

«УТВЕРЖДАЮ»
И.О. Проректора по научной работе ФГБОУ ВО
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
И. И. Комаров
2024 г.

1.02.2024



ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию

Швецова Дмитрия Анатольевича

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

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности **1.3.14. – Теплофизика и теоретическая теплотехника**

Актуальность исследований

Диссертационная работа Швецова Д.А. посвящена экспериментальному исследованию теплообмена при испарении и кипении на микроструктурированных капиллярно-пористых покрытиях в широких диапазонах изменения высоты горизонтального слоя жидкости и приведенного давления. В работе применялись покрытия, полученные по технологии **3D-печати** методом селективного лазерного плавления/спекания (**SLM/SLS**). Актуальность исследований теплообмена при кипении в тонких слоях жидкости определяется необходимостью обеспечения безопасности работы высоконапряженного энергетического оборудования и недостатком знаний о переходных режимах теплообмена от кипения в тонких слоях жидкости к большому объему при разных приведенных давлениях. Остается актуальным поиск оптимальной формы микроструктурированных поверхностей для интенсификации теплообмена при кипении различных жидкостей. Процессы испарения и кипения, протекающие на микроструктурированных покрытиях при различных приведенных давлениях, также практически не исследованы. Работы по изучению теплообмена и кризисных явлений при кипении в тонких горизонтальных слоях жидкости различной толщины на микроструктурированных капиллярно-пористых поверхностях отсутствуют.

Диссертационная работа состоит из Введения, четырех глав, Заключение и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 157 страниц с 72 рисунками и 3 таблицами. Список литературы содержит 124 наименования.

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

В главе 1 приведены обзор и анализ литературы, посвященной теме диссертации. Проведен обзор работ, в которых исследовалось влияние высоты слоя жидкости на теплообмен при кипении на технически гладких и модифицированных поверхностях. Представлен анализ литературных данных, посвященных исследованию влияния

геометрических характеристик, размера частиц и теплопроводности материала капиллярно-пористых покрытий на теплообмен при кипении. Рассмотрено явление инверсии кривой кипения, при котором температурный напор уменьшается с ростом теплового потока. Приведены известные модели кризиса кипения в большом объеме жидкости и зависимости для расчета критического теплового потока. Показано, что работы, в которых экспериментально исследуется критический тепловой поток на модифицированных поверхностях в широких диапазонах изменения приведенного давления и высоты слоя жидкости, на данный момент отсутствуют.

В главе 2 представлены: описание экспериментального стенда, параметры микроструктурированных капиллярно-пористых покрытий, теплофизические свойства рабочей жидкости, методика получения экспериментальных данных, оценки неопределенности измерений и тепловых потерь, а также сравнение коэффициента теплоотдачи, полученного в слое жидкости на базовой технически гладкой поверхности, с расчетными зависимостями. Покрытия из нержавеющей стали и бронзы изготовлены с использованием технологии 3-D печати SLM/SLS-методом (селективное лазерное плавление/спекание). В результате были получены и исследованы регулярные структуры с синусоидальной зависимостью локальной толщины покрытия от поперечной координаты. Длина волны модуляции пористых покрытий λ_m составляла от одной до двух значений капиллярной постоянной рабочей жидкости l_c . В качестве рабочей жидкости применялся н-додекан.

В главе 3 приводится описание результатов экспериментального исследования теплообмена при кипении на микроструктурированных капиллярно-пористых покрытиях. Установлено, что на всех капиллярно-пористых покрытиях при давлении 20 кПа ($P_s/P_{cr} = 1.1 \cdot 10^{-2}$) наблюдалась значительная интенсификация теплообмена при кипении по сравнению с поверхностью без покрытий. На образце из бронзы с длиной волны модуляции $\lambda_m = 1.75$ мм, соответствующей одной капиллярной постоянной для рабочей жидкости, были получены более низкие температурные напоры при всех заданных плотностях теплового потока по сравнению с образцом из бронзы с большей длиной волны модуляции ($\lambda_m = 3.5$ мм). На образце из нержавеющей стали наблюдалась инверсия – происходило уменьшение температурного напора с ростом плотности теплового потока.

