладких и модифицированных нагревателях в условиях стационарного тепловыделения при атмосферном и пониженных давлениях. Для всех типов пористых покрытий при стационарном тепловыделении в той или иной степени наблюдался гистерезис кривой кипения. В то же время при снижении мощности тепловыделения данные, полученные для отдельно взятого образца, с хорошей точностью совпадали друг с другом. По этой причине анализ результатов проводился при уменьшении плотности теплового потока.

В *разделе 3.1* представлены результаты исследования трубчатых нагревателей с бронзовыми ТКП-покрытиями, полученными методом направленного плазменного напыления. На рисунке 3а представлены кривые кипения и критические тепловые потоки для гладкого нагревателя и нагревателей со структурированными капиллярно-пористыми покрытиями малого диаметра (3 мм). Для сравнения также приведена теоретическая зависимость теплообмена, рассчитанная по модели Лабунцова [Лабунцов Д.А. // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. –1963. – Т. 1. – С. 58-71.] и модель кризиса кипения Кутателадзе-Зубера [Кутателадзе С.С. // Журнал технической физики. – 1950. – Т. 20. – №. 11. – С. 1389-1392.], которые с хорошей точностью описывают данные, полученные на гладком рабочем участке. Можно заметить характерный излом кривой кипения при тепловом потоке порядка 2 Вт/см², соответствующий переходу от конвективного режима теплообмена к развитому пузырьковому кипению. Для всех модифицированных участков данный излом отсутствует, а наклон кривой кипения существенно ниже по сравнению с немодифицированным нагревателем. Практически для всех нагревателей с покрытием наблюдалось увеличение кризиса теплоотдачи относительно гладкого участка. При этом максимальная величина КТП наблюдалась для

образца № 3-2 с максимальной пористостью (76%). Для данного образца величина $q_{кр}$ была практически в 1.8 раз выше соответствующего значения $q_{кр}$ для гладкой трубки без покрытия.

На рисунке 3б представлена зависимость степени интенсификации теплообмена для нагревателей с ТКП-покрытиями, полученная как отношение коэффициентов теплоотдачи на нагревателях с покрытиями к аналогичной величине для гладкого участка при заданном значении теплового потока. Как видно, для всех исследованных участков с покрытиями из бронзы наблюдается существенная интенсификация теплообмена в широком диапазоне тепловых нагрузок. При малых плотностях теплового потока наблюдаются два характерных тренда: максимальная интенсификация теплообмена (более чем в 3.5 раза) – для нагревателей № 3-3, № 3-4, № 3-6, № 3-7 с «большой» шириной каналов покрытия, и более низкая интенсификация (до 2.5 раз) – для образцов № 3-1, № 3-2 и № 3-5. Кроме того, наблюдается тенденция уменьшения степени интенсификации теплообмена по мере приближения плотности теплового потока к значениям $q_{кр}$ для гладкого нагревателя. Для участка № 3-5 в области умеренных и высоких тепловых потоков интенсивность теплообмена незначительно снижается (~ 15%) относительно не модифицированного образца.

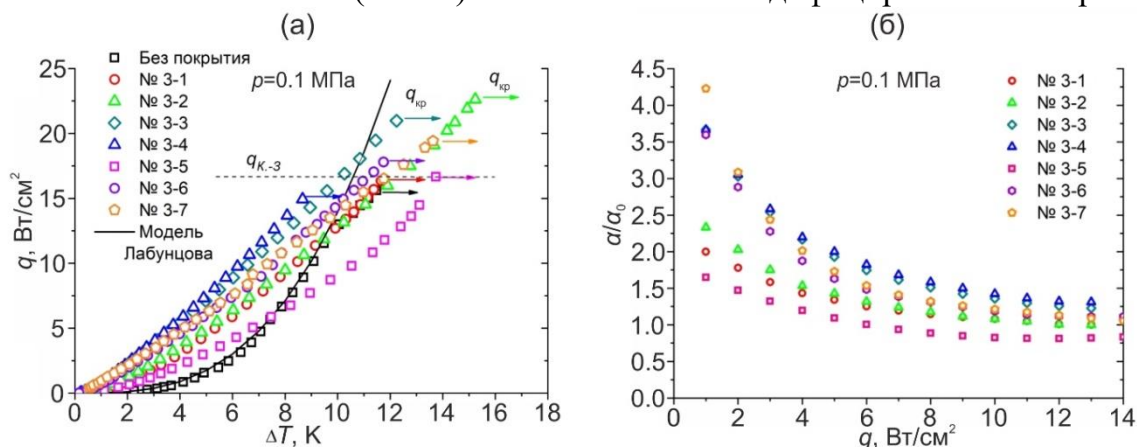


Рис. 3. Экспериментальные данные для трубок диаметром 3 мм: (а) кривые кипения, (б) степень интенсификации.

Количественные оценки плотности центров парообразования (NSD), полученные на основе данных высокоскоростной видеосъемки, в области тепловых потоков до 3 Вт/см² показали, что для гладкого нагревателя наблюдается практически линейный рост NSD при увеличении мощности тепловыделения, в то время как на нагревателях с покрытиями эта величина остается практически постоянной (рисунок 4). Отсутствие существенного увеличения плотности центров при росте q на модифицированных образцах может являться одной из причин снижения степени интенсификации теплообмена при увеличении плотности теплового потока. Кроме того, весьма важно отметить, что уже при тепловом потоке порядка 1 Вт/см² плотность активных центров для гладкой трубки выше, чем для модифицированных образцов. Исключением является образец № 3-2, что связано со значительно более высокой пористостью относительно остальных капиллярно-пористых покрытий. Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о том, что плотность центров парообразования не является единственным определяющим

механизмом интенсификации теплообмена при кипении жидкого азота на исследованных образцах.

