



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-63-69>

УДК 621.762+536.248.2

КОНТУРНЫЙ ТЕРМОСИФОН ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МИНИАТЮРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

В. А. ОЛЕХНОВИЧ, А. Ф. ИЛЬЮЩЕНКО, П. С. АНЧЕВСКИЙ

Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Рассмотрен пульсирующий контурный термосифон как наиболее перспективное теплопередающее устройство для охлаждения теплонагруженных миниатюрных полупроводников, обладающее минимальными размерами испарителя и демонстрирующее плотность теплосъема более 120 Вт/см². Основной недостаток данного типа термосифонов – высокое термическое сопротивление. Для повышения эффективности теплопередачи исследованы ультратонкие порошковые капиллярные структуры, являющиеся интенсификатором процесса испарения в испарителе контурного термосифона. Показано, что применение порошковой капиллярной структуры толщиной 140 мкм, изготовленной из фракции медного порошка ПМС-Н с размерами частиц 63–100 мкм, снижает термическое сопротивление контурного термосифона в три раза и повышает плотность теплосъема до 220 Вт/см². Пульсирующий контурный термосифон может использоваться в эффективных системах охлаждения серверных станций, промышленных компьютеров, телекоммуникационного оборудования, где требуется отвод теплоты от миниатюрных полупроводниковых компонентов в ограниченном пространстве плотной компоновки.

Ключевые слова: охлаждение электроники, тепловая труба, контурный термосифон, порошковая капиллярная структура, испаритель.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Олехнович, В. А. Контурный термосифон для эффективного охлаждения миниатюрных источников теплоты в электронике / В. А. Олехнович, А. Ф. Ильющенко, П. С. Анчевский // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 4. С. 63–69. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-63-69>.

LOOP THERMOSIPHON FOR EFFICIENT COOLING OF MINIATURE HEAT SOURCES IN ELECTRONICS

VALERY A. ALIAKHNOVICH, ALIAKSANDR PH. ILYUSHCHANKA,
PAVEL S. ANCHEUSKI

Powder Metallurgy Institute (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article considers a pulsating loop thermosyphon as the most promising heat-transfer device for cooling heat-loaded miniature semiconductors, which has minimal evaporator dimensions and demonstrates a heat removal density of more than 120 W/cm². The main disadvantage of this type of thermosyphons is high thermal resistance. To improve the efficiency of heat transfer, ultra-thin powder capillary structures were studied, which intensify the evaporation process in the evaporator of the loop thermosyphon. It has been shown that the use of a 140 μm thick powder capillary structure made from a fraction of copper powder PMS-N with particle sizes of 63–100 μm to reduces the thermal resistance of a loop thermosyphon by three times and increases the heat flux density to 220 W/cm². The pulsating loop thermosyphon can be used in efficient cooling systems for server stations, industrial computers, telecommunication equipment, where it is necessary to remove heat from miniature semiconductor components in a limited space of a dense arrangement.

Keywords: electronics cooling, heat pipe, loop thermosyphon, powder capillary structure, evaporator.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Aliakhnovich V. A., Ilyushchanka A. Ph., Ancheuski P. S. (2025) Loop Thermosiphon for Efficient Cooling of Miniature Heat Sources in Electronics. *Doklady BGUIR*. 23 (4), 63–69. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-63-69> (in Russian).

Введение

В настоящее время широкое применение полупроводниковых компонентов, таких как центральные процессоры, графические микропроцессоры, JBT-транзисторы, мощные светодиоды, тесно связано с проблемой охлаждения из-за значительного количества тепла, выделяемого при их работе. Согласно проведенному исследованию, установлено, что больше половины выходов из строя вычислительной техники происходит из-за перегрева [1]: когда температура полупроводникового перехода превышает $85\text{ }^{\circ}\text{C}$, интенсивность отказов приобретает экспоненциальный рост [2]. Поэтому для стабильной и надежной работы теплонагруженных полупроводников требуется эффективная система охлаждения, обеспечивающая отвод выделяемого теплового потока и поддержание температуры ниже критических значений.

Наблюдаемая тенденция по уменьшению геометрических размеров полупроводниковых элементов вместе с повышением их производительности ведет к увеличению плотности выделяемого теплового потока. Сегодня локальная поверхностная плотность тепловыделения компьютерных процессоров и тиристорных устройств управления более 100 и 200 Вт/см^2 соответственно, а полупроводниковые лазеры могут выделять более 300 Вт/см^2 . Проблема охлаждения миниатюрных чипов с высокой плотностью тепловыделения в современной микроэлектронной индустрии стала одним из факторов, влияющих на технологию изготовления высокоинтегральных микросхем, и в некоторой степени выступает как ограничивающий фактор по отношению к дальнейшему росту вычислительной производительности микропроцессоров следующего поколения [3].

