

ИНВЕРСИЯ КРИВОЙ КИПЕНИЯ НА МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОРИСТЫХ ПОКРЫТИЯХ¹

© 2023 г. Д. А. Швецов^{1, *}, А. Н. Павленко¹, А. Е. Брестер², В. И. Жуков^{1, 2}

¹Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

*E-mail: shvetsov.kh301@ya.ru

Поступила в редакцию 15.09.2022 г.

После доработки 30.11.2022 г.

Принята к публикации 06.12.2022 г.

В работе представлено экспериментальное исследование теплообмена при кипении в тонком горизонтальном слое жидкости на капиллярно-пористом покрытии. Образец покрытия из нержавеющей стали изготовлен с помощью аддитивной технологии 3D-печати методом селективного лазерного спекания. На покрытии наблюдалась инверсия кривой кипения, которая приводила к пятикратному снижению температурного напора по сравнению с поверхностью без покрытия. После 350 ч испытательного цикла значение плотности теплового потока, при котором возникала инверсия кривой кипения, уменьшалось в семь раз.

DOI: 10.31857/S0040364423020163

ВВЕДЕНИЕ

В связи с широким внедрением микроэлектроники и постоянным увеличением требований к ее функциональности и надежности охлаждение остается важной технической задачей. Для большинства электронных устройств важно поддержание постоянного значения температуры, которое должно быть не выше 85°C. Одним из вариантов решения данной задачи является использование пузырькового кипения в системе охлаждения. Применение различных модифицированных поверхностей нагрева позволяет существенно уменьшить температурный напор при кипении, делая данный способ охлаждения более эффективным. В обзорах [1, 2] представлены современные исследования по интенсификации теплообмена и рассмотрены методы модификации и структурирования поверхности кипения. Среди перспективных отечественных методов модифицирования поверхностей можно выделить: микродуговое оксидирование [3, 4], метод деформирующего резания [5–7], нанесение оксидных пленок [8, 9] и капиллярно-пористых покрытий [10, 11]. Для дальнейшего поиска оптимальных поверхностей нагрева необходимо понимание физики процессов парообразования. Учет специфики различных механизмов пузырькового кипения позволит проектировать более эффективные системы охлаждения.

В данном исследовании теплообмена при кипении рассмотрено явление, при котором температурный напор уменьшается с ростом теплового потока. Авторы работы [12] назвали данное явление инверсией кривой кипения. Впервые инверсия наблюдалась в [13] на вертикальных гладких поверхностях, когда с увеличением плотности теплового потока происходило формирование с устойчивым существованием стационарных регулярных структур при росте количества центров парообразования. В [14] инверсия кривой кипения получена при кипении воды на горизонтальных трубах со спеченным покрытием из нержавеющей стали. На рис. 1 представлены экспериментальные данные по кипению воды при атмосферном давлении, полученные различными коллективами исследователей. В зависимости от геометрии и материала покрытий инверсия кривой кипения наблюдалась как в предкризисных режимах кипения, так и при более низких тепловых потоках. Среди модифицированных поверхностей нагрева представлены: микроканалы, в которых пористое покрытие нанесено по бокам и дну каналов [15]; микроканалы, изготовленные резанием [16]; микроканалы, изготовленные фотолитографией в сочетании с электрохимическим осаждением [17]; микроканалы с покрытием из оксида меди [18]; пористое покрытие, изготовленное фемтосекундным лазером [19]; покрытые наночастицами микротрубочки [20]. Низкие значения температурного напора (2–5 К) достигались на упорядоченных микроканальных поверхностях [15–18], причем инверсия кривой кипения

¹ По материалам Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-8). Москва. 17–22 октября 2022 г.

