

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕННЫХ УСТРОЙСТВ ПРИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ

А.В. Тупотилова

Э.И. Гареев

А.В. Беляев

А.В. Дедов

stupakovaav@mpei.ru

gareevei@mpei.ru

beliayevavl@mpei.ru

dedovav@mpei.ru

НИУ «МЭИ», Москва, Российская Федерация

Аннотация

В многочисленных исследованиях для интенсификации двухфазного теплообмена и повышения критических тепловых потоков используются развитые поверхности как средство воздействия на процесс кипения. Для определения оптимальной геометрии новых структурированных поверхностей теплопередачи необходимы детальные экспериментальные исследования для каждого отдельного случая. В настоящее время отсутствует методика расчета подобных теплообменных поверхностей, применимая к широкому диапазону параметров потока. Исследована интенсификация теплообмена с применением модифицирования поверхности при кипении фреонов в моделях теплообменных устройств, которые можно использовать в холодильной технике, микроэлектронике, тепловых насосах. Для модифицирования поверхности теплообмена, представляющей собой пластину из коррозионно-стойкой стали, использованы лазерное и плазменное воздействия. Изготовлены пять рабочих участков. Исследования выполнены при кипении двух фреонов (R125, RC318) со значениями приведенного давления $p_r = 0,43, 0,13$ в диапазоне значений параметров потока $G = 30 \dots 150 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, $T_s = 30 \text{ }^\circ\text{C}$. Представлены экспериментальные данные о теплообмене при кипении на модифицированных поверхностях, проведено сравнение с данными, измеренными на немодифицированной поверхности. Показана возможность увеличения плотности теплового потока до 18 %

Ключевые слова

Кипение, интенсификация, теплообмен, модификация, развитая поверхность

Поступила 14.07.2023

Принята 01.12.2023

© Автор(ы), 2024

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант РНФ № 19-19-00410)

Введение. Применение модифицированных теплообменных поверхностей при кипении направлено на интенсификацию теплообмена и повышение критических тепловых потоков [1]. Модифицированные поверхности — теплообменные поверхности с полученными при их обработке и/или нанесении покрытиями, мелкомасштабными деформациями, сопоставимыми по геометрическим параметрам с шероховатостью. В этом случае шероховатость незначительна для изменения интенсивности однофазной теплоотдачи. Область применения модифицированных теплообменных поверхностей при кипении достаточно широка [2–4]. Модифицирование поверхности можно обеспечить различными способами обработки. В настоящее время активно разрабатываются технологии получения пористых структур с заданными геометрическими параметрами и физико-химическими характеристиками материалов [5–7].

В задачах разработки новых теплообменных поверхностей для микроэлектроники, энергетики, химической и нефтегазовой промышленности наблюдаются две противоположные тенденции в технических требованиях — уменьшение площади поверхности и увеличение плотности теплового потока. Объединить эти требования для систем, использующих фазовые переходы, можно при модификации поверхности теплообмена, повышающей интенсивность теплообмена одновременно с увеличением критической плотности теплового потока [8–10]. Как правило, модифицированные поверхности получают механической обработкой, окислением в электролитах, нанесением пористых покрытий. В последнее десятилетие в лабораторных исследованиях активнее применяют и изучают методы, основанные на пучковом воздействии на поверхность [11, 12].

При обработке лазерным, плазменным и электронным пучком в результате плавления, испарения, абляции и затвердевания материала на поверхности образуются регулярные и нерегулярные микро- и наноструктуры, существенно влияющие на параметры обрабатываемой поверхности [13]. В результате модифицирования поверхности приобретают новые физико-химические свойства. Пучковое воздействие позволяет не только развить поверхности теплообмена, но и создать искусственные центры парообразования за счет появления пористости и сочетания нано-, микро- и миллиразмерных неровностей (многомасштабной структуры). Для двухфазных систем необходимо, чтобы структура поверхности имела размеры, сопоставимые с характерными размерами при кипении (толщина макро-слоя жидкости, радиус жизнеспособного пузырька), определяемые свойствами жидкости и параметрами ее состояния [14].

В силу экономических факторов и эксплуатационных преимуществ применение пластинчатых теплообменников представляет собой более оптимальное инженерное решение, чем использование кожухотрубных теплообменников. Результаты анализа проведенных исследований показали, что интенсификация теплообмена достигается за счет применения поверхностей различной конфигурации. Наибольшая эффективность достигается для высокопористых микроканальных теплообменных элементов. Использование подобных элементов в сочетании с контрастной смачиваемостью позволяет сформировать развитую систему центров парообразования, следствием чего является интенсификация процесса [15]. Создание поверхностей с контрастной смачиваемостью — сложная материаловедческая задача. Множество исследований направлено на создание теплообменных поверхностей с требуемыми свойствами [16, 17].

