

Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 8. С. 347–352
Thermal processes in engineering, 2025, vol. 17, no. 8, pp. 347–352

Научная статья

УДК 536.248; 621.566

URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=186014>

EDN: <https://www.elibrary.ru/XTSICE>

Экспериментальное исследование контурной тепловой трубы с медной капиллярной структурой и аммиаком в качестве теплоносителя

А.С. Панасенко^{1✉}, Ю.Ф. Майданик², С.В. Вершинин³

^{1,2,3}ФБГУН Институт теплофизики Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Российская Федерация

¹panasenko@itpuran.ru✉

Аннотация. В работе впервые представлены результаты разработки и исследования рабочих характеристик контурной тепловой трубы (КТТ), изготовленной из нержавеющей стали с цилиндрическим испарителем диаметром 12 мм, снабженным медным фитилем, и аммиаком в качестве теплоносителя. Особенностью данного устройства является сочетание меди и аммиака, ранее не применявшееся в тепловых трубах. Испытания КТТ проводились при горизонтальной ориентации и тепловых нагрузках от 10 до 350 Вт при различной температуре циркулирующей воды, охлаждающей трубчатый U-образный конденсатор. Термическое сопротивление устройства в диапазоне номинальных тепловых нагрузок от 100 до 350 Вт при этом находилось на уровне 0,2 °С/Вт. Показано, что комбинация «медь – аммиак» является вполне приемлемой, что позволит в дальнейшем значительно снизить термическое сопротивление контурных тепловых труб, полностью выполненных из меди.

Ключевые слова: система охлаждения, контурная тепловая труба, тепловая нагрузка, термическое сопротивление, химическая совместимость

Для цитирования. Панасенко А.С., Майданик Ю.Ф., Вершинин С.В. Экспериментальное исследование контурной тепловой трубы с медной капиллярной структурой и аммиаком в качестве теплоносителя // Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 8. С. 347–352. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=186014>

Original article

Experimental study of a loop heat pipe with a copper capillary structure and ammonia as a working fluid

A.S. Panasenko^{1✉}, Yu.F. Maydanik², S.V. Vershinin³

^{1,2,3}Institute of Thermal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation

¹panasenko@itpuran.ru✉

Abstract. Loop heat pipes (LHPs) are passive two-phase heat transfer devices that operate on a closed evaporation-condensation cycle and use a “capillary mechanism” to ensure circulation of the working

fluid. The LHPs are designed as a closed loop, including an evaporator equipped with a fine-pored capillary structure – a wick and a condenser, which are connected by means of smooth-walled pipelines for separate movement of vapor and liquid, the diameter of which usually varies from 2 to 8 mm. This makes it easy to configure them, which is often necessary to place the device in highly constricted conditions. The evaporator can have both cylindrical and various flat shapes depending on the conditions of practical application. The wick, located only in the evaporator, has a special design that allows it to simultaneously perform the functions of a capillary pump as well as a hydraulic and thermal lock, which ensures the operability of the heat transfer device in a wide variety of conditions. The condenser can have different shapes and sizes adapted to the operating conditions of the LHP. Various liquids can be used as working fluids depending on their operating temperature range, chemical compatibility with structural elements, and the required operating characteristics of the LHPs. The most effective working fluid for LHPs, used in particular in electronics cooling systems, is ammonia.

The paper presents for the first time the results of the development and study of the operating characteristics of a loop heat pipe (LHP) made of stainless steel with a cylindrical evaporator with a diameter of 12 mm and a length of 90 mm, equipped with a copper wick with a breakdown radius of pores of 3,4 μm . A vapor line with a length of 395 mm had a diameter of 2,5 mm, while a liquid line measured 605 mm and 2 mm, respectively. A U-shaped tubular condenser with a length of 299 mm and a diameter of 4 mm was coupled with a flat copper interface with dimensions of 150×100×5 mm, which was pressed against a liquid heat exchanger during tests. Ammonia was used as a working fluid. The feature of this device is the combination of copper and ammonia, which has not previously been used in heat pipes. This combination makes it possible to significantly expand the technological capabilities in the production of LHPs, as well as to increase their efficiency. The LHP tests were carried out in a horizontal orientation at heat loads from 10 to 350 W at different temperatures of the circulating water cooling the condenser. The thermal resistance of the device in the range of nominal heat loads from 100 to 350 W was at a level of 0,2 °C/W. It has been shown that the “copper-ammonia” combination is quite acceptable, which will make it possible in the future to significantly reduce the thermal resistance of loop heat pipes made entirely of copper.

