

Effect of Porous Coating on Heat Transfer in Minichannels with Intensive Localised Heating

Pukhovoy M.V., Zaitsev D.V.

Kutateladze Institute of Thermophysics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Novosibirsk, Russian Federation

Abstract. The main objective of the work is to study the influence of the porous layer on the intensity of heat transfer during flow boiling in mini- and microchannels with localized heating from the wall side (heater size $3 \times 3 \text{ mm}^2$) with a channel width and length an order of magnitude larger. The following problems were solved to achieve these goals. A technology was created for forming various porous coatings on a heater based on Nickel powder with a characteristic grain size of about $60\text{-}100 \text{ }\mu\text{m}$. As a result, three different thin ($150 \text{ }\mu\text{m}$ scale) porous coatings were obtained: Nickel (100% Ni) and two bimetallic coatings containing copper or zinc powders (80% Ni + 20% Cu, 50% Ni + 50% Zn). Systematic studies of heat transfer during boiling with non-uniform heating in mini- and microchannels with a height of 0.55 to 2.0 mm with subcooling water were carried out. The experiments were carried out with intensive heating from the wall side, up to 1.6 kW/cm^2 . There are established facts that are important results. The values of heat transfer coefficients and critical heat flux on porous surfaces are significantly (up to 3 times) higher than for a smooth surface. The values of critical heat flux reached 1.2 kW/cm^2 , and the values of heat transfer coefficient reached $100 \text{ kW}/(\text{m}^2 \text{ K})$. The significance of the obtained results is that the features of localized heating are underestimated but are important in modern multi-chip electronic systems and promising power plants. This will allow achieving the required scale of heat exchange parameter values when developing highly efficient heat exchange systems for modern microelectronics and power engineering.

Keywords: micro/mini channels, high heat flux, local heating, thin porous coating.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2025.1-65.07>

UDC: 536.24, 574.46.

Efectul acoperirii poroase asupra transferului de căldură în minicanale cu încălzire intensivă localizată

Puhovoi M.V., Zaitsev D.V.

Institutul de Termofizică numit după S.S. Kutateladze de Siberian Branch al Academiei de Științe Rusă,
Novosibirsk, Federația Rusă

Rezumat. Obiectivul principal al lucrării este de a studia influența stratului poros asupra intensității transferului de căldură în timpul fierberii în flux în mini și microcanale cu încălzire localizată din partea peretelui (dimensiunea încălzitorului $3 \times 3 \text{ mm}^2$) cu o lățime și lungime a canalului la comandă. de magnitudine mai mare. Următoarele probleme au fost rezolvate pentru a atinge obiectivele. A fost creată o tehnologie pentru formarea diferitelor acoperiri poroase pe un încălzitor pe bază de pulbere de nichel cu o dimensiune caracteristică a granulelor de aproximativ $60\text{-}100 \text{ }\mu\text{m}$. Ca urmare, au fost obținute trei acoperiri poroase subțiri diferite (scara de $150 \text{ }\mu\text{m}$): nichel (100% Ni) și două acoperiri bimetalice care conțin pulberi de cupru sau zinc (80% Ni + 20% Cu, 50% Ni + 50% Zn). Au fost efectuate studii sistematice ale transferului de căldură în timpul fierberii cu încălzire neuniformă în mini și microcanale cu o înălțime de 0,55 până la 2,0 mm cu apă de subrăcire. Experimentele au fost efectuate cu încălzire intensivă din partea peretelui, până la $1,6 \text{ kW/cm}^2$. Există fapte stabilite care sunt rezultate importante. Valorile coeficienților de transfer termic și ale fluxului critic de căldură pe suprafețele poroase sunt semnificativ (de până la 3 ori) mai mari decât pentru o suprafață netedă. Valorile fluxului critic de căldură au ajuns la $1,2 \text{ kW/cm}^2$, iar valorile coeficientului de transfer termic au ajuns la $100 \text{ kW}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Semnificația rezultatelor obținute este că caracteristicile încălzirii localizate sunt subestimate, dar sunt importante în sistemele electronice moderne cu mai multe cipuri și centralele electrice promițătoare. Acest lucru va permite atingerea scalei necesare a valorilor parametrilor de schimb de căldură atunci când se dezvoltă sisteme de schimb de căldură extrem de eficiente pentru microelectronica modernă și inginerie energetică.

Cuvinte-cheie: micro/mini canale, flux ridicat de căldură, încălzire locală, acoperire poroasă subțire.

Влияние пористого покрытия на теплообмен в микрочаналах с интенсивным локализованным нагревом

Пуховой М.В., Зайцев Д.В.

Институт Теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
Новосибирск, Российская Федерация

Аннотация. Целью работы является исследования влияния пористого слоя на интенсивность теплообмена при проточном кипении в мини- и микро- каналах с локализованным нагревом со стороны стенки (размер нагревателя $3 \times 3 \text{ мм}^2$) при ширине и длине канала на порядок больше. Для достижения поставленных целей были решены следующие задачи. Была создана технология формирования различных пористых покрытий на нагревателе, основой которых был никелевый порошок с характерным размером зерна около 60-100 мкм. В результате были получены три различных тонких (масштаба 100 мкм) пористых покрытия: из никеля (100% Ni) и два биметаллических покрытия, содержащих медный или цинковый порошки (80%Ni + 20% Cu, 50% Ni + 50% Zn). Были проведены систематические исследования теплообмена при кипении с неоднородным нагревом в мини- и микро- каналах высотой от 0,55 до 2,0 мм при недогреве воды. Эксперименты выполнены при интенсивном нагреве со стороны стенки вплоть до $1,6 \text{ кВт/см}^2$. Наиболее важными результатами являются следующие установленные факты: величины коэффициентов теплоотдачи и критического теплового потока на пористых поверхностях существенно (до 3 раз) выше, чем для гладкой поверхности, величины критического теплового потока достигли величины $1,2 \text{ кВт/см}^2$, а величины коэффициента теплоотдачи достигли величины $100 \text{ кВт/(м}^2 \text{ К)}$. Кроме того, при малых перегревах воды (менее $15 \text{ }^\circ\text{C}$) величины коэффициентов теплоотдачи на всех исследованных пористых поверхностях могут быть в разы выше, чем для гладкой поверхности. Значимость полученных результатов состоит в том, что выявленные особенности локализованного нагрева недооценены, но важны в современных много- чиповых электронных системах и перспективных энергетических установках. Что позволит достичь требуемого масштаба величин параметров теплообмена при разработке высокоэффективных теплообменных систем для микроэлектроники и энергетики в современном мире.

Ключевые слова: микро/мини каналы, высокий тепловой поток, локальный нагрев, тонкое пористое покрытие.

ВВЕДЕНИЕ

Текущее тысячелетие породило новые вызовы ученым и инженерам во всех известных отраслях знания. Массовая миниатюризация в силовой электронике; большие успехи в физико-химических преобразованиях масса-энергия, связанные не только с ядерной энергетикой, но и с физико-химическими преобразователями массы в электроэнергию в топливных или водородных ячейках; последовательная микроминиатюризация в электронике; масштабная по значимости интеграция силовой, сигнальной и микроэлектронной архитектуры в единое устройство привело к новому вызову. Отныне теплофизический менеджмент новых устройств необходим почти во всех новых современных устройствах. И если при уровне тепловых потоков в масштабе менее 1 МВт/м^2 существует достаточный выбор апробированных инженерных решений для очень широкого массива температурных, энергетических, масса-геометрических и специфических эксплуатационных ограничений, то при превышении этого порога по тепловым потокам, следует ожидать практическое отсутствие решений, апробированных в должной степени для

современных условий, [1]. Миниатюризация элементов устройств с удельным тепловыделением масштаба 1 МВт/м^2 и их систем охлаждения так же пока не имеет инженерных решений, имеющих достаточных научных обоснований. Каковы реальные потребности теплового менеджмента новых или перспективных устройств показывает следующее. Для случая плотно упакованных интегральных схем [2, 3] и лазерного зеркала [4] максимальный удельный поток мощности уже превысил порог в $0,1 \text{ кВт/см}^2$. В интегрированных устройствах авиационной промышленности и при создании Сверх Больших Интегральных Схем уже требуется отводить до 1 кВт/см^2 [5, 6]. Заявляется, что в ряде реализаций термоядерных реакторов и в оборонной технике содержатся компоненты, требующие отвода теплового потока порядка 10 кВт/см^2 . Отметим, что практически во всех этих случаях реализуется неоднородный нагрев поверхности вследствие локализации интенсивного источника тепла, и это другой важный аспект проблемы.

Охлаждение горячих элементов конструкций мини- и микро- каналами при кипении охлаждающей жидкости является востребованным в технике современным типом системы охлаждения. Это показывает, к

примеру, авторский аналитический обзор экспериментальных результатов от 2021 года по мини- и микроканальной технике охлаждения, который охватывает рассмотрение более 60 статей за последние 20-25 лет, демонстрировавших отвод тепла от нагретой поверхности более 1.0 МВт/м^2 . В работе [9] продемонстрированы следующие достигнутые параметры теплообмена в миниканалах с неоднородно текстурированной поверхностью: величина коэффициента теплоотдачи составила $260 \text{ кВт/(м}^2 \text{ К)}$, величина критического теплового потока достигла 1.47 кВт/см^2 ; работе [10] в миниканалах из пористой меди, расположенной на основании из синтетического алмаза — $630 \text{ кВт/(м}^2 \text{ К)}$ и 1.35 кВт/см^2 ; в работе [11] в иерархически разветвленных микроканальных охладителях, изготовленных методом глубокого реактивного ионного травления, — $134 \text{ кВт/(м}^2 \text{ К)}$ и 4.8 кВт/см^2 , соответственно. Однако прогресс в этом вопросе недостаточен вследствие технологических сложностей создания таких специфических систем охлаждения. Требуется достичь схожих результатов более простыми технологическими методами, например, применением тонких пористых покрытий нагретых поверхностей.

Охлаждение при кипении жидкости на модифицированных и пористых поверхностях с принудительной конвекцией хорошо изучено в простых случаях для больших равномерно нагретых каналов [12] и изучается для случаев миниканального охлаждения, например [13]. Проточное кипение в каналах и мини-каналах при неоднородном нагреве так же активно изучается [14]. Однако исследование проточного кипения в микроканалах с неоднородным нагревом связано с новыми требованиями существенно более интенсивного охлаждения электронного и микроэлектронного оборудования при возникновении такого нагрева по плоскости канала [15, 16], что требует отнестись более внимательно и к величинам коэффициентов теплоотдачи, реализующихся при малых значениях перегрева охлаждаемой поверхности.

Ключевой проблемой, как при интенсивном, так и при неоднородном нагреве является большой перегрев стенки для начала пузырькового кипения с присущей неустойчивостью потока и относительно

низкими значениями, как коэффициентов теплоотдачи, так и критического теплового потока в обычных сплошных параллельных микроканалах, [17]. В работах авторов, выполненных в 2022-2024 годах изучена динамика кипения и потока, проведена скоростная микросъемка, определено влияние высоты канала на теплоотдачу и критический тепловой поток в плоских миниканалах с неоднородным нагревом (ширина и длина потока рабочей жидкости больше таковых для нагревателя на порядок), представлены обобщающие зависимости. Это позволяет прогнозировать параметры теплообмена, применять накопленные знания при проектировании систем охлаждения. И здесь применение пористых поверхностей может дать новые интересные результаты, являясь естественным продолжением работ по изучению методов интенсификации теплообмена в подобных системах.