Данные высокоскоростной видеосъемки показали, что кипение азота на ТКП-покрытиях осуществляется преимущественно в каналах покрытий, поэтому увеличение эффективной площади теплообмена также не является причиной интенсификации теплоотдачи. В то же время центры парообразования на гладких участках в области малых тепловых потоков не являются стабильными, тогда как на модифицированных образцах наблюдалась непрерывная парогенерация. Также для покрытий с шириной каналов больше отрывного диаметра пузыря на гладком участке ($250\text{--}300\text{ мкм}$ при $q < 3\text{ Вт/см}^2$) характерно формирование крупных паровых конгломератов в каналах между гребнями до момента отрыва паровой фазы от теплоотдающей поверхности. Формирование крупных паровых образований в каналах покрытия приводит к общему увеличению областей тонких менисков жидкости между паровой и твёрдой фазами и, как следствие, к значительному увеличению доли тепла, передаваемого за счёт интенсивного испарения в макрослое в указанных зонах. Данный эффект объясняет максимальную степень интенсификации, полученную на образцах № 3-3, № 3-4, № 3-6 и № 3-7.

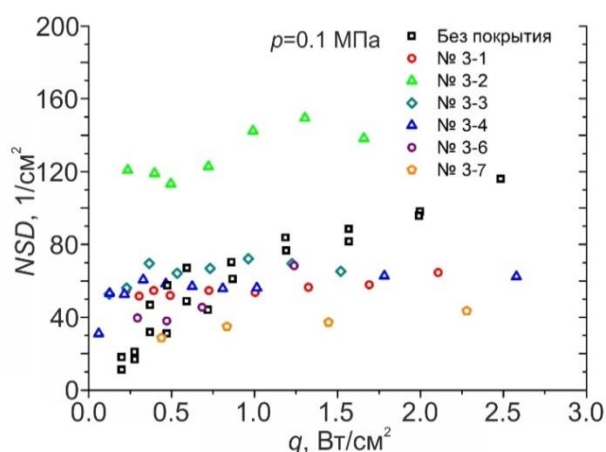


Рис. 4. Плотность центров парообразования для трубок диаметром 3 мм.

На рисунке 5а приведены кривые кипения и критические тепловые потоки для гладкого медного образца и образцов с ТКП-покрытиями с внешним диаметром 16 мм. Также представлены данные [Nakayama W. et al. // Trans. ASME J. Heat Transfer –1980. – Т. 102. – №. 3. – Р. 445-450.; Ройзен Л. И. и др. // ТВТ. –1982. – Т. 20. – №. 2. – С. 304-310.] по теплообмену при кипении жидкого азота на плоском и проволочном (диаметром 1.6 мм) медных нагревателях с гладкой поверхностью, которые, как видно из рисунка, хорошо согласуются с результатами, полученными в настоящей работе.

Из таблицы 1 можно видеть, что величина критического теплового потока для гладкой медной трубки удовлетворительно согласуются с $q_{кр}$ на гладком нагревателе из нержавеющей стали с внешним диаметром 3 мм. В соответствии с [Гогонин И. И. //ТВТ. – 2010. – Т. 48. – №. 1. – С. 84-95.] внешние диаметры исследованных гладких образцов (для 3 и 16 мм, соответственно) лежат в зоне отсутствия влияния размеров нагревателя на величину критического теплового потока при кипении азота, что объясняет полученные результаты. При этом максимальная величина $q_{кр}$ наблюдается для образца № 16-2, имеющего

максимальную пористость, и практически совпадает с $q_{кр}$ для ТКП-покрытия № 3-2 со схожими микроструктурными параметрами, но нанесенного на трубку малого диаметра (3 мм). Полученный результат важен для анализа неоднозначности в интерпретации данных для трубок малого диаметра. А именно: толщина покрытия в проведенных исследованиях на трубке диаметра 3 мм была соизмерима с внешним диаметром гладкой стальной трубки, на которую проводилось напыление, что вносит некоторую неопределенность в вычислении плотности теплового потока через внешнюю поверхность теплообмена. В частности, степень интенсификации теплообмена и величина критического теплового потока могут быть почти в 1.7 раз выше для нагревателя № 3-4 с максимальной толщиной покрытия при нормировании мощности тепловыделения на площадь внешней поверхности гладкого нагревателя (в работе плотность теплового потока вычислялась с учетом толщины покрытия). Стоит также отметить, что для участков № 16-1 и № 16-2 в области высоких тепловых потоков наблюдается ярко выраженный излом кривой кипения, связанный с переходом в предкризисный режим кипения, и который сопровождается значительными периодическими колебаниями температуры поверхности амплитудой (1–2) К и с характерными частотами пульсаций (100–200) мГц.