Стремление к повышению эффективности теплообменников является частью общей тенденции к миниатюризации технологических устройств для нагрева и охлаждения. Канальные теплообменники обеспечивают высокую интенсивность теплообмена и надежность конструкции. Применение канальных теплообменников в разнообразном теплообменном оборудовании позволяет значительно уменьшить объемы рабочих жидкостей в системах. Основная задача при разработке канальных испарителей холодильных систем — создание теплообменников, использующих каналы с модифицированными поверхностями [18–20].

Для того чтобы определить оптимальную геометрию новых структурированных поверхностей теплообмена требуется экспериментальное изучение каждого отдельного случая. В настоящее время не существует методики расчета подобных теплообменных поверхностей, которую можно применять к широкому диапазону значений параметров потока.

Описание экспериментального стенда. Для изучения особенностей процессов гидродинамики и теплообмена в мини-каналах при высоких значениях приведенного давления использован модернизированный экспериментальный стенд (рис. 1). В качестве рабочих жидкостей применены фреоны R125, RC318.

Заполнение первого контура рабочей жидкостью осуществляется через вентиль В11 или В10 с помощью термокомпрессора 1. Давление в контуре создается термокомпрессором. Рабочая жидкость в нем испаряется, ее пары при расширении создают необходимое давление. Для того чтобы давление в контуре не превышало максимального значения, в баке термокомпрессора установлен предохранительный клапан, кото-

рый выпускает пары фреона из бака, когда давление в контуре достигает определенного значения. Объем термокомпрессора 1,6 л. Термокомпрессор оснащен датчиком давления, термопарой для измерения температуры жидкости и уровнемером для контроля предельно допустимого уровня теплоносителя в баке 2.

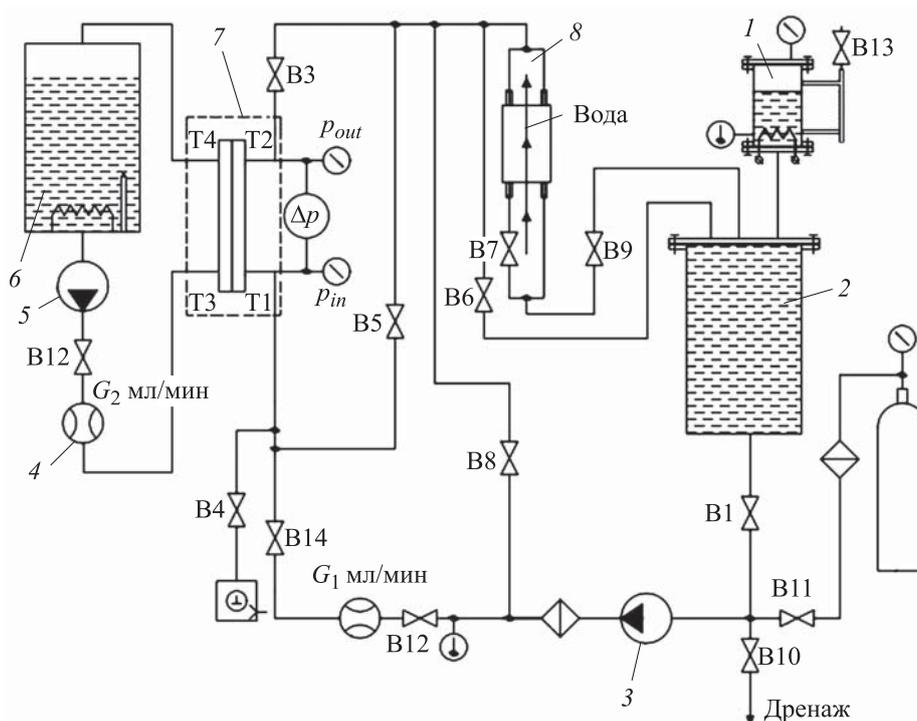


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

Для обхода рабочего участка предусмотрена байпасная линия. Это техническое решение используют при пуске и остановке стенда, пусконаладочных и технических работах. Включение байпаса вентилем В5 уменьшает потери давления и увеличивает расход теплоносителя, позволяя быстрее прокачать теплоноситель через контур, уменьшая время охлаждения системы.

После центробежного насоса 3 поток фреона подается на рабочий участок 7. Пройдя рабочий участок, фреон поступает в рекуперативный теплообменник 8, в котором фреон охлаждается водопроводной водой до ее температуры. После теплообменника теплоноситель попадает в бак, где контур замыкается.

