

03

Интенсификация теплообмена при кипении на модифицированных поверхностях, полученных методом спекания металлических микросфер

© Н.В. Васильев, С.Н. Вавилов, В.А. Леньков, И.П. Семенов

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия
E-mail: nikvikvas@mail.ru

Поступило в Редакцию 20 января 2026 г.

В окончательной редакции 24 апреля 2026 г.

Принято к публикации 29 апреля 2026 г.

Представлены результаты экспериментального исследования теплообмена при кипении дистиллированной воды в большом объеме на гладкой и модифицированной поверхностях. Модификация поверхности из меди осуществлялась с помощью нанесения пористого покрытия методом спекания. Использовались два вида покрытий: из фракций бронзовых микросфер с диаметрами 63–100 и 215–300 мкм. Показана интенсификация теплоотдачи до 3 раз по сравнению с теплоотдачей для гладкой поверхности. При низких тепловых потоках коэффициенты теплоотдачи на покрытии из микросфер размером 215–300 мкм оказались выше, с ростом тепловой нагрузки более эффективным становится покрытие из мелких фракций (63–100 мкм).

Ключевые слова: кипение, интенсификация теплоотдачи, модификация поверхности, пористое покрытие, метод спекания.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.15.63396.20630

Процессы кипения различных жидкостей играют важную роль в теплообменных аппаратах химического и нефтехимического применения, холодильной и криогенной техники, биологических и космических технологиях, системах охлаждения электронной техники и других современных отраслях промышленности. Кипение отличается высокой интенсивностью теплоотдачи, однако с развитием техники миниатюризация теплообменных устройств создает потребности в отводе все более высоких плотностей тепловых потоков. В связи с этим в настоящее время разработка путей и методов интенсификации теплоотдачи и увеличения критических тепловых потоков занимает ведущее место в исследованиях теплообмена при кипении. Количество работ в этом направлении насчитывает сотни и даже тысячи наименований. Следует отметить, что в последние годы вышло большое число обстоятельных обзоров по этой теме (например, [1–5]).

Основным способом интенсификации теплообмена при кипении является модификация греющей поверхности. В настоящее время проводятся исследования степени эффективности таких методов модификации, как обработка деформирующим резанием [6], плазменное напыление [7], микродуговое оксидирование [8,9], 3D-печать [10], электронно-лучевая обработка [11] и др. Нанесение покрытий посредством спекания металлических микросфер с подложкой зарекомендовало себя в качестве одного из наиболее эффективных методов [12–17]. В аспекте интенсификации теплообмена капиллярно-пористые покрытия, нанесенные по данной технологии, обладают рядом плюсов:

— значительное (в несколько раз) развитие площади поверхности теплообмена;

— увеличение числа потенциальных центров парообразования (пор) требуемых размеров;

— улучшение устойчивости работы центров парообразования за счет создания по границам спеченных частиц с подложкой большого числа менисков (границ раздела жидкость–пар), с поверхности которых происходит интенсивное испарение в растущие паровые пузыри с непрерывным подсосом жидкой фазы [12,13];

— создание возможности рациональной организации (разделения) потоков пар–жидкость [14].

К технологическим плюсам данного метода относятся высокая степень адгезии с подложкой, прочность, надежность и долговечность покрытия, возможность нанесения на внешнюю и внутреннюю поверхности труб теплообменных аппаратов. Наличие пор варьируемых размеров (от сотни до нескольких микрометров) с помощью подбора диаметров микросфер, температуры и времени спекания позволяет уменьшить перегрев поверхности относительно насыщения в момент закипания до 1 К и ниже [13,15], что особенно актуально для аппаратов холодильной и криогенной техники. Таким способом, например, удалось увеличить коэффициент теплоотдачи (КТО) в 7 раз [16] и критический тепловой поток в 8 раз [17].