Целью работы являлось изучение влияния наличия пористости на поверхности нагревателя на теплообмен между водой и более горячей поверхностью, в частности на коэффициенты теплоотдачи и критический тепловой поток при кипении текущего потока воды в мини- и микро-каналах с неоднородным нагревом в рабочей зоне канала. В работе выполнены систематические исследования теплообмена при кипении с неоднородным нагревом в мини- и микроканалах высотой от 0.55 до 2.0 мм при недогреве воды. Эксперименты проводились на созданном ранее рабочем участке шириной 30 мм на нагревателе $3 \times 3 \text{ мм}^2$ (смотри Рис.1). Эксперименты выполнены при интенсивном нагреве со стороны стенки вплоть до 1.6 кВт/см^2 . Проведено сравнение теплообмена и кипения на медном гладком и трех нагревателях, покрытых тонкими различающимися пористыми металлическими пленками.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И СОЗДАНИЯ ТОНКИХ ПОРИСТЫХ ПОКРЫТИЙ

Для выполнения исследований по кипению с неоднородным нагревом в миниканале на гладкой медной или пористой поверхностях использовалось следующее оборудование. Экспериментальные исследования теплообмена выполнялись на рабочем участке (фото на Рис. 1) с массивным медным

нагревателем $3 \times 3 \text{ мм}^2$, показанном на Рис. 2. Верхняя стенка канала состоит из просветленного стекла толщиной 20 мм, что позволяет проводить визуализацию гидродинамики процесса кипения. Нижняя часть канала – пластина из нержавеющей стали, в которую впрессован медный стержень с головкой $3 \times 3 \text{ мм}^2$, выполняющий роль нагревателя. При помощи 2 термопар, диаметром 0.25 мм, заделанных в нагреватель, и 6 термопар диаметром 0.5 мм, заделанных в стальную пластину, определяется тепловой поток в медном стержне, а также тепловые растечки в пластину из нержавеющей стали. Чтобы дополнительно минимизировать радиационные тепловые потери, медный нагреватель снаружи был никелирован. В качестве источника тепла используются 4 картриджных нагревателей тепловой мощностью 160 Вт. Тепловой контакт между картриджными нагревателями и медью обеспечивается за счет тонкого слоя жидкометаллического термоинтерфейса на основе галлиевого сплава. Блок медного нагревателя обернут листами аэрогеля с теплопроводностью 0.019 Вт/(м К) при комнатной температуре, что значительно снижает потери тепла в атмосферу. Тепловой поток с нагревателя определяется, как тепловой поток вдоль медного стержня, измеренный при помощи термопар, за вычетом тепловых растечек в пластину. Подробно методика тепловых измерений с неоднородным нагревом описана в [18], ее экспериментальное сравнение с однородным нагревом было представлено авторами в 2021 году. Интенсивные работы в течение пяти последних лет, доложенные в ведущих профильных журналах делают маловероятной возможность того, что наблюдаемые явления являются результатом ошибки обработки экспериментальных данных. Жидкость (вода) подавалась в используемый рабочий участок при помощи насоса с регулируемым расходом и дополнительно расход измерялся при помощи ультразвукового расходомера. В качестве рабочей жидкости использовалась сверхчистая дистиллированная вода Milli-Q. Во всех экспериментах начальная температура воды составляла $19 \text{ }^\circ\text{C}$. Высота канала варьировалась от 0.5 до 2.0 мм. Высота канала измеряется в 6 точках при помощи конфокального датчика Micro-Epsilon IFC2451. Визуализация процесса кипения производилась с использованием

высокоскоростной камеры FASTCAM SA 1.1. Скорость съемки в экспериментах достигала 100 000 кадров в секунду. Камера оборудована оптической системой высокого пространственного разрешения, в частности объективом Mitutoyo M PLAN APO x5 позволяющим достичь пространственного разрешения 2 мкм на пиксель камеры.

Проведено сравнение кипения на медном гладком и различающихся пористых поверхностях нагрева: никелевой (Ni), никелево-медной (Ni+Cu) и никелево-цинковой (Ni+Zn). Массовое содержание металлов в покрытиях следующее: 100% Ni, 80%Ni + 20% Cu, 50% Ni + 50% Zn. Пористая поверхность формировалась нанесением однородного слоя никелевого порошка или смеси порошков (размер порошинок масштаба 50-100 мкм) на медное гладкое основание с дальнейшим спеканием порошинок с медным основанием и между собой импульсным разрядом электрического тока. Толщина сформированного пористого слоя составляла около 150 мкм. Пример изображения сформированного пористого слоя представлен на Рис. 3. Из рисунка видно, что пористый слой содержит около трех слоев порошинок никеля, спеченных и локально частично расплавленных импульсом электрического тока. Слой не является однородным как в плоскости основы - гладкого медного нагревателя, так и по толщине. Более однородным получается пористый слой (Ni+Cu), полученный по такой же методике, смотри Рис. 4. Было проведено и EDS (EDS - Energy Dispersive Spectroscopy, микроаналитический метод для идентификации и количественной оценки элементов, присутствующих в образце) исследование элементного состава пористого покрытия (Ni+Cu) с помощью растрового электронного микроскопа, смотри Рис. 5. Здесь а), б) и в) являются визуализированными цветом пространственными распределениями указанных металлов и кислорода. Из рисунков видно, что: 1) покрытие однородно как по пространству, так и по толщине, и достигает примерно трех толщин частицы никеля; 2) частицы никеля в целом расположены схоже с пористым покрытием Ni; 3) однако, медь, распределенная равномерно по пространству слоя, отделена от никеля и частично сплавлена; 4) кроме того, никель не выглядит расплавленным, но слой прочный, спеченный

электрическим импульсом. Таким образом, пористое покрытие (Ni+Cu) как целое более однородно по объему и толщине, является биметаллическим, имеет отличные от случая покрытия Ni характеристики. Существенно менее однородным по толщине получается пористый слой (Ni+Zn), полученный по схожей методике спекания смеси двух порошков электрическим импульсом, смотри Рис. 6. Было проведено и EDS исследование элементного состава пористого покрытия (Ni+Zn) с помощью растрового электронного микроскопа. Установлено, что: 1) это покрытие менее однородно как по пространству, так и по толщине, а размер частиц металла существенно меньше; 2) частицы металла в целом расположены схоже с пористым покрытием Ni; 3) однако, и никель и цинк распределены равномерно по пространству слоя, возможно составляя единый сплав в виде порошинок и

проплавлений; 4) порошинки образуют прочный пористый слой, спеченный электрическим импульсом. Таким образом, пористое покрытие (Ni+ Zn) как целое имеет схожие характеристики по однородности по объему и толщине с покрытием Ni, является биметаллическим с идентичным распределением металлов в нем, но имеет отличные от случая предыдущих покрытий характеристики.

В результате проведенных экспериментов получены первичные данные и первичные кривые конвективного теплообмена (для случаев температуры поверхности контакта воды с нагреваемой поверхностью) и теплообмена при кипении для различных расходов воды при различных высотах канала для всех описанных выше типов поверхностей. Подробно методика описана для неоднородного нагрева в [18].

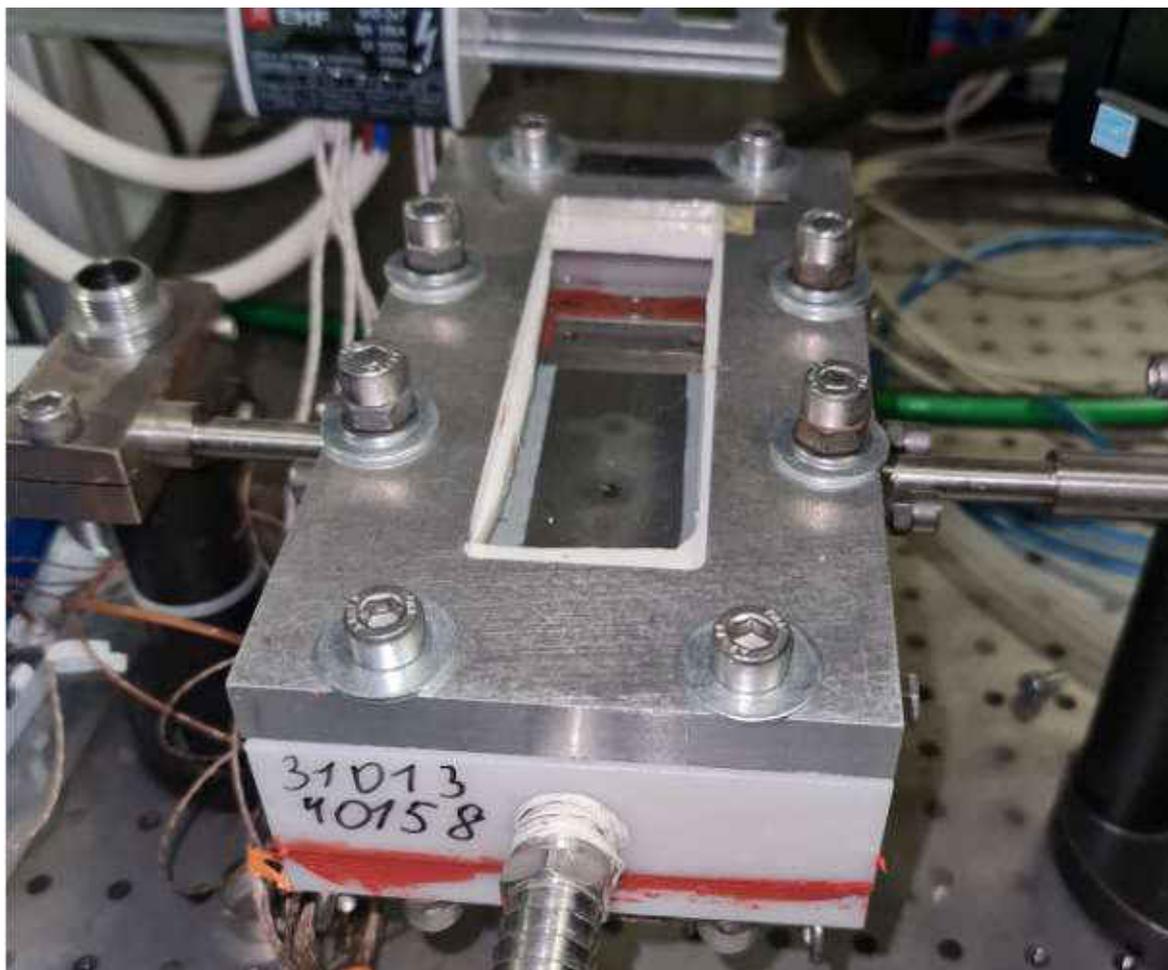
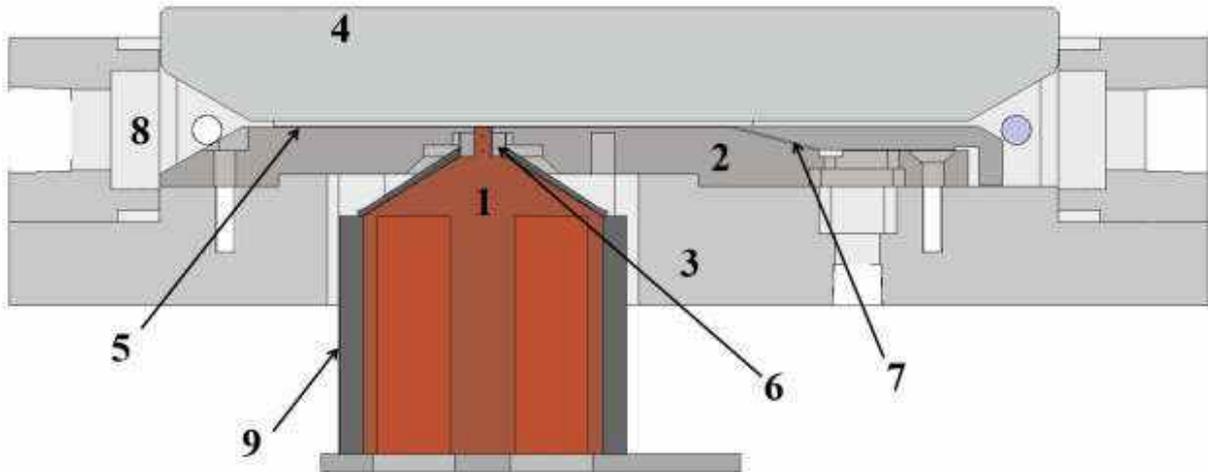


Рис. 1. Фото рабочего участка с нагревателем размерами 3x3 мм¹

¹ Appendix 1



1 – медный нагреватель, 2 – пластина из нержавеющей стали, 3 – основа из капролона 4 – верхняя крышка из стекла, 5 – фторопластовая вставка, 6 – прокладка из фторфлаопита, 7 – входное сопло жидкости, 8 – выходное сопло, 9 – теплоизоляция из аэрогеля.