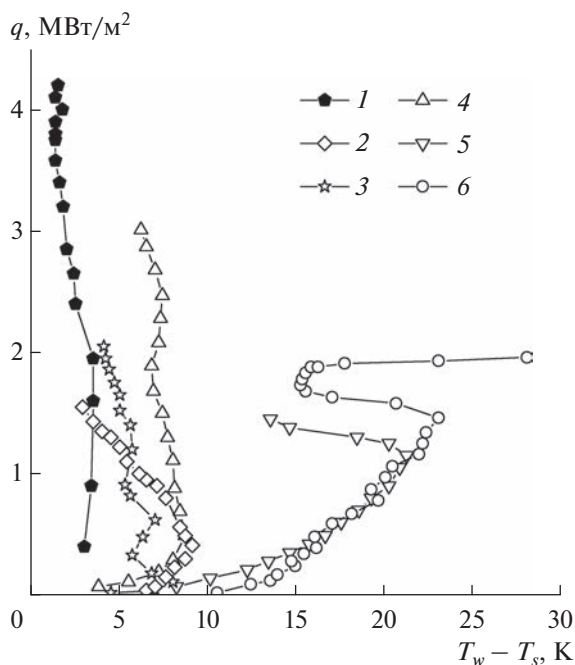


Рис. 1. Обобщение экспериментальных данных, полученных при кипении воды на микроструктурированных поверхностях: 1 – [15], 2 – [16], 3 – [17], 4 – [18], 5 – [19], 6 – [20].

на таких поверхностях происходила несколько раз по мере увеличения плотности теплового потока (рис. 1).

Эксперименты, проведенные с использованием воды и этанола [21], пропана [22], а также фреона-113 и этанола [23], показали, что на капиллярно-пористых покрытиях может наблюдаться гистерезис кривой кипения. Он обусловлен тем, что центры парообразования, активированные в области высоких тепловых потоков, остаются активными при понижении теплового потока. Увеличенное количество активированных центров являлось причиной более низкого температурного напора, полученного при понижении теплового потока в [24] с водой в качестве рабочей жидкости. На рис. 2 показаны инверсия и гистерезис кривой кипения, полученные в [25]. Гистерезис на рис. 2 был результатом того, что центры парообразования оставались активированными после уменьшения теплового потока. Инверсия и гистерезис наблюдались при кипении тонкого горизонтального слоя жидкости на капиллярно-пористом покрытии из нержавеющей стали [26].

Анализ перечисленных выше работ показывает, что причины возникновения инверсии кривой кипения изучены недостаточно, а воспроизводимость экспериментальных данных практически не исследовалась. Необходимо понимание физики процесса, которое позволит эффективно проекти-

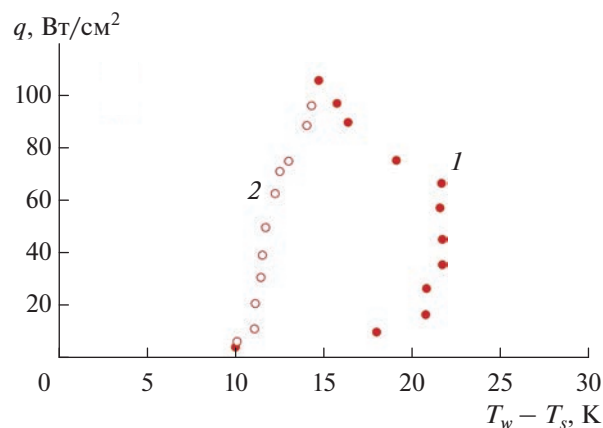


Рис. 2. Инверсия и гистерезис кривой кипения, полученные в работе [25]: 1 – точки при нагреве, 2 – точки при охлаждении.

ровать и эксплуатировать теплообменные поверхности.

