

Шаповал А. А.,
Стрельцова Ю. В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ ДЛЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

Исследовано влияние различных типов металлических капиллярно-пористых материалов на теплофизические свойства тепловых труб, являющихся эффективными двухфазными теплопередающими устройствами многоцелевого назначения. Установлено, что в зависимости от структурных, теплофизических и прочих характеристик и параметров металлических пористых материалов эксплуатационные свойства тепловых труб могут быть существенно улучшены (по сравнению с аналогичными существующими тепловыми трубами).

Ключевые слова: тепловые трубы, капиллярные структуры, композиционные пористые материалы, волоконные пористые материалы.

1. Введение

Проблемы энергосбережения, экономии топлива и энергоресурсов, утилизации выбрасываемой в атмосферу теплоты, использования солнечной энергии для различных промышленных и хозяйственных целей могут (во многих технических приложениях) успешно решаться путем эффективного использования герметичных двухфазных теплопередающих устройств. К числу последних относятся так называемые тепловые трубы (ТТ) и их разновидности — термосифоны. Теплообменные устройства и системы, создаваемые на основе ТТ, обладают рядом технико-экономических преимуществ, по сравнению, например, с классическими теплообменниками-рекуператорами [1–3]. В первую очередь, это — высокая надежность теплотрубных теплообменников, а также — отсутствие проблем компенсации термических расширений теплонапряженных элементов-трубок.

Эффективность и теплофизические характеристики ТТ во многом зависят от конструкции, параметров [4] и характеристик капиллярных структур (КС), которые в ТТ выполняют две важные функции:

- 1) транспортирования рабочих жидкостей-теплоносителей от зон теплоотвода ТТ к зонам теплоподвода;
- 2) обеспечения высоких параметров интенсивности двухфазного теплоотвода (значений коэффициентов теплоотдачи) в обеих зонах [5, 6].

Некоторые результаты создания эффективных КС и исследований характеристик ТТ низкотемпературного диапазона ($-50...+200$ °С) представлены ниже.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Несмотря на то, что ТТ (в их классическом виде) стали известными с 1966 г., целенаправленные исследования характеристик металлических КС с целью непосредственного их применения в тепловых трубах вначале в Украине практически не проводились. Большинство опытных образцов ТТ были созданы с ис-

пользованием КС, изготовленных на основе металлических сетчатых материалов, серийно производимых промышленностью. Однако сетчатые КС, не обладающие таким физическим свойством как распределение пор по размерам и обладающими, в то же время, высокими значениями контактных термических сопротивлений (существующих в местах контакта слоев сеток КС и в местах контакта сетчатых КС со сплошными металлическими поверхностями труб) не обеспечивали, соответственно, высоких теплофизических показателей ТТ. Позднее появились ТТ, созданные на основе КС из металлических порошков [7, 8] и обладающие определенными распределениями пор по размерам. Такие ТТ до настоящего времени серийно производит металлургическое предприятие Беларуси (г. Молодечно). Использование металловолоконных капиллярно-пористых материалов (МВКПМ), созданных в Институте проблем материаловедения НАН Украины (ИПМ), позволило разработать украинские тепловые трубы, обладающие высокими гидродинамическими и теплофизическими характеристиками [9], не уступающие лучшим мировым образцам ТТ (а иногда — и превосходящие их).

Основными преимуществами ТТ с МВКПМ, по сравнению с аналогичными типами КС, являются:

- 1) отсутствие в МВКПМ закрытых и полузакрытых (тупиковых) пор; существование таких пор ухудшает процессы транспортирования рабочих жидкостей-теплоносителей внутри ТТ;
- 2) большой диапазон пористости МВКПМ ($\Theta_{\text{КС}} = 25-95$ %) позволяет создавать тепловые трубы различных типов (в зависимости от технических требований и условий);

- 3) использование МВКПМ в качестве КС позволяет создавать ТТ с переменными значениями пористости $\Theta_{\text{КС}}$ как по длине ТТ, так и по толщине КС.

Отмеченные особенности МВКПМ являются практически неосуществимыми для других известных в технике ТТ пористых материалов (например — порошковых КС).

Необходимо отметить, что и порошковые металлические материалы обладают некоторыми положительными

свойствами (применительно к практике конструирования ТТ); в частности, способность ПМ препятствовать относительно быстрому прохождению жидкостей через поры КС оказывает положительный эффект в тех случаях эксплуатации ТТ (встречающихся в транспортной аппаратуре), когда зоны нагрева тепловых труб могут (или должны) располагаться под определенным углом выше зон их охлаждения (теплоотвода). Угол наклона тепловой трубы существенно влияет на ее транспортные характеристики [10, 11]. Решение отмеченной технической проблемы осуществлено в ИПМ НАН Украины путем создания ТТ с так называемыми «композиционными» пористыми материалами, представляющими собой гибридные капиллярные структуры, в которых определенным образом сочетаются как волоконные, так и порошковые металлические материалы [12].

