

ОТЗЫВ
ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА на диссертационную работу
Швецова Дмитрия Анатольевича
«Интенсификация теплообмена при кипении в тонких горизонтальных слоях
жидкости на капиллярно-пористых покрытиях»,
представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности
1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Диссертационная работа Швецова Д.А. посвящена экспериментальному исследованию процессов теплообмена при кипении на модифицированных методом 3D-печати поверхностях в тонких горизонтальных слоях жидкости различной толщины в широком диапазоне изменения приведенного давления.

Актуальность темы диссертации

Исследования процессов теплоотдачи на микроструктурированных различными способами поверхностях в условиях кипения жидкостей ведутся в последние годы достаточно интенсивно в России и за рубежом. Повышенный интерес к изучению способов интенсификации теплообмена (в первую очередь в режиме кипения) связан с возрастающими требованиями по отводу тепла в современных вычислительных модулях, потребностями силовой электроники, задачами атомной энергетики, при разработке теплонасосной, холодильной и криогенной техники и т. д. Характерные тепловые потоки, которые требуется отводить в указанных случаях, достигают величины на сегодняшний день вплоть до $(100\text{--}1000) \text{ Вт/см}^2$. Несмотря на то, что основная часть методов интенсификации теплообмена при кипении была заложена в двадцатом веке, развитие технологий обработки поверхностей и методов измерения характеристик нестационарных процессов, а также возможностей моделирования, позволяет проводить современные исследования на принципиально новом уровне, давая, к примеру, возможность детально проследить динамику развития отдельно взятых пузырей, несмоченных зон под паровыми конгломератами при различных физических условиях. Усовершенствованные методы механической обработки поверхности позволяют достигать поразительных значений плотности микроребер, микроштырьков (до 400 шт. на мм^2). Современные методы плазменного и ионного напылений, химические технологии обработки, аддитивные технологии 3D-печати, а также различные методики создания наноразмерных покрытий и их комбинирование с микротекстурами позволяют создавать принципиально новые типы мультимасштабных структурированных поверхностей, получать недоступные ранее «рекордные» результаты по интенсификации теплообмена и повышению величины

критического теплового потока при кипении. При этом необходимо подчеркнуть, что и сегодня экспериментальные исследования остаются основным инструментом при выборе и тестировании приемлемых и наиболее эффективных методов интенсификации теплообмена применительно к конкретным жидкостям, заданным режимным параметрам, гидродинамическим и геометрическим условиям, что связано с весьма слабой предсказательной способностью существующих теоретических моделей, результатов численного моделирования теплообмена и кризисных явлений при кипении.

На сегодня получен очень большой объем экспериментальных данных, связывающих основную функцию цели – коэффициент теплоотдачи с наиболее значимыми характеристиками микроструктурированных поверхностей. Но, как правильно отмечает автор диссертации, «результаты экспериментов различных авторов в ряде случаев носят противоречивый характер». Полуэмпирические же теории, разработанные для описания функциональных связей между критическими тепловыми потоками и параметрами микроструктурированных поверхностей, а также условий нагрева, не обеспечивают во многих случаях приемлемое для практики соответствие теоретических и экспериментальных значений критических тепловых потоков. В тоже время, хотя применение в реальных системах теплопереноса и теплоотвода разного рода капиллярно-пористых покрытий перспективно по мнению большинства исследователей и инженеров – конструкторов, пока нет теоретической базы для проведения конкретных опытно-конструкторских работ с целью создания нового поколения теплообменников различного назначения с использованием эффекта интенсификации теплоотдачи при кипении на микроструктурированных поверхностях. Отсутствие же такой теории обусловлено, скорее всего, недостаточным объемом достоверных экспериментальных данных об основных закономерностях процессов, происходящих на микроструктурированных поверхностях. Все вышесказанное, безусловно, подчеркивает высокую научную и практическую актуальность темы диссертационной работы Д.А. Швецова, целью которой является 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.

Общая характеристика диссертации.

Диссертация Д.А. Швецова состоит из введения, четырех глав, заключения. Объем рукописи диссертации составляет 157 страниц, включая 72 рисунка и 3 таблицы. Список литературы содержит 124 источника.

Во введении автор обосновывает актуальность своего диссертационного исследования, формулирует цель и задачи, защищаемые положения, обосновывает новизну и практическую значимость диссертации, описывает личный вклад диссертанта.