Для регулировки расхода фреона в контуре предусмотрен вентиль тонкой регулировки В2. Расход рабочей жидкости можно регулировать изме-

нением частоты вращения ротора насоса, а значение расхода фреона — контролировать высокоточным кориолисовым расходомером.

Второй контур представляет собой термостат 6 с дистиллированной водой, насосом 5 и расходомером 4. Вода нагревается в термостате до необходимой температуры, после насоса поток жидкости попадает в рабочий участок, передавая теплоту фреону. Расход воды устанавливается вентилем В12 и контролируется расходомером. После прохождения через рабочий участок вода попадает в термостат, где поддерживается заданная температура воды, тем самым контур замыкается.

Рабочий участок (рис. 2) сконструирован в виде модели пластинчатого теплообменника, представляющего собой два прямоугольных канала размерами $8 \times 3,8$ мм, разделенных пластиной из коррозионно-стойкой стали толщиной 0,4 мм. В одном канале протекала дистиллированная вода заданной температуры (60, 70, 80 °С), в другом — в том же направлении циркулировал кипящий поток фреона (объемный расход $30 \dots 150 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$).

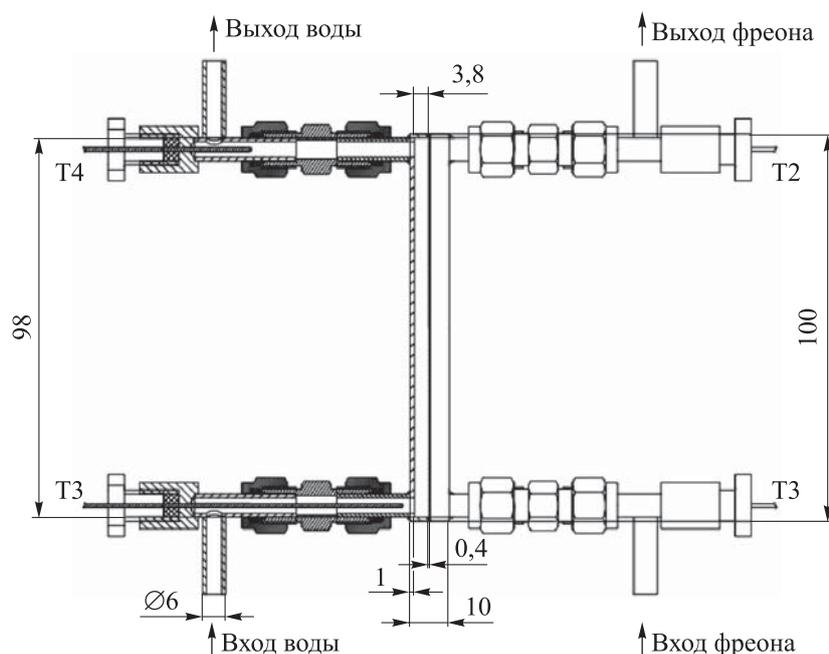


Рис. 2. Модель рабочего участка

Предварительно откалиброванные термопары (Т1, Т2 — температуры входа и выхода фреона, Т3, Т4 — температуры входа и выхода воды) расположены в подводящих трубках с внутренним диаметром 4 мм через соединитель в потоке жидкостей. Термопары Т1 и Т3 размещены непо-

средственно около входного сечения, термопары Т2 и Т4 — на расстоянии 40 мм от выходного сечения для измерения средней температуры.

Вода — охлаждающая жидкость, фреоны RC318, R125 — нагреваемые жидкости при приведенных значениях давления $p_r = 0,13$ и $p_r = 0,43$. Тепловой поток от воды передавался через тонкую пластину к фреону. Теплопередача со стороны воды осуществлялась за счет конвекции, со стороны фреона — за счет конвекции и кипения.

Изготовление рабочих участков с модифицированными поверхностями. На установке лазерной сварки выполнена обработка пластины из коррозионно-стойкой стали для получения выборки различных структур, анализа этих структур и последующего выбора нескольких из них для создания новых рабочих участков.

По результатам анализа полученных структур выбраны два режима работы лазерной установки и изготовлены две поверхности теплообмена: № 1 при $I = 60$ А и $t = 10$ мс; № 2 при $I = 110$ А, $t = 6$ мс и расфокусировке 1,5 мм.

Фотографии полученных поверхностей в увеличенном масштабе приведены на рис. 3, а–д. На стороне 1 на поверхностях образовывались углубления (лунки), на стороне 2 — выпуклости (горки).