Рис. 2. Рабочий участок с массивным нагревателем размером $3 \times 3 \text{ мм}^2$ в продольном сечении.²

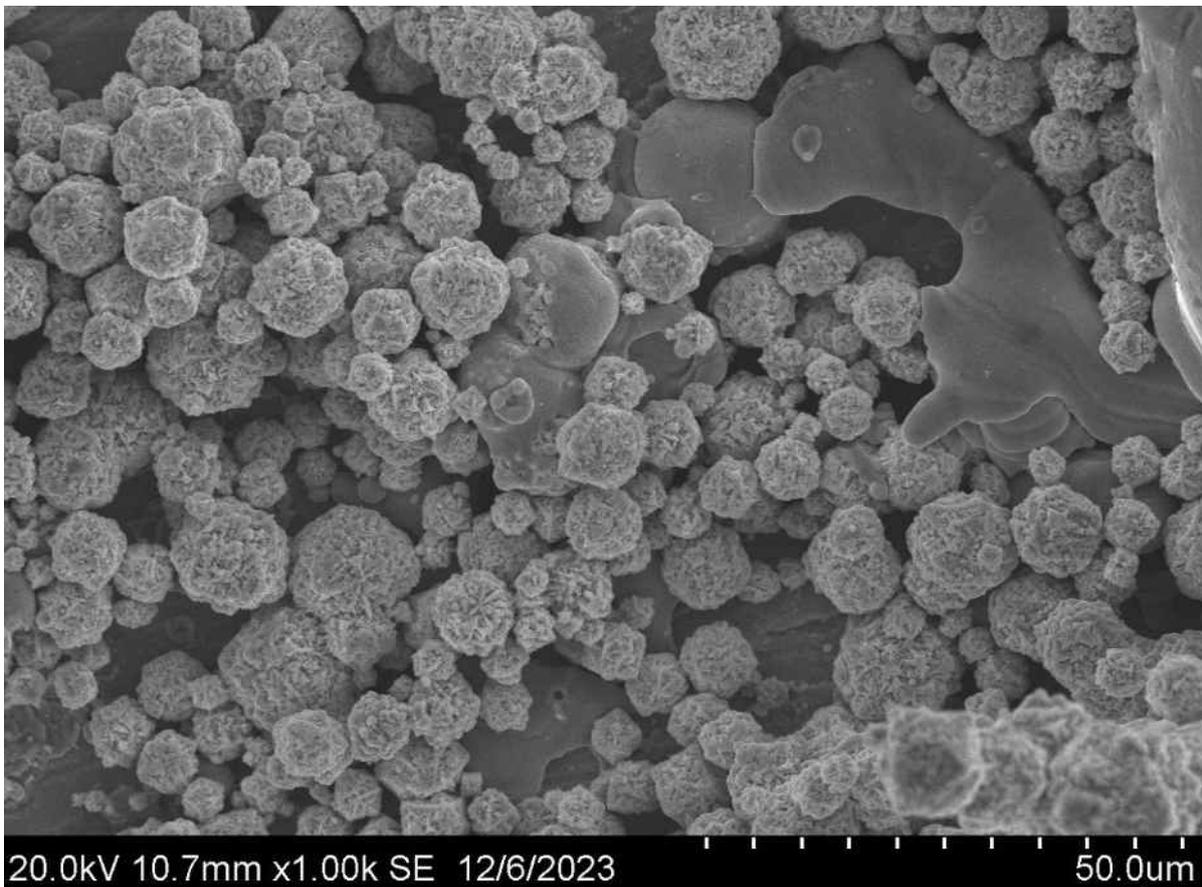


Рис. 3. Пример изображения пористого (Ni) покрытия с растрового электронного микроскопа.³

^{2,3} Appendix 1

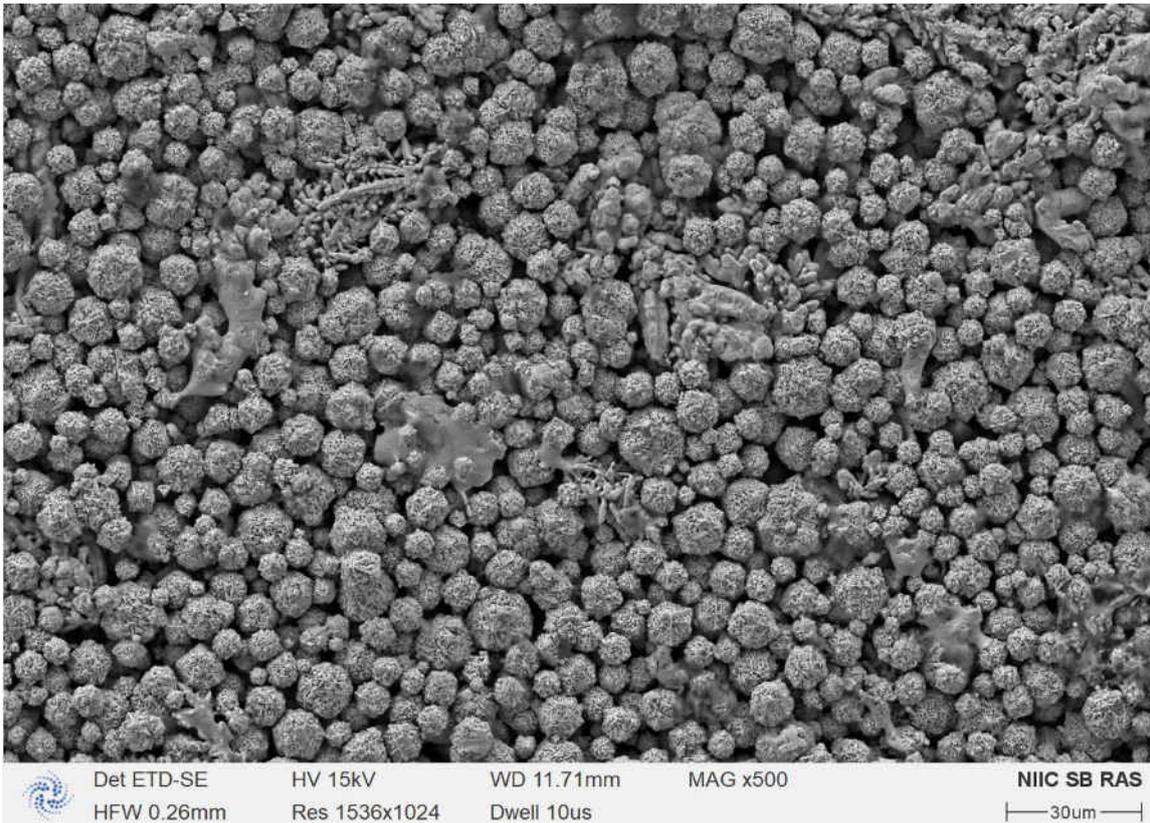
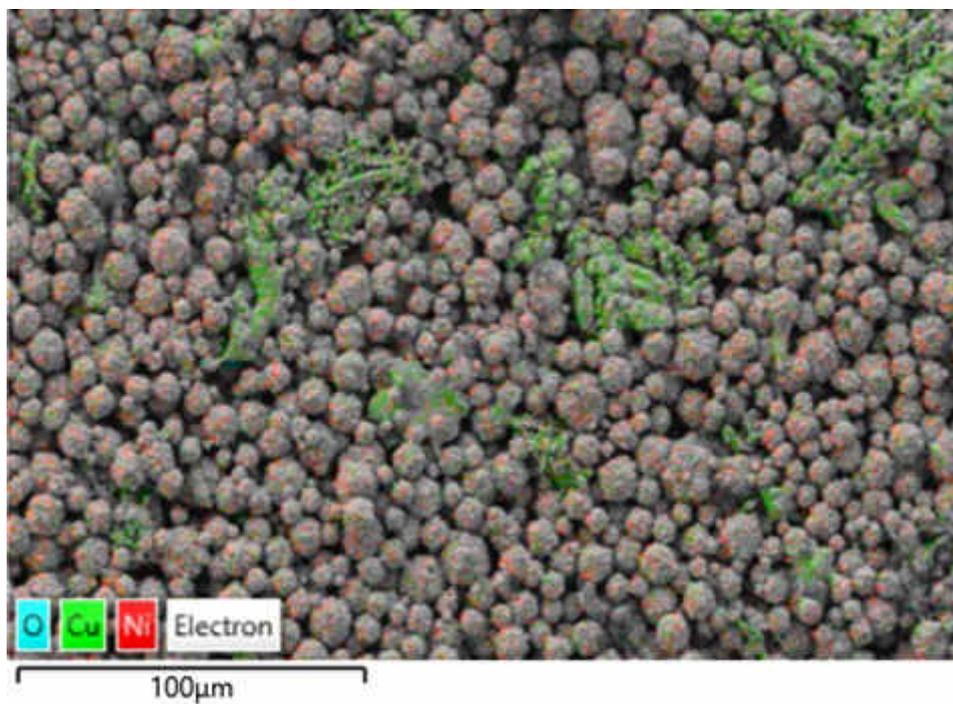
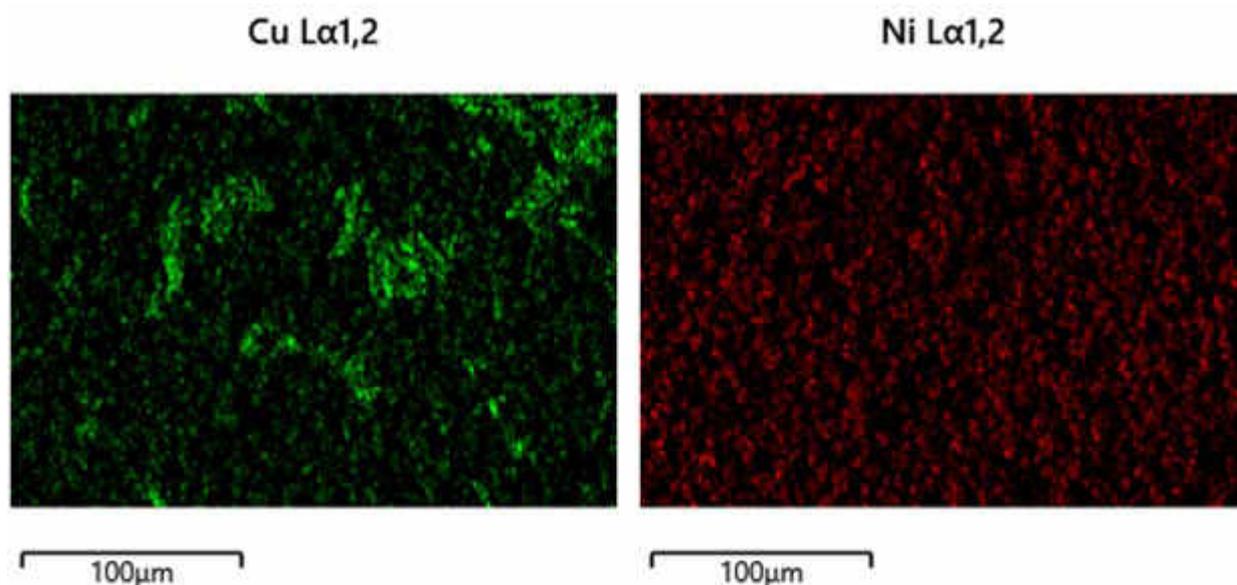


Рис. 4. Пример изображения пористого (Ni+Cu) покрытия с помощью растрового электронного микроскопа.⁴



а) визуализация цветом пространственного распределения химических элементов кислорода, меди и никеля.⁵

^{4,5} Appendix 1



б) изображение пространственного распределения⁵ меди, выполненное через цветовую маску;

в) та же процедура для визуализации⁵ распределения никеля.