Краткий анализ методов охлаждения

Поиск эффективных методов охлаждения теплонагруженных миниатюрных полупроводниковых элементов с размерами менее 2 см^2 и плотностью тепловыделения более 100 Вт/см^2 является важной задачей для проектирования и производства надежного современного электронного оборудования и вычислительной техники [4–6]. Распространенный и эффективный способ охлаждения электронных устройств – использование систем охлаждения на основе тепловых труб (ТТ) [7, 8]. Тепловая труба – автономное теплопередающее устройство, внутри которого организован испарительно-конденсационный принцип теплопередачи, не требующий электричества и дополнительных механизмов. Ключевым элементом ТТ является капиллярная структура (КС), которая обеспечивает транспорт теплоносителя из конденсатора в испаритель, а также играет важную роль интенсификатора процесса испарения и конденсации за счет своей развитой поверхности.

Среди классических ТТ, используемых в системах охлаждения электроники, широко применяются плоские миниатюрные ТТ [9], удобные для расположения внутри компактного современного оборудования. Однако несмотря на их высокую эффективную теплопроводность, плотность теплосъема в испарителе ограничена 25 Вт/см^2 , что не позволяет использовать их при охлаждении более теплонагруженной электроники.

Большую эффективность теплопередачи обеспечивают контурные ТТ и термосифоны, так как имеют отдельные каналы для транспорта жидкости и пара. Высокие теплопередающие показатели демонстрируют медные контурные ТТ, работающие на воде, которые способны отводить тепловыделение плотностью до 55 Вт/см^2 при минимальных размерах испарителя $2\times 2\text{ см}^2$ [10]. В отличие от контурных ТТ в контурных термосифонах подпитка зоны испарения осуществляется за счет сил гравитации, и при наличии КС в испарителе термосифоны могут обеспечить теплоотвод с плотностью до 80 Вт/см^2 [11].

Особое место среди двухфазных теплопередающих устройств занимают пульсирующие контурные термосифоны (ПКТ), которые отличаются нестационарным механизмом теплопередачи. Данный тип термосифонов характеризуется высокой плотностью теплосъема, достигающей 120 Вт/см^2 [12, 13], имея при этом размеры испарителя всего $1\text{--}3\text{ см}^2$. Однако несмотря на высокую плотность теплосъема в испарителе, эффективность теплопередачи в ПКТ низкая из-за его высокого термического сопротивления, которое составляет $0,2\text{--}0,3\text{ }^{\circ}\text{C/Вт}$, что ограни-

чивается применение таких термосифонов в системах охлаждения электроники. Для сравнения, в классических ТТ термическое сопротивление составляет 0,05–0,07 °С/Вт.

Конструкция и принцип работы пульсирующего контурного термосифона

Пульсирующий контурный термосифон имеет простую и надежную конструкцию, представленную на рис. 1.

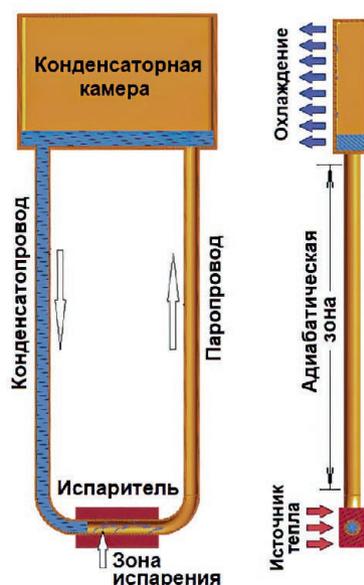


Рис. 1. Принцип теплопередачи в пульсирующем контурном термосифоне

Fig. 1. The principle of heat transfer in pulsating loop thermosiphon

ПКТ состоит из конденсаторной камеры, испарителя, паропровода и конденсаторпровода. Длина испарительной части составляет всего 1–3 см. Особенность термосифона – пульсирующий механизм теплопередачи, для реализации которого необходимым условием является малый размер внутреннего канала, который ограничен условием баланса капиллярных и гравитационных сил и не должен превышать критического значения $D_{\text{крит}}$

$$D_{\text{крит}} = 2 \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_{\text{жид}} - \rho_{\text{пар}})}}, \quad (1)$$

где σ – поверхностное натяжение жидкости; g – ускорение свободного падения; $\rho_{\text{жид}}$, $\rho_{\text{пар}}$ – плотность жидкости и пара.

