



УТВЕРЖДАЮ
И.о. директора ИТ СО РАН
Д.ф.-м.н. О.В. Шарыпов
Шарыпов
«25» сентября 2020 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 01.04.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника «Экспериментальное исследование микрохарактеристик и теплообмена при кипении жидкостей в условиях различных давлений» 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 2014 по 2020 год соискатель Сердюков Владимир Сергеевич работал в лаборатории низкотемпературной теплофизики ИТ СО РАН в должности инженера-исследователя. В 2015 г. окончил магистратуру Новосибирского государственного университета по направлению «Физика», по специальности «Физика кинетических явлений».

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 01.04.14 – 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 локальных и интегральных характеристик теплообмена при пузырьковом кипении жидкостей в условиях свободной конвекции при различных давлениях, включая исследование эволюции тройной контактной линии в основании паровых пузырей.

Актуальность исследования

Кипение жидкости является одним из наиболее эффективных способов теплоотвода и характеризуется значительно более высокими коэффициентами теплоотдачи по сравнению с однофазным теплопереносом. В связи с этим данный процесс широко используется в различных областях промышленности, в частности, в теплоэнергетике, для охлаждения атомных реакторов, в химической и пищевой промышленности и т.д. Кроме того, важной задачей является повышение функциональности и надежности работы

различных устройств микроэлектроники, для чего необходимо поддерживать температуру их элементов постоянной на заданном уровне. Кипение является перспективным способом для охлаждения таких устройств, в частности, при двухфазном погружном охлаждении уже активно применяется в работе сверхпроизводительных серверов.

По этой причине описание локальных и интегральных характеристик теплообмена, а также динамики парообразования при кипении жидкости в условиях свободной конвекции при различных давлениях является весьма актуальной задачей. Для решения этой задачи необходимо иметь достаточно полную экспериментальную картину процессов тепло- и массопереноса при кипении жидкости, проявляющихся на различных временных и пространственных масштабах. В частности, с использованием опытных данных по внутренним характеристикам кипения становится возможным создать новые и апробировать существующие модели описания интенсивности теплоотдачи при пузырьковом кипении жидкости. Также одной из важнейших задач является детальное экспериментальное исследование динамики тройной контактной линии в основании паровых пузырей, в частности, характеристик испарения микрослоя и скорости роста сухих пятен в широком диапазоне тепловых нагрузок. Развитие высокоскоростных экспериментальных методик позволяет сегодня получить принципиально новую экспериментальную по локальным и интегральным характеристикам теплообмена при кипении при варьировании условий проведения эксперимента, в частности, приведенного давления.

Личный вклад

Вклад автора в исследования состоял в разработке экспериментального стенда и конструкции рабочих участков, 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. Разработана методика комплексного исследования динамики парообразования и эволюции температурного поля нагревательной поверхности при пузырьковом кипении жидкости в широких диапазонах варьирования тепловой нагрузки и приведенного давления.
2. С использованием разработанной методики исследована интенсивность теплоотдачи, динамика парообразования и основные внутренние характеристики пузырькового кипения воды и этилового спирта в широком диапазоне варьирования тепловых нагрузок.
3. Изучена эволюция областей микрослоя жидкости и сухого пятна под паровыми пузырями при кипении воды и этилового спирта при атмосферном давлении.
4. Исследована интенсивность локального теплообмена в окрестности тройной контактной линии при пузырьковом кипении воды и этилового спирта в условиях атмосферного давления.
5. Изучено влияние давления на локальные и интегральные характеристики теплообмена при пузырьковом кипении воды, включая динамику тройной контактной линии.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием современных методов диагностики, оценкой неопределенностей измерений, калибровкой измерительного оборудования, применением аттестованных средств измерения и измерительных приборов, сравнением с результатами других исследователей и с расчетными зависимостями, а также воспроизводимостью экспериментальных данных.

Научная новизна изложенных в диссертационной работе результатов заключается в следующем

1. Проведено комплексное исследование взаимосвязи локальных и интегральных характеристик теплообмена и динамики парообразования при пузырьковом кипении воды и этилового спирта в широких диапазонах изменения тепловых потоков с помощью современных экспериментальных методик, включая использование специальной конструкции прозрачного нагревателя. Установлены закономерности влияния тепловой нагрузки и перегрева поверхности на плотность центров парообразования, динамику роста паровых пузырей и их отрывной диаметр при кипении воды и этилового спирта.