Рис. 5. Пример EDS (EDS - Energy Dispersive Spectroscopy, микроаналитический метод для идентификации и количественной оценки элементов, присутствующих в образце) исследования элементного состава пористого (Ni+Cu) покрытия с помощью растрового электронного микроскопа.⁵

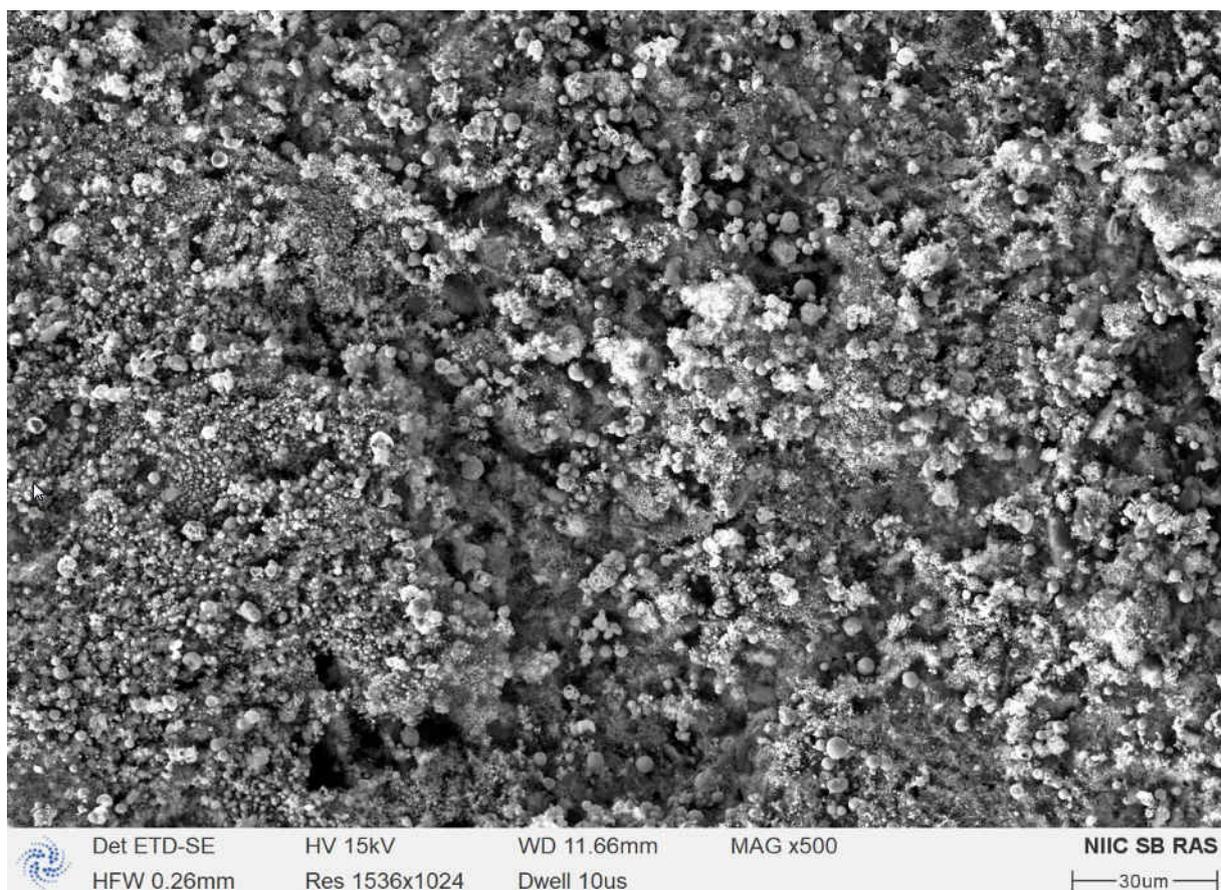


Рис. 6. Пример изображения пористого (Ni+ Zn) покрытия с помощью растрового электронного микроскопа.⁶

^{5,6} Appendix 1

Для нагревателя $3 \times 3 \text{ мм}^2$ (ширина канала 30 мм) проведено подробное сравнение параметров теплообмена и кипения на гладкой и шероховатой Ni поверхности нагрева для каналов высотой от 0.55 до 2.0 мм при различных расходах и недогреве воды. Кроме того, для канала высотой 1.3 мм выполнено подробное сравнительное исследование параметров теплообмена и кипения на гладкой и шероховатых (Ni, Ni+Cu, Ni+Zn) поверхностях нагрева. Проведена видеосъемка процесса кипения высокоскоростной камерой. Характеризация результатов, позволяющая определить как наличие шероховатости повлияло на теплообмен между водой, текущей в канале шириной 30 мм и нагревателем с размерами в плане $3.0 \times 3.0 \text{ мм}^2$ выполнено типичным образом – представлением данных в виде зависимостей: критического теплового потока от удельного массового потока воды, коэффициента теплоотдачи в зависимости от реализующегося в экспериментах перегрева и численных оценок характеристик пузыреобразования при кипении, полученных из скоростной макро- видеосъемки процессов кипения.

Критический тепловой поток определяет условия верхнего предела количества перенесенного тепла кипящим потоком в микроканалах. Критический тепловой поток тесно и неразрывно связан с явлением, при котором при движении кипящего потока вдоль нагреваемого канала в отдельных точках может быстро уменьшиться коэффициент теплоотдачи и температура стенки в этих точках резко возрастёт. Связано это с образованием паровой прослойки на поверхности твердого нагревателя, оттесняющей поток охлаждающей жидкости. Именно по этому критерию в данных работах определяется величина критического теплового потока при заданных в эксперименте условиях.

Коэффициент теплоотдачи определяется в данных работах по классическому определению: это плотность теплового потока на границе жидкости (газа) и соприкасающегося с ней нагревателя, отнесенная к разности температур поверхности и набегающей на область нагревателя воды. Численное его значение равно тепловому потоку, Вт, от единичной поверхности теплообмена, $1/\text{м}^2$, отнесенному к разности температуры поверхности и

температуры жидкости, задаваемой термостатом на входе в наш рабочий канал, выраженная в Кельвинах.

В качестве численных оценок характеристик пузыреобразования при кипении, полученных из скоростной макро- видеосъемки процессов кипения, использовались такие величины, как: частота появления новых пузырьков пара на единице поверхности нагревателя, оценка скорости их всплытия и времени исчезновения, возможность их движения в направлении плоскости нагреваемой поверхности как по течению, так и в других или оппозитных направлениях. Некоторые результаты обработки видеопленок представлены в работе авторов в 2024 году.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение величин критического теплового потока сделано для массива данных при нагреве гладким нагревателем и нагревателем с пористым покрытием из никеля для каналов высотой от 0.55 до 2.0 мм при различных расходах и недогреве воды. На Рис. 7 представлен график, отражающий влияние пористости Ni на поверхности кипения на критический тепловой поток. Здесь показаны зависимости удельного массового расхода (массовой скорости) воды и высоты канала (указана в легенде) на критический тепловой поток q_{cr} для нагревателя $3 \times 3 \text{ мм}^2$ (ширина канала 30 мм). Видно, что для двух различающихся поверхностей нагрева линии идут эквидистантно, но в случае наличия пористой поверхности величина критического теплового потока растет сильнее. На примере канала с высотой 0.55 мм ясно отмечено, что пересечение кривых для двух типов поверхностей произошло при изменении режима кипения в момент кризиса кипения. Вместо медленно развивающегося кризиса кипения при постоянно сидящем большом пузыре, кипение сменилось на интенсивное паровое пузыреобразование, сметающее большие пузыри. Большие пузыри либо флуктуируют, либо совсем не образуются до момента «классического» кризиса – внезапного образования крупного пузыря с резким ростом температуры. Это верно для обоих типов представленных на графике поверхностей. Но в случае гладкой поверхности превалирует режим флуктуирующего большого пузыря, а на пористой Ni поверхности он не образуется либо возникает на мгновения вплоть до

возникновения «классического» кризиса. При течении в канале высотой 2.0 мм на пористой Ni поверхности кипение практически всегда имело «классический» тип без образования «сидящего» или флуктуирующего пузыря.

Было изучено влияние пористости Ni на величины коэффициентов теплоотдачи и характеристики различий в режимах кипения. Рисунки 8-9 представляют сравнимые (при схожих удельных массовых расходах воды) зависимости величин коэффициентов теплоотдачи от величины перегрева, реализующегося на нагреваемой поверхности для обоих типов поверхностей, (нагреватель 3x3 мм², ширина канала 30 мм, высота 0.55 мм). Обозначение типа поверхности нагревателя: a_Ni) - пористая Ni, b) - гладкая. Расход воды и тип поверхности представлены в легенде. Рис. 9 представляет сравнение этих данных только для расходов воды схожей величины и случаев, когда перегрев воды не превышает 15 °С. Из Рис. 8-9 для канала, высотой 0,55 мм хорошо видно, что для массовых расходов воды менее 163 кг/(м² с) величины коэффициентов теплоотдачи сравнимы, хотя для пористой Ni поверхности при перегревах выше 10 °С они могут на 15-50% превышать соответствующие значения при кипении на гладкой поверхности. Однако при режиме кипения, когда не образуется постоянно «сидящего» пузыря, постоянно закрывающего значительную часть нагретой поверхности, или такого пузыря, флуктуирующего с малыми частотами, – коэффициенты теплоотдачи в разы больше. Чаще всего это наблюдалось для кипения на пористой Ni поверхности.

На Рис. 10-11 для канала высотой 2,0 мм представлены сравнимые (при схожих удельных массовых расходах воды) зависимости величин коэффициентов теплоотдачи от величины перегрева реализующегося на нагреваемой поверхности для этих двух типов поверхностей. Обозначение типа поверхности нагревателя: a_Ni) - пористая Ni, b) - гладкая. Расход воды и тип поверхности представлены в легенде. Рис. 11 представляет сравнение этих данных для расходов воды схожей величины и случаев, когда перегрев воды не превышает 15 °С. Из Рис. 10-11 для канала, высотой 2.0 мм хорошо видно, что для пористой Ni поверхности уже при всех значениях перегрева коэффициенты теплоотдачи более чем в 2 раза превышают соответствующие

значения при кипении на гладкой поверхности. А падение величин теплоотдачи при самых высоких перегревах отражает технический факт фиксации медленно развивающегося кризиса кипения при слабо флуктуирующих пузырях, закрывающих практически весь нагреватель.

Представим частично данные по коэффициентам теплоотдачи и для канала высотой 1.3 мм с целью более полной характеристики отличий между гладкой и пористой Ni поверхностями. Рис. 12 представляет сравнение этих данных при расходах воды схожей величины и случаев, когда перегрев воды не превышает 15 °С. Для этой области параметров так же наблюдается отмеченный выше факт, что коэффициенты теплоотдачи более чем в 2 раза превышают соответствующие значения при теплообмене на гладкой поверхности. Остальные экспериментальные факты для канала с высотой 1.3 приведены ниже.

Были выполнены эксперименты по неоднородному нагреву для случаев с кипением на поверхностях с различающейся пористостью. Эти эксперименты выполнены на канале с глубиной 1.3 мм. На Рис. 13 представлен график, отражающий зависимость критического теплового потока от сравнимых массовых расходов воды при теплообмене и кипении на плоской медной и представленных трех пористых поверхностях, обозначение типа поверхности указано в легенде. Видно, что биметаллические пористые поверхности (Ni+Cu, Ni+Zn) не показали значимого преимущества перед гладкой поверхностью. Связано это, прежде всего, с тем, что на них редко возникал эффективный механизм сноса больших пузырей за счет интенсивного парового пузыря-образования с значимо более высокими частотами.

И все-таки, поведение кривой для пористой (Ni+Zn) поверхности требует комментариев. При малых массовых расходах воды (две левые точки) эта биметаллическая поверхность проявила себя схоже с гладкой поверхностью. Однако, при расходе около 74 кг/(м² с) возникло образование паровых пузырьков с очень высокими частотами. Это предопределило полное отсутствие постоянно «сидящего» пузыря, хотя бы частично закрывающего нагретую пористую (Ni+Zn) поверхность,