На установке ПЛМ-2 проведено модифицирование пластины из коррозионно-стойкой стали плазменной обработкой [11]. Фотография поверхности № 3 в увеличенном масштабе показана на рис. 3, д. Основные параметры, при которых осуществлена обработка поверхности, приведены ниже:

Температура образца, °С 505–550
 Плазмообразующий газ Гелий
 Потенциал образца относительно плазмы, В –60
 Плотность плазмы n_e , м⁻³ $5 \cdot 10^{18}$
 Суммарное время воздействия плазмы, ч 19

С использованием лазерного микроскопа получены значения шероховатостей R_z изготовленных поверхностей, результаты приведены в таблице.

Основные параметры поверхностей

Номер образца	Обработка	Сторона	R_z , мкм
1	Лазерная	1 / 2	1,36 / 2,82
2		1 / 2	1,34 / 1,22
3	Плазменная	–	1,11

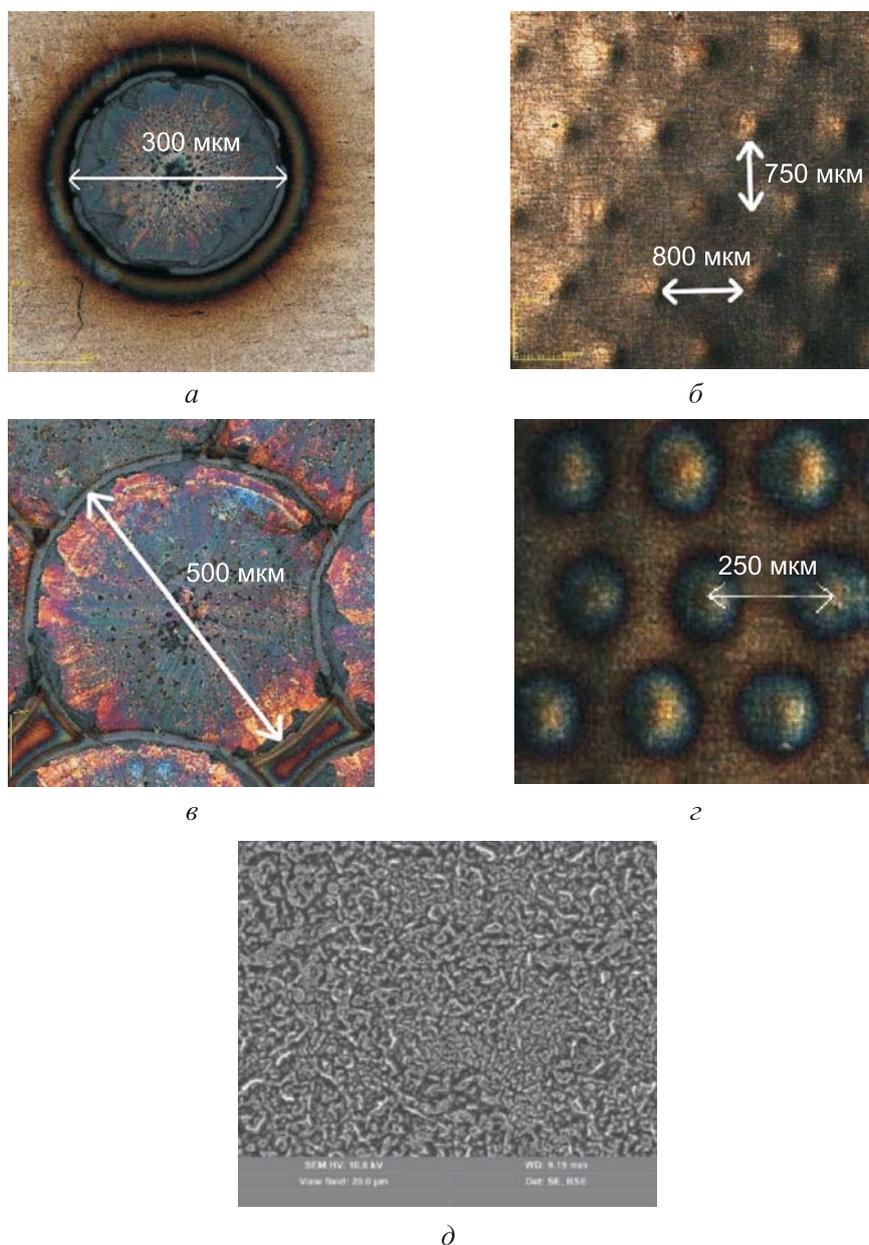


Рис. 3. Фотографии полученных поверхностей № 1 (а, б), № 2 (в, г) и № 3 (д) для сторон 1 (а, в), 2 (б, г)

Результаты экспериментальных исследований. Проведена серия экспериментов на изготовленных рабочих участках. На термостате установили необходимую температуру воды. Используя вентиль В12, установили расход воды, который контролировали расходомером. Расход фреона установили и регулировали с использованием вентиля В2. Высокое

давление фреона задавали в термокомпрессоре с условием того, что температура фреона должна быть близка температуре насыщения. Расход фреона, температуры входа и выхода фреона и воды регистрировала система сбора данных *L-CARD*.