Keywords: cooling system, loop heat pipe, heat load, thermal resistance, chemical compatibility

For citation. Panasenکو A.S., Maydanik Yu.F., Vershinin S.V. Experimental study of a loop heat pipe with a copper capillary structure and ammonia as a working fluid. *Thermal processes in engineering*. 2025, vol. 17, no. 8, pp. 347–352. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=186014>

Введение

Одной из проблем, связанных с интенсивным развитием микроэлектронной и светодиодной компонентной базы, используемой в приборостроении, компьютерной и лазерной технике, сопровождаемым ростом плотности тепловой нагрузки, является задача охлаждения. Она становится особенно актуальной при сильно стесненных условиях компоновки, когда возникают проблемы с размещением соответствующих стоков тепла. Использование контурных тепловых труб (КТТ) в качестве высокоэффективной и гибкой тепловой связи между источником и удаленным стоком тепла во многих случаях позволяет решить эту задачу наиболее оптимальным

образом [1]. Как правило, рабочая температура охлаждаемых компонентов не должна превышать 60–70 °C, а их эксплуатация должна надежно обеспечиваться при окружающей температуре от +50 °C до –50 °C. Наиболее эффективным теплоносителем в указанном диапазоне температур является аммиак [2]. До сих пор считалось, что конструкционными материалами, химически совместимыми с ним, являются нержавеющая сталь, никель, титан и алюминий, которые используются как в обычных, так и в контурных тепловых трубах [3–9]. Медь из этого списка исключалась, хотя не удалось найти ни одной работы, которая бы экспериментальным или теоретическим путем подтверждала этот факт. Исключе-

чением здесь является книга С.В. Алексеева и др., в которой указана возможная совместимость аммиака с обычной медной тепловой трубой, но никаких экспериментальных данных или ссылок на них также не представлено [10]. Вместе с тем, комбинация «медь – аммиак» в КТТ может оказаться весьма перспективной, что связано с высокой теплопроводностью меди и теплофизическими свойствами аммиака в указанном температурном диапазоне. Это сочетание может обеспечить существенное увеличение эффективности контурных тепловых труб как за счет снижения их термического сопротивления, так и повышения рентабельности уже существующего серийного производства этих устройств. Медные порошки, которые могут быть использованы для изготовления фитилей КТТ, являются более дешевыми по сравнению с никелевыми и титановыми и, кроме того, выпускаются отечественной промышленностью в значительно более широком спектре гранулометрического состава.

Химическая совместимость конструкционных материалов и теплоносителей является весьма важной для тепловых труб любых типов. Если в процессе работы возникает химическая реакция между теплоносителем и конструкционными материалами, то ее продуктом является выделение неконденсируемых газов, например, водорода, которые блокируют зону конденсации. Результатом этого является увеличение термического сопротивления теплопередающего устройства и недопустимый прогрессирующий рост температуры охлаждаемого объекта.

Целью данной работы было экспериментальным путем подтвердить химическую совместимость фитиля, изготовленного из спеченного медного порошка, с аммиаком в качестве теплоносителя в контурной тепловой трубе, корпусные детали которой изготовлены из нержавеющей стали. Предполагалось, что в случае удачи, следующим этапом будет изготовление и испытание КТТ с аммиаком, полностью выполненной из меди.

Описание конструкции КТТ

В качестве конструкционных материалов для экспериментальной КТТ были использованы нержавеющая сталь (корпус испарителя, конденса-

тор, паропровод, конденсаторопровод) и медь (интерфейсы испарителя и конденсатора). Для изготовления фитиля выбран медный порошок марки ПМС-М4. На рисунке 1 представлена схема экспериментальной КТТ.