Целью данной работы является экспериментальное исследование теплообмена при кипении тонкого горизонтального слоя жидкости на капиллярно-пористом покрытии до и после испытательного цикла.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ

Детальное описание экспериментального стенда приведено в [27]. Рабочая камера выполнена в виде цилиндрического сосуда из стали 12X18H10T с толщиной стенок 1 мм, внутренним диаметром 120 мм и высотой 300 мм. Нагрев днища рабочей камеры осуществляется электронагревателем с мощностью 2 кВт. Для равномерного распределения теплового потока, направленного к поверхности нагрева, между электронагревателем и днищем рабочей камеры расположена латунная пластина. В целях уменьшения контактного термического сопротивления зазор между днищем и латунной пластиной заполнен специальной пастой с высокой теплопроводностью. Для измерения плотности теплового потока в днище сбоку на различной высоте просверлено пять отверстий диаметром 1.5 мм, в которые вставляются в нержавеющей капиллярах медь-константановые термопары. Тепловой поток рассчитывается посредством уравнения Фурье по температурному градиенту, измеренному вдоль центральной линии верхней части дна, с использованием линейной аппроксимации выходного сигнала пяти термопар. Расчетная ошибка определения теплового потока составила около $\pm 16\%$ при тепловом потоке $q = 10^3$ Вт/м², $\pm 10\%$ при $q = 10^4$ Вт/м² и $\pm 6\%$ при $q = 10^5$ Вт/м². Температура поверхности T_w определялась по показаниям термопары, находившейся под поверхностью нагре-

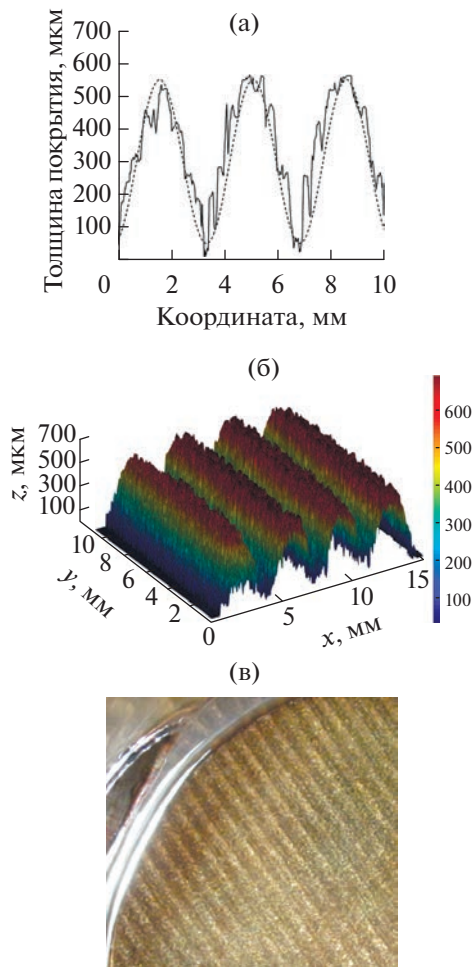


Рис. 3. Фотография капиллярно-пористого покрытия из нержавеющей стали с соответствующими (а) 2D- и (б) 3D-профилограммами; (в) — вид поверхности сверху.

ва, с учетом измеренного температурного градиента. Общая погрешность измерения температуры поверхности составила около $\pm 0.8^\circ\text{C}$ при тепловых потоках $q \sim 10^5 \text{ Вт/м}^2$.

Капиллярно-пористое покрытие из нержавеющей стали LPW 155 (15-5PH) наносилось на нижнее основание (днище) специально изготовленной камеры с использованием технологии лазерной 3D-печати методом селективного лазерного спекания. Подробно технология нанесения покрытия описана в работах [26, 27]. Морфология образца из нержавеющей стали анализировалась с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-3400N. Для создания профилограмм покрытия применялся профилометр оптического микроскопа BRUKER Contour GT-K1. Топографические карты с распределением толщины и фотографией покрытия представлены на рис. 3, а изображение с микроскопа — на рис. 4. Теплопроводность материала покрытия $\lambda \approx 20 \text{ Вт/(м К)}$ [28],