Условие баланса обеспечивает движение жидкости в канале в виде поршня, что препятствует проникновению пара в конденсаторпровод и обеспечивает однонаправленное движение двухфазного потока в паропроводе. Величина $D_{\text{крит}}$ зависит от типа теплоносителя. Если в качестве рабочей жидкости использовать воду, то максимальный внутренний диаметр канала не должен превышать 5 мм.

Термическое сопротивление ПКТ определяется по формуле

$$R_t = \frac{T_{\text{исп}} - T_{\text{конд}}}{Q}, \quad (2)$$

где $T_{\text{исп}}$, $T_{\text{конд}}$ – средняя температура испарителя и конденсатора соответственно; Q – передаваемый тепловой поток.

Высокое термическое сопротивление ПКТ вызвано двумя основными причинами: во-первых, это нестационарность механизма теплопередачи и, во-вторых, протекание процесса испарения на гладкой поверхности канала испарителя. Поэтому очевидно, что применение развитой поверхности в виде КС в зоне испарения приведет к уменьшению термического сопротивления. В качестве КС в ТТ используются сетчатые, канавочные, волоконные и порошковые. Широкое

применение получили порошковые КС, так как имеют весомое преимущество из-за их высококапиллярного потенциала и удельной поверхности. Интенсификация теплопередачи в ПКТ за счет применения порошковой КС в испарителе затруднена из-за малого размера канала испарителя, который составляет всего 3-4 мм, что не позволяет использовать обычные порошковые КС, применяемые в классических ТТ. Кроме того, КС должна быть достаточно тонкая, чтобы не создавать дополнительное гидравлическое сопротивление в испарителе и обеспечивать уменьшение термического сопротивления.

Ультратонкие порошковые капиллярные структуры

В Институте порошковой металлургии имени академика О. В. Романа разработан уникальный метод получения ультратонких порошковых капиллярных структур (УПКС) с управляемыми структурными и капиллярно-пористыми характеристиками, позволяющий создавать равномерную порошковую структуру на внутренней поверхности узких каналов с условным диаметром менее 5 мм. Под ультратонкой понимается КС толщиной от одного до двух размеров частиц порошка, используемого при формировании порошкового слоя.

Суть метода заключается в формировании равномерного тонкого слоя порошка на поверхности жидкой пленки, предварительно нанесенной на внутреннюю поверхность канала испарителя. При этом жидкая пленка формируется с использованием раствора с изменяемым углом смачивания к частицам порошка, который задается определенной пропорцией компонентов раствора. Для получения УПКС применяется медный порошок марки ПМС-Н с фракциями частиц порошка от 50 до 200 мкм. ПМС-Н относится к электролитическим порошкам с частицами дендритной формы (рис. 2), который широко применяется при изготовлении КС для медных ТТ благодаря максимальной удельной поверхности получаемых структур. С помощью разработанного метода можно получать УПКС с заданными параметрами: толщина структуры – от 50 до 300 мкм, максимальный диаметр пор – 60–190 мкм, пористость – 55–75 %. УПКС могут применяться в испарителях двухфазных теплопередающих устройств с высокой плотностью теплопередачи, обеспечивая минимальное термическое сопротивление.

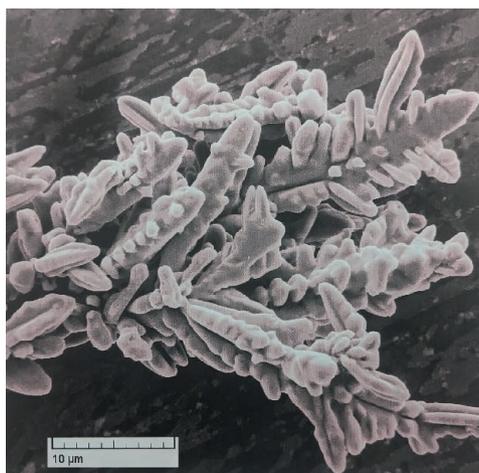


Рис. 2. Дендритная форма частиц порошка ПМС-Н
Fig. 2. Dendritic shape of PMS-N powder particles

Экспериментальное исследование пульсирующих контурных термосифонов с ультратонкими порошковыми капиллярными структурами

Проведено экспериментальное исследование зависимости теплопередающей способности ПКТ от структурных и капиллярно-транспортных характеристик УПКС, расположенной в активной зоне испарителя. Для этого был изготовлен медный образец ПКТ, показанный на рис. 3. Экспериментальный образец позволял осуществлять замену испарителя на испаритель с другими характеристиками УПКС, не меняя общей конструкции термосифона. Это дало возможность исключить влияние теплофизических факторов остальной части устройства на полученные результаты исследования. В качестве теплоносителя использовалась дистиллированная вода.