3. Объект, цель и задачи исследования

Объектом исследования являлись тепловые трубы низкотемпературного диапазона, капиллярными структурами которых являлись как металлические волоконные материалы, так и металлические композиционные материалы, синтезированные определенным образом из металлических дискретных волокон и порошковых фракций.

Задачи настоящей работы:

- 1) создание опытных образцов тепловых труб с композиционными КС;
- 2) экспериментальные исследования теплофизических характеристик и теплопередающих способностей таких ТТ;
- 3) анализ полученных экспериментальных данных и, соответственно, сравнение результатов исследований с аналогичными результатами, полученными для ТТ с волоконными КС.

Основной целью экспериментальных исследований являлось сопоставление теплофизических характеристик тепловых труб, созданных на основе композиционных капиллярных структур с аналогичными характеристиками ТТ, созданной с использованием волоконных КС.

4. Экспериментальная установка. Опытные образцы тепловых труб. Методика исследований

Для проведения экспериментальных исследований использована установка (стенд) ИПМ, предназначенная для испытаний тепловых труб. Схема установки представлена на рис. 1, общий вид установки — рис. 2. В состав экспериментального стенда входили следующие системы, узлы, приборы и элементы: система подвода, регулирования и измерения мощности теплового потока; система высокоточного измерения температуры поверхности ТТ в контрольных точках (с использованием термомар и вторичных измерительных приборов); система стабилизации и измерений параметров подвода теплоты к ТТ; некоторые вспомогательные системы.

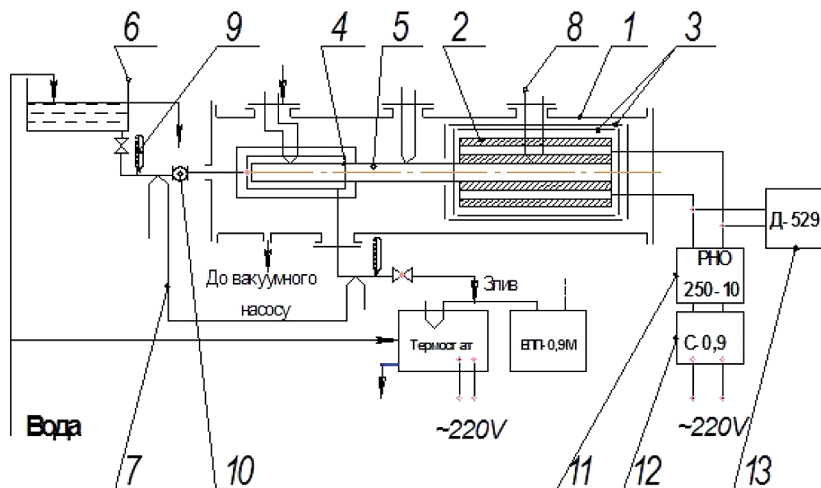


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (стенда) для испытаний тепловых труб и исследований их теплофизических характеристик: 1 — теплозащитная оболочка; 2 — электронагреватель; 3 — защитные экраны; 4 — кожух водяной системы охлаждения; 5 — исследуемая тепловая труба; 6 — резервуар с устойчивым уровнем воды; 7, 8 — термомары; 9 — ртутный термометр; 10 — расходомер; 11 — регулятор напряжения; 12 — стабилизатор напряжения; 13 — ваттметр

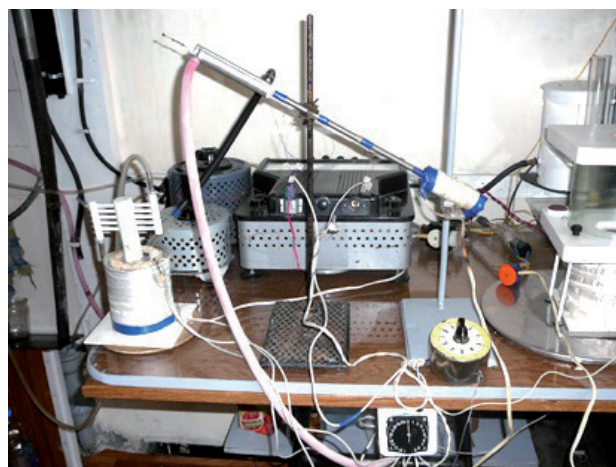


Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки ИПМ для исследований тепловых труб

В процессе разработки композиционных капиллярных структур созданы и исследованы следующие типы слоистых КС:

- 1) волоконные КС, состоящие из слоя волокон с диаметром 50 микрон (мкм), с толщиной слоя 0,75 мм; также — из слоя волокон с диаметром 30 мкм, с толщиной 0,25 мм;
- 2) волоконно-порошковые КС — в виде каркасов из волокон с диаметром 50 мкм и толщиной 1 мм, заполненных на глубину 0,25 мм порошком с размером частиц 60 мкм;
- 3) волоконно-порошковые КС, представляющие собой волоконные каркасы из волокон с диаметром 30 мкм и толщиной 1 мм, заполненные на глубину 0,25 мм порошком со средним размером частиц (фракций) ~ 40 мкм.