В первой главе приведены результаты выполненного автором аналитического обзора литературы по тематике своей диссертации. Показано, что при очень малых толщинах слоя жидкости достигаются максимальные значения коэффициента теплоотдачи. Также показано, что зависимость значений коэффициента теплоотдачи и критического теплового потока на модифицированных поверхностях от высоты слоя жидкости изучена недостаточно. В той же главе приведены данные о связях оптимальных параметров модифицированных поверхностей с теплофизическими свойствами рабочей жидкости. Также сделан вывод, что влияние давления на инверсию кривой кипения в тонких слоях жидкости ранее не исследовалось. В заключительной части этой главы приведены модели кризиса кипения в большом объеме жидкости и экспериментальные данные по критическому тепловому потоку. Показано, что экспериментальных данных по критическим тепловым потокам в условиях кипения и испарения на микроструктурированных капиллярно-пористых поверхностях в тонких слоях жидкости при изменении приведенного давления в настоящее время не опубликовано.

Во второй главе приведено подробное описание методик экспериментальных исследований и использовавшегося автором диссертации экспериментального стенда. Также представлено детальное описание микроструктурированных капиллярно-пористых поверхностей, использовавшихся в экспериментах, приведены основные параметры, характеризующие покрытия. Проведена оценка неопределенности измерений.

Третья глава посвящена описанию результатов выполненных автором экспериментов по исследованию теплообмена при кипении на микроструктурированных капиллярно-пористых поверхностях. Установлено, что на всех использовавшихся покрытиях имеет место значительная интенсификация теплообмена при кипении по сравнению с гладкой поверхностью. Анализ результатов проведенных экспериментов с использованием известных полуэмпирических теорий образования активных центров парообразования на капиллярно-пористых покрытиях показал, что теплопроводность материала покрытия влияет на размер активных центров парообразования при кипении в тонких горизонтальных слоях жидкости. Проведен анализ влияния толщины слоя жидкости и давления внешней среды на интенсивность теплообмена. Сформулировано описание механизма образования микропузырьков в межреберных впадинах. Также установлено, что в диапазоне низких давлений внешней среды пузырьковое кипение возникало на всех исследовавшихся микроструктурированных поверхностях только при

достижении больших значений температурного напора. Исследованы особенности теплообмена, связанные с длительностью эксплуатации образцов из нержавеющей стали и направлением изменения плотности теплового потока при различных давлениях. При плотности $q=195 \text{ кВт/м}^2$ установлено пятикратное снижение температурного напора по сравнению с данными, полученными на поверхностях без покрытия.

В четвертой главе приведены результаты анализа экспериментальных данных, полученных автором, по значениям коэффициента теплоотдачи и критического теплового потока в условиях различных давлений внешней среды и толщинах слоя жидкости на использовавшихся капиллярно-пористых покрытиях в сравнении с полученными в рамках полуэмпирических теорий зависимостями. Установлено, что для типичных диапазонов изменения значений основных факторов величины коэффициентов теплоотдачи достаточно существенно отличаются от расчетных по известным формулам (до 60-70)%. Выделены режимы, в которых не происходит образования пузырей, а происходит только испарение с поверхности слоя жидкости на капиллярно-пористых покрытиях. Показано, что на капиллярно-пористом покрытии из бронзы с длиной волны модуляции равной капиллярной постоянной в слое жидкости при $h/l\sigma = 5.56$ достигались наибольшие значения КТП во всем диапазоне приведенных давлений (увеличение достигает до 70% по сравнению с гладкой поверхностью). Значения КТП, полученные в слоях жидкости 4 мм и 10 мм в области низких приведенных давлений на всех капиллярно-пористых покрытиях, превышали предсказания большинства расчетных моделей, прогнозирующих КТП для условий большого объема жидкости.

В конце работы в заключении приводятся достаточно четко сформулированные общие выводы, убедительно обоснованные в диссертационной работе Д.А. Швецова.

Общая методология и методика исследования

При решении задач диссертации Д.А. Швецов выполнял, в основном, достаточно сложные и трудоемкие экспериментальные исследования, которые, безусловно, относятся к категории фундаментальных. Также приведено сравнение результатов выполненных автором диссертации экспериментов по ряду характеристик исследовавшихся процессов с получающимися при вычислении с использованием полученных другими исследователями формул результатами. Автор использовал современное оборудование и средства регистрации характеристик исследовавшихся процессов, обеспечивающих возможность получения экспериментальных данных, в полной мере соответствующих современному критерию новизны. При анализе результатов своих исследований автор использовал современные представления о физике кипения жидкостей, показав хорошие

знания не только современной литературы по тематике диссертации, но также знания установленных много лет назад закономерностей и разработанных в прошлом веке полуэмпирических теорий.