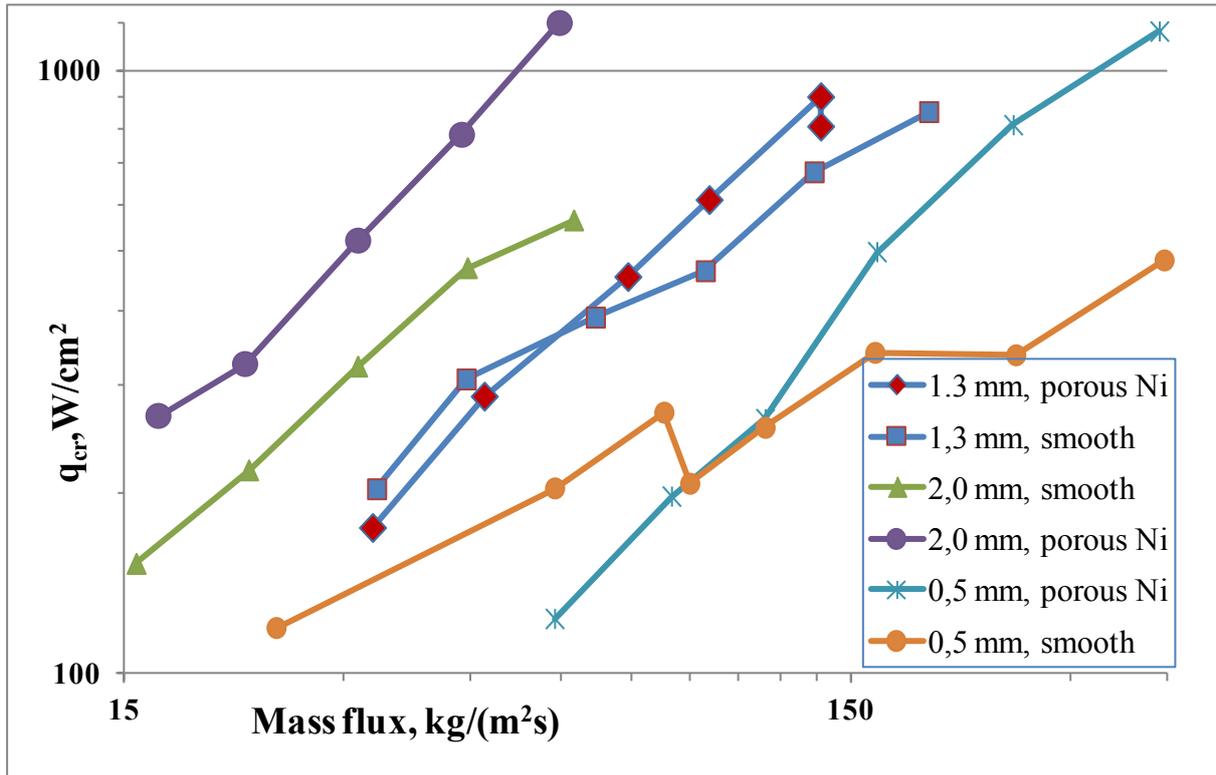
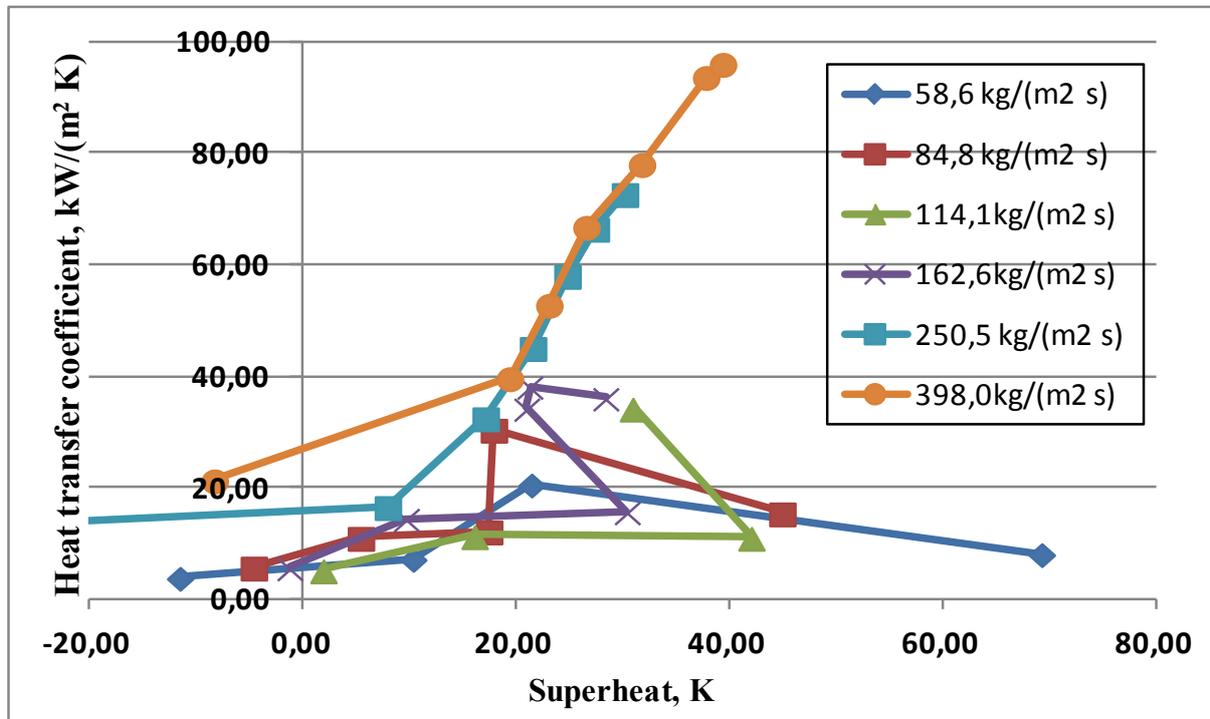
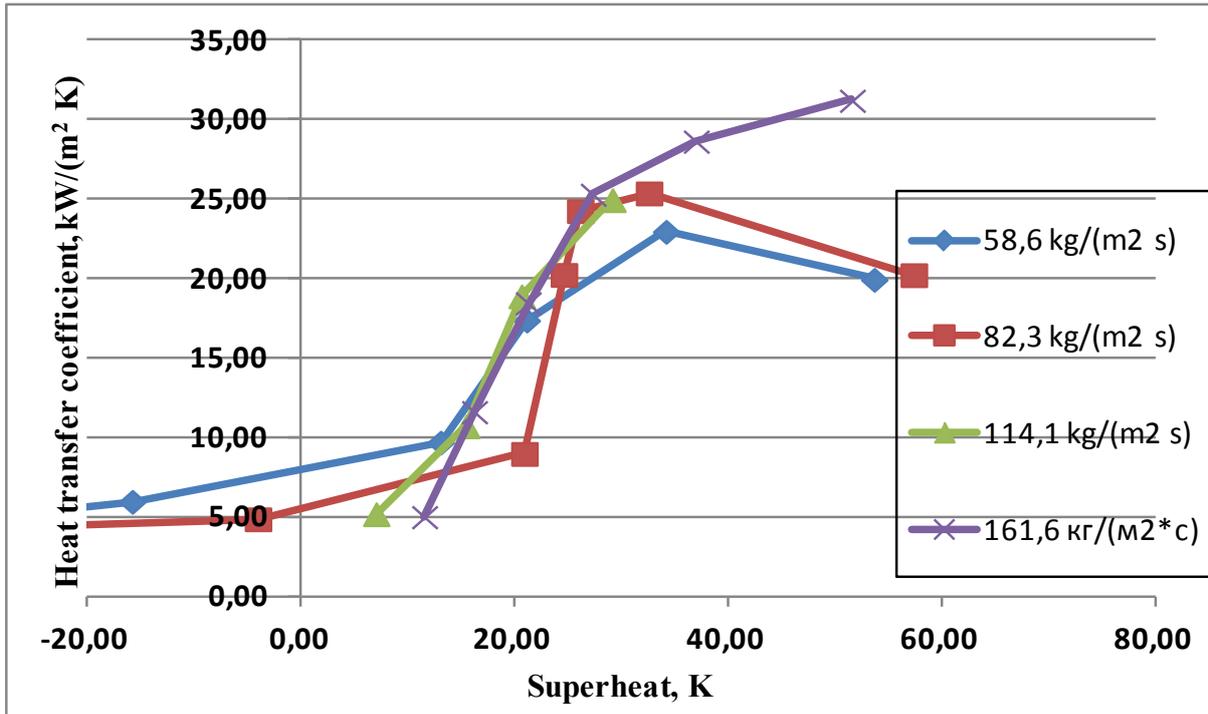


Рис. 7. Влияние удельного массового расхода (массовой скорости) воды и высоты канала (указана в легенде) на критический тепловой поток q_{cr} для нагревателя 3x3 мм² (ширина канала 30 мм). Представлены данные для нагревателя с гладкой и пористой Ni поверхностями.⁷



a_Ni) пористая Ni⁸

^{7,8} Appendix 1



б) гладкая ^{8 App 1}

Рис. 8. Коэффициент теплоотдачи, в зависимости от величины перегрева стенки, при кипении в канале для нагревателя 3x3 мм² (ширина канала 30 мм, высота 0.55 мм) для различных расходов воды. Обозначение типа поверхности нагревателя указано под рисунком. ^{8 App 1}

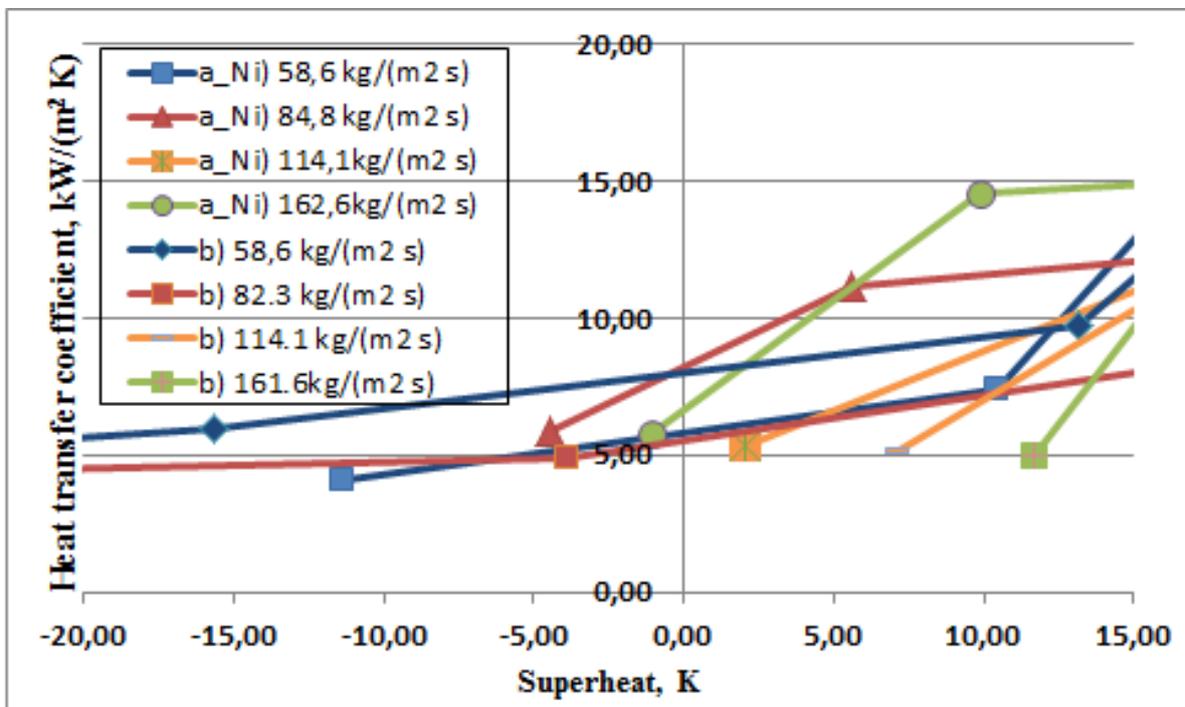
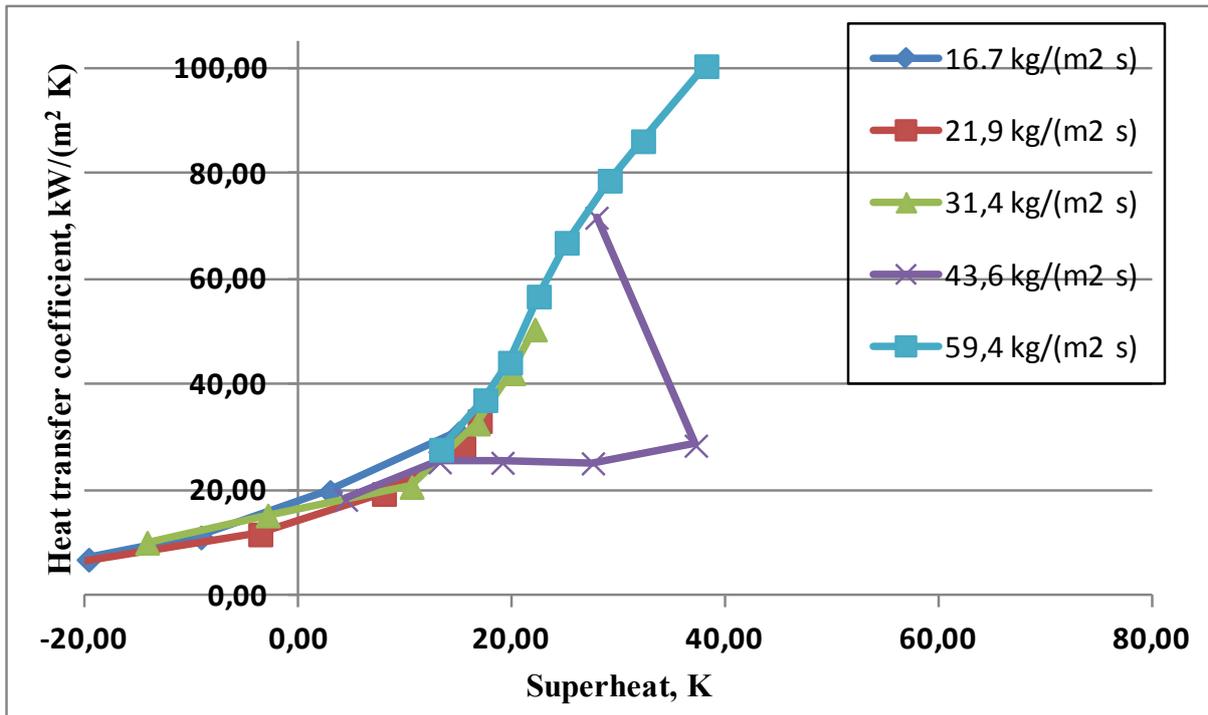
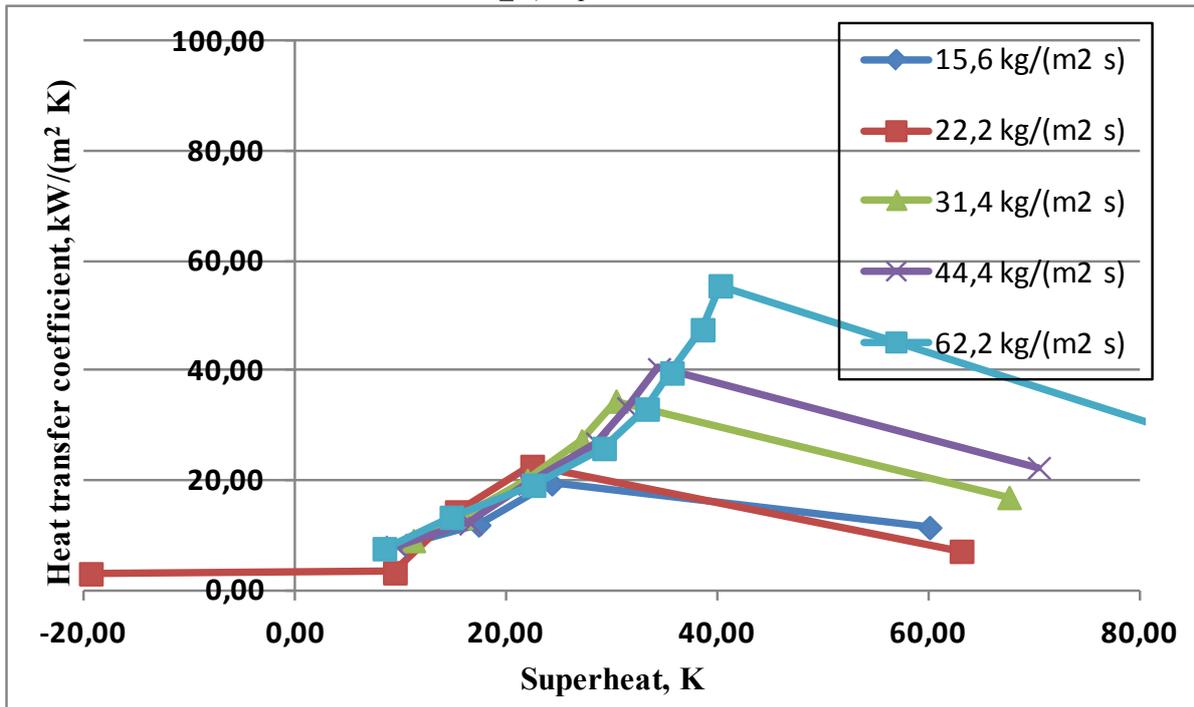