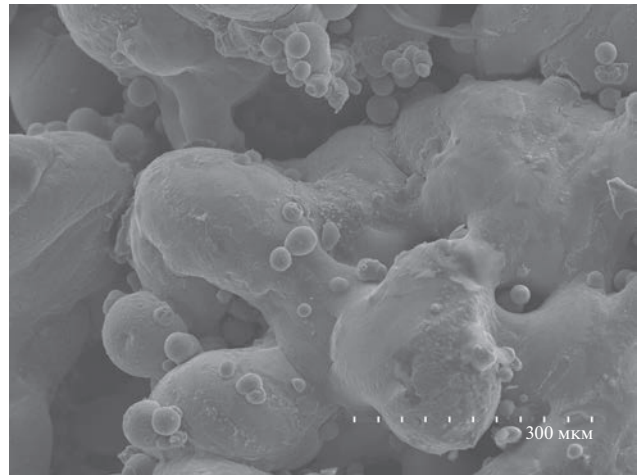


Рис. 4. Изображение капиллярно-пористого покрытия из нержавеющей стали, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа.

пористость $\varepsilon = 44\%$. Максимальная высота гребней $\delta = 550 \text{ мкм}$, минимальная высота (остаточный слой) $\delta_0 = 50 \text{ мкм}$, амплитуда $A = \delta - \delta_0 = 500 \text{ мкм}$. Уравнение профиля покрытия $z = (A/2)\sin(2\pi x/\lambda_m) + A/2 + \delta_0$, где z — вертикальная координата, x — горизонтальная. Длина волны модуляции $\lambda_m = 3500 \text{ мкм}$. Длина волны модуляции покрытия выбиралась кратной двум капиллярным постоянным для исследуемой жидкости. В качестве рабочей жидкости использовался *n*-додекан. В данной работе представлены результаты, полученные при давлении над слоем $P_s(P_s/P_{cr}) = 20 \text{ кПа}$ (1.1×10^{-2}), где P_s и P_{cr} — давление насыщения и критическое давление соответственно. Температура насыщения $T_s = 158^\circ\text{C}$ определялась с помощью зависимости давления паров от температуры, взятой из справочника [29]. Приборная погрешность измерения давления приводила к погрешности определения температуры насыщения $\pm 0.3^\circ\text{C}$. Высота исследуемого в работе слоя жидкости h (h/l_σ) = 4 мм (2.32), где l_σ — капиллярная постоянная жидкости (для *n*-додекана $l_\sigma = 1.78 \text{ мм}$). Экспериментальные результаты сравнивались с данными [30], полученными на гладкой поверхности.

На рис. 5 представлено сравнение экспериментальных данных, полученных на капиллярно-пористом покрытии и на гладкой поверхности. При увеличении плотности теплового потока выше величины, соответствующей точке *a* на кривой 1 ($q = 92 \text{ кВт/м}^2$), наблюдалась инверсия кривой кипения — происходило уменьшение температурного напора с ростом плотности теплового потока. За начало инверсии кривой кипения принималась точка, после которой с увеличением плотности теплового потока происходило значительное снижение температурного напора по сравнению с

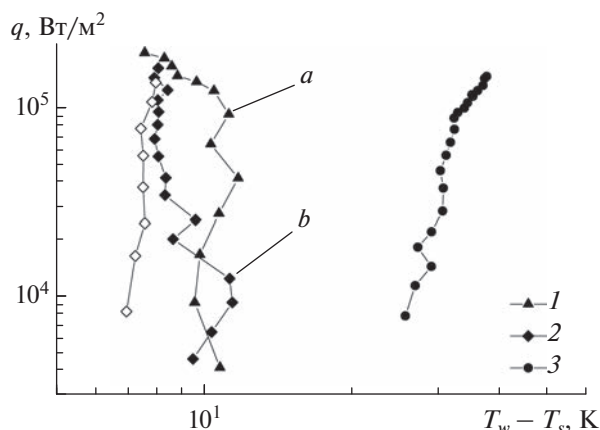


Рис. 5. Зависимости плотности теплового потока от температурного напора: 1 — данные, полученные на капиллярно-пористом покрытии; 2 — данные, полученные на покрытии после 350 ч испытательного цикла; 3 — данные, полученные на поверхности без покрытия; черные маркеры — точки при нагреве (прямой ход), белые — при охлаждении (обратный ход).