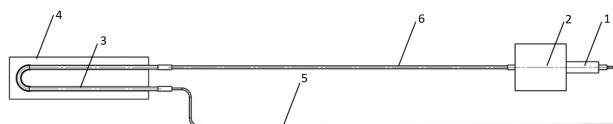


Рис. 1. Схема КТТ, где 1 – испаритель, 2 – интерфейс испарителя, 3 – конденсатор, 4 – интерфейс конденсатора, 5 – конденсаторопровод, 7 – паропровод

В таблице 1 представлены основные конструктивные параметры КТТ.

Таблица 1

Компонент	Параметр	Значение
Испаритель	Длина	90 мм
	Диаметр	12 мм
	Интерфейс	55×50×14 мм
	Площадь зоны нагрева	50×50 мм
Конденсатор	Длина	299 мм
	Диаметр	4 мм
	Интерфейс	150×50×5 мм
Паропровод	Длина	395 мм
	Диаметр	2,5 мм
Конденсаторопровод	Длина	605 мм
	Диаметр	2 мм
Фитиль	Длина полная	65 мм
	Длина активной зоны	57 мм
	Диаметр	11 мм
	Пробойный радиус пор	3,4 мкм
	Пористость	66 %

Внешний вид КТТ показан на рисунке 2.

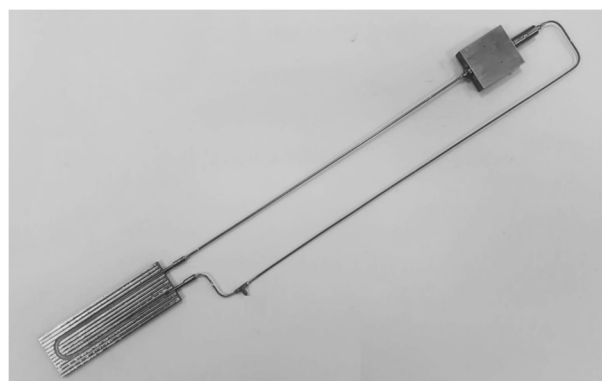


Рис. 2. Внешний вид КТТ

На рисунке 3 показана капиллярно-пористая структура фитиля, снятая с увеличением 50х8.

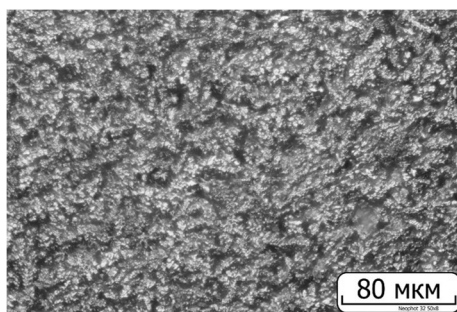


Рис. 3. Медная капиллярно-пористая структура фитиля

Методика испытаний

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рисунке 4.

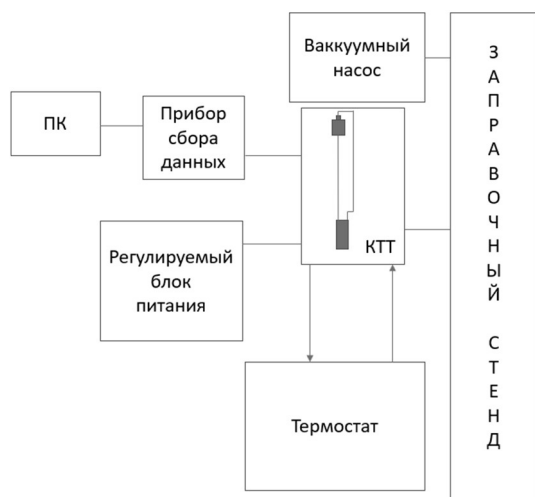


Рис. 4. Схема экспериментальной установки

В качестве источника тепловой нагрузки в эксперименте использовался нагреватель с греющей поверхностью 50 мм × 50 мм, который плотно прижимался к интерфейсу испарителя через слой термопасты MX-4.