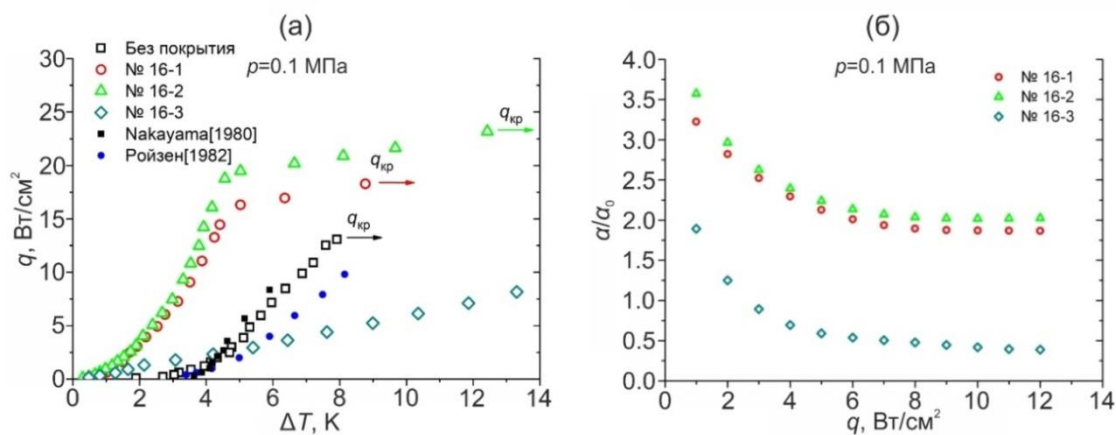


Рис. 5. Экспериментальные данные для трубок диаметром 16 мм: (а) кривые кипения, (б) степень интенсификации.

На рисунке 5б представлена степень интенсификации теплообмена для образцов с ТКП-покрытиями на трубках большого диаметра. Для образцов № 16-1 и № 16-2 наблюдается интенсификация теплообмена до 3.5 раз в области малых тепловых потоков, которая снижается до 2 раз при тепловых потоках, близких к $q_{кр}$ на нагревателе без покрытия. В то же время для образца № 16-3 увеличение коэффициентов теплоотдачи относительно гладкого рабочего участка наблюдается лишь при тепловых потоках до 2 Вт/см². Дальнейшее увеличение мощности тепловыделения приводит к весьма существенной деградации коэффициентов теплоотдачи. Для данного рабочего участка № 16-3 толщина остаточного слоя h составляет порядка 700 мкм. Это важное отличие, по-видимому, и приводит к значительному увеличению гидравлического сопротивления при фильтрации пара из нижних слоев покрытия и фактически лимитирует интенсивность теплопередачи режимом эффективной теплопроводности структуры при условии ее заполнения паровой фазой.

В области малых тепловых потоков на трубчатых нагревателях 16 мм кипение качественно повторяет динамику парообразования на нагревателях малого диаметра. Кадры высокоскоростной видеосъемки кипения на модифицированном нагревателе при высоких мощностях тепловыделения (выше критического теплового потока для гладкого образца) представлены на рисунке 6а. Как отмечалось, в этой области тепловых потоков наблюдались существенные колебания температуры поверхности нагрева. Анализ кадров видеосъемки кипения показал схожий пульсирующий характер поведения межфазной границы. По всей поверхности нагревателя образовывались толстые «паровые чулки», которые периодически отрывались от поверхности нагрева, обеспечивая последующий подток жидкости к теплоотдающей поверхности. Далее наблюдалась интенсификация парообразования с последующим периодическим формированием новых паровых конгломератов.

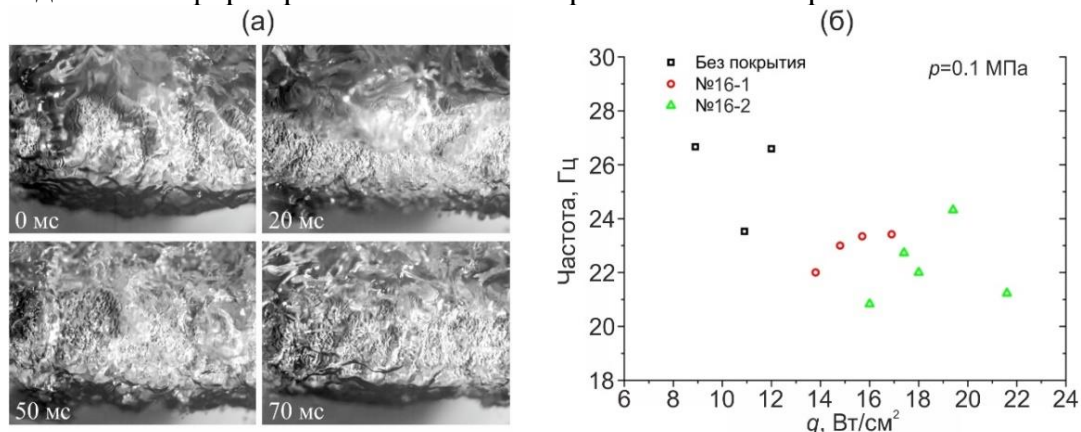


Рис. 6.: (а) Фотографии кипения на образце № 16-2 при $q = 22,7 \text{ Вт/см}^2$; (б) зависимость частоты отрыва паровых конгломератов от плотности теплового потока.

Зависимость частоты отрыва паровых образований от плотности теплового потока представлена на рисунке 6б. Аналогичное поведение межфазной поверхности отмечалось и для гладкого нагревателя вблизи кризисных значений теплового потока, однако существенного изменения наклона кривой кипения в этом случае не было. Частота отрыва паровых образований в таком режиме кипения слабо зависит от мощности тепловыделения и составляет (23–28) Гц. При этом минимальные значения плотности теплового потока, при которых происходил этот периодический процесс, лежат вблизи точек изменения наклонов кривых кипения для модифицированных нагревателей. Именно этот периодический процесс, сопровождающийся соответствующими изменениями паросодержания в пристенном двухфазном слое и доли общей смоченной поверхности, определяет снижение теплоотдачи в предкризисных режимах для тепловыделяющих поверхностей с покрытиями. Следует также отметить существенное различие в частотах пульсаций температуры и межфазной поверхности. Такое различие, вероятно, связано с тем, что наибольшие амплитуды колебаний температуры поверхности нагревателя соответствуют, как правило, моментам слияния паровых конгломератов от нескольких близлежащих друг к другу областей и образования более крупного «парового чулка» на тепловыделяющей поверхности. При этом за счет тепловой инерционности

исследованных образцов высокочастотные пульсации температуры, очевидно, «сглаживаются» и не имеют столь выраженного характера.