2. С использованием данных высокоскоростной инфракрасной термографии по эволюции нестационарного температурного поля тепловыделяющей поверхности изучено распределение интенсивности локального теплообмена в окрестности тройной контактной линии в основании паровых пузырей.

3. Получены новые опытные данные по динамике тройной контактной линии под паровыми пузырями. Показано, что стадия отрыва паровых пузырей при кипении воды и этилового спирта при различных тепловых нагрузках начинается после полного испарения жидкого микрослоя. Установлена взаимосвязь между эволюцией внешнего диаметра паровых пузырей и областью жидкого микрослоя. Экспериментально установлено, что максимальный размер области микрослоя составляет половину от величины отрывного диаметра паровых пузырей при кипении воды и этилового спирта. Показано, что практически на всей стадии роста сухого пятна его размер линейно растет со временем для кипения воды и этилового спирта в широком диапазоне варьирования тепловых нагрузок.

5. Проведено исследование структуры двухфазного слоя вблизи тепловыделяющей поверхности при кипении воды и этилового спирта в области высоких тепловых нагрузок. Изучены особенности эволюции сухих пятен и относительного паросодержания в области предкризисных тепловых потоков.

6. Показано комплексное влияние понижения давления на микрохарактеристики кипения воды в условиях свободной конвекции. Впервые проведено исследование плотности центров парообразования и динамики тройной контактной линии при кипении жидкости в области субатмосферных давлений в широком диапазоне изменения тепловых нагрузок.

Научная и практическая ценность

Диссертация В.С. Сердюкова представляет собой законченную научно-квалификационную работу, содержащую современные методы решения актуальных задач экспериментальной науки. Полученная в исследованиях новая экспериментальная информация важна для разработки теоретически обоснованных подходов описания основных локальных характеристик процесса кипения, включая эволюцию различных областей теплообмена под паровым пузырем, плотность центров парообразования, отрывной диаметр пузырей, частоту зародышеобразования и т.д. Полученные опытные данные по интенсивности локальной и интегральной теплоотдачи важны для создания новых моделей описания теплообмена при кипении жидкости на поверхностях с различными параметрами шероховатости.

Также полученная новая экспериментальная информация о динамике парообразования в области развитого пузырькового кипения вплоть до развития кризисных явлений может быть использована для разработки современных модельных подходов при теоретическом описании физических процессов при пузырьковом кипении жидкостей.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 5th International Workshop on Heat/Mass Transfer Advances for Energy Conservation and Pollution Control (г. Новосибирск, Россия, 2019 г.); Gordon Research Conference «Micro and Nanoscale Phase Change Heat Transfer» (г. Барга, Италия, 2019 г.); 10th International Conference on Boiling and Condensation Heat Transfer (г. Нагасаки, Япония, 2018 г.); Седьмая Российская национальная конференция по теплообмену (РНКТ-7) (г. Москва, Россия, 2018 г.); Всероссийская конференция «Сибирский теплофизический семинар» (г. Новосибирск, Россия, 2020 г., 2018 г., 2017 г., 2014 г.); Всероссийская школа-конференция молодых ученых с международным участием «Актуальные Вопросы Теплофизики и Физической Гидрогазодинамики» (г. Новосибирск, Россия, 2018 г., 2016 г.); 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 г., 2017 г., 2015 г., 2014 г.); 12th International Conference «Two-phase systems for space and ground applications» (г. Новосибирск, Россия, 2017 г.); XXI Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (г. Санкт-Петербург, Россия, 2019 г., 2017 г.); XV-й Минский международный форум по тепломассообмену (г. Минск, Беларусь, 2016 г.); International Symposium and School for Young Scientists «Interfacial phenomena and heat transfer» (г. Новосибирск, Россия, 2016 г.); ASME-ATI-UIT 2015 Conference on Thermal Energy Systems: Production, Storage, Utilization and the Environment (г. Неаполь, Италия, 2015 г.); 53-я Международная научная студенческая конференция «Студент и научно-технический прогресс» (г. Новосибирск, Россия, 2015 г.).

