



УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора института

О.В.Шарыпов

июль 2023 г.

М.П.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ ТЕПЛОФИЗИКИ
ИМ. С.С. КУТАТЕЛАДЗЕ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ АКАДЕМИИ НАУК (ИТ СО РАН)

Диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук «Интенсификация теплообмена при кипении в тонких горизонтальных слоях жидкости на капиллярно-пористых покрытиях» выполнена Швецовым Д.А. в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С.Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

В 2019 году Швецову Д.А. присуждена степень магистра, диплом магистра 105408 0034097. В настоящее время Швецов Д.А. работает инженером- исследователем в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С.Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Актуальность темы. Быстрое развитие технологий во многих отраслях промышленности предъявляет 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. Модификация поверхности нагрева дает возможность существенно уменьшить температурный напор и увеличить критический тепловой поток, делая способ охлаждения кипением намного более эффективным и безопасным.

В целом ряде технологий, разнообразных схемных решениях, относящихся к существующим и перспективным системам охлаждения, теплообмен осуществляется при испарении и кипении в тонких слоях жидкости (термосифоны, паровые камеры и тепловые трубы, слои жидкости заданной толщины во вращающихся системах, тонкопленочные теплообменники, некоторые конструкции диффузионных паромасляных

насосов). Применение тонкопленочного теплообмена 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.

Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ №14-08-00691, гранта РФФИ №18-08-00545, РНФ №19-19-00180, крупного научного проекта № 075-15-2020-770 «Разработка фундаментальных основ расчета и принципов построения энергетических систем, основанных на эффекте сверхпроводимости» Министерства науки и образования Российской Федерации, Мегагранта Минобрнауки России №075-15-2021-575, выполняемого под руководством ведущего ученого – профессора Сундена и Мегагранта Минобрнауки России № 075-15-2022-1043, выполняемого под руководством ведущего ученого – профессора Маркидеса.

Цель работы:

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.

Поставлены и решены следующие задачи:

1. Исследование влияния геометрических характеристик и теплопроводности капиллярно-пористых покрытий на теплообмен при испарении и кипении жидкости. В работе применяются 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 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 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 капиллярно-пористыми покрытиями, с результатами, полученными на гладкой поверхности.

4. Проведение сравнительного анализа данных по критическим тепловым потокам, полученных на капиллярно-пористых покрытиях, с известными расчетными зависимостями.

Научная новизна основных положений, результатов и выводов, полученных в диссертации:

1. Впервые исследовано влияние геометрических характеристик и теплопроводности 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 капиллярно-пористыми покрытиями с различными геометрическими характеристиками и теплопроводностью. Впервые исследован теплообмен в условиях очень низких приведенных давлений $P/P_{cr} \sim 10^{-5}$.

3. Получены новые результаты по критическому тепловому потоку на поверхностях с 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 капиллярно-пористых покрытиях. Проведено сравнение новых экспериментальных данных с известными расчетными зависимостями.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Полученная в исследовании 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, изучить условия перехода теплообмена от кипения в тонких слоях жидкости к кипению в большом объеме и определить для капиллярно-пористых покрытий с различными геометрическими характеристиками и теплопроводностью наиболее приемлемые режимные параметры (давление, высота слоя, плотность теплового потока) по степени интенсификации теплообмена и повышению критического теплового потока. Полученные данные могут применяться при создании тепловых труб, паровых камер и термосифонов различного назначения.

Степень достоверности результатов:

Степень достоверности 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 и теплопроводности капиллярно-пористых покрытий на теплообмен при испарении и кипении в горизонтальных слоях жидкости.
2. Результаты экспериментального исследования влияния высоты горизонтального слоя жидкости и давления на теплообмен и критический тепловой поток при испарении и кипении для 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 капиллярно-пористых покрытиях, с соответствующими данными, полученными для гладкой поверхности, а также с известными расчетными зависимостями, разработанными для условий кипения в большом объеме жидкости.

Личный вклад автора:

Основные научные результаты и выводы, послужившие основой диссертации и выносимые на защиту, получены соискателем самостоятельно, либо при его определяющем вкладе. Постановка решаемых задач проводилась диссертантом совместно с научным руководителем д.ф.–м.н. А.Н. Павленко и к.т.н. В.И. Жуковым. Автор проводил лично и непосредственно участвовал в проектировании и сборке узлов экспериментального стенда и использованных рабочих участков, отладке экспериментальных методик, подготовке и проведении всех описанных в работе экспериментов. Совместно с к.т.н. В.И. Жуковым и инж. А.Е. Брестером автор проводил обработку и анализ опытных данных, обсуждения при подготовке статей для публикации в рецензируемых журналах и докладов на конференциях.