Деформационные изменения в исследованных образцах КС соответствуют известным в литературе данным о механизмах уплотнения волокон и порошков [12]. Образцы волокон, поддающиеся при уплотнении не только контактной, но и пластической деформации изгиба, существенно превышают по деформационным

способностям порошковые образцы (отличающиеся контактным характером уплотнения).

В порошково-волоконных образцах сосуществуют оба вышеуказанных механизма уплотнения. В зависимости от размеров исходных волокон, порошков и соотношения толщин волоконных и порошковых слоев деформационные кривые могут смещаться как в направлении волоконных, так и в сторону порошковых материалов. Характеристики образцов КС в опытных (исследуемых) тепловых трубах представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики опытных образцов тепловых труб с металлическими волоконными и композиционными капиллярными структурами

№ ТТ	Вес ТТ, г	Размеры корпуса ТТ		Характеристики капиллярных структур ТТ				
		Диаметр, мм	Длина со штенгелем, мм	Масса, г	Толщина, мм	Длина, мм	Пористость, %	Состав пористых металлических материалов КС
1	73,0	10	305,6	21,0	1	294	71	волокно Ø 50 мкм; порошок 60 мкм
2	69,0	10	305,6	18,7	1	294	74	
3	68,0	10	305,7	15,0	1	294	79	волокно Ø 30 мкм; порошок 40 мкм
4	66,5	10	305,7	16,2	1	294	78	
5	58,5	10	305,6	7,6	0,8	294	85	волокно Ø 50 мкм; порошок 60 мкм
6	60,2	10	305,6	7,5	0,8	294	85	
7	62,0	10	305,7	9,5	0,8	294	83	волокно Ø 30 мкм; порошок 40 мкм
8	58,4	10	305,6	8,3	0,8	294	85	
9	56,5	10	305,8	6,3	0,8	294	89	волокно Ø 50 мкм
10	56,8	10	305,6	6,5	0,8	294	88	

Методика исследований характеристик тепловых труб состояла в следующем:

1) подготовка испытываемой ТТ к исследованиям, с предварительным креплением к внешней поверхности трубы ряда термпар (в 5–7 контрольных точках);

2) установка в зонах теплоподвода и теплоотвода устройств электроподогрева и водяного охлаждения, соответственно;

3) установка ТТ в рабочие положения: I – нагрев «снизу»; II – ТТ расположена горизонтально; III – нагрев «сверху».

В процессе подвода к ТТ теплоты величину теплового потока Q (Вт) варьировали в диапазоне (0–70) Вт, используя лабораторный автотрансформатор и стабилизатор электрического напряжения.

5. Результаты исследований характеристик тепловых труб

Результаты исследований теплофизических характеристик образцов тепловых труб с волоконными и композиционными КС при их произвольной ориентации в поле массовых сил представлены в виде графических зависимостей изменения температуры поверхности от длины транспортной зоны ТТ при изменении величины подводимой к ТТ мощности Q (Вт), рис. 3–5.

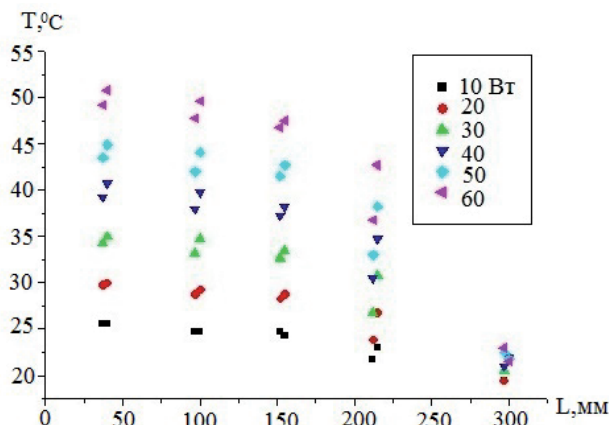


Рис. 3. Зависимость температуры поверхности T тепловых труб с волоконными капиллярными структурами (ТТ 9,10) от длины транспортной зоны L при изменении подводимой мощности, расположение труб вертикальное (нагрев «снизу»)