В разделе 3.2 представлены результаты исследования плоских медных нагревателей при атмосферном и пониженном давлениях. На рисунке 7а представлены данные по интенсификации теплообмена на медных покрытиях, полученных методом 3D-печати, при атмосферном давлении. Как можно видеть, наблюдается аналогичная тенденция снижения степени интенсификации теплообмена по мере увеличения мощности тепловыделения при кипении жидкого азота на поверхностях со схожими по морфологии ТКП-покрытиями. Величина интенсификации для данных типов покрытий находится несколько выше (до 6 раз для нагревателя № 1 и до 4 раз для нагревателя № 2). Качественные оценки плотности центров и динамики парообразования повторяют таковые для исследованных покрытий, полученных методом направленного плазменного напыления. Поэтому вышеописанные выводы о механизмах интенсификации теплообмена справедливы и в данном случае. Однако отличительной особенностью кипения азота на высокотеплопроводных медных покрытиях являлось парообразование преимущественно в порах регулярных гребней покрытия. Такой характер парогенерации увеличивает эффективную площадь теплообмена и может быть дополнительной причиной интенсификации теплообмена. Стоит также отметить, что для нагревателя № 2 критический тепловой поток совпадает с $q_{кр}$ гладкого образца (таблица 2). Этот факт может быть объяснен наличием у данного участка широких зон (более 1 мм) между гребнями со значительно более тонким слоем покрытия (сопоставимым с характерным размером сплавляемых друг с другом частиц порошка), в которых, по-видимому, в первую очередь возникают очаги локального пленочного кипения, приводящие к распространению кризиса теплоотдачи по всей теплоотдающей поверхности. Существенное снижение давления до 0.017 МПа приводит к уменьшению степени интенсификации теплообмена для обоих модифицированных нагревателей (рисунок 7б), также как и критических тепловых потоков. Как и в случае атмосферного давления, плотность центров парообразования в области малых тепловых потоков на нагревателях с покрытиями существенно превышала аналогичную величину для гладкого участка.

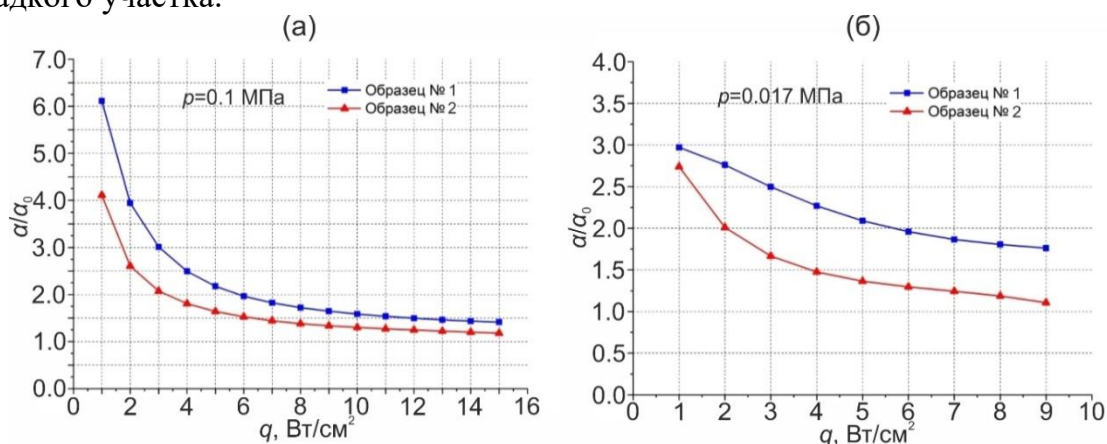


Рис.7. Степень интенсификации теплообмена при различных давлениях для нагревателей с покрытиями, полученными 3D-печатью:
(а) 0.1 МПа; (б) 0.017 МПа.