Актуальной задачей является поиск оптимальных размеров микросфер и толщины покрытий, нанесенных методом спекания, по критерию интенсивности теплоотдачи. Увеличение размеров используемых микросфер и уменьшение толщины покрытия ведут к увеличению радиуса пор [12], за счет чего можно уменьшить пере-

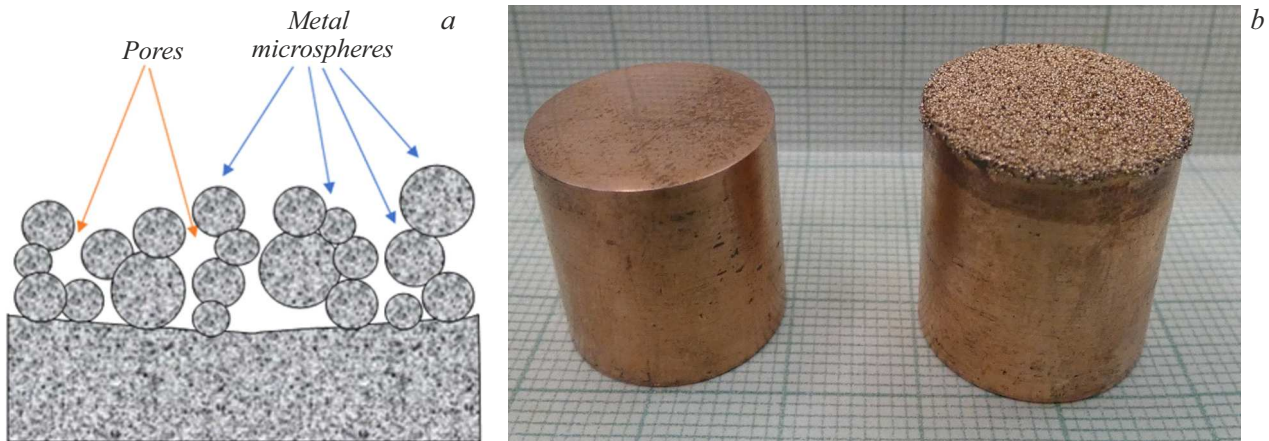


Рис. 1. Покрытие, нанесенное методом спекания металлических микросфер. *a* — схема поперечного разреза (шлифа) покрытия с толщиной в 2–3 слоя частиц. *b* — фотография образцов из меди с гладкой поверхностью и с покрытием из бронзы с диаметрами микросфер в диапазоне 215–300 μm .

грев поверхности в момент закипания и интенсифицировать теплоотдачу в области низких и умеренных тепловых потоков (вдали от критических тепловых потоков). Кроме того, уменьшение толщины покрытия ведет к снижению массы и металлоемкости. Однако при толщине покрытия в одну микросферу оно теряет характерные особенности, и процесс кипения будет слабо отличаться от такового на гладкой поверхности.

Ввиду отмеченного выше целью настоящей работы является исследование интенсификации теплообмена при кипении на медной поверхности с помощью нанесения пористого покрытия методом спекания бронзовых микросфер двух фракций: с диаметрами $d = 63\text{--}100$ и $215\text{--}300\ \mu\text{m}$ и толщиной покрытия в 2–3 слоя частиц (рис. 1, *a*). Эксперименты проводились на дистиллированной воде в области низких и умеренных тепловых потоков ($q < 700\ \text{kW/m}^2$).

Нанесение покрытий осуществлялось на собственной базе ОИВТ РАН. Они наносились на торцевую поверхность медных цилиндров (диаметром 18 mm и высотой 20 mm) (рис. 1, *b*). Микросферы из бронзы БрО10Ф1 наносились в 2–3 слоя на основание медного цилиндра вместе со слоем связующего (водного раствора поливинилового спирта 10% концентрации). Спекание проводилось в вакуумной печи ВПИ-10 при вакууме 1.5–2.0 Pa. В течение 1 h образцы выдерживались в печи при температуре 400 °C для испарения связующего, затем производилось спекание при температуре 850 °C в течение 2 h.

На рис. 2 представлены микрофотографии полученных покрытий, сделанные при помощи сканирующего электронного микроскопа Tescan VEGA 3 SEM. На покрытия из спеканных микросфер с $d = 63\text{--}100\ \mu\text{m}$ видны поры со средним размером 20–40 μm (рис. 2, *a*), пористость составляла 15%. На поверхности, сформированной более крупными частицами с $d = 215\text{--}300\ \mu\text{m}$, поры име-

ют большие размеры, близкие к 100 μm (рис. 2, *b*), пористость 35%.