Рассмотрено влияние на теплообмен высоты слоя жидкости и давления. Установлено, что при давлениях 5, 10 и 20 кПа ($P_s/P_{cr} = 2.76 \cdot 10^{-3}; 5.5 \cdot 10^{-3}; 1.1 \cdot 10^{-2}$) при всех исследованных значениях высоты слоя жидкости наблюдалось пузырьковое кипение. В области низких приведенных давлений ($2.2 \cdot 10^{-4} \leq P_s/P_{cr} \leq 6.62 \cdot 10^{-4}$) пузырьковое кипение возникало на всех микроструктурированных капиллярно-пористых покрытиях только при достижении большого значения температурного напора. При давлениях 33, 67 и 133 Па ($P_s/P_{cr} = 1.84 \cdot 10^{-5}; 3.68 \cdot 10^{-5}; 7.35 \cdot 10^{-5}$) пузырьковое кипение отсутствовало при всех исследованных высотах слоя жидкости. Теплообмен осуществлялся интенсивным испарением с поверхности капиллярно-пористых покрытий.

Дополнительно исследованы особенности теплообмена, связанные со временем эксплуатации образца из нержавеющей стали и направлением изменения плотности теплового потока при различных давлениях. Показано, что на приработанном покрытии инверсия кривой кипения происходит при меньшей плотности теплового потока по

сравнению с результатами, полученными на покрытии до приработки. При давлении 133 Па ($P_s/P_{cr} = 7.35 \cdot 10^{-5}$) инверсии кривой кипения не наблюдалось, гистерезис также отсутствовал, и точки, полученные при прямом и обратном ходе, практически совпадали.

В главе 4 представлены анализ экспериментальных данных по коэффициенту теплоотдачи и критическому тепловому потоку, полученных на образцах с капиллярно-пористыми покрытиями при различных давлениях и высотах слоя жидкости, и сравнение с расчетными зависимостями. Представлены все полученные на образцах с капиллярно-пористыми покрытиями зависимости плотности теплового потока от температурного напора при различных давлениях в слоях н-додекана высотой $h = 10.0$ мм ($h/l_\sigma = 5.56$) и $h = 1.4$ мм ($h/l_\sigma = 0.81$), рассчитаны диапазоны размеров активных впадин при различных давлениях и проведено сравнение с экспериментальными данными. Представлены на графиках зависимости коэффициента теплоотдачи от высоты слоя жидкости при заданной плотности теплового потока.

Экспериментальные данные по критическому тепловому потоку сравнены с расчетными зависимостями, разработанными для условий кипения в большом объеме жидкости. Показано, что на образце с капиллярно-пористым покрытием из бронзы с длиной волны модуляции, равной капиллярной постоянной, в слое жидкости 10 мм ($h/l_\sigma = 5.56$) достигались наибольшие значения критического теплового потока во всем диапазоне приведенных давлений (увеличение достигает до 70% по сравнению с поверхностью без покрытия). Установлено, что формула В.В. Ягова правильно описывает тенденцию изменения критического теплового потока в области низких приведенных давлений ($P_s/P_{cr} \leq 6.62 \cdot 10^{-4}$). В области очень низких давлений (33–133) Па ($P_s/P_{cr} = 1.84 \cdot 10^{-5}$ – $7.35 \cdot 10^{-5}$) критический тепловой поток ограничен сверху расчетом по зависимости Ландау, полученной из условий развития неустойчивости межфазной поверхности жидкость–пар в условиях интенсивного испарения.

Выводы по результатам работы приведены в каждой из глав, основные результаты сформулированы в общем **Заклучении** по диссертации.

Научная новизна результатов диссертационной работы Д.А. Швецова:

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

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

3. Получены новые результаты по критическому тепловому потоку на поверхностях с микроструктурированными капиллярно-пористыми покрытиями в широком диапазоне высоты слоя жидкости и давления. Впервые исследованы переходные режимы теплообмена от кипения в тонких слоях жидкости к большому объему на образцах с микроструктурированными капиллярно-пористыми покрытиями. Проведено сравнение новых экспериментальных данных с известными расчетными зависимостями.

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

Научная и практическая значимость результатов исследований.