Исследования проводили при $p_r = 0,43, 0,13$ с использованием фреонов R125, RC318 в диапазоне значений параметров потока $G = 30 \dots 150$ кг/(м²·с), $T_s = 30$ °С, температуры воды 60, 70 и 80 °С и значений расхода воды 0,25 и 0,5 л/мин.

Тепловой поток определяли по расходу воды и температуре на входе и выходе рабочего участка, относительная погрешность теплового потока составила 3 %. По тепловому балансу находили тепловые потери в окружающую среду, которые также не превышали 3 % для теплового потока 100 кВт/м². Результат сравнения тепловых потоков, полученных на поверхностях № 1–3 при $p_r = 0,43, 0,13$, показан на рис. 4.

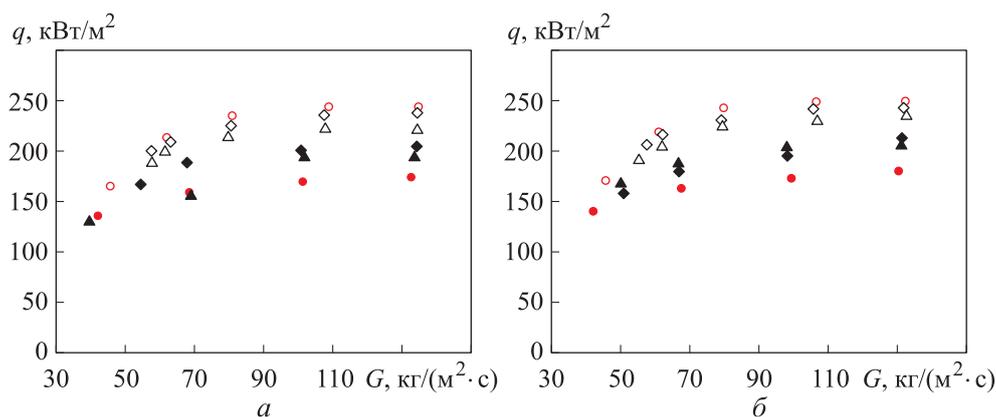


Рис. 4. Результаты сравнения тепловых потоков на гладкой пластине и на поверхностях № 1, № 3 (а) и № 2, № 3 (б):

$p_r = 0,13$: ● — гладкая поверхность; ▲ — поверхность № 2 (сторона 1);
◆ — поверхность № 2 (сторона 2); $p_r = 0,43$: ○ — гладкая поверхность;
△ — поверхность № 2; ◇ — поверхность № 3

В результате сравнения значений тепловых потоков на изготовленных поверхностях сделан вывод о том, что при $p_r = 0,13$ и максимально достигнутом тепловом потоке обнаружено заметное влияние модифицированных поверхностей на теплообмен. Тепловой поток увеличивался от 10 до 18 % при использовании модифицированных поверхностей № 1 и № 2.

Тепловой поток на поверхности № 1 изменялся в зависимости от положения пластины относительно воды и фреона. Если к воде обращены углубления, а к фреону — выпуклости, то тепловой поток возрастал

на 13 %. На поверхности № 2 увеличение теплового потока составило 5...7 %, что объясняется меньшими значениями шероховатости. Еще один способ интенсификации теплообмена — повышение давления рабочей жидкости. При $p_r = 0,43$ коэффициент теплоотдачи со стороны нагреваемой жидкости (фреона) возрастал, так что модифицированная поверхность уже не влияла на теплопередачу, которая становилась ограниченной со стороны охлаждающей жидкости (воды).

Заключение. Выполнено экспериментальное исследование по изучению интенсификации теплообмена при кипении жидкости в каналах. Предложены способы модификации поверхностей теплообменного оборудования в холодильной технике, микроэлектронике, тепловых насосах с помощью плазменного и лазерного воздействия.