Исследование проводилось на экспериментальной установке, подробно описанной в [9]. Нагрев поверхности кипения проводился методом теплового клина. Исследуемые образцы крепились на поверхности медного нагревательного блока с помощью термопасты. Для измерения плотности теплового потока и температуры теплоотдающей поверхности в образцы заделывались три предварительно протарированные хромель-копелевые термопары с диаметром спая 0.2 mm (с точностью измерения 0.5 °C), расположенные на расстоянии 4 mm друг от друга на его оси. Верхняя термопара, с помощью показаний которой рассчитывалась температура поверхности кипения, располагалась на расстоянии 1 mm от нее. Сигналы с термопар обрабатывались с помощью прибора Термодат-25М5, имеющего функцию автоматической компенсации температуры холодного спая и работающего в режиме электронного самописца с выводом данных на персональный компьютер. Фиксация параметров каждого теплового режима (экспериментальной точки) производилась после стабилизации значений температур на всех термопарах. Среднее время выдержки после изменения тепловой нагрузки составляло примерно 30 min.

На рис. 3 представлены полученные экспериментальные данные в виде кривых кипения — зависимостей плотности теплового потока (q) от перегрева поверхности относительно температуры насыщения (ΔT_{sat}). Видно, что оба вида нанесенных покрытий (кривые 2 и 3 на рис. 3) интенсифицируют теплоотдачу по сравнению с теплоотдачей для гладкой поверхности (кривые 1 на рис. 3) в исследованном диапазоне $q < 700\ \text{kW/m}^2$ максимально в 2–3 раза. При этом, как и ожидалось, закипание на поверхности с покрытием из более крупных частиц ($d = 215\text{--}300\ \mu\text{m}$) ввиду наличия пор больших размеров происходило при меньших значениях ΔT_{sat} .

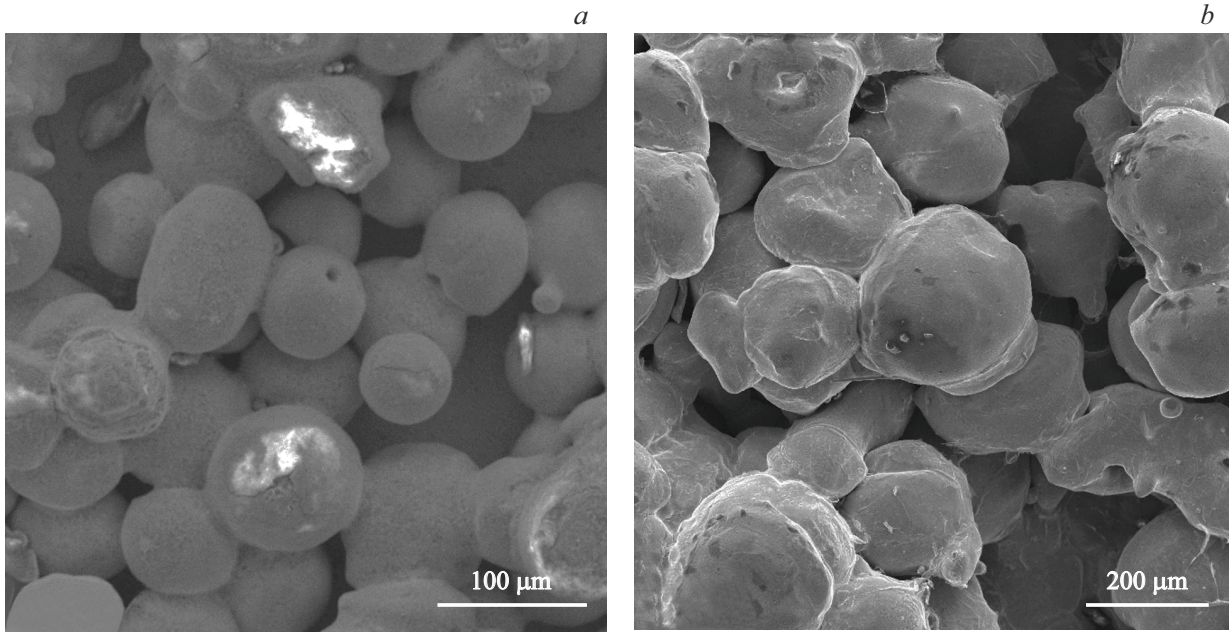


Рис. 2. Микрофотографии покрытий, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan VEGA 3 SEM. Диаметры частиц $d = 63–100$ (a) и $215–300$ μm (b).