Полученные в диссертационной работе Д.А. Швецова результаты могут использоваться для проектирования микроструктурированных покрытий с целью повышения коэффициента теплоотдачи и критического теплового потока при кипении в тонких слоях жидкости. В работе выявлено сложное влияние геометрических характеристик и теплопроводности капиллярно-пористых покрытий на теплообмен. Результаты анализа экспериментальных данных о влиянии высоты слоя жидкости и приведенного давления позволили выяснить механизмы интенсификации теплообмена и изучить условия перехода теплообмена от кипения в тонких слоях жидкости к большому объему.

Экспериментальные данные могут применяться для прогнозирования наиболее приемлемых режимных параметров (давление, высота слоя жидкости, плотность теплового потока) с целью интенсификации теплообмена и повышения критического теплового потока на модулированных по толщине капиллярно-пористых покрытиях с различными геометрическими характеристиками и теплопроводностью. Полученные результаты могут применяться при создании термосифонов, тепловых труб и паровых камер различного назначения.

Результаты диссертации целесообразно рекомендовать для использования в ФГБОУ ВПО НИЯУ МИФИ, в компании РСК (разработчик и интегратор «полного цикла» инновационных энергоэффективных, высокоплотных, масштабируемых устройств с жидкостным охлаждением для высокопроизводительных вычислений и систем для машинного/глубокого обучения, центров обработки данных, интеллектуальных систем хранения данных, г. Москва), в Акционерном обществе «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана), Научно-исследовательском институте электронного специального технологического оборудования (НИИ ЭСТО, г. Зеленоград) и ОАО «Завод Протон-МИЭТ» (г. Москва, г. Зеленоград), ФГБУН Институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), Национальном исследовательском университете «Московский энергетический институт» (ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»), ФГБУН Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (ИБРАЕ РАН), ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН), ФГБУН Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИТФ УрО РАН), в профильных отраслевых НИИ и предприятиях электронной промышленности, атомной энергетики, в центрах по разработке оборудования для космической отрасли.

Результаты проведенного исследования также целесообразно рекомендовать для студентов вузов и аспирантов в учебном процессе при подготовке специалистов соответствующего профиля.

Публикации

Основные результаты диссертационной работы были представлены в 11 печатных изданиях, в том числе в 7 статьях в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 3 статьях в изданиях Web of Science, 7 статьях в изданиях Scopus и в 20 тезисах докладов. Результаты работы докладывались на многочисленных профильных отечественных и международных конференциях. Результаты диссертации были успешно апробированы на целом ряде профильных международных и отечественных конференций (несколько докладов, представленных диссертантом, были отмечены Дипломами, в частности, его доклад в МЭИ на Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-8, 2022 г.) и доклад на Школе-семинаре им. академика А.И. Леонтьева (г. Казань, 2023 г.) были отмечены Оргкомитетом как «Лучший доклад»).

Замечания по диссертации:

1. Как в работе контролировалась высота слоя жидкости? Как поддерживалась постоянная высота слоя жидкости в процессах теплообмена при кипении?
2. Чем были обусловлены такое количество испытуемых образцов, выбор материала капиллярно-пористых покрытий, рабочей жидкости?
3. Желательно прокомментировать более развернуто возможные физические механизмы, приводящие к инверсии кривой кипения на капиллярно-пористом покрытии из нержавеющей стали с более низким коэффициентом теплопроводности. Проводился ли анализ влияния смачиваемости на теплообмен?

Однако данные замечания не критичны для восприятия и анализа работы, для высокой оценки научной и практической значимости полученных диссертантом результатов. Материал диссертации Д.А. Швецова изложен последовательно и развернуто доступным и ясным для понимания языком без существенных замечаний по стилю и форме изложения, хорошо иллюстрирован качественно оформленными фотографиями, рисунками, таблицами.

Содержание автореферата и сформулированные в нем выводы полностью соответствуют представленным в диссертации результатам исследования. Публикации также отражают основные положения диссертации. Нет сомнения в соответствии представленной диссертации требованиям ВАК к кандидатским диссертациям. Основные результаты диссертационного исследования Д.А. Швецова в полной мере опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ для публикации материалов кандидатских и докторских диссертаций. Оформление диссертации в целом соответствует современным требованиям по подготовке рукописей и авторефератов кандидатских диссертаций.