В разделе 3.3 обсуждаются результаты исследования теплообмена и кризиса теплоотдачи на плоских дюралюминиевых нагревателях. На рисунке 8а представлена степень интенсификации теплообмена при кипении азота на дюралюминиевых нагревателях с МДО-покрытиями при атмосферном и пониженных давлениях. Так для образца № 1 наблюдается существенная интенсификация теплообмена при атмосферном давлении вплоть до 60% в области малых тепловых потоков, которая снижается по мере увеличения мощности тепловыделения. При давлении 0.05 МПа максимальное увеличение коэффициентов теплоотдачи лежит значительно ниже (до 20%), приближаясь к погрешности измерения, и также было получено при малых тепловых потоках. При максимальном снижении рабочего давления наличие покрытия на поверхности нагревателя, полученного методом микродугового оксидирования при использовании гидроксида калия в качестве электролита, не влияет на теплообмен во всем исследованном диапазоне тепловых нагрузок вплоть до кризиса теплоотдачи. Иная зависимость коэффициентов теплоотдачи от плотности теплового потока наблюдалась для МДО-покрытия № 2 (рисунок 8б). В условиях атмосферного давления наличие такого покрытия на теплоотдающей поверхности приводит к интенсификации теплообмена на (50–60)%, при этом данная величина практически не меняется при изменении теплового потока вплоть до кризиса теплоотдачи. Такая тенденция может быть связана с малыми диаметрами пор покрытия (порядка 2 мкм), которые активируются постепенно при достижении определенных перегревов теплоотдающей поверхности по мере увеличения теплового потока. Кроме того, образование парового пузыря на поверхности теплообмена снижает локальную температуру вблизи данного конкретного центра и в связи с высокой плотностью пор затрудняет активацию соседних для него пор. Для образца № 2 практически отсутствует интенсификация теплообмена при пониженных давлениях, которая по величине приближается к погрешности измерения. Качественный анализ видеосъемки показал существенное увеличение плотности активных центров парообразования на МДО-покрытиях при атмосферном давлении в области малых тепловых нагрузок, что, по-видимому, является основной причиной интенсификации теплообмена. Анализ выражения, определяющего критический радиус зародышеобразования, показал, что для жидкого азота при перегреве 1 К в условиях атмосферного давления данная величина составляет 1.5 мкм и сопоставима с размерами пор на МДО-покрытиях. Однако, снижение давления приводит к существенному росту данного значения (в 5 раз при давлении 0.017 МПа). Как следствие, поры таких размеров, как на исследованных покрытиях, в области низких давлений практически не влияют на процесс кипения, что объясняет отсутствие интенсификации теплообмена для нагревателей № 1 и № 2. Стоит также отметить, что значимого влияния таких покрытий на величину КТП не наблюдалось при всех исследованных давлениях.

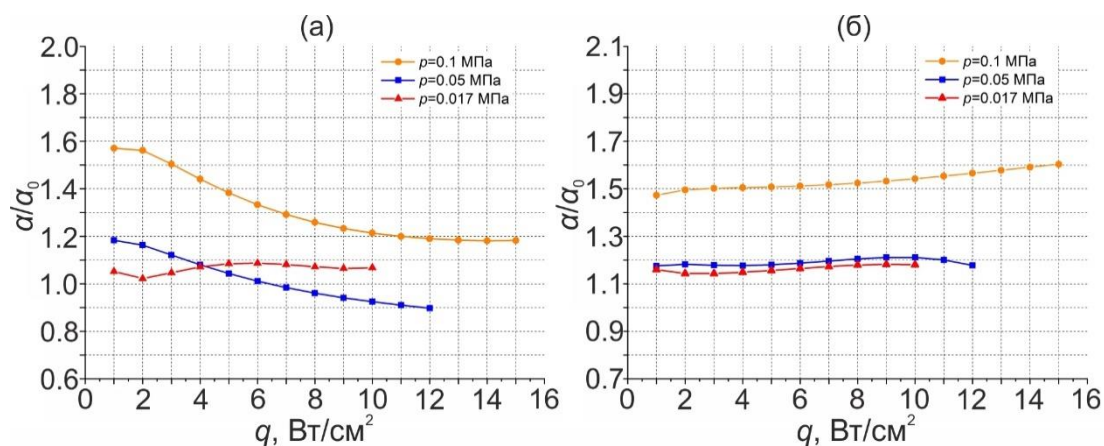


Рис.8. Степень интенсификации теплообмена при различных давлениях для нагревателей с МДО-покрытиями: (а) образец № 1; (б) образец № 2.

На рисунке 9 представлено сравнение результатов по интенсификации теплообмена при кипении жидкого азота при атмосферном давлении настоящего исследования и других работ (на пористых поверхностях). Как можно видеть, данные, полученные в работе [Ройзен Л. И. и др. // ТВТ. –1982. – Т. 20. – №. 2. – С. 304–310.] на покрытиях из алюминия с пористостью (20–30)%, изготовленных традиционным методом плазменного напыления, лежат близко к результатам настоящей работы для МДО-покрытия в области низких тепловых потоков (максимальная интенсификация составляет порядка 50%). Используя аналогичный метод создания покрытий, гораздо более высоких показателей удалось достигнуть в работе [Scurlock R. G. // Cryogenics. –1995. – Т. 35. – №. 4. – Р. 233–237.], где авторы для увеличения пористости в процессе напыления использовали смесь порошка алюминия и полиэстера. После напыления образцы выдерживались при высокой температуре для разложения и испарения полиэстера, в результате чего получались покрытия с высокой пористостью. Как максимальное увеличение коэффициентов теплоотдачи (до 6 раз), так и снижение степени интенсификации теплообмена по мере роста плотности теплового потока схожи с данными, полученными в настоящей работе для модифицированного методом 3D-печати медного плоского нагревателя.

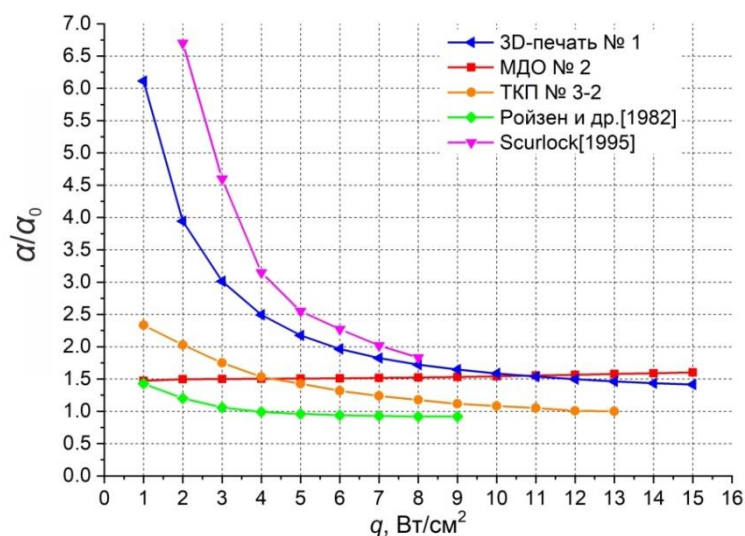


Рис.9. Сравнение степени интенсификации теплообмена для пористых покрытий с данными других авторов при атмосферном давлении.