Соответственно интенсификация теплоотдачи была выше, чем в случае покрытия из частиц с $d = 63–100$ μm . Однако в области $q \approx 300$ kW/m^2 происходит пересечение кривых (точки 2 и 3 на рис. 3), и при более высоких q теплоотдача на покрытии с частицами меньшего размера становится выше. По всей видимости, это происходит вследствие того, что все центры парообразования на покрытии из крупных частиц ($d = 215–300$ μm), размеры которых составляют преимущественно порядка 100 μm , практически сразу включаются в работу, и затем с ростом ΔT_{sat} не происходит дальнейшего увеличения их количества. Радиус критического парового зародыша ($R_{cr} = 2\sigma T_{sat} / (r\rho_v \Delta T_{sat})$, где σ — коэффициент поверхностного натяжения, T_{sat} — температура насыщения, r — теплота парообразования, ρ_v — плотность пара) с увеличением ΔT_{sat} от 2 до 6 К уменьшается примерно от 18 до 5.5 μm [18]. Именно в этой области происходит интенсивное увеличение теплоотдачи за счет постепенного включения в работу центров парообразования меньших размеров (в среднем $20–40$ μm) на покрытии из частиц с $d = 63–100$ μm .

Если сравнивать полученные результаты с данными других авторов на поверхностях с близкими геометрическими параметрами, то в работе [15] на покрытии из нержавеющей стали из микросфер с $d = 63–100$ μm толщиной 0.45 mm на поверхности трубы с $d_t = 3$ mm было получено более раннее закипание теплоносителя (точки 4 на рис. 3). Однако в области $q > 600$ kW/m^2 происходит переход кривой в положение, близкое к горизонтальному (следующая экспериментальная точка лежит уже за пределами графика по оси ΔT_{sat}). Это, по всей видимости, связано с образованием устойчивых

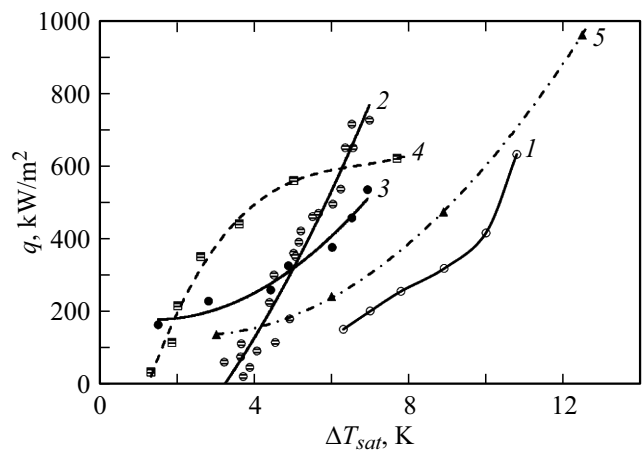


Рис. 3. Кривые кипения воды в большом объеме при атмосферном давлении. 1 — на гладкой поверхности из меди; 2 — на поверхности меди с покрытием из бронзовых микросфер с $d = 63–100$ μm толщиной 2–3 слоя частиц; 3 — на поверхности меди с покрытием из бронзовых микросфер с $d = 215–300$ μm толщиной 2–3 слоя частиц; 4 — на поверхности из микросфер из нержавеющей стали с $d = 63–100$ μm толщиной 0.45 mm ; 5 — на поверхности с покрытием из медных микросфер с $d = 380–510$ μm толщиной 4 mm . 1–3 — данные, полученные в настоящей работе; 4 — данные [15]; 5 — данные [17].

паровых агломератов в нижних слоях пористой структуры вследствие более высокого термического сопротивления [19] из-за большей толщины покрытия и меньшей теплопроводности нержавеющей стали (по сравнению с нашим покрытием из бронзы). На более толстом

покрытии из крупных частиц (из медных микросфер с $d = 380\text{--}510\ \mu\text{m}$ толщиной $4\ \text{mm}$) [17] происходит раннее закипание, однако затем теплоотдача в области $q = 200\text{--}700\ \text{kW/m}^2$ становится ниже, чем на наших покрытиях (точки 5 на рис. 3).