Отвод тепла от конденсатора осуществлялся через его интерфейс, прижатый к плоскому водоохлаждаемому теплообменнику. Прокачка воды через теплообменник осуществлялась рециркуляционным термостатом Julabo FP 50–HD с расходом 6,5 л/мин. Температура воды на входе в теплообменник устанавливалась на уровне 8, 20 и 30 °С и поддерживалась с точностью ±1 °С.

Для измерения рабочей температуры КТТ использовались медь-константановые термопары с диаметром электродов 0,2 мм. Показания термопар регистрировались и записывались автоматической системой сбора и обработки ин-

формации Agilent 34970 А. Измерение температуры осуществлялось на середине греющей поверхности источника тепла, на паропроводе, конденсаторопроводе и в пяти точках на внешней поверхности интерфейса конденсатора.

Исследовались зависимости температуры источника тепла и пара на выходе из испарителя от тепловой нагрузки. Максимальная тепловая нагрузка ограничивалась температурой пара, которая не должна была превышать 60 °С, так как давление паров аммиака при такой температуре достигает значения близкого к 30 атм.

По результатам измерений рассчитывалось термическое сопротивление испарителя R_e , конденсатора R_c и полное термическое сопротивление контурной тепловой трубы R_{tot} .

Расчет производился по формулам:

$$R_e = \frac{T_e - T_{v1}}{Q}, \quad (1)$$

$$R_c = \frac{T_{v2} - T_{cool}}{Q}, \quad (2)$$

$$R_{tot} = R_e + R_c, \quad (3)$$

где T_{v1} – температура пара на выходе из испарителя, T_{v2} – температура пара на входе в конденсатор, T_{cool} – температура охлаждающей воды.

Коэффициент теплопередачи в активной зоне испарителя, рассчитывался по формуле:

$$\alpha_e = \frac{Q}{(T_e - T_v) \times F}. \quad (4)$$

Результаты испытаний

Результаты испытаний КТТ представлены в виде зависимости рабочей температуры или термического сопротивления от тепловой нагрузки при различной температуре охлаждающей воды.

На рисунке 5 представлена зависимость температуры источника тепла от нагрузки при температурах охлаждения: 8, 20, 30 °С. Эти результаты показывают, что с увеличением температуры стока тепла увеличивается и рабочая температура КТТ. Этот рост происходит пропорционально. К примеру, при тепловой нагрузке 100 Вт и температуре охлаждения равной 30 °С температура источника тепла равна 46,3 °С, а при 20 °С она снижается до 36,6 °С.

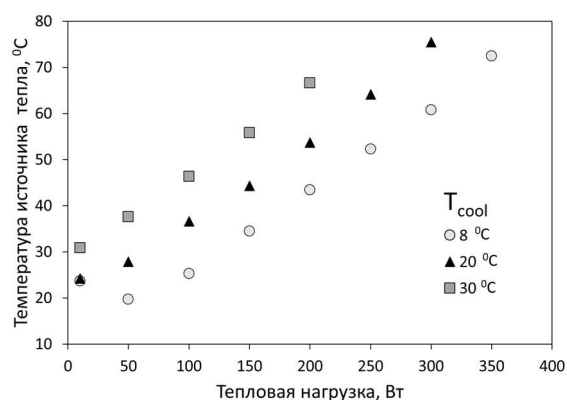


Рис. 5. Зависимость температуры источника тепла от тепловой нагрузки при различной температуре охлаждения

Термическое сопротивление испарителя при тепловых нагрузках до 100 Вт имеет различный характер в зависимости от температуры охлаждения конденсатора (рис. 6 а). Это связано с тем, что рабочая температура КТТ оказывается близкой к окружающей температуре воздуха. В особенности это заметно при температуре охлаждения 8°C . Такое поведение типично для КТТ и связано с перераспределением теплоносителя между конденсатором и испарителем. Аналогичное поведение наблюдается и для конденсатора (рис. 6 б), где представлена зависимость его термического сопротивления от тепловой нагрузки и, соответственно, на рис. 6 в, где показана аналогичная зависимость полного термического сопротивления КТТ.