Выполнен анализ полученных результатов и сделаны выводы об эффективности модификации поверхности. При максимально достигнутом тепловом потоке получена интенсификация теплообмена до 18 % при использовании лазерного воздействия на поверхность теплообмена. Плотность теплового потока ограничена теплообменом со стороны нагреваемой жидкости в условиях проводимых исследований.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дедов А.В. Обзор современных методов интенсификации теплообмена при пузырьковом кипении. *Теплоэнергетика*, 2019, № 12, с. 18–54. EDN: ADYDJW. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040363619120014>
- [2] Володин О.А., Печеркин Н.И., Павленко А.Н. Интенсификация теплообмена при кипении и испарении жидкостей на модифицированных поверхностях. *ТВТ*, 2021, № 2, т. 59, с. 280–312. EDN: BVREHB. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0040364421020149>
- [3] Singh S.K., Sharma D. Review of pool and flow boiling heat transfer enhancement through surface modification. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2021, vol. 181, pp. 122–142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122020>
- [4] Dedov A.V., Budaev V.P. Heat transfer on micro and nanostructured rough surfaces synthesized by plasma. *Symmetry*, 2022, vol. 14, iss. 11, art. 2346. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym14112346>
- [5] Yuan X., Du Y., Su J. Approaches and potentials for pool boiling enhancement with superhigh heat flux on responsive smart surfaces: a critical review. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2021, vol. 156, pp. 111–121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111974>
- [6] Nguyen D.H., Ahn H.S. A comprehensive review on micro/nanoscale surface modification techniques for heat transfer enhancement in heat exchanger. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2021, vol. 178, pp. 121–138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121601>

- [7] Liang G., Mudawar I. Review of nanoscale boiling enhancement techniques and proposed systematic testing strategy to ensure cooling reliability and repeatability. *Appl. Therm. Eng.*, 2021, vol. 184, pp. 115–124.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115982>
- [8] Dedov A.V., Khaziev I.A., Laharev D.A., et al. Study of nucleate pool boiling heat transfer enhancement on surfaces modified by beam technologies. *Heat Transf. Eng.*, 2022, vol. 43, iss. 7, pp. 598–607. DOI: <https://doi.org/10.1080/01457632.2021.1896834>
- [9] Попов И.А., Щелчков А.В., Гортышов Ю.Ф. и др. Интенсификация теплоотдачи и критические тепловые потоки при кипении на поверхностях с микроорегбрением. *ТВТ*, 2017, № 4, т. 55, с. 537–548.
DOI: <https://doi.org/10.7868/S0040364417030206>
- [10] Surtaev A., Kuznetsov D., Serdyukov V., et al. Structured capillary-porous coatings for enhancement of heat transfer at pool boiling. *Appl. Therm. Eng.*, 2018, vol. 133, pp. 532–542. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.01.051>
- [11] Fedorovich S.D., Dedov A.V., Khaziev I.A. Creating heat exchange surfaces using laser, electronic, and plasma energy fluxes. *High Temp. Mater. Process.*, 2021, vol. 25, iss. 1, pp. 81–93. DOI: <https://doi.org/10.1615/HighTempMatProc.2021038265>
- [12] Павленко А.Н. Плазменные, лазерные технологии и метод микродугового оксидирования для интенсификации теплообмена при кипении и испарении. *Неравновесные процессы: плазма, горение, атмосфера*. М., Торус-Пресс, 2022, с. 201–204. EDN: CYNKYUK. DOI: <https://doi.org/10.30826/NEPCAP10A-61>
- [13] Zhang C., Zhang L., Xu H., et al. Performance of pool boiling with 3D grid structure manufactured by selective laser melting technique. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2019, vol. 128, pp. 570–580. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.021>
- [14] Sallal A.S., Ghassan F.S., Thahab S.M. The heat transfer from fined perforated pipe improved due to nano-fluid. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1973, art. 012075.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1973/1/012075>
- [15] Volodin O.A., Pecherkin N.I., Pavlenko A.N. Combining microstructured surface and mesh covering for heat transfer enhancement in falling films of refrigerant mixture. *Energies*, 2023, vol. 16, iss. 2, pp. 782–794. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16020782>
- [16] Serdyukov V., Volodin O.A., Bessmeltsev V., et al. Heat transfer enhancement during pool water boiling using 3D printed capillary-porous coatings. *J. Engin. Thermophys.*, 2022, vol. 31, no. 2, pp. 201–209.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S1810232822020011>
- [17] Moharana S., Das M., Pecherkin N.I., et al. Experimental assessment of enhanced 2×3 semi-closed microstructure tube bundle as an alternative in shell and tube heat exchangers. *Appl. Therm. Eng.*, 2023, vol. 11, pp. 120–132.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120966>
- [18] Belyaev A.V., Dedov A.V., Sidel'nikov N.E., et al. Flow boiling heat transfer intensification due to inner surface modification in circular mini-channel. *Water*, 2022, vol. 14, iss. 24, pp. 40–54. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14244054>

[19] Крапивин И.И., Беляев А.В., Дедов А.В. Экспериментальное исследование теплообмена при кипении в условиях вынужденного течения фреонов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2022, № 4 (103), с. 59–79.