Если посмотреть на график изменения коэффициента теплоотдачи с увеличением q (рис. 4), то можно увидеть его постепенное увеличение на покрытии из частиц с $d = 63\text{--}100\ \mu\text{m}$ (кривые 2 на рис. 4). На покрытии из более крупных частиц ($d = 215\text{--}300\ \mu\text{m}$) коэффициент теплоотдачи уменьшается от первоначального высокого значения, стабилизируясь в диапазоне $\alpha = 60\text{--}75\ \text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ (кривые 3 на рис. 4). Качественно похожие тенденции наблюдались в работе [13] на покрытиях из частиц тех же диаметров, но большей толщины (кривые 4 и 5 на рис. 4), при этом количественно КТО были ниже примерно в 2 раза. Это, по всей видимости, связано с более высоким термическим сопротивлением. Интересно поведение кривой 6 на рис. 4 [15]. После достижения максимального значения α при $q \approx 250\ \text{kW/m}^2$ происходит его уменьшение, что указывает на начало образования устойчивых паровых агломератов в нижних слоях покрытия. С данным явлением могут быть связаны также дальнейшее уменьшение и стабилизация КТО с ростом q на покрытиях (точки 5 и 4 на рис. 4 соответственно).

Таким образом, в работе экспериментальным путем установлено увеличение теплоотдачи при кипении воды в большом объеме на поверхностях с двумя видами

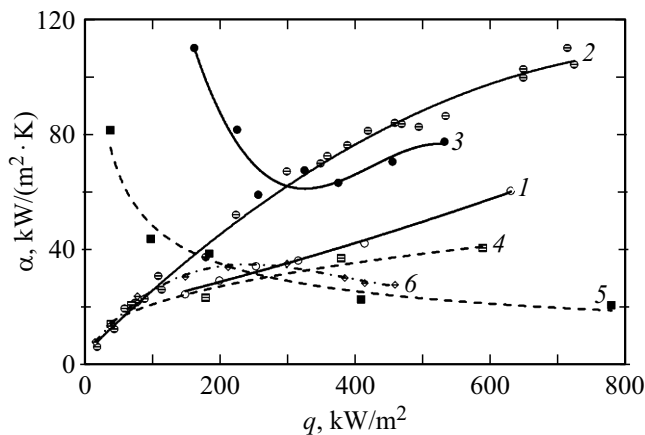


Рис. 4. Теплоотдача в зависимости от q при кипении воды в большом объеме при атмосферном давлении на покрытиях, нанесенных методом спекания. 1 — на гладкой поверхности из меди; 2 — на поверхности меди с покрытием из бронзовых микросфер с $d = 63\text{--}100\ \mu\text{m}$ толщиной 2–3 слоя частиц; 3 — на поверхности меди с покрытием из бронзовых микросфер с $d = 215\text{--}300\ \mu\text{m}$ толщиной 2–3 слоя частиц; 4 — с покрытием из бронзовых микросфер с $d = 63\text{--}100\ \mu\text{m}$ толщиной $1\ \text{mm}$; 5 — с покрытием из бронзовых микросфер с $d = 215\text{--}300\ \mu\text{m}$ толщиной $2\ \text{mm}$; 6 — на поверхности из микросфер из нержавеющей стали с $d = 63\text{--}100\ \mu\text{m}$ толщиной $1.5\ \text{mm}$. 1–3 — данные, полученные в настоящей работе; 4, 5 — данные [13]; 6 — данные [15].