В четвертой главе представлены результаты экспериментального исследования влияния трехмерных капиллярно-пористых покрытий из бронзы на развитие кризиса теплоотдачи при нестационарной подаче тепловой нагрузки, а также на динамику охлаждения сильно перегретой медной пластины при пленочном течении жидкого азота.

Данные по динамике образования паровой фазы и развития кризиса тепловыделения на гладком трубчатом нагревателе диаметром 3 мм и нагревателях со структурированными капиллярно-пористыми покрытиями № 3-5, № 3-6, № 3-7 при ступенчатой подаче тепловой нагрузки представлены в разделе 4.1. Анализ видеоданных показал, что после подачи импульса тока для гладкого нагревателя уже при относительно низких тепловых потоках $q \sim 0.5 q_{кр}$ образуются быстрорастущие паровые пузыри, на границе которых возникают самоподдерживающиеся фронты испарения, распространяющиеся вдоль поверхности с высокой скоростью. В результате слияния фронтов от различных центров парообразования на нагревателе формируется пленка пара, которая впоследствии разрушается и устанавливается режим развитого пузырькового кипения. Такая динамика развития нестационарного процесса наблюдалась при тепловых потоках меньше величины 13.5 Вт/см^2 . При дальнейшем увеличении мощности тепловыделения после слияния фронтов наблюдался переход к стабильному пленочному кипению, минуя стадию развитого пузырькового кипения. Данную пороговую величину в литературе принято называть минимальным нестационарным критическим тепловым потоком. Как можно видеть, для исследованного нагревателя без покрытия это значение ниже величины $q_{кр}$ примерно на 15%.

Наличие ТКП-покрытий на нагревателях приводит к существенному изменению динамики парообразования и развития кризиса теплоотдачи. Так, даже при тепловых потоках, превышающих величину $q_{кр}$, до перехода к пленочному режиму кипения сначала наблюдался переход в режим развитого пузырькового кипения. Более того, быстрый переход к режиму устойчивого пленочного кипения, минуя стадию развитого пузырькового кипения, для модифицированных образцов наблюдается при тепловых потоках, более чем в 2 раза превышающих величину критического теплового потока при стационарном тепловыделении. Таким образом, для исследованных нагревателей с покрытиями, полученными направленным плазменным напылением, происходит вырождение развития кризиса теплообмена в условиях нестационарного тепловыделения при $q < q_{кр}$, а величина минимального критического теплового потока совпадает с величиной КТП в условиях стационарного тепловыделения.

Одним из важнейших условий наступления кризиса при нестационарном тепловыделении, как было показано в работе [Павленко А. Н., Чехович В. Ю. // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. – 1989. – Т. 2. – С. 3-9.], является полное испарение жидкости в двухфазном слое у теплоотдающей поверхности в период роста паровых пузырей до их отрыва, когда подтекание и интенсивное перемешивание жидкости отсутствует. Для гладкого нагревателя это условие реализуется за счет быстрого распространения и слияния фронтов испарения (рисунок 10). В то же время для структурированных образцов после появления первых паровых пузырей наблюдается их быстрый рост и дальнейшее распространение фронтов испарения преимущественно вдоль регулярных крупных каналов структурированного покрытия (рисунок 10). При этом

отсутствует ярко выраженная направленность развития фронтов вдоль поверхности нагревателя. Это приводит к тому, что отрыв паровой фазы в этих зонах происходит до момента полного запаривания нагревателя и, таким образом, к нарушению условия наступления кризиса теплоотдачи. Кроме того, при одинаковых значениях плотности теплового потока при ступенчатом набросе тепла температура вскипания жидкости для гладкого нагревателя заметно выше, чем температура вскипания для нагревателей с покрытиями. Это приводит к тому, что на момент вскипания для модифицированных образцов в пристенном слое запасается меньше тепла по сравнению с критическим значением.

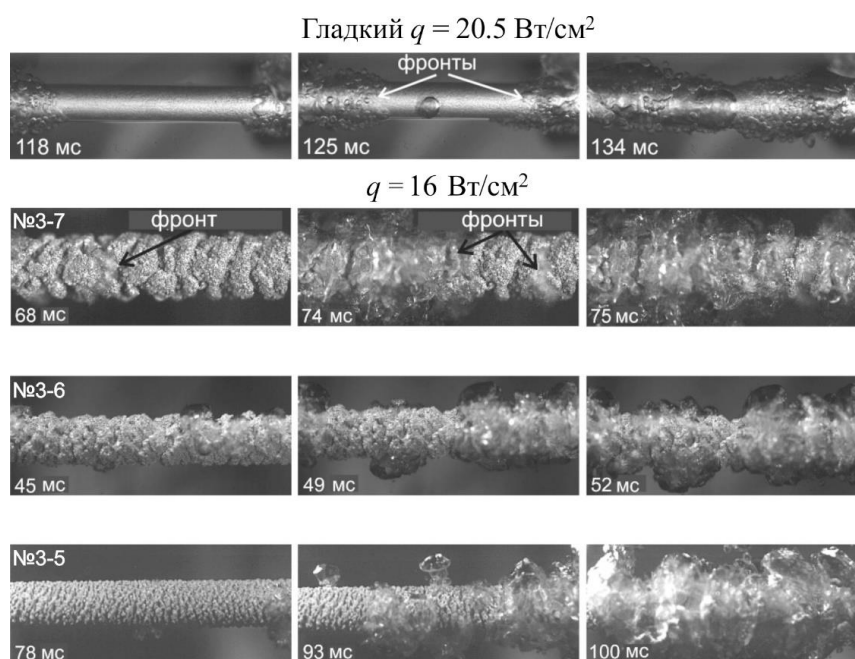


Рис.10. Кадры распространения фронтов испарения для гладкого и модифицированных нагревателей при ступенчатом тепловыделении.