предыдущими точками с меньшими значениями плотности тепловых потоков. В точке, соответствующей значению критической плотности теплового потока ($q = 195 \text{ кВт/м}^2$), наблюдалось пятикратное снижение температурного напора по сравнению с данными, полученными на поверхности без покрытия (кривая 3). По-видимому, данное снижение происходило за счет активации дополнительных центров парообразования внутри пористой структуры из низкотеплопроводной нержавеющей стали. Этому мог способствовать значительный перепад температур от основания до вершины гребня, приводящий к постепенному прогреву и активации центров парообразования внутри капиллярно-пористого покрытия. В работах [19, 25], проведенных при кипении в большом объеме жидкости, температурный градиент по высоте низкотеплопроводных покрытий приводил к активации центров парообразования при высоких тепловых потоках, что отражалось в виде инверсии кривой кипения.

После 350 ч работы покрытия с перерывами при различных давлениях над слоем жидкости был проведен повторный эксперимент с целью воспроизведения полученной ранее инверсии кривой кипения. Эксперимент на приработанном покрытии проводился сначала при повышении мощности, подаваемой на нагреватель (прямой ход), а затем при постепенном ее снижении (обратный ход). В точке *b* на кривой 2 (рис. 5) при $q = 12 \text{ кВт/м}^2$ видно, что начало инверсии кривой кипения на приработанном покрытии происходит при меньшей в семь раз плотности теплового потока по сравнению с точкой *a*. Визуально после точки *b*, соответствующей началу инверсии кривой кипения

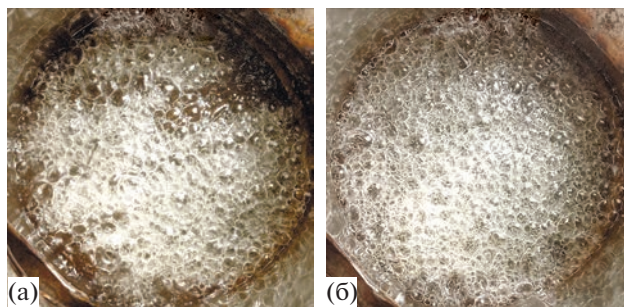


Рис. 6. Фотографии процесса пузырькового кипения на капиллярно-пористом покрытии: (а) — при нагреве (прямой ход), $q = 9.3 \text{ кВт/м}^2$, $T_w - T_s = 11.4 \text{ K}$; (б) — при охлаждении (обратный ход), 8.4 кВт/м^2 , 6.9 K .

на приработанном покрытии, с ростом плотности теплового потока наблюдалось резкое увеличение количества активированных центров парообразования по всей площади покрытия. В предкризисных режимах теплообмена кривые 1 и 2 практически совпадают. Температурные напоры при нагреве и охлаждении отличались незначительно в отличие от показанной в работе [25] кривой. При низких тепловых потоках разница в температурных напорах становилась более существенной, поскольку при обратном ходе центры парообразования оставались активированными (рис. 6). Количество активных центров парообразования при обратном ходе было значительно больше, чем при прямом, что позволило отводить плотность теплового потока $q = 8.4 \text{ кВт/м}^2$ при меньшем температурном напоре.

Таким образом, на изготовленном с использованием технологии лазерной 3D-печати капиллярно-пористом покрытии наблюдалась инверсия кривой кипения. Со временем свойства данного покрытия менялись, в результате чего инверсия происходила при более низких тепловых потоках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведено экспериментальное исследование теплообмена при кипении тонкого горизонтального слоя жидкости на капиллярно-пористом покрытии до и после продолжительных испытаний. На покрытии наблюдалась инверсия кривой кипения, которая приводила к пятикратному снижению температурного напора по сравнению с поверхностью без покрытия. Инверсия кривой кипения на приработанном покрытии начиналась при меньшей в семь раз плотности теплового потока.