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2022-4-59-79>

[20] Александров А.А., Бармин И.В., Павлов С.К. и др. Исследование параметров теплообмена витого теплообменника в двухфазной среде. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2019, № 3 (84), с. 22–33.

EDN: FRLCND. DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2019-3-22-33>

Тупотилова Алена Васильевна — инженер НЦ «Инженерные проблемы термоядерной энергетики» кафедры «Общая физика и ядерный синтез» НИУ «МЭИ» (Российская Федерация, 111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 17, стр. 3).

Гареев Эмиль Ильгизович — студент кафедры «Общая физика и ядерный синтез» НИУ «МЭИ» (Российская Федерация, 111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 17, стр. 3).

Беляев Александр Владимирович — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры «Общая физика и ядерный синтез» НИУ «МЭИ» (Российская Федерация, 111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 17, стр. 3).

Дедов Алексей Викторович — член-корр. РАН, д-р техн. наук, директор Института тепловой и атомной энергетики, заведующий кафедрой «Общая физика и ядерный синтез» НИУ «МЭИ» (Российская Федерация, 111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 17, стр. 3).

Пробьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Тупотилова А.В., Гареев Э.И., Беляев А.В., и др. Повышение эффективности теплообменных устройств при фазовых переходах. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2024, № 4 (115), с. 63–76. EDN: WYSOWH

**IMPROVING THE HEAT EXCHANGER EFFICIENCY
AT THE PHASE TRANSITIONS**

A.V. Tupotilova

stupakovaav@mpei.ru

E.I. Gareev

gareevei@mpei.ru

A.V. Belyaev

beliayevavl@mpei.ru

A.V. Dedov

dedovav@mpei.ru

National Research University “Moscow Power Engineering Institute”,
Moscow, Russian Federation

Abstract

Numerous studies are using developed surfaces as a means effecting the boiling process to intensify the two-phase heat exchange and increase the critical heat flow.

Keywords

Boiling, intensification, heat exchange, modification, developed surface

Detailed experimental study is required in each separate case to determine optimal geometry for the new structured heat transfer surfaces. Currently, any computation method for such heat exchange surfaces applicable in a wide range of flow parameters is missing. The paper considers heat exchange intensification using the surface modification during freon boiling in the models of heat exchangers that could be used in refrigeration systems, microelectronics and heat pumps. Laser and plasma effects were used to modify the heat exchange surface, which was a plate made of the corrosion-resistant steel. Five working sections were manufactured. The study was carried out during boiling the two chladones (R125, RC318) with reduced pressures of $p_r = 0.43$ and $p_r = 0.13$ in the flow parameter values range of $G = 30\text{--}150 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $T_s = 30 \text{ }^\circ\text{C}$. The paper presents experimental data on heat exchange during boiling on the modified surfaces and compares it with the data measured on the unmodified surface. It shows possibility of increasing the heat flux density by up to 18 %

Received 14.07.2023

Accepted 01.12.2023

© Author(s), 2024

*The work was supported by the Russian Science Foundation
(grant no. 19-19-00410)*

REFERENCES

- [1] Dedov A.V. A review of modern methods for enhancing nucleate boiling heat transfer. *Therm. Eng.*, 20189, vol. 66, no. 12, pp. 881–915.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040601519120012>
- [2] Volodin O.A., Pecherkin N.I., Pavlenko A.N. Heat transfer enhancement at boiling and evaporation of liquids on modified surfaces — a review. *High Temp.*, 2021, vol. 59, no. 2, pp. 405–432. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0018151X21020140>
- [3] Singh S.K., Sharma D. Review of pool and flow boiling heat transfer enhancement through surface modification. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2021, vol. 181, pp. 122–142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122020>
- [4] Dedov A.V., Budaev V.P. Heat transfer on micro and nanostructured rough surfaces synthesized by plasma. *Symmetry*, 2022, vol. 14, iss. 11, art. 2346.
DOI: <https://doi.org/10.3390/sym14112346>
- [5] Yuan X., Du Y., Su J. Approaches and potentials for pool boiling enhancement with superhigh heat flux on responsive smart surfaces: a critical review. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2021, vol. 156, pp. 111–121.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111974>

[6] Nguyen D.H., Ahn H.S. A comprehensive review on micro/nanoscale surface modification techniques for heat transfer enhancement in heat exchanger. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2021, vol. 178, pp. 121–138.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121601>

[7] Liang G., Mudawar I. Review of nanoscale boiling enhancement techniques and proposed systematic testing strategy to ensure cooling reliability and repeatability. *Appl. Therm. Eng.*, 2021, vol. 184, pp. 115–124.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115982>

[8] Dedov A.V., Khaziev I.A., Laharev D.A., et al. Study of nucleate pool boiling heat transfer enhancement on surfaces modified by beam technologies. *Heat Transf. Eng.*, 2022, vol. 43, iss. 7, pp. 598–607.