Первая серия экспериментов была направлена на исследование зависимости термического сопротивления R_t ПКТ от размера частиц порошка при одинаковой толщине структуры. Экспериментальные испарители ПКТ с УПКС изготавливали из следующих фракций порошка ПМС-Н: 50–63, 63–100, 100–125, 125–160 и 160–200 мкм. Толщина слоя составляла (160 ± 20) мкм. Размеры испарителя: длина 18 мм, высота 10 мм, толщина 7 мм. Диаметр внутреннего канала 3 мм. На рис. 4 изображено фото УПКС, спеченной на внутренней поверхности канала испарителя.



Рис. 3. Пульсирующий контурный термосифон с ультратонкой порошковой капиллярной структурой

Fig. 3. Pulsating contour thermosiphon with ultra-fine powder capillary structure



Рис. 4. Ультратонкая порошковая капиллярная структура в канале испарителя пульсирующего контурного термосифона ($D_{\text{вн}} = 3$ мм)

Fig. 4. Ultra-fine powder capillary structure in the evaporator channel of a pulsating loop thermosiphon ($D_{\text{in}} = 3$ мм)

На рис. 5 представлены зависимости термического сопротивления R_t от размера частиц порошка. Эксперимент показал, что наименьшее термическое сопротивление при плотности теплосъема 100 Вт/см^2 зафиксировано у образца ПКТ с испарителем с УПКС, спеченной из частиц размерами 63–100 мкм, и составило $0,068 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$, а минимальное значение R_t , равное $0,043 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$, соответствовало пределу теплопередачи $Q_{\text{max}} = 320 \text{ Вт}$.

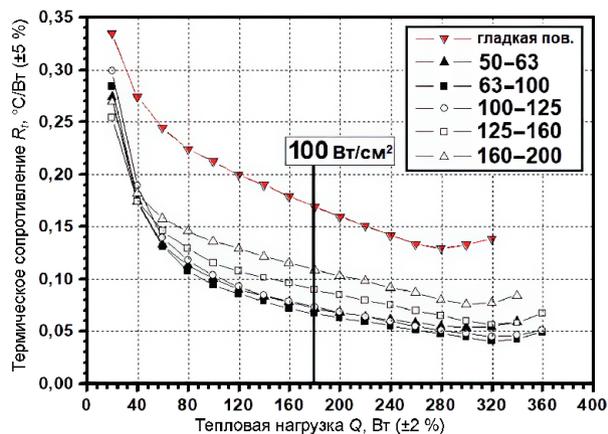


Рис. 5. Зависимость R_t от тепловой нагрузки для разных фракций порошка, мкм
Fig. 5. Dependence of thermal resistance on heat load for different powder fractions, μm

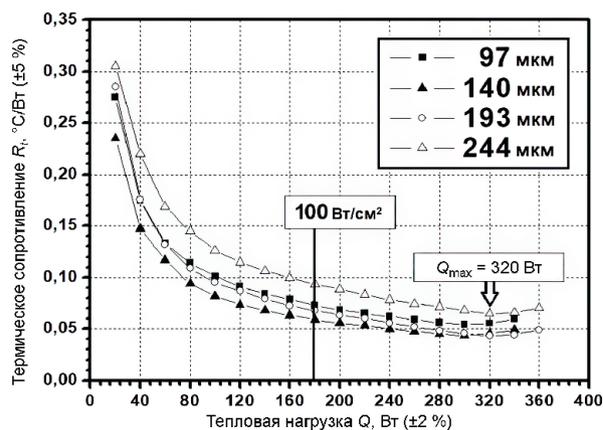


Рис. 6. Зависимость R_t от тепловой нагрузки для разной толщины ультратонкой порошковой капиллярной структуры
Fig. 6. Dependence of R_t on thermal load for different thicknesses of ultra-thin powder capillary structure

Вторая серия экспериментов была направлена на исследование зависимости термического сопротивления R_t от толщины УПКС. Для этого изготавливались испарители с толщинами УПКС 97, 140, 193 и 244 мкм (рис. 6). Для формирования КС использовалась фракция порошка 63–100 мкм как наиболее оптимальная по результатам первой серии экспериментов. На рис. 6 представлены полученные результаты в виде зависимости R_t от тепловой нагрузки для разных толщин УПКС. Эксперимент показал, что при толщине 140 мкм фиксировалось наименьшее термическое сопротивление 0,058 °C/Вт при плотности теплового потока в испарителе 100 Вт/см².