Также в работе было исследовано влияние ТКП-покрытия на нестационарный процесс повторного смачивания сильно перегретой медной пластины при пленочном течении жидкого азота (раздел 4.2). На рисунке 11 приведено сравнение зависимостей температуры пластины без покрытия и пластины с покрытием от времени в процессе охлаждения стекающей пленкой жидкости при различных значениях числа Рейнольдса. Как можно видеть, характер и темп снижения температуры пластины существенно отличаются для нагревателя с покрытием и без него. Наличие покрытия приводит к значительному снижению времени полного охлаждения нагревателя (более чем в 3 раза) от заданной температуры $T_0 = 190 \text{ К}$ до температуры насыщения жидкого азота. Как отмечалось ранее, крупные гребни покрытия имеют несимметричную форму, поэтому эксперименты проводились как с прямой, так и с обратной ориентациями покрытия относительно потока жидкости. Минимальное время охлаждения наблюдается для ориентации поверхности, при котором поток жидкости набегает на более крутую часть гребней (обратная ориентация). Как показал анализ полученных данных, наблюдается тенденция уменьшения времени полного охлаждения с увеличением степени орошения. Наблюдаемое в данных опытах значительное снижение общего времени охлаждения пластины со структурированным капиллярно-пористым покрытием

обусловлено развитием высокоинтенсивного теплообмена в переходном и пузырьковом режимах кипения (на этапе начала распространения фронта повторного смачивания, соответствующего характерному излому кривой на графике) при значительно более высоких значениях температуры пластины. Этот эффект может быть объяснен проникновением жидкости за счет капиллярных сил в поры, и, как следствие, резким снижением температуры верхних слоев покрытия. Кроме того, для такой высокопористой структуры подвод тепла из медной пластины к верхним слоям покрытия фактически лимитируется неплотной упаковкой нанесенных частиц. Очевидно, что количество запасенного тепла в пористом покрытии с низкой эффективной (каркасной) теплопроводностью относительно мало. В работе [Starodubtseva I. P., Kuznetsov D. V., Pavlenko A. N. // Int. J. of Heat and Mass Transfer. – 2021. – Т. 176. – Р. 121388.] было представлено численное моделирование процесса повторного смачивания медной пластины с таким покрытием, которое с хорошей точностью воспроизводит полученные экспериментальные результаты.

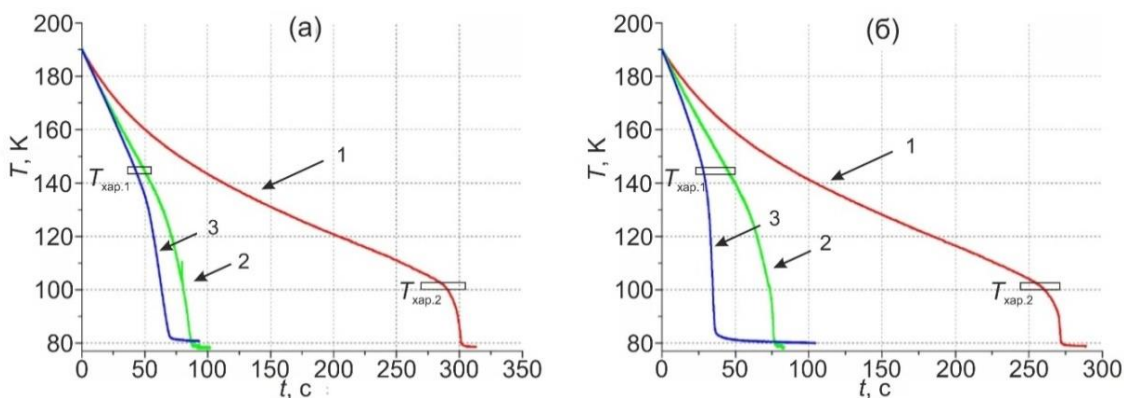


Рис.11. Зависимость температуры нагревателя от времени в процессе охлаждения при максимальной температуре 215K: (а) $Re=250$ (350 для гладкого), (б) $Re=1010$; 1 – гладкий нагреватель, 2 – с покрытием (прямая ориентация), 3 – с покрытием (обратная ориентация).

Заключение

В работе представлены основные результаты комплексного исследования по влиянию пористых покрытий, полученных различными методами, на теплообмен и кризисные явления при кипении азота, включая режимы нестационарного нагрева и охлаждения.