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

1. Anton Surtaev, Vladimir Serdyukov, Ivan Malakhov Effect of subatmospheric pressures on heat transfer, vapor bubbles and dry spots evolution during water boiling // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2020. – V. 112. – P. 109974.
2. Vladimir Serdyukov, Ivan Malakhov, Anton Surtaev High-speed visualization and image processing of sub-atmospheric water boiling on a transparent heater // *Journal of Visualization*. – 2020. – V. 23, № 5. – P. 873–884.
3. Сердюков В.С., Малахов И.П., Суртаев А.С. Исследование особенностей динамики парообразования при кипении жидкости в области субатмосферных давлений // *Теплофизика и Аэромеханика*. – 2019. – Т. 26. – № 4 – С. 667 – 670.
4. A. Surtaev, V. Serdyukov, J. Zhou, A. Pavlenko, V. Tumanov An experimental study of vapor bubbles dynamics at water and ethanol pool boiling at low and high heat fluxes // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – V. 126PB. – P. 297-311.
5. Сердюков В.С., Суртаев А.С., Павленко А.Н., Чернявский А.Н. Исследование локального теплообмена в окрестности контактной линии под паровыми пузырями при кипении жидкостей // *Теплофизика Высоких Температур*. – 2018. – Т. 56. – № 4. – С. 561 – 567.
6. Anton S. Surtaev, Vladimir S. Serdyukov, Alexey I. Safonov Enhancement of boiling heat transfer on hydrophobic fluoropolymer coatings // *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*. – 2018. – V. 6, № 3. – P. 269-276.
7. Суртаев А.С., Сердюков В.С. Исследование динамики контактной линии под паровым пузырьём при кипении жидкости на поверхности прозрачного нагревателя // *Теплофизика и Аэромеханика*. – 2018. – Т. 25. – № 1. – С. 71 – 77.

8. Serdyukov V., Surtaev A. Experimental study of multi-scale heat transfer characteristics at pool boiling // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – V. 785, №. 1. – P. 012007.

9. Surtaev A., Serdyukov V., Chernyavskiy A. Study of thermal behavior of microlayer under vapor bubble at liquid boiling // The European Physical Journal (EPJ). – 2017. – V. 159, №. 00051. – 5 p.

10. Суртаев А.С., Сердюков В.С., Павленко А.Н. Нанотехнологии в теплофизике: теплообмен и кризисные явления при кипении // Российские нанотехнологии. – 2016. – Т. 11. – № 11-12. – С. 18-32.

11. Суртаев А.С., Сердюков В.С., Моисеев М.И. Применение высокоскоростной инфракрасной термографии для исследования кипения жидкости // Приборы и Техника Эксперимента. – 2016. – № 4. – С. 140 – 145.

Полнота работы

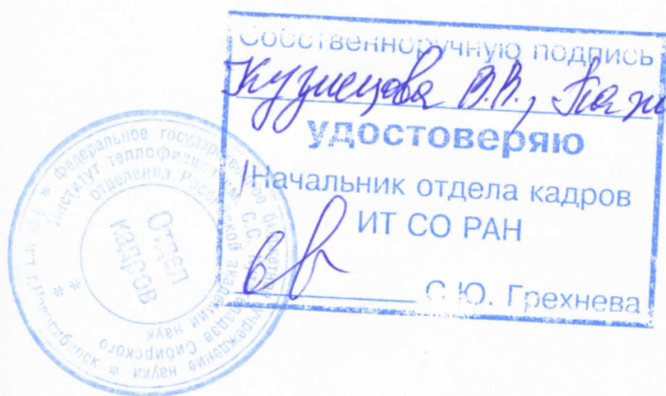
Диссертация «Экспериментальное исследование микрохарактеристик и теплообмена при кипении жидкостей в условиях различных давлений» инженера-исследователя Сердюкова Владимира Сергеевича является завершённой научно-исследовательской работой, содержащей новые результаты в области исследования пузырькового кипения жидкости.

Решение о рекомендации работы к защите

Диссертация «Экспериментальное исследование микрохарактеристик и теплообмена при кипении жидкостей в условиях различных давлений» инженера-исследователя Сердюкова Владимира Сергеевича рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника.

Заключение принято 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 д.ф.-м.н. Кузнецова В.В. На заседании присутствовали 37 человек, из них 2 члена-корреспондента РАН, 2 профессора РАН, 10 докторов наук, 14 кандидатов наук.

Результаты открытого голосования по вопросу о принятии заключения по диссертации Сердюкова В.С.: «за» – 36, «против» – 0, «воздержались» – 1 (Протокол № 1 от 24 сентября 2020 г.).



Председатель семинара
Д.ф.-м.н., профессор, заведующий
лабораторией теплофизики
многофазных систем ИТ СО РАН
Владимир Васильевич Кузнецов

Секретарь семинара
Д.ф.-м.н., профессор РАН
в.н.с. ИТ СО РАН
Пахомов Максим Александрович