Заключение

1. Проведены исследования теплопередающей способности пульсирующего контурного термосифона с применением ультратонкой порошковой капиллярной структуры в испарителе. Получены зависимости термического сопротивления от толщины капиллярной структуры и размера частиц порошка, используемого при формировании структуры. Результаты показали, что для пульсирующего контурного термосифона с внутренним каналом 3 мм, работающего на воде, наиболее оптимальной является ультратонкая порошковая капиллярная структура толщиной 140 мкм и размерами частиц порошка 63–100 мкм. Капиллярная структура с такими характеристиками способствует уменьшению термического сопротивления всего теплопередающего устройства с 0,17 °C/Вт (для гладкого канала испарителя) до 0,058 °C/Вт при плотности теплового потока в испарителе 100 Вт/см². Минимальное R_t было зафиксировано при максимальной теплопередаче $Q_{\max} = 320$ Вт и составило 0,043 °C/Вт.

2. Применение ультратонкой порошковой капиллярной структуры в испарителе пульсирующего контурного термосифона позволило значительно уменьшить его термическое сопротивление, то есть получено эффективное теплопередающее устройство с размерами испарителя менее 2 см² и плотностью теплосъема до 220 Вт/см².

3. Пульсирующий контурный термосифон может использоваться в эффективных системах охлаждения серверных станций, промышленных компьютеров, телекоммуникационного оборудования, где требуется отвод тепловыделения от миниатюрных полупроводниковых компонентов в ограниченном пространстве плотной компоновки.

Список литературы

1. Janicki, M. Modelling Electronic Circuit Radiation Cooling Using Analytical Thermal Model / M. Janicki, A. Napieralski // *Microelectronics Journal*. 2000. Vol. 31, Iss. 9–10. P. 781–785.
2. Pokorni, S. Reliability Prediction of Electronic Equipment: Problems and Experience / S. Pokorni // *Proceedings of the 7th International Scientific Conference on Defensive Technologies OTEH, Belgrade, Serbia, 6–7 Oct. 2016*.
3. *The International Roadmap for Semiconductors*. USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2023.
4. Soheli Murshed, S. M. A Critical Review of Traditional and Emerging Techniques and Fluids for Electronics Cooling / S. M. Soheli Murshed, C. A. Nieto de Castro // *J. Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 78, Iss. 1. P. 821–833.
5. Khudaiwala, A. Recent Developments in Thermal Management of Light-Emitting Diodes (LEDS) / A. Khudaiwala, R. L. Patel, R. Bumataria // *Journal of Thermal Engineering*. 2024. Vol. 10, Iss. 2. P. 517–540.
6. Zhihao, Zhang. A Review of the State-of-the-Art in Electronic Cooling / Zhihao Zhang, Xuehui Wang, Yuying Yan // *J. Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*. 2021. Vol. 1. P. 100–109.
7. Faghri, A. *Heat Pipe Science and Technology* / A. Faghri // Washington: Taylor & Francis DC, 1995. 1st ed.
8. Faghri, A. Review and Advances in Heat Pipe Science and Technology / A. Faghri // *Journal of Heat Transfer*. 2012. Vol. 134, Iss. 12.
9. Антигравитационные тепловые трубы с многосекционными порошковыми структурами / В. В. Мазюк [и др.] // *Пористые проницаемые материалы: технологии и изделия на их основе: сб. докл. 7-го Междунар. науч.-техн. симп., г. Раков, 19–20 окт. 2023*. С. 274–280.
10. Maydanik, Y. High-Capacity Loop Heat Pipe with Flat Evaporator for Efficient Cooling Systems / Y. Maydanik, M. Chernysheva, S. Vershinin // *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. 2020. Vol. 34, Iss. 5. P. 1–11.
11. Khrustalev, D. Loop Thermosyphons for Cooling of Electronics / D. Khrustalev // *Eighteenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*. 2002. P. 145–150.
12. Олехнович, В. А. Теплопередающее устройство для охлаждения микроэлектроники / В. А. Олехнович, С. В. Конев // *Тезисы докл. VI Минского Междунар. форума по тепло- и массообмену*. Минск: ИТМО Нац. акад. наук Беларуси, 2008. Т. 2.