Диссертация Д.А. Швецова представляет серьезное и обширное исследование, выполненное на высоком уровне. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно, содержит результаты экспериментальных и теоретических исследований, характеризующиеся безусловной новизной.

Тема диссертации соответствует указанной научной специальности 1.3.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника» для физико-математических наук. Содержание работы соответствует паспорту специальности по п. 1 «Фундаментальные, теоретические и экспериментальные исследования молекулярных и макросвойств веществ в твердом, жидком и газообразном состоянии для более глубокого понимания явлений, протекающих при тепловых процессах и агрегатных изменениях в физических системах» и по п. 8 «Численное и натурное моделирование теплофизических процессов в природе, технике и эксперименте, расчет и проектирование нового теплотехнического оборудования».

Общее заключение

Тема диссертационного исследования соответствует паспорту специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

На основании анализа содержания рукописи и автореферата диссертации сделано заключение, что диссертация Д.А. Швецова **«Интенсификация теплообмена при кипении в тонких горизонтальных слоях жидкости на капиллярно-пористых покрытиях»** соответствует всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, в том числе отвечает критериям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 (в действующей редакции). Выявленные диссертантом новые закономерности влияния параметров микроstructuringа теплоотдающей поверхности методом 3D-печати на коэффициенты теплоотдачи и критические тепловые потоки при кипении в тонком слое жидкости представляют собой в совокупности важное научное достижение в области развития научных основ по разработке высокоэффективных методов интенсификации теплообмена применительно к системам охлаждения в микро- и силовой электронике, к энергетике и аппаратам химической промышленности.

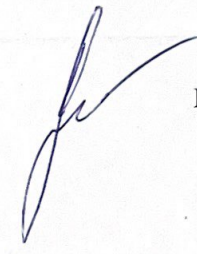
Таким образом, диссертация Швецова Дмитрия Анатольевича является завершенной научно-квалификационной работой, обладающей научной новизной и практической значимостью, в которой содержится решение актуальной задачи, имеющей важное значение для развития теплофизики и теоретической теплотехники в области тепломассообмена при кипении и испарении, разработки научных основ и создания высокоэффективных методов интенсификации процессов тепло-и массообмена.

Её автор Швецов Дмитрий Анатольевич, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

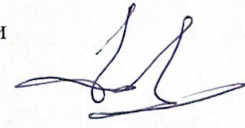
Обсуждение диссертации Д.А. Швецова было проведено на заседании кафедры Инженерной теплофизики НИУ «МЭИ» 24 января 2024 г., работа представлена автором дистанционно. На заседании присутствовало 23 человека, профессорско-преподавательского состава. Отзыв на диссертацию был одобрен на данном заседании кафедры Инженерной теплофизики НИУ «МЭИ» (результаты голосования: «за» - 23 чел., «против» - нет, «воздержалось» - нет), протокол № 1/2024 от 24.01.2024.

Согласны на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Зав. кафедрой Инженерной теплофизики
НИУ «МЭИ»,
доцент, к.ф.-м.н.
Тел. +7 (495)3627501
e-mail: GerasimovDN@mpei.ru


Герасимов Денис Николаевич

Профессор
кафедры Инженерной теплофизики
НИУ «МЭИ», д.т.н.
Тел. + 7 (495) 3627001
e-mail: KuzmakichtaYA@mpei.ru


Кузма-Кичта Юрий Альфредович

Доцент
кафедры Инженерной теплофизики
НИУ «МЭИ», к.т.н.,
Тел. +7 (495)3627501
e-mail: Zakharovaod@mpei.ru


Захарова Оксана Дмитриевна

Подписи Герасимова Дениса Николаевича, Кузма-Кичты Юрия Альфредовича, Захаровой Оксаны Дмитриевны заверяю:

Заместитель начальника управления
по работе с персоналом


Полевая Людмила Ивановна

2.02.24

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»).

Адрес: РФ, 111250, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Лефортово, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1.
Телефон: +7 495 362-75-60.
Факс: +7 495 362-89-38
E-mail: universe@mpei.ac.ru
Сайт: <https://mpei.ru/Pages/default.aspx>