Список работ автора по тематике диссертации, опубликованных в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК:

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. DOI:10.56304/S0040363622110078 (из перечня ВАК).
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. 2 (из перечня ВАК).
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. V. 163. P. 120488. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120488 (из перечня ВАК).
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. V. 1683. № 2. P. 22085 DOI: 10.1088/1742-6596/1683/2/022085 (из перечня ВАК).
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. V. 1683. P. 022086. DOI: 10.1088/1742-6596/1683/2/022086 (из перечня ВАК).
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.V. 2039. № 1. P. 012033. DOI: 10.1088/1742-6596/2039/1/012033 (из перечня ВАК).
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. V. 2119. P. 012082. DOI:10.1088/1742-6596/2119/1/012082 (из перечня ВАК).

Апробация работы:

- Международный семинар с элементами научной школы для молодых ученых (ISHM V, VI) (Новосибирск, 2016; 2017);

– Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 2017; 2019, диплом третьей степени; 2020; 2021; 2022 г. (диплом второй степени);

– III Международная Российско-Казахстанская научно-практическая конференция «Химические технологии функциональных материалов» (Новосибирск, 2017 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 с международным участием «Актуальные Вопросы Теплофизики и Физической Гидрогазодинамики» (Шерегеш, 2023 г., диплом за лучшую работу).

Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите:

Диссертация Швецова Д.А., посвященная экспериментальному исследованию теплообмена и критического теплового потока при испарении и кипении на микроструктурированных капиллярно-пористых покрытиях в широком диапазоне изменения высоты горизонтального слоя жидкости и давления, соответствует паспорту специальности 1.3.14 – “Теплофизика и теоретическая теплотехника” для физико-математических наук.

Решение о рекомендации к защите.

Диссертация «**Интенсификация теплообмена при кипении в тонких горизонтальных слоях жидкости на капиллярно-пористых покрытиях**» Швецова

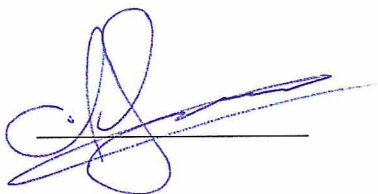
Дмитрия Анатольевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – “Теплофизика и теоретическая теплотехника”. Представленная в диссертации экспериментальная информация может использоваться для проектирования микроструктурированных покрытий с целью повышения коэффициента теплоотдачи и критического теплового потока при кипении в тонких слоях жидкости. Исследованные в работе механизмы интенсификации теплообмена и условия перехода теплообмена от кипения в тонких слоях жидкости к кипению в большом объеме при различных приведенных давлениях представляют собой важное научное достижение в области физики кипения, развития научных основ по разработке высокоэффективных методов интенсификации теплообмена применительно к системам охлаждения в микроэлектронике, к энергетике и аппаратам химической, холодильной и криогенной промышленности.

Заключение принято 15 июня 2023 года на заседании секции № 1 “Теплофизика и гидрогазодинамика многофазных и многокомпонентных систем (включая фазовые переходы, волновые явления и акустику)” Ученого совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) под председательством главного научного сотрудника ИТ СО РАН профессора В.В. Кузнецова. В качестве замечаний высказаны пожелания дополнить список литературы в разделе 1.1 (глава № 1) работой Толубинского (1988 г.), дополнить тепловые расчеты по распределению плотности теплового потока в теплопередающей стенке рабочих участков на экспериментальной установке (глава № 2) и устранить несколько имеющихся опечаток.

Присутствовало на заседании 16 членов (списочный состав секции № 1 составляет 21 чл.), в том числе 2 член-корреспондента РАН, 2 профессора РАН, 9 докторов наук, 3 кандидата наук. Результаты голосования: «за» – 16, «против» – 0, «воздержалось» – 0. Протокол № 2 от 15 июня 2023 года.



Председатель семинара
Кузнецов Владимир Васильевич, профессор,
д.ф.-м.н., главный научный сотрудник ИТ СО РАН



Секретарь семинара
Суртаев Антон Сергеевич, к.ф.-м.н.,
Старший научный сотрудник ИТ СО РАН