DOI: <https://doi.org/10.1080/01457632.2021.1896834>

[9] Popov I.A., Shchelchikov A.V., Gortyshov Yu.F., et al. Heat transfer enhancement and critical heat fluxes in boiling of microfinned surfaces. *High Temp.*, 2017, vol. 55, no. 4, pp. 524–534. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0018151X17030208>

[10] Surtaev A., Kuznetsov D., Serdyukov V., et al. Structured capillary-porous coatings for enhancement of heat transfer at pool boiling. *Appl. Therm. Eng.*, 2018, vol. 133, pp. 532–542. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.01.051>

[11] Fedorovich S.D., Dedov A.V., Khaziev I.A. Creating heat exchange surfaces using laser, electronic, and plasma energy fluxes. *High Temp. Mater. Process.*, 2021, vol. 25, iss. 1, pp. 81–93. DOI: <https://doi.org/10.1615/HighTempMatProc.2021038265>

[12] Pavlenko A.N. [Plasma, laser technologies, and micro-arc oxidation method for heat transfer enhancement at boiling and evaporation]. *Neravnovesnye protsessy: plazma, gorenje, atmosfera* [Nonequilibrium processes: plasma, combustion, and atmosphere]. Moscow, Torus-Press Publ., 2022, pp. 201–204 (in Russ.). EDN: CYNYUK. DOI: <https://doi.org/10.30826/NEPCAP10A-61>

[13] Zhang C., Zhang L., Xu H., et al. Performance of pool boiling with 3D grid structure manufactured by selective laser melting technique. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2019, vol. 128, pp. 570–580. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.021>

[14] Sallal A.S., Ghassan F.S., Thahab S.M. The heat transfer from fined perforated pipe improved due to nano-fluid. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1973, art. 012075.

DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1973/1/012075>

[15] Volodin O.A., Pecherkin N.I., Pavlenko A.N. Combining microstructured surface and mesh covering for heat transfer enhancement in falling films of refrigerant mixture. *Energies*, 2023, vol. 16, iss. 2, pp. 782–794. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16020782>

[16] Serdyukov V., Volodin O.A., Bessmeltsev V., et al. Heat transfer enhancement during pool water boiling using 3D printed capillary-porous coatings. *J. Engin. Thermophys.*, 2022, vol. 31, no. 2, pp. 201–209.

DOI: <https://doi.org/10.1134/S1810232822020011>

[17] Moharana S., Das M., Pecherkin N.I., et al. Experimental assessment of enhanced 2×3 semi-closed microstructure tube bundle as an alternative in shell and tube heat exchangers. *Appl. Therm. Eng.*, 2023, vol. 11, pp. 120–132.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120966>

[18] Belyaev A.V., Dedov A.V., Sidel'nikov N.E., et al. Flow boiling heat transfer intensification due to inner surface modification in circular mini-channel. *Water*, 2022, vol. 14, iss. 24, pp. 40–54. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14244054>

[19] Krapivin I.I., Belyaev A.V., Dedov A.V. Experimental investigation of boiling heat transfer in freons subjected to forced flow. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2022, no. 4 (103), pp. 59–79 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2022-4-59-79>

[20] Aleksandrov A.A., Barmin I.V., Pavlov S.K., et al. Investigation heat transfer parameters for a helical-coil heat exchanger in a two-phase medium. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2019, no. 3 (84), pp. 22–33 (in Russ.). EDN: FRLCND.

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2019-3-22-33>

Tupotilova A.V. — Engineer, SC “Engineering Problems of Thermonuclear Energy”, Department of General Physics and Nuclear Fusion, National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (Krasnokazarmennaya ul. 17, str. 3, Moscow, 111250 Russian Federation).

Gareev E.I. — Student, Department of General Physics and Nuclear Fusion, National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (Krasnokazarmennaya ul. 17, str. 3, Moscow, 111250 Russian Federation).

Belyaev A.V. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Lecturer, Department of General Physics and Nuclear Fusion, National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (Krasnokazarmennaya ul. 17, str. 3, Moscow, 111250 Russian Federation).

Dedov A.V. — Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sc. (Eng.), Director of the Institute of Thermal and Nuclear Power Engineering; Head of the Department of General Physics and Nuclear Fusion, National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (Krasnokazarmennaya ul. 17, str. 3, Moscow, 111250 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Tupotilova A.V., Gareev E.I., Belyaev A.V., et al. Improving the heat exchanger efficiency at the phase transitions. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2024, no. 4 (115), pp. 63–76 (in Russ.). EDN: WYSOWH