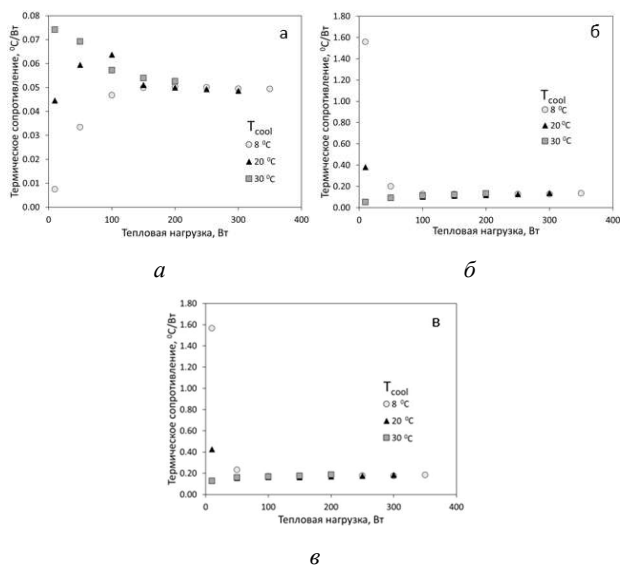


Рис. 6. Зависимость термического сопротивления: а – испарителя, б – конденсатора, в – КТТ от тепловой нагрузки при различных температурах охлаждения

Из рисунка 7, где представлена зависимость коэффициента теплопередачи в испарителе, видно, что предельное значение тепловой нагрузки не было достигнуто, поскольку кризис теплообмена не наблюдался. Об этом же свидетельствуют графики на рис. 5, это связано с конструктивными способностями КТТ, которые могли не выдержать давления в 30 атм, а значит, что температура пара не могла превышать 60°C .

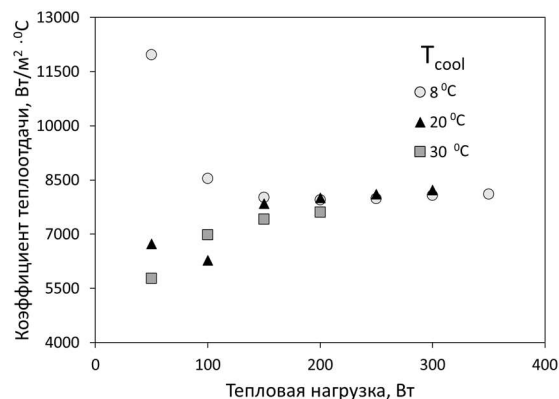


Рис. 7. Зависимость коэффициента теплопередачи в испарителе от тепловой нагрузки при различной температуре охлаждения конденсатора

Испытания КТТ проводились с перерывами, в течение трех месяцев. Общая наработка составила порядка 100 часов. На рисунке 8 показана воспроизводимость рабочих характеристик КТТ (температуры источника тепла), полученных в разное время при температуре охлаждающей жидкости 20°C . При номинальной тепловой нагрузке 200 Вт различие температуры источника тепла находятся в пределах $\pm 0,7^\circ\text{C}$, что говорит о достаточно хорошем совпадении результатов.

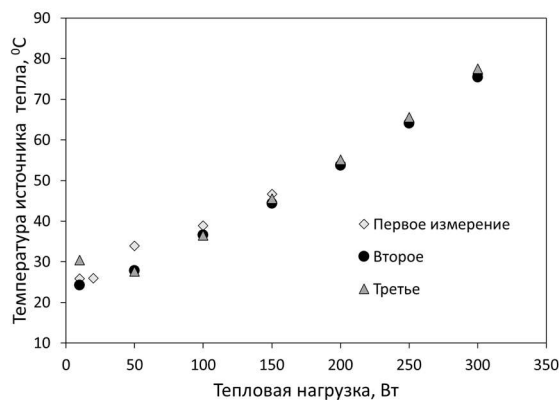


Рис. 8. Зависимость температуры источника тепла от тепловой нагрузки при температуре охлаждения 20°C при измерениях, сделанных в разное время

Заключение

1. Впервые изготовлена контурная тепловая труба с аммиаком в качестве теплоносителя и фитилем, выполненным из медного порошка марки ПМС-М4.