Рис. 9. Коэффициент теплоотдачи, в зависимости от величины перегрева стенки (менее 15 °С), при кипении в канале для нагревателя 3x3 мм² (ширина канала 30 мм, высота 0,55 мм) для различных расходов воды. Обозначение типа поверхности нагревателя в легенде: a_Ni) - пористая Ni, b) – гладкая. ⁹

⁹ Appendix 1



a Ni) пористая Ni ¹⁰



б) гладкая ¹⁰ App 1

Рис. 10. Коэффициент теплоотдачи, в зависимости от величины перегрева стенки, при кипении в канале для нагревателя 3x3 мм² (ширина канала 30 мм, высота 2.0 мм) для различных расходов воды. Обозначение типа поверхности нагревателя указано под рисунком.¹⁰

¹⁰ Appendix 1

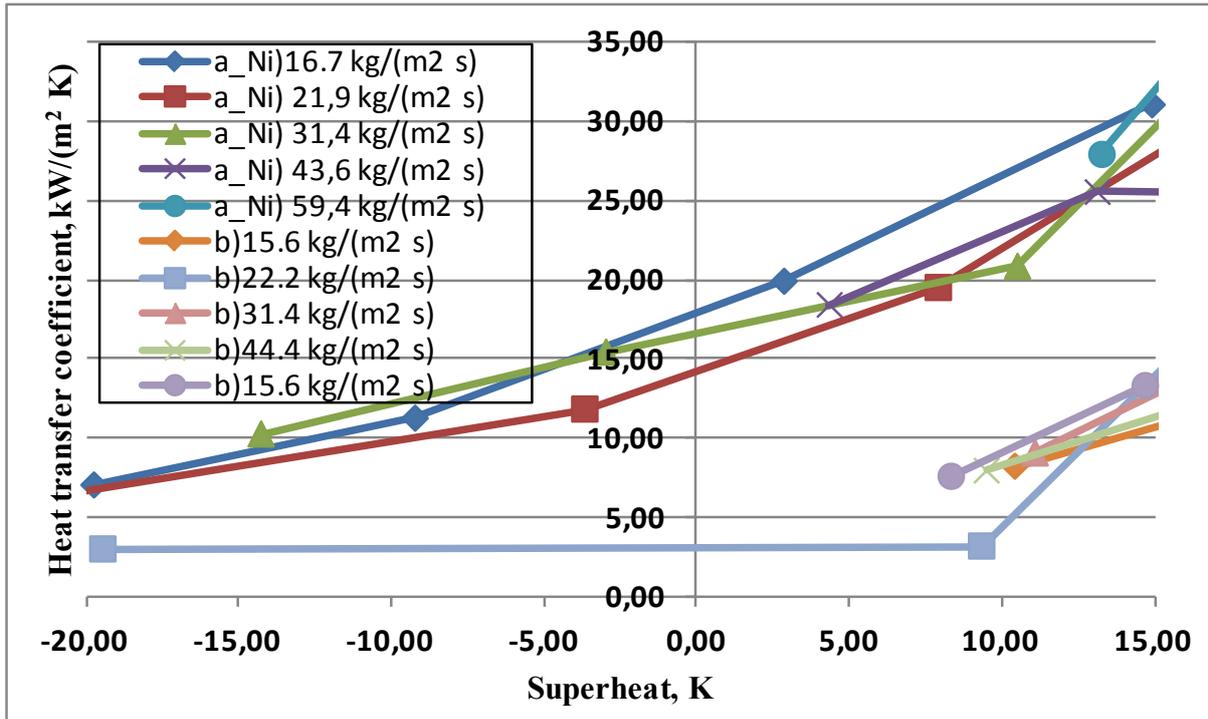


Рис. 11. Коэффициент теплоотдачи, в зависимости от величины перегрева стенки (менее 15 °С), при кипении в канале для нагревателя 3x3 мм² (ширина канала 30 мм, высота 2.0 мм) для различных расходов воды. Обозначение типа поверхности нагревателя: a_Ni) - пористая Ni, b) – гладкая.¹¹

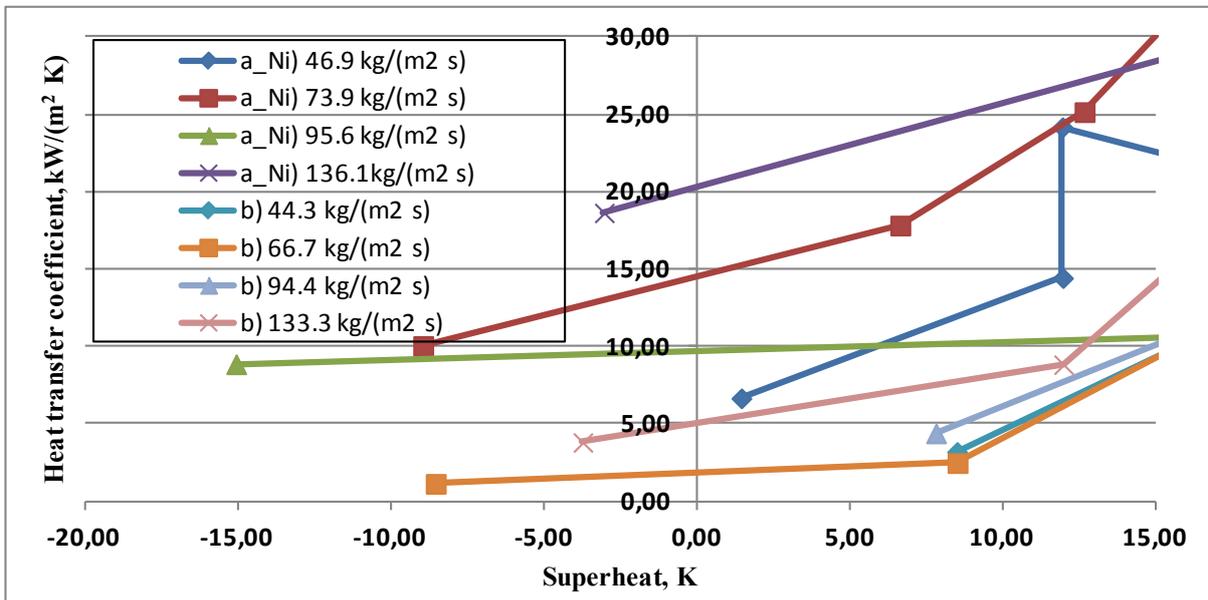


Рис. 12. Коэффициент теплоотдачи, в зависимости от величины перегрева стенки (менее 15 °С), при кипении в канале для нагревателя 3x3 мм² (ширина канала 30 мм, высота 1.3 мм) для различных расходов воды и двух типов поверхностей. Обозначение типа поверхности нагревателя представлено в легенде: a_Ni) - пористая Ni, b) – гладкая.¹²