Исследования выполнены в рамках госзадания ИТ СО РАН (№ 121031800216-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дедов А.В. Обзор современных методов интенсификации теплообмена при пузырьковом кипении // Теплоэнергетика. 2019. Т. 66. № 12. С. 18.
2. Володин О.А., Печеркин Н.И., Павленко А.Н. Интенсификация теплообмена при кипении и испарении жидкостей на модифицированных поверхностях // ТВТ. 2021. Т. 59. № 2. С. 280.
3. Васильев Н.В., Вараксин А.Ю., Зейгарник Ю.А., Ходаков К.А. Характеристики кипения воды, недогретой до температуры насыщения, на структурированных поверхностях // ТВТ. 2017. Т. 55. № 6. С. 712.
4. Pecherkin N.I., Volodin O.A., Pavlenko A.N., Kataev A.I., Mironova I.B. Heat Transfer Enhancement Experiments in R21 Falling Film over a Bundle of MAO-coated Horizontal Tubes // Int. Commun. Heat Mass Transfer. 2021. V. 129. P. 105743.
5. Попов И.А., Щелчков А.В., Гортышов Ю.Ф., Зубков Н.Н. Интенсификация теплоотдачи и критические тепловые потоки при кипении на поверхностях с микрооребрением // ТВТ. 2017. Т. 55. № 4. С. 537.
6. Аксянов Р.А., Коханова Ю.С., Куимов Е.С., Лэй Р.А., Попов И.А. Обобщение экспериментальных данных по теплоотдаче и критическим тепловым потокам на микроструктурированных поверхностях при кипении различных жидкостей // Тепловые процессы в технике. 2020. Т. 12. № 7. С. 301.
7. Volodin O.A., Pecherkin N.I., Pavlenko A.N., Zubkov N.N. Surface Microstructures for Boiling and Evaporation Enhancement in Falling Films of Low-viscosity Fluids // Int. J. Heat Mass Transfer. 2020. V. 155. P. 119722.
8. Zabirow A., Kanin P., Vinogradov M., Sliva A., Dedov A., Fedorovich S., Yagov V. Influence of Carbon Coating and Oxide Layer on Film Boiling Regime // Mater. Today: Proc. 2018. V. 5. № 12. P. 26171.
9. Molotova I., Zabirow A., Yagov V., Vinogradov M., Kanin P., Molotov I., Antonov N. Influence of Coolant and Material Properties on Cooling High-temperature Steel Spheres in Subcooled Ethanol-water Mixtures // Int. J. Therm. Sci. 2022. V. 179. P. 107659.
10. Павленко А.Н., Цой А.Н., Суртаев А.С., Кузнецов Д.В., Калита В.И., Комлев Д.И., Иванников А.Ю., Радюк А.А. Экспериментальное исследование повторного смачивания перегретой пластины со структурированным капиллярно-пористым покрытием стекающей пленкой жидкости // ТВТ. 2018. Т. 56. № 3. С. 424.
11. Starodubtseva I.P., Kuznetsov D.V., Pavlenko A.N. Experiments and Modeling on Cryogenic Quenching Enhancement by the Structured Capillary-porous Coatings of Surface // Int. J. Heat Mass Transfer. 2021. V. 176. P. 121388.
12. Jaikumar A., Kandlikar S.G. Pool Boiling Inversion Through Bubble Induced Macroconvection // Appl. Phys. Lett. 2017. V. 110. № 9. P. 094107.
13. Pavlenko A.N., Lel. V.V. Heat Transfer and Crisis Phenomena in Falling Films of Cryogenic Liquid // Russ. J. Eng. Therm. 1997. V. 7. № 3–4. P. 177.
14. Cieřliński J.T. Nucleate Pool Boiling on Porous Metallic Coatings // Exp. Therm. Fluid Sci. 2002. V. 25. № 7. P. 557.
15. Jaikumar A., Kandlikar S.G. Ultra-high Pool Boiling Performance and Effect of Channel Width with Selectively Coated Open Microchannels // Int. J. Heat Mass Transfer. 2016. V. 95. P. 795.