Научная новизна полученных результатов, выводов и защищаемых положений.

Д.А. Швецов выполнил большой объем оригинальных экспериментальных исследований и получил результаты, соответствующие современному критерию новизны. Перечень новых научных результатов, полученных автором, довольно широк.

С точки зрения оппонента наиболее важными и принципиальными из них являются следующие:

1. Установлены по результатам впервые проведенных экспериментов основные закономерности процессов теплообмена при кипении в тонких горизонтальных слоях жидкости на капиллярно-пористых покрытиях.
2. Показано, что во всем диапазоне применения достигнутых в экспериментах давлений переход режимов теплообмена от кипения в тонких слоях жидкости к кипению в большом объеме по значениям коэффициента теплоотдачи и критического теплового потока происходит при толщине слоя жидкости более двух капиллярных постоянных.
3. Установлено экспериментально влияние геометрических характеристик микроструктурированных капиллярно-пористых покрытий на интенсивность теплообмена.
4. Обосновано влияние теплопроводности материала капиллярно-пористых покрытий на интенсивность теплообмена при кипении в тонких слоях жидкости.
5. Показано, что инверсия кривой кипения на приработанном капиллярно-пористом покрытии из нержавеющей стали начиналась при меньшей в семь раз плотности теплового потока.
6. Установлено, что на капиллярно-пористом покрытии из бронзы с длиной волны модуляции равной капиллярной постоянной в слое жидкости толщиной десять миллиметров достигаются наибольшие значения коэффициента теплоотдачи во всем диапазоне приведенных давлений (увеличение достигает 70% по сравнению с гладкой поверхностью).

Степень обоснованности и достоверности результатов научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Достоверность результатов исследований Д.А. Швецов обосновывает в первую очередь использованием современных методов и средств регистрации основных характеристик исследованных им процессов. Также важным является систематический анализ неопределенностей (погрешностей по старой терминологии) результатов выполненных экспериментальных исследований. Кроме этого автор провел достаточно большой объем сопоставлений результатов своих экспериментов с результатами расчетов по формулам, полученным другими авторами.

Все научные положения, выводы и рекомендации диссертационной работы основываются на проверенных и тщательно проанализированных результатах и являются обоснованными.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов

заключается в том, что: полученная в проведенных исследованиях экспериментальная информация может использоваться для проектирования микроструктурированных покрытий с целью повышения коэффициента теплоотдачи и критического теплового потока при кипении в тонких слоях жидкости. В работе выявлен сложный характер влияния геометрических характеристик и теплопроводности капиллярно-пористых покрытий на теплообмен и критический тепловой поток. Результаты анализа экспериментальных данных о влиянии высоты слоя жидкости и приведенного давления позволили выделить механизмы интенсификации теплообмена и изучить условия перехода теплообмена от кипения в тонких слоях жидкости к кипению в большом объеме. Экспериментальные данные могут применяться для прогнозирования наиболее приемлемых режимных параметров (давление, высота слоя жидкости, плотность теплового потока) с целью интенсификации теплообмена и повышения критического теплового потока на модулированных по толщине капиллярно-пористых покрытиях с различными геометрическими характеристиками и теплопроводностью. Результаты выполненных автором экспериментальных исследований могут использоваться при проведении опытно-конструкторских работ по созданию нового поколения разного рода теплообменников и систем обеспечения теплового режима с использованием капиллярно-пористых покрытий на поверхностях теплообмена. В частности, полученные результаты могут применяться при создании термосифонов, тепловых труб и паровых камер различного назначения.

Результаты диссертации можно рекомендовать для использования в компании РСК (разработчик и интегратор «полного цикла» инновационных энергоэффективных, высокоплотных, масштабируемых решений с жидкостным охлаждением для

высокопроизводительных вычислений и систем для машинного/глубокого обучения, центров обработки данных, интеллектуальных систем хранения данных, г. Москва), профильных отраслевых НИИ (АО «Институт Гидропроект», ООО «Газпром ВНИИГАЗ», ВНИИ холодильного машиностроения), предприятиях химической, нефтегазовой промышленности, криогенной промышленности и других предприятиях энергетического профиля (ОАО «НПО «ГЕЛИЙМАШ», ПАО «Криогенмаш», АО «Силовые машины» и др.), а также в ФГБОУ ВО "Московский политехнический университет", ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана», ФГБУН Институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), Национальном исследовательском университете «Московский энергетический институт» (ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»), ФГБУН Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИТФ УрО РАН), ФГБУН Институт теплофизики им. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН).