13. Олехнович, В. А. Теплопередающее устройство / В. А. Олехнович, С. В. Конев // Тепло- и массоперенос – 2008: сб. науч. тр. Минск: ИТМО Нац. акад. наук Беларуси, 2008.

Поступила 26.06.2025

Принята в печать 17.07.2025

References

1. Janicki M., Napieralski A. (2000) Modelling Electronic Circuit Radiation Cooling Using Analytical Thermal Model. *Microelectronics Journal*. 31 (9–10), 781–785.
2. Pokorni S. (2016) Reliability Prediction of Electronic Equipment: Problems and Experience. *Proceedings of the 7th International Scientific Conference on Defensive Technologies OTEH, Belgrade, Serbia, 6–7 Oct.*
3. *The International Roadmap for Semiconductors (ITRS) (2023)*. USA, Institute of Electrical and Electronics Engineers.
4. Soheli Murshed S. M., Nieto de Castro C. A. (2017) A Critical Review of Traditional and Emerging Techniques and Fluids for Electronics Cooling. *J. Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 78 (1), 821–833.
5. Khudaiwala A., Patel R. L., Bumataria R. (2024) Recent Developments in Thermal Management of Light-Emitting Diodes (LEDs). *Journal of Thermal Engineering*. 10 (2), 517–540.
6. Zhihao Zhang, Xuehui Wang, Yuying Yan (2021) A Review of the State-of-the-Art in Electronic Cooling. *J. Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*. 1, 100–109.
7. Faghri A. (1995) *Heat Pipe Science and Technology*. Washington, Taylor & Francis DC.
8. Faghri A. (2012) Review and Advances in Heat Pipe Science and Technology. *Journal of Heat Transfer*. 134 (12).
9. Maziuk V. V., Ilyushchanka A. Ph., Aliakhnovich V. A., Ancheuski P. S. (2023) Antigravity Heat Pipe with Multi-Section Powder Wick. *Porous Permeable Materials: Technologies and Products Based on Them, Proc. of the 7th International Scientific and Technical Symposium, Rakov, 19–20 Oct.* 274–280 (in Russian).
10. Maydanik Y., Chernysheva M., Vershinin S. (2020) High-Capacity Loop Heat Pipe with Flat Evaporator for Efficient Cooling Systems. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. 34 (5), 1–11.
11. Khrustalev D. (2002) Loop Thermosyphons for Cooling of Electronics. *Eighteenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*. 145–150.
12. Aliakhnovich V. A., Konev S. V. (2008) Heat Transfer Device for Microelectronics Cooling. *Proc. of the VI Minsk Int. Forum on Heat and Mass Transfer*. Minsk, Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus. Vol. 2 (in Russian).
13. Aliakhnovich V. A., Konev S. V. (2008) Heat Transfer Device. *Heat and Mass Transfer – 2008, Collection of Scientific Papers*. Minsk, Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus (in Russian).

Received: 26 June 2025

Accepted: 17 July 2025

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Олехнович В. А., ст. науч. сотр. науч.-иссл. лаб. капил.-порис. матер. (НИЛ-24), Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа (ИПМ)

Ильющенко А. Ф., акад. Нац. акад. наук Беларуси, д-р техн. наук, проф., дир., ИПМ

Анчевский П. С., зав. НИЛ-24, ИПМ

Адрес для корреспонденции

220005, Республика Беларусь,
Минск, ул. Платонова, 41
Институт порошковой металлургии
имени академика О. В. Романа
Тел.: +375 17 290-99-92
E-mail: nil24@pminstitute.by
Олехнович Валерий Адамович

Information about the authors

Aliakhnovich V. A., Senior Researcher at the R&D Laboratory of Capillary-Porous Materials (Lab. 24), Powder Metallurgy Institute (PMI)

Ilyushchanka A. Ph., Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Director, PMI

Ancheuski P. S., Head of the Lab. 24, PMI

Address for correspondence

220005, Republic of Belarus,
Minsk, Platonova St., 41
Powder Metallurgy
Institute
Tel.: +375 17 290-99-92
E-mail: nil24@pminstitute.by
Aliakhnovich Valery Adamovich