16. Hai F., Zhu W., Liang S., Yang X., Deng Y. Enhanced Pool Boiling Performance of Microchannel Patterned Surface with Extremely Low Wall Superheat Through Capillary Feeding of Liquid // Nanoscale Microscale Thermophys. Eng. 2020. V. 24. № 2. P. 66.
17. Li J., Zhu G., Kang D., Fu W., Zhao Y., Miljkovic N. Endoscopic Visualization of Contact Line Dynamics During Pool Boiling on Capillary-activated Copper Microchannels // Adv. Funct. Mater. 2021. V. 31. № 4. P. 2006249.
18. Rahman M.M., McCarthy M. Effect of Length Scales on the Boiling Enhancement of Structured Copper Surfaces // J. Heat Transfer. 2017. V. 139. № 11. P. 111508.
19. Kruse C., Tsubaki A., Zuhlke C., Anderson T., Alexander D., Gogos G., Ndao S. Secondary Pool Boiling Effects // Appl. Phys. Lett. 2016. V. 108. № 5. P. 827.
20. Song Y., Díaz-Marín C.D., Zhang L., Cha H., Zhao Y., Wang E.N. Three-tier Hierarchical Structures for Extreme Pool Boiling Heat Transfer Performance // Adv. Mater. 2022. V. 34. № 32. P. 2200899.
21. Малышенко С.П., Андрианов А.Б. О начальном участке кривой кипения на поверхностях с пористыми покрытиями и гистерезисе закипания // ТВТ. 1987. Т. 25. № 3. С. 563.
22. Васильев Л.Л., Журавлев А.С., Овсянник А.В., Новиков М.Н., Васильев Л.Л. Теплоотдача при кипении сжиженного пропана в капиллярно-пористых структурах // Вести НАН Беларуси. 2002. № 4. С. 114.
23. Poniewski M.E. Peculiarities of Boiling Heat Transfer on Capillary-porous Coverings // Int. J. Therm. Sci. 2004. V. 43. № 5. P. 431.
24. Wang Y.Q., Luo J.L., Heng Y., Mo D.C., Lyu S.S. Wettability Modification to Further Enhance the Pool Boiling Performance of the Micro Nano Bi-porous Copper Surface Structure // Int. J. Heat Mass Transfer. 2018. V. 119. P. 333.
25. Costa-Greger J., Tsubaki A., Gerdes J., Anderson M., Zuhlke C., Alexander D., Shield J., Gogos G. Pool Boiling Inversion and Hysteresis with Femtosecond Laser Processed 304 Stainless Steel Surfaces for Heat Transfer Enhancement // 19th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm). IEEE. 2020. P. 298.
26. Бессмельцев В.П., Павленко А.Н., Жуков В.И. Разработка технологии создания структурированных капиллярно-пористых покрытий методом 3D-печати для интенсификации теплообмена при кипении // Автометрия. 2019. Т. 55. № 6. С. 25.
27. Zhukov V.I., Pavlenko A.N., Shvetsov D.A. The Effect of Pressure on Heat Transfer at Evaporation/Boiling in Horizontal Liquid Layers of Various Heights on a Microstructured Surface Produced by 3D Laser Printing // Int. J. Heat Mass Transfer. 2020. V. 163. P. 120488.
28. Зубченко А.С., Колосков М.М., Каширский Ю.В. и др. Марочник сталей и сплавов. 2-е изд., доп. и испр. / Под ред. Зубченко А.С. М.: Машиностроение, 2003. 784 с.
29. Yaws C.L. Handbook of Thermodynamic and Physical Properties of Chemical Compounds. N.Y.: Knovel, 2003. P. 597.
30. Zhukov V.I., Pavlenko A.N. Heat Transfer and Critical Phenomena During Evaporation and Boiling in a Thin Horizontal Liquid Layer at Low Pressures // Int. J. Heat Mass Transfer. 2018. V. 117. P. 978.