



УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора ИТ СО РАН

К.Ф.-м.н. Д.Ф. Сиковский

«07» июля 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН)

Диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника **«Влияние пористых покрытий на теплообмен и развитие кризисных явлений при кипении азота, включая режимы нестационарного нагрева и охлаждения»** выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН).

В период подготовки диссертации с 2016 по 2025 год соискатель Кузнецов Денис Владимирович работал в лаборатории низкотемпературной теплофизики ИТ СО РАН в должности инженера-исследователя и младшего научного сотрудника. В 2015 г. окончил магистратуру Новосибирского государственного университета по направлению «физика».

Соискатель проходил обучение в очной аспирантуре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук с 2015 по 2019 год.

Справка о сдаче кандидатских экзаменов по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника выдана в 2019 г. Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, член-корреспондент Российской академии наук Павленко Александр Николаевич работает в должности заведующего лабораторией низкотемпературной теплофизики в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Цель работы

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 ступенчатом тепловыделении и в режимах повторного смачивания при пленочном течении.

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

значительное внимание исследователей в данной области уделяется изучению теплообмена при кипении диэлектрических и криогенных 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 ВТСП-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, 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 тоже 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 тоже 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.

Личный вклад

Вклад автора в исследования состоял в модернизации стенда для проведения опытов в условиях субатмосферных давлений, разработке и изготовлении рабочих областей для проведения опытов на нагревателях с различной геометрией, определяющем участии в проведении всех описанных в работе экспериментов, обработке, анализе и интерпретации опытных данных, а также в подготовке статей для публикации в рецензируемых журналах и докладов на конференциях.

Поставлены и решены следующие задачи

1. Разработаны и изготовлены отдельные узлы экспериментальной установки для проведения опытов на различных типах нагревателей в широком диапазоне приведенных давлений.
2. Проведен анализ микроструктурных характеристик пористых покрытий, полученных с использованием метода направленного плазменного напыления, 3D-печати и микродугового оксидирования (МДО).
3. Исследованы интенсивность теплообмена и величина критического теплового потока при кипении на гладких и модифицированных нагревателях в условиях стационарного тепловыделения при атмосферном и пониженных давлениях.
4. Изучено влияние трехмерных капиллярно-пористых (ТКП) покрытий, полученных методом направленного плазменного напыления, на динамику парообразования и развитие кризиса теплоотдачи в условиях ступенчатого тепловыделения.
5. Исследовано влияние ТКП-покрытия на динамику повторного смачивания сильно перегретой пластины при пленочном течении азота.
6. Проведен сравнительный анализ полученных экспериментальных данных с существующими моделями и данными других авторов.

Достоверность полученных 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.

Научная новизна изложенных в диссертационной 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 вырождению

Список основных публикаций по материалам диссертации, опубликованных в научных журналах, рекомендованных ВАК РФ:

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.

Результаты научных исследований данной диссертационной работы были получены в рамках выполнения следующих проектов:

1. РФФИ № 15-08-03221 А. Исследование нестационарного теплообмена и переходных процессов при кипении и испарении на микроструктурированных поверхностях и поверхностях с покрытиями. (Исполнитель);
2. РФФИ № 15-38-20982 мол_а_вед. Экспериментальное исследование теплообмена и механизмов развития кризисных явлений при кипении жидкостей на поверхностях с пористым покрытием. (Исполнитель);
3. РФФИ № 18-08-00402 А. Исследование гидродинамики, теплообмена, переходных процессов и кризисных явлений при кипении и испарении при пленочных течениях на новых микроструктурированных поверхностях. (Исполнитель);
4. РФФИ № 18-38-00726 мол_а. Исследование механизмов интенсификации и кризиса теплообмена при кипении жидкости на нагревателях различного диаметра с трехмерными капиллярно-пористыми покрытиями. (Руководитель);
5. РНФ № 19-19-00180. Комплексные исследования по разработке наиболее эффективных методов теплообмена при кипении и испарении с использованием микротекстурирования теплоотдающей поверхности. (Исполнитель);
6. Минобрнауки РФ № 075-15-2020-770. Фундаментальные основы расчета и принципов построения энергетических систем, основанных на эффекте сверхпроводимости. (Исполнитель).
7. Проект РАН III.18.2.3: Высокоэффективные режимы тепломассообмена и кризисные явления при кипении, испарении жидкостей и их смесей при различных законах тепловыделения, дистилляции, в т.ч. на модифицированных поверхностях (Гос. рег. 01201350441);

8. Проект РАН III.18.2.3: Разработка методов интенсификации тепломассообмена при кипении, испарении жидкостей и их смесей при различных законах тепловыделения, дистилляции, в т.ч. с использованием новых микроструктурированных поверхностей и покрытий (Гос. рег. АААА-17-117030310025-3) (исполнитель);

9. Проект РАН III.18.2.3: Развитие научных основ по разработке высокоэффективных методов интенсификации тепломассообмена при кипении, испарении жидкостей, гидратообразовании и разделении смесей при дистилляции (Гос. рег. 121031800216-1) (исполнитель).

Полнота работы

Диссертация «Влияние пористых покрытий на теплообмен и развитие кризисных явлений при кипении азота, включая режимы нестационарного нагрева и охлаждения» младшего научного сотрудника Кузнецова Дениса Владимировича является завершённой научно-исследовательской работой, содержащей новые результаты в области исследований по интенсификации теплообмена при пузырьковом кипении жидкости на микроструктурированных пористых покрытиях.

Решение о рекомендации диссертационной работы к защите

Диссертация «Влияние пористых покрытий на теплообмен и развитие кризисных явлений при кипении азота, включая режимы нестационарного нагрева и охлаждения» младшего научного сотрудника Кузнецова Дениса Владимировича рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника.

Заключение принято 27 июня 2025 г. на расширенном заседании секции № 1 «Теплофизика и гидрогазодинамика многофазных и многокомпонентных систем (включая фазовые переходы, волновые явления и акустику)» Ученого совета ИТ СО РАН под руководством заместителя председателя секции № 1 д.ф.-м.н. Чиннова Е.А.

На заседании присутствовали 31 человек (в том числе, 18 членов секции № 1), из них 2 члена-корреспондента РАН, 2 профессора РАН, 15 докторов наук, 10 кандидатов наук.

Результаты открытого голосования по вопросу о принятии заключения по диссертации Кузнецова Д.В.: «за» – 31, «против» – 0, «воздержались» – 0 (Протокол № 4 от 27 июня 2025 г.).

Председатель семинара

Заместитель председателя секции № 1 Ученого совета ИТ СО РАН
д.ф.-м.н., г.н.с. ИТ СО РАН

 /Чиннов Е.А./.

Секретарь семинара

Секретарь секции № 1 Ученого совета ИТ СО РАН
д.ф.-м.н., профессор РАН, г.н.с. ИТ СО РАН

 /Пахомов М. А./.

27 июня 2025 г.