^{11,12} Appendix 1

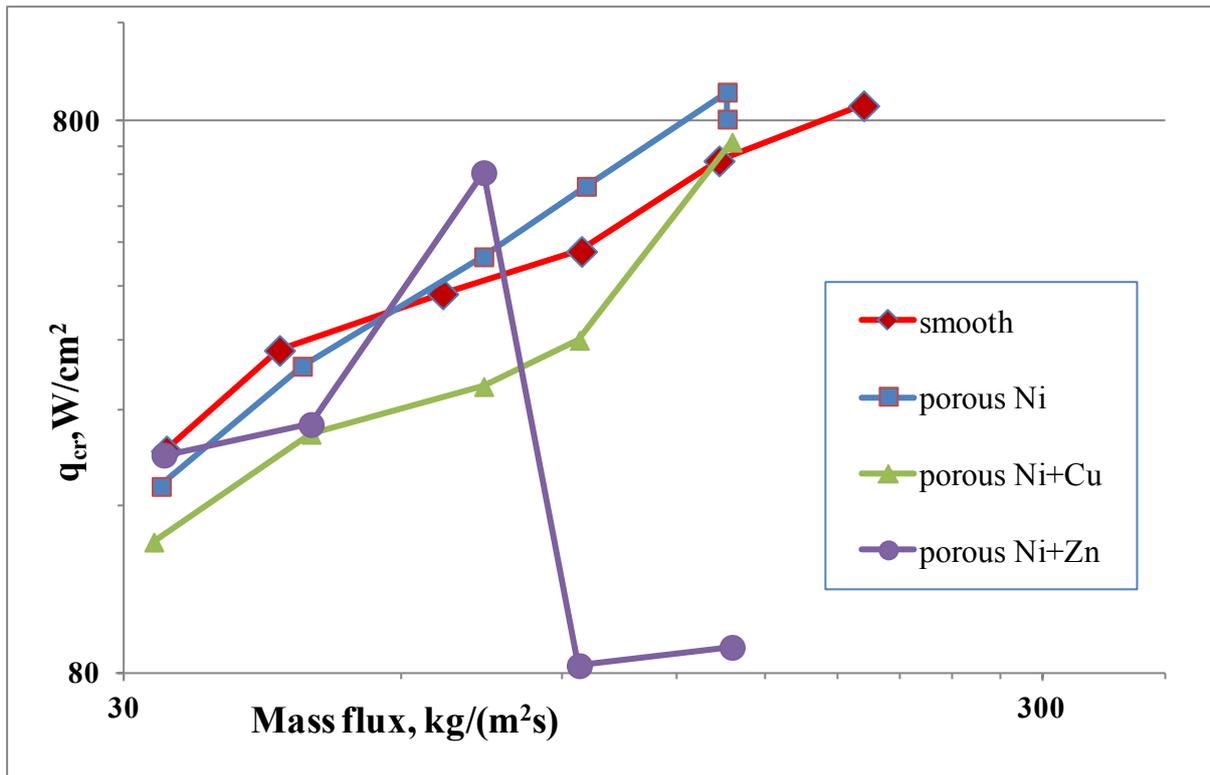


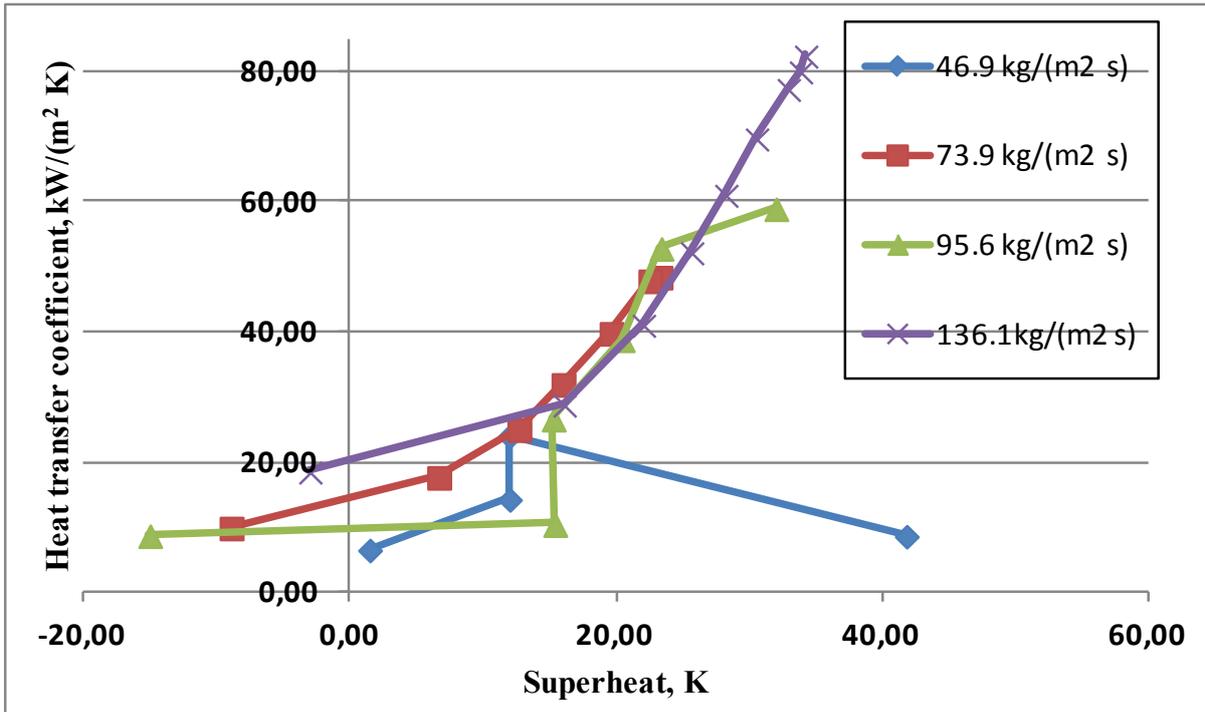
Рис. 13. Влияние удельного массового расхода (массовой скорости) воды на критический тепловой поток q_{cr} для нагревателя $3 \times 3 \text{ мм}^2$ (ширина канала 30 мм, высота канала 1.3 мм). Представлены данные для нагревателя с гладкой и пористыми поверхностями, обозначения типа поверхности указано в легенде. Ni, Ni+Cu и Ni+Zn – соответствующие пористые поверхности; smooth - гладкая поверхность.¹³

вплоть до мгновения, когда возник стремительно развившийся «классический» кризис кипения. При продолжении (правые две точки на этой кривой) эксперимента по методике, принятой нами во всем комплексе таких экспериментальных исследований, выяснилось, что сверхинтенсивное кипение как-то изменило пористую поверхность - часть ее разрушилась либо окислилась. Это и вызвало снижение величин критических потоков в этой экспериментально изученной области.

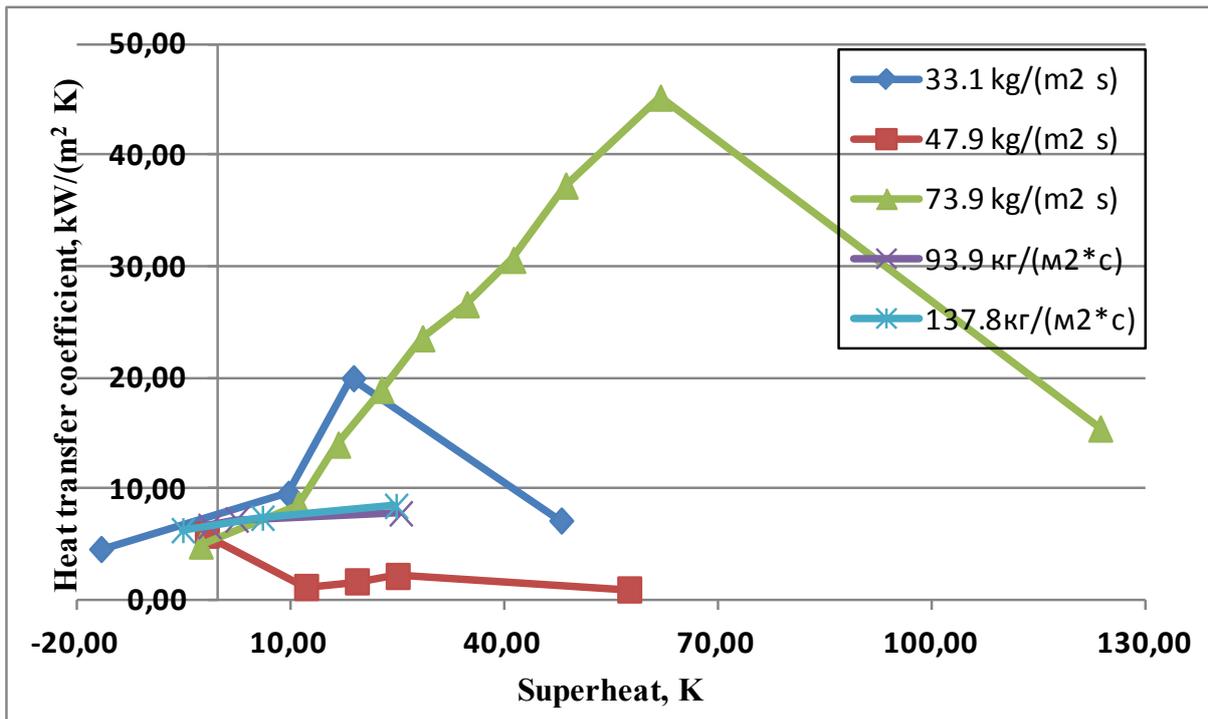
На Рис. 14 для канала с глубиной 1.3 мм представлены сравнимые (при схожих удельных массовых расходах воды) графики величин теплоотдачи в зависимости от перегрева поверхности для четырех исследованных типов поверхностей (нагреватель $3 \times 3 \text{ мм}^2$, ширина канала 30 мм), расход воды и обозначение типа поверхности указано под рисунком или в легенде. Здесь a_{Ni} , a_{Ni+Cu} и a_{Ni+Zn} – соответствующие пористые поверхности в) - гладкая поверхность. Выводы для канала

высотой 1.3 мм для гладкой и пористой поверхности Ni идентичны для выводов для каналов высотой 0.55 и 2.0 мм. Коэффициенты теплоотдачи при перегреве выше $15 \text{ }^\circ\text{C}$ значимо (от 15-50%) превышают, чем в случае кипения на гладкой поверхности. Для пористых поверхностей Ni+Cu и Ni+Zn ситуация несколько иная. При относительно небольших перегревах (менее $15 \text{ }^\circ\text{C}$) величины коэффициентов теплоотдачи на пористых биметаллических поверхностях так же в разы выше, чем для гладкой поверхности, причем даже при несколько больших расходах. Однако, при более высоких перегревах ситуация меняется радикально – чаще всего величины коэффициентов теплоотдачи на биметаллических поверхностях сравнимы или ниже, чем на гладкой поверхности. И опять же, это связано с тем, что на них не возникал эффективный механизм сноса больших пузырей за счет интенсивного парового пузыре-образования с значимо более высокими частотами.