1. Показано, что наличие пористых покрытий на поверхности нагревателей приводит к существенному увеличению коэффициентов теплоотдачи (вплоть до 6 раз для метода 3D печати) в области малых тепловых потоков, а также к увеличению критических тепловых потоков (более чем на 70% для метода направленного плазменного напыления) в условиях стационарного тепловыделения и атмосферного давления. На основе анализа данных высокоскоростной видеосъемки предложены основные механизмы интенсификации теплообмена;

2. Показано, что существенное снижение давления может приводить к уменьшению степени интенсификации теплообмена на исследованных пористых покрытиях по сравнению с гладким нагревателем и даже к отсутствию эффекта от модификации поверхности для метода микродугового оксидирования. Такая

тенденция связана с существенным увеличением (в 5 раз при давлении 0.017 МПа) критического радиуса зародышеобразования в области пониженных давлений и, как следствие, отсутствием при кипении азота вклада в теплоотдачу пор покрытий с меньшими размерами;

3. Впервые показано, что наличие капиллярно-пористых покрытий, полученных методом направленного плазменного напыления, на поверхности нагревателей приводит к вырождению развития кризиса кипения в области $q < q_{кр}$ при резком нарастании мощности тепловыделения для жидкого азота. Более того, быстрый переход к режиму устойчивого пленочного кипения, минуя стадию развитого пузырькового кипения, для модифицированных образцов наблюдается при тепловых потоках, более чем в 2 раза превышающих величину критического теплового потока при стационарном тепловыделении ($q_{кр}$). Такой эффект связан с меньшим количеством тепла, запасённым в слое метастабильной жидкости на момент вскипания, а также ярко выраженной направленностью распространения фронтов испарения только вдоль регулярных каналов покрытий;

4. Показано значительное сокращение (более чем в 3 раза) времени полного охлаждения сильно перегретой платины с ТКП-покрытием относительно гладкого нагревателя в режиме повторного смачивания при пленочном охлаждении жидким азотом. Наблюдаемое в данных опытах значительное снижение общего времени охлаждения модифицированной пластины обусловлено развитием высокоинтенсивного теплообмена в переходном и пузырьковом режимах кипения при значительно более высоких значениях температуры.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих журналах из перечня ВАК:

1. Кузнецов Д.В., Павленко А.Н. Особенности динамики кипения азота на микроструктурированных пористых покрытиях // Теплофизика и Аэромеханика. – 2024. – Т. 31, № 3. – С. 515–520.
2. Kuznetsov D.V., Pavlenko A.N. The effect of porous coatings obtained by various methods on heat transfer and crisis phenomena during nitrogen boiling including non-stationary heating and cooling // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences. – 2024. – Vol. 578. – P. 01015.
3. Kuznetsov D.V., Pavlenko A.N. Heat transfer during nitrogen boiling on surfaces modified by microarc oxidation // Energies. – 2022. – Vol. 15, № 16. – P. 5792.
4. Pavlenko A.N., Kuznetsov D.V., Bessmeltsev V.P. Heat transfer enhancement during pool boiling of nitrogen on porous coatings produced by selective laser melting/sintering (SLM/SLS) // Journal of Engineering Thermophysics. – 2022. – Vol. 31, № 1. – P. 1–10.
5. Pavlenko A.N., Kuznetsov D.V., Bessmeltsev V.P. Experimental study on heat transfer and critical heat flux during pool boiling of nitrogen on 3D printed structured copper capillary-porous coatings // Journal of Engineering Thermophysics. – 2021. – Vol. 30, № 3. – P. 341–349.
6. Pavlenko A.N., Kuznetsov D.V. Development of methods for heat transfer enhancement during nitrogen boiling to ensure the stabilization of HTS devices // Journal of Engineering Thermophysics. – 2021. – Vol. 30, № 4. – P. 526–562.

7. Starodubtseva I.P., Kuznetsov D.V., Pavlenko A.N. Experiments and modeling on cryogenic quenching enhancement by the structured capillary-porous coatings of surface // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2021. – Vol. 176. – P. 121388.
8. Kuznetsov D.V., Pavlenko A.N. Intensification of heat transfer during pool boiling of nitrogen on surfaces with capillary-porous coatings produced by 3D-printing // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing. – 2021. – Vol. 2039, № 1. – P. 012013.
9. Kuznetsov D.V., Pavlenko A.N., Chernyavskiy A.N., Radyuk A.A. Study of the effect of three-dimensional capillary-porous coatings with various microstructural parameters on heat transfer and critical heat flux at pool boiling of nitrogen // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing. – 2020. – Vol. 1677, № 1. – P. 012089.
10. Kuznetsov D.V., Pavlenko A.N., Radyuk A.A., Komlev D.I., Kalita V.I. Features of heat transfer during pool boiling of nitrogen on surfaces with capillary-porous coatings of various thicknesses // *Journal of Engineering Thermophysics*. – 2020. – Vol. 29. – P. 375–387.
11. Pavlenko A.N., Kuznetsov D.V. Experimental study of the effect of structured capillary-porous coating on rewetting dynamics and heat transfer at film cooling by liquid nitrogen // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing. – 2018. – Vol. 1105, № 1. – P. 012053.
12. Pavlenko A.N., Kuznetsov D.V., Surtaev A.S. Experimental study of the influence of structured capillary-porous coatings on the dynamics of development of transient processes and the crisis phenomena at stepwise heat release // *Journal of Engineering Thermophysics*. – 2018. – Vol. 27. – P. 285–293.
13. Павленко А.Н., Цой А.Н., Суртаев А.С., Кузнецов Д.В. Экспериментальное исследование повторного смачивания перегретой пластины со структурированным капиллярно-пористым покрытием стекающей пленкой жидкости // *Теплофизика высоких температур*. – 2018. – Т. 56, № 3. – С. 424–430.
14. Surtaev A.S., Pavlenko A.N., Kuznetsov D.V., Kalita V.I., Komlev D.I., Ivannikov A.Y., Radyuk A.A. Heat transfer and crisis phenomena at pool boiling of liquid nitrogen on the surfaces with capillary-porous coatings // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2017. – Vol. 108. – P. 146–155.