покрытий (из бронзовых микросфер с $d = 63\text{--}100$ и $215\text{--}300\ \mu\text{m}$), полученных методом спекания, по сравнению с теплоотдачей гладкой поверхности из меди. Вследствие более крупных размеров пор закипание на покрытии с большими диаметрами частиц происходит при меньших ΔT_{sat} . Однако затем с ростом ΔT_{sat} на покрытии с меньшими диаметрами микросфер КТО становится выше за счет постепенного включения в работу центров парообразования. Таким образом, показано, что в области низких плотностей тепловых потоков ($q < 300\ \text{kW/m}^2$) более высокие коэффициенты теплоотдачи демонстрирует покрытие из крупных микросфер ($d = 215\text{--}300\ \mu\text{m}$), а в области $q > 300\ \text{kW/m}^2$ более эффективным становится покрытие из мелких частиц с $d = 63\text{--}100\ \mu\text{m}$.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (госзадание № 075-00270-26-00).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] G. Liang, I. Mudawar, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **128**, 892 (2019). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.026
- [2] А.В. Дедов, *Теплоэнергетика*, № 12, 18 (2019). [A.V. Dedov, *Therm. Eng.*, **66** (12), 881 (2019). DOI: 10.1134/S0040601519120012].
- [3] Н.В. Васильев, Ю.А. Зейгарник, К.А. Ходаков, *Теплоэнергетика*, № 5, 3 (2022). [N.V. Vasil'ev, Yu.A. Zeigarnik, K.A. Khodakov, *Therm. Eng.*, **69** (5), 313 (2022). DOI: 10.1134/S0040363622050071].
- [4] X. Liu, J. Yang, Q. Zou, Y. Hu, P. Li, L. Tan, N. Miljkovic, R. Yang, *ACS Nano*, **19** (10), 9513 (2025). DOI: 10.1021/acsnano.4c15277
- [5] O.A. Volodin, D.A. Svetsov, V.S. Serdyukov, V.I. Zhukov, A.N. Pavlenko, *Appl. Therm. Eng.*, **277**, 127088 (2025). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2025.127088
- [6] И.А. Попов, Н.Н. Зубков, С.И. Каськов, А.В. Щелчков, *Теплоэнергетика*, № 3, 3 (2013) [I.A. Popov, N.N. Zubkov, S.I. Kas'kov, A.V. Shchelchikov, *Therm. Eng.*, **60** (3), 157 (2013). DOI: 10.1134/S004060151303004X].
- [7] A.S. Surtayev, A.N. Pavlenko, D.V. Kuznetsov, V.I. Kalita, D.I. Komlev, A.Y. Ivannikov, A.A. Radyuk, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **108**, 146 (2017). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.100
- [8] D. Kuznetsov, A. Pavlenko, *Energies*, **15** (16), 5792 (2022). DOI: 10.3390/en15165792
- [9] Н.В. Васильев, В.А. Ленков, Ю.А. Зейгарник, *Письма в ЖТФ*, **50** (15), 34 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.15.58438.1990 [N.V. Vasil'ev, V.A. Len'kov, Yu.A. Zeigarnik, *Tech. Phys. Lett.*, **50** (8), 30 (2024). DOI: 10.61011/TPL.2024.08.58912.19900].

- [10] А.С. Шамирзаев, А.С. Мордовской, С.Г. Баев, Д.Н. Ката-сонов, В.П. Бессмельцев, В.В. Кузнецов, Письма в ЖТФ, **50** (9), 16 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.09.57562.19786 [A.S. Shamirzaev, A.S. Mordovskoy, S.G. Baev, D.N. Katasonov, V.P. Bessmeltsev, V.V. Kuznetsov, Tech. Phys. Lett., **50** (5), 13 (2024). DOI: 10.61011/TPL.2024.05.58413.19786].
- [11] V.S. Shteling, A.T. Komov, P.P. Shcherbakov, A.V. Zakharenkov, A.P. Sliva, Tech. Phys., **69** (11), 2678 (2024). DOI: 10.1134/S1063784224701019
- [12] С.А. Ковалев, С.Л. Соловьев, *Испарение и конденсация в тепловых трубах* (Наука, М., 1989). <https://search.rsl.ru/ru/record/01001499432>
- [13] С.А. Ковалев, Е.Г. Шкловер, ТВТ, **26** (5), 918 (1988). https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrmid=vtv&paperid=4418&option_lang=rus [S.A. Kovalev, E.G. Shklover, High Temp., **26** (5), 712 (1988)].
- [14] S.G. Liter, M. Kaviany, Int. J. Heat Mass Transfer, **44** (22), 4287 (2001). DOI: 10.1016/S0017-9310(01)00084-9
- [15] N.H. Afgan, L.A. Jovic, S.A. Kovalev, V.A. Lenykov, Int. J. Heat Mass Transfer, **28** (2), 415 (1985). DOI: 10.1016/0017-9310(85)90074-2
- [16] S. Jun, H. Wi, A. Gurung, M. Amaya, S.M. You, J. Heat Transfer, **138** (7), 071502 (2016). DOI: 10.1115/1.4032988
- [17] K. Zhang, L. Bai, G. Lin, H. Jin, D. Wen, Appl. Therm. Eng., **149**, 377 (2019). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.12.089
- [18] Y. Hsu, ASME J. Heat Mass Transfer, **84** (3), 207 (1962). DOI: 10.1115/1.3684339
- [19] С.П. Малышенко, Теплоэнергетика, № 2, 38 (1991). [S.P. Malyshenko, Therm. Eng., **38** (2), 81 (1991). <https://elibrary.ru/xppfow>].