¹³ Appendix 1

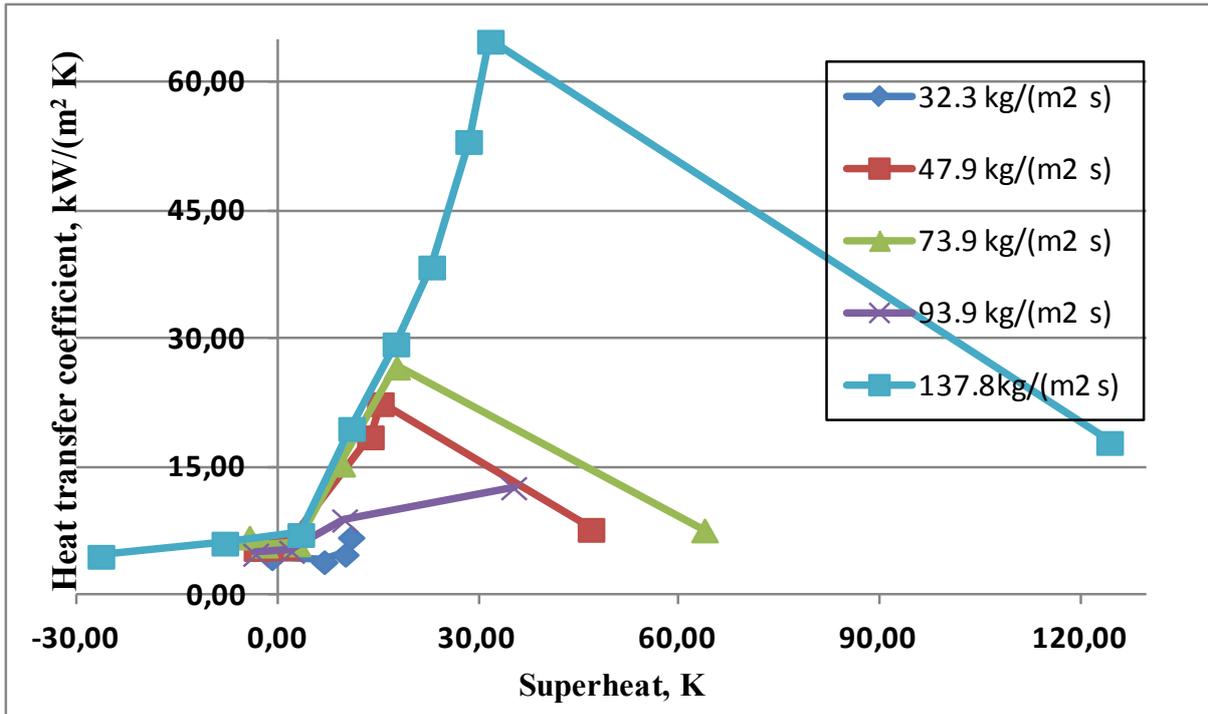


*a_Ni) пористая*¹⁴

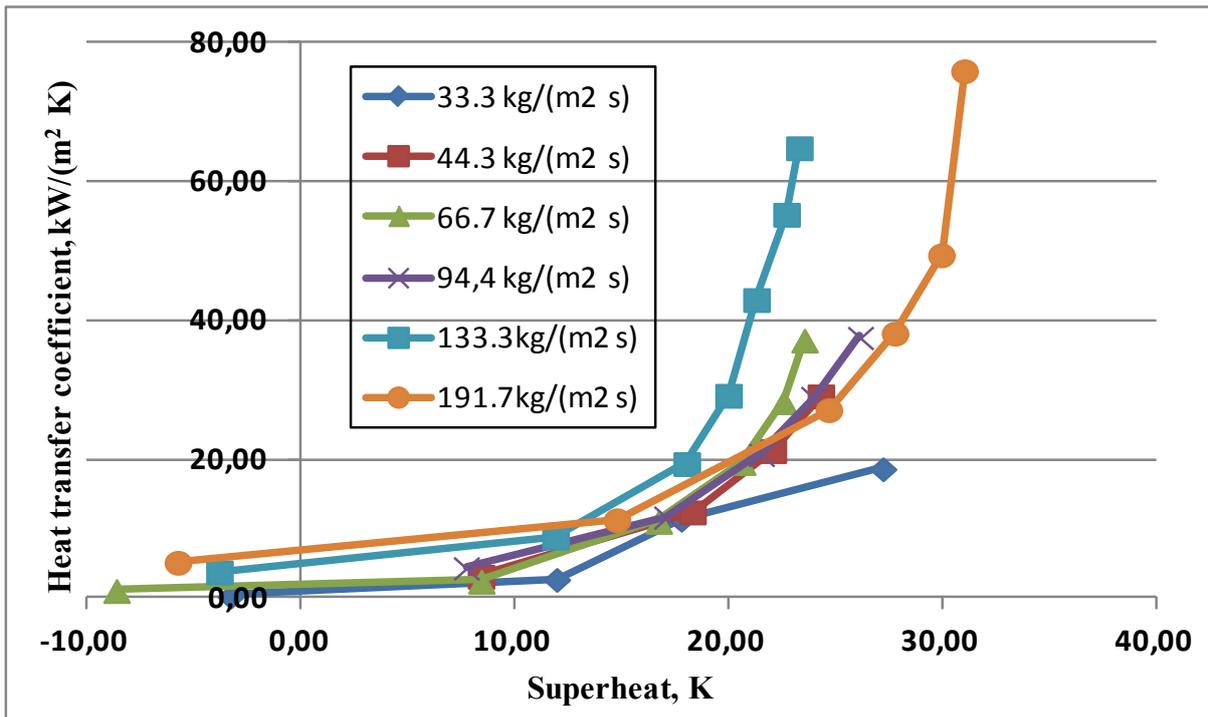


*a_Ni+Cu) пористая*¹⁴

^{13,14} Appendix 1



a) Ni+Zn) пористая¹⁴



b) гладкая¹⁴

Рис. 14. Коэффициент теплоотдачи, в зависимости от величины перегрева стенки, при кипении в канале для нагревателя 3x3 мм² (ширина канала 30 мм, высота 1.3 мм) для различных расходов воды. Обозначение типа поверхности нагревателя указано под рисунком.¹⁴ App 1

¹⁴ Appendix 1

ВЫВОДЫ

При изучении влияния пористости на поверхности нагревателя на теплообмен между водой и более горячей поверхностью, формирующей неоднородный нагрев потока воды в рабочей зоне канала, были получены следующие результаты:

1. Получены новые систематические экспериментальные данные по теплообмену при неоднородном нагреве водного потока в мини каналах высотой от 0,5 до 2,0 мм на гладкой поверхности меди и трех различающихся тонких пористых поверхностях. Эксперименты выполнены при интенсивном нагреве со стороны стенки вплоть до 1,6 кВт/см².

2. Разработана методика создания и нанесены на гладкий медный нагреватель три различающихся тонких пористых покрытия, которые использовались в качестве поверхностей нагрева: никелевой (Ni), никелево-медной (Ni+Cu) и никелево-цинковой (Ni+Zn). Массовое содержание металлов в этих покрытиях следующее: 100% Ni, 80%Ni + 20% Cu, 50% Ni + 50% Zn. Пористая поверхность формировалась нанесением однородного слоя никелевого порошка или смеси порошков (размер порошинок масштаба 50-100 мкм) на медное гладкое основание с дальнейшим спеканием порошинок с медным основанием и между собой импульсным разрядом электрического тока.

3. Создана пористая Ni поверхность из порошка никеля, которая позволила экспериментально получить повышенные результаты по теплообмену при неоднородном нагреве потока воды без потока газа в миниканале. Величины критического

теплового потока достигли величины 1,2 кВт/см², а величины коэффициента теплоотдачи буквально на единицы не достигли величины 100 кВт/(м² К). Эти значения в разы превышают соответствующие значения при кипении на гладкой поверхности в схожих условиях.

4. Обнаружено, что при перегревах воды менее 15 °С величины коэффициентов теплоотдачи на всех исследованных пористых поверхностях могут быть в разы выше, чем для гладкой поверхности, причем они могут превышать таковые и для значимо большего расхода воды при охлаждении гладкой поверхности в схожих в остальном условиях.

5. Однако, при реализующихся перегревах с значениями выше 15°С, ситуация по теплообмену на исследованных биметаллических поверхностях выглядит несколько драматично. Чаще всего величины коэффициентов теплоотдачи и величины критических потоков сравнимы или даже ниже, чем при теплообмене на гладкой поверхности. И опять же, это связано с тем, что на них не возникал эффективный механизм сноса больших пузырей за счет интенсивного парового пузыре- образования с значимо более высокими частотами.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-49-08018), <https://rscf.ru/project/22-49-08018>. Экспериментальный стенд подготовлен в рамках государственного задания ИТ СО РАН № 121031800213-0.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

Fig. 1. Photo of the test section with heater sized 3x3 mm².

Fig. 2. Schematic of the test section with heater of 3x3 mm².

1 - Copper heater, 2 - stainless steel plate, 3 - caprolon base, 4 - glass top cover, 5 - fluoroplastic insert, 6 - fluoroflagopite gasket, 7 - liquid inlet nozzle, 8 - outlet nozzle, 9 - airgel thermal insulation.

Fig. 3. Example of raster electron microscope image of a nickel porous coating.

Fig. 4. Example of raster electron microscope image of a porous (Ni+Cu) coating.

Fig. 5. Example of EDS (EDS - Energy Dispersive Spectroscopy, a microanalytical method for

identifying and quantifying elements present in a sample) study of the elemental composition of a porous (Ni+Cu) coating using a scanning electron microscope. a) color visualization of the spatial distribution of the chemical elements oxygen, copper and nickel; b) image of the spatial distribution of copper, made through a color mask; c) the same procedure for visualizing the distribution of nickel.

Fig. 6. Example of raster electron microscope image of a porous (Ni+Zn) coating.

Fig. 7. Effect of specific mass flow rate (mass flux) of water and channel height (indicated in the legend) on critical heat flux q_{cr} for a 3x3 mm² heater (channel width 30 mm). Data are presented for heaters with smooth and porous Ni surfaces.

Fig. 8. Heat transfer coefficient, depending on the superheat value, during boiling in a channel for a 3x3 mm² heater (channel width 30 mm, height 0.55 mm) for different mass water flow rates (indicated in the legend). The heater surface type is indicated below the figure.

a) Ni porous Ni
b) smooth

Fig. 9. Heat transfer coefficient, depending on the superheat value (less than 15 °C), during boiling in a channel for a 3x3 mm² heater (channel width 30 mm, height 0.55 mm) for different water flow rates (indicated in the legend). Designation of the heater surface type in the legend: a) Ni - porous Ni, b) - smooth.

Fig. 10. Heat transfer coefficient, depending on the superheat value, during boiling in a channel for a 3x3 mm² heater (channel width 30 mm, height 2.0 mm) for different water flow rates (indicated in the legend). The heater surface type is indicated below the figure.

a) Ni porous Ni
b) smooth

Fig. 11. Heat transfer coefficient, depending on the superheat value (less than 15 °C), during boiling in a channel for a 3x3 mm² heater (channel width 30 mm, height 2.0 mm) for different water flow rates (indicated in the legend). Designation of the heater surface type in the legend: a) Ni - porous Ni, b) - smooth.

Fig. 12. Heat transfer coefficient, depending on the superheat value (less than 15 °C), during boiling in a channel for a 3x3 mm² heater (channel width 30 mm, height 1.3 mm) for different water flow rates (indicated in the legend). Designation of the heater surface type in the legend: a) Ni - porous Ni, b) - smooth.

Fig. 13. Effect of specific mass flow rate (mass flux) of water on critical heat flux q_{cr} for 3x3 mm² heater (channel width 30 mm, channel height 1.3 mm). Data are presented for heater with smooth and porous surfaces, surface type designations are given in the legend. Ni, Ni+Cu and Ni+Zn are corresponding porous surfaces.

Fig. 14. Heat transfer coefficient, depending on the superheat value, during boiling in a channel for a 3x3 mm² heater (channel width 30 mm, height 1.3 mm) for different water flow rates (indicated in the legend). The heater surface type is indicated below the figure.

a) Ni porous
a) Ni+Cu porous
a) Ni+Zn porous
b) smooth

БИБЛИОГРАФИЯ (REFERENCES)

[1] Bar-Cohen A., Asheghi M., Chainer T.J., Garimella S.V., Goodson K., Gorle C. The ICECool Fundamentals Effort on Evaporative Cooling of Microelectronics. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2021, vol. 11, no. 10, pp.1546-1564.

[2] Ali R. *Phase change phenomena during fluid flow in micro channels*. Ph.D., Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2010. 141 p.

[3] Pop E., Goodson K.E. Thermal phenomena in nanoscale transistors. *Journal of Electronic Packaging*, 2006, vol. 128, p.p. 102-108.

[4] Phillips R.J., Microchannel heat sinks. *LINC Lab Journal*, 1988, vol. 1, p.p. 31-47.

[5] Lee J., Mudawar I. Fluid flow and heat transfer characteristics of low temperature two-phase micro-channel heat sink, part1: experimental methods and flow visualization results. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, vol. 51, pp. 4315-4326.

[6] Kadam S. and Kumar R. Twenty first century cooling solution: Microchannel heat sinks. *International Journal of Thermal Sciences*, 2014, vol. 85, pp. 73-92.

[7] Boyd R.D.. Subcooled flow boiling critical heat flux and its application to fusion energy components. Part 1. A review of fundamentals of CHF and related data base, *Fusion Technology*, 1985, vol. 7, pp. 7-30.

[8] Lee J., Mudawar I. Low-temperature two-phase microchannel cooling for high heat-flux thermal management of defence electronics, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2009, vol. 32, pp. 453-465.

[9] Zhu Y., Antao D.S., Chu K., Hendricks T.J., Wang E.N. Enhanced Flow Boiling Heat Transfer in Microchannels with Structured Surfaces, *15th International Heat Transfer Conference*, 2014, p. 9508.

[10] Palko J., Lee H., Zhang C., Dusseault T., Maitra T., Won Y., Agonafer D., Moss J., Houshmand F., Rong G., Wilbur J., Rockosi D., Mykyta I., Resler D., Altman D., Asheghi M., Santiago J., Goodson K. Extreme Two Phase Cooling from Laser Etched Diamond and Conformal, Template Fabricated Microporous Copper. *Advanced Functional Materials*, 2017, vol. 27. 10.1002/adfm.201703265.

[11] Calame J., Bass R., Myers R., Safier P. Investigation of Hierarchically Branched-Microchannel Coolers Fabricated by Deep Reactive Ion Etching for Electronics Cooling Applications. *Journal of Heat Transfer-Transactions of The Asme - J HEAT TRANSFER*, 2009, vol. 131, 10.1115/1.3001017.

[12] Liang G., Mudawar I. Review of channel flow boiling enhancement by surface modification, and instability suppression schemes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020. vol. 146, pp. 118864.

[13] Dadas N., Pastuszko R. and Kaniowski R. Pool boiling heat transfer on minichannels with porous structure. *EPJ Web of Conferences*, 2022, vol. 264, p. 01010.

- [14] Kabov O., Zaitsev D., Cheverda V. and Bar-Cohen A. Evaporation and flow dynamics of thin, shear-driven liquid films in microgap channels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2011 vol. 35, pp. 825-831.
- [15] International Roadmap for Devices and Systems, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2021. Available at: <https://irds.ieee.org/editions>.
- [16] Bar-Cohen A., Maurer J., Altman D. Embedded Cooling for Wide Bandgap Power Amplifiers: A Review. *Journal of Electronic Packaging*, 2019, vol.141, 10.1115/1.4043404.
- [17] Deng D., Zeng L., Sun W. A review on flow boiling enhancement and fabrication of enhanced microchannels of microchannel heat sinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, vol. 175, p. 121332.
- [18] Zaitsev D., Belosludtsev V., Ribatski G. and Kabov O. The effect of channel height on flow boiling heat transfer and CHF in flat minichannels with local heating. *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*, 2022, vol. 10, no. 3, p. 044258.

Сведения об авторах.



Пуховой Максим Валерьевич,
к.ф.-м.н., научный сотрудник. Область научных интересов: теплофизика и молекулярная физика
E-mail: pukhovoy.maxim@yandex.ru



Зайцев Дмитрий Валерьевич,
к.ф.-м.н., заведующий лабораторией. Область научных интересов: теплофизика и молекулярная физика
E-mail: zaitsev@itp.nsc.ru