2. Проведены испытания устройства при тепловых нагрузках от 10 до 350 Вт при температуре охлаждающей жидкости 8, 20, 30 °С.

3. Показана воспроизводимость рабочих характеристик КТТ при общей длительности испытаний 100 часов, что свидетельствует об отсутствии влияния НГ на параметры КТТ в исследуемом диапазоне температур. Исследования в данном направлении будут продолжены и результаты опубликованы в следующей работе.

Список источников

1. Майданик Ю.Ф., Чернышева М.А. Контурные тепловые трубы: разработка, исследование, применение // Инженерно-физический журнал. 2024. Т. 97. № 7.
2. Maydanik Y.F., Vershinin S.V., Chernysheva M.A. Investigation of thermal characteristics of a loop heat pipe in a wide range of external conditions // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. Vol. 147. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118967
3. Дан П.Д., Рей Д.А. Тепловые трубы. М.: Энергия, 1979.
4. Ивановский М.Н., Сорокин В.П., Чулков Б.А. и др. Технологические основы тепловых труб. М.: Атомиздат, 1980.
5. Чи С. Тепловые трубы. Теория и практика. М.: Машиностроение, 1981.
6. Faghri A. *Heat pipes science and technology*. Taylor&Francis, 1995.
7. Майданик Ю.Ф., Вершинин С.В., Чернышева М.А. Разработка и исследование аммиачной миниатюрной контурной тепловой трубы при различных внешних условиях. // Тепловые процессы в технике. 2016. Т. 8. № 7. С. 312–320.
8. Ramasamy N.S., Kumar. P., Wangaskar. B., et al. Miniature ammonia loop heat pipe for terrestrial applications: Experiments and modeling // *International Journal of*

Thermal Sciences. 2018. Т. 124. pp. 263–278. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2017.10.018

9. Maydanik Y.F., Chernysheva M.A., Pastukhov V.G. Investigation of thermal characteristics of high-capacity loop heat pipes after a long-term storage // *Energy*. 2014. Vol. 74. pp. 804–809. DOI: 10.1016/j.energy.2014.07.053
10. Алексеев С.В., Прокопенко И.Ф., Рыбкин Б.И. Низкотемпературные тепловые трубы для космической техники. Том 1. Проблемы обеспечения работоспособности. М.: Новости, 2006.

References

1. Maidanik YuF, Chernysheva MA. Contour Heat Pipes: Development, Research, and Application. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2024;97(7). (In Russ.).
2. Maydanik YF, Vershinin SV., Chernysheva MA. Investigation of thermal characteristics of a loop heat pipe in a wide range of external conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020;147. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118967
3. Dan PD, Rei DA. *Heat pipes*. Moscow: Energiya; 1979. (In Russ.).
4. Ivanovskii MN, Sorokin VP, Chulkov BA et al. *Technological basics of heat pipes*. Moscow: Atomizdat; 1980. (In Russ.).
5. Chi S. *Heat pipes. Theory and practice*. Moscow: Mashinostroenie; 1981. (In Russ.).
6. Faghri A. *Heat pipes science and technology*: Taylor&Francis; 1995.
7. Maidanik YuF, Vershinin SV, Chernysheva MA. Development and research of an ammonia miniature loop heat pipe under various external conditions. *Thermal processes in engineering*. 2016;8(7):312–320. (In Russ.).
8. Ramasamy NS, Kumar P, Wangaskar B et al. Miniature ammonia loop heat pipe for terrestrial applications: Experiments and modeling. *International Journal of Thermal Sciences*. 2018;124:263–278. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2017.10.018
9. Maydanik YF, Chernysheva MA, Pastukhov VG. Investigation of thermal characteristics of high-capacity loop heat pipes after a long-term storage. *Energy*. 2014;74: 804–809. DOI: 10.1016/j.energy.2014.07.053
10. Alekseev SV, Prokopenko IF, Rybkin BI. *Low-temperature heat pipes for space technology. Vol. 1. Performance issues*. Moscow: Novosti; 2006. (In Russ.).