Результаты проведенных исследований также целесообразно рекомендовать для студентов вузов и аспирантов в учебном процессе, специализирующихся в области энергетики, разработки систем охлаждения и тепловой стабилизации различного назначения.

Замечания по диссертационной работе.

1. В качестве объектов исследования были выбраны капиллярно-пористые покрытия, изготовленные из двух материалов: нержавеющей сталь и бронза. В тексте рукописи выбор бронзы недостаточно обоснован, в то время как использование меди в качестве материала покрытий могло бы убедительней показать влияние теплопроводности капиллярно-пористых покрытий на теплообмен при кипении.

2. Экспериментальные исследования диссертанта проведены с использованием в качестве рабочей жидкости н-додекана. В тексте диссертации недостаточно представлены конкретные области (отрасли промышленности и типы оборудования), когда эта жидкость используется в процессах теплообмена при кипении. Возможно ли сравнение экспериментальных данных, полученных с использованием н-додекана, с другими жидкостями?

3. Приведенные на рис. 4.9 (стр. 127) зависимости значений коэффициента теплоотдачи от относительной высоты слоя жидкости показывают, что величина α от отношения h/l_0 по существу не зависит. Поэтому, если учитывать неопределенности, подпись к рисунку не соответствует приведенным на этом рисунке экспериментальным данным.

4. В тексте диссертации при описании структур, возникающих при интенсивном испарении при низких приведенных давлениях, используются термины «воронки» и «кратеры». Разница между данными терминами, характеризующими различные наблюдаемые автором структуры, неочевидна для читателя, в рукописи приводится недостаточно информации. Целесообразно сделать поясняющий более детальный комментарий.

5. Целесообразно прокомментировать отмечаемые диссертантом на стр. 134 утверждения о том, что значения КТП в области очень низких приведенных давлений (33–133) Па ($P_s / P_{cr} = 1.84 \cdot 10^{-5} - 7.35 \cdot 10^{-5}$) ограничивались сверху расчетом по зависимости Ландау, полученной из условий развития неустойчивости межфазной поверхности жидкость–пар в условиях интенсивного испарения.

Однако число и содержание данных замечаний 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 рисунками, фотографиями, приложенными таблицами.

Содержание автореферата и сформулированные в нем выводы полностью соответствуют представленным в диссертации результатам исследований. Публикации также отражают основные положения диссертации. У оппонента 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. Результаты диссертации были многократно и успешно апробированы на профильных международных и отечественных конференциях (несколько докладов, представленных диссертантом, были отмечены Дипломами, в частности, его доклады на РНКТ-8 и на Школе-семинаре им. академика А.И. Леонтьева (г. Казань, 2023 г.) были отмечены Оргкомитетом в качестве лучших докладов).

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, соответствующих критерию новизны.

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 о соответствии диссертации критериям.

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

На основании анализа содержания рукописи и автореферата диссертации можно сделать 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 микроструктурирования теплоотдающей поверхности методом 3D-печати на коэффициенты теплоотдачи и критические тепловые потоки при кипении представляют собой в совокупности важное научное достижение в области развития научных основ по разработке высокоэффективных методов интенсификации теплообмена применительно к системам охлаждения в микроэлектронике, к энергетике и аппаратам химической промышленности.

Таким образом, данная диссертация является завершенной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи, имеющей важное значение для развития теплофизики и теоретической теплотехники в области тепломассообмена при фазовых превращениях, разработки научных основ и создания методов интенсификации процессов тепло-и массообмена.

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

Официальный оппонент:

Кузнецов Гений Владимирович

подпись

Доктор физико-математических наук, профессор
специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Профессор Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова

Инженерной школы энергетики

kuznetsovgv@tpu.ru

Тел.: 8 (3822) 60-62-48; вн. телефон: 1615.

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30,
ФГАОУ ВО НИ ТПУ, тел.: 8 (3822) 60-63-33,

tpu@tpu.ru; <http://www.tpu.ru/>

E-mail: marisha@tpu.ru

тел.: 8(3822) 60-62-48

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

Подпись Г.В. Кузнецова удостоверяю:

Ученый секретарь Национального
исследовательского Томского
политехнического университета

28.01.2024

Кулинич Е. А.