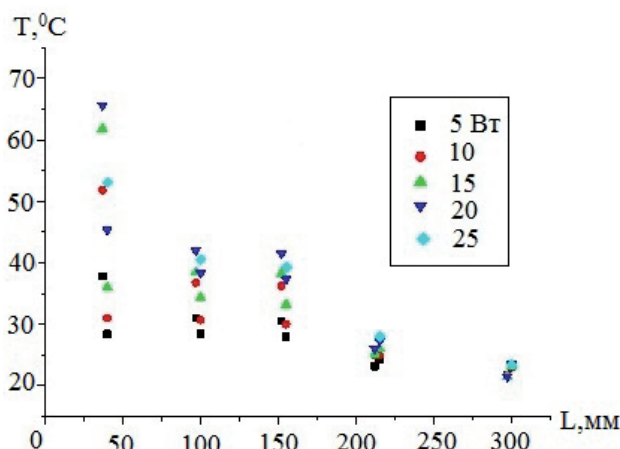


Рис. 4. Зависимость температуры поверхности T тепловых труб с композиционными капиллярными структурами (ТТ 3,4) от длины транспортной зоны L при изменении подводимой мощности, расположение ТТ вертикальное (нагрев «сверху»)

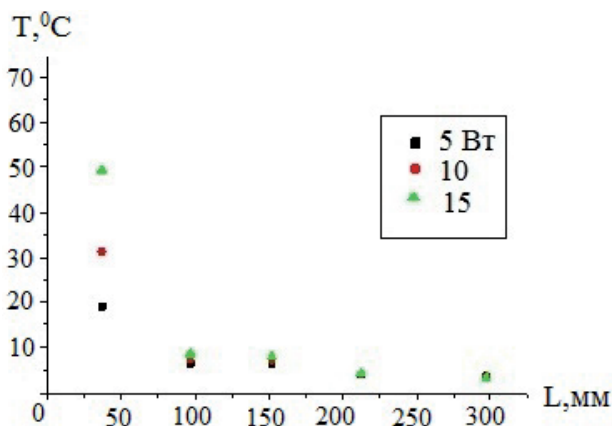


Рис. 5. Зависимость температуры поверхности T тепловых труб с волоконными капиллярными структурами (ТТ 9,10) от длины транспортной зоны L при изменении подводимой мощности, расположение ТТ вертикальное (нагрев «сверху»)

Также представлены результаты исследований влияния характеристик волоконных и композиционных КС на значения термических сопротивлений теплопроводности $R_{ТТ}$ [К/Вт], определяемых путем измерения температуры в контрольных точках на поверхности транспортной

зоны каждой исследованной тепловой трубы (рис. 6). Величины термических сопротивлений ТТ определены в виде зависимости $R_{\text{тТ}}$ от подводимой мощности, при изменении углов наклона ТТ.

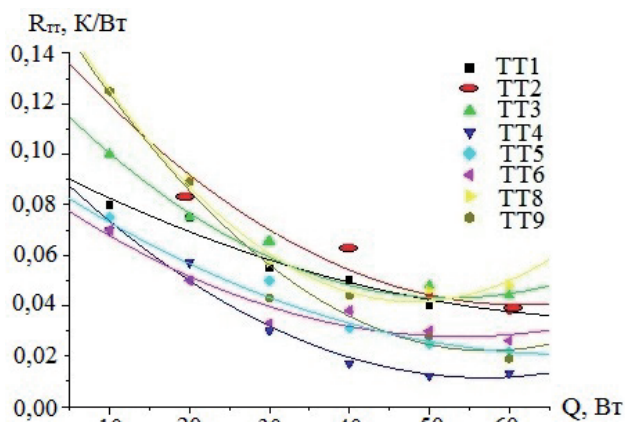


Рис. 6. Изменение термических сопротивлений $R_{\text{тТ}}$ опытных тепловых труб с волоконными и композиционными капиллярными структурами от величины подводимой мощности Q при вертикальном расположении ТТ (нагрев «снизу»)

6. Обсуждение результатов исследований тепловых труб с волоконными и композиционными капиллярными структурами

Анализ экспериментальных данных, полученных при исследованиях созданных тепловых труб с новыми типами «композиционных» капиллярных структур, и сравнение основных характеристик ТТ с такими структурами — максимальной передаваемой трубами мощности (Q [Вт]), а также величины термического сопротивления теплопроводности ТТ (R [К/Вт]), свидетельствует о следующем:

1. Тепловые трубы с композиционными капиллярными структурами обеспечивают лучшие (по сравнению с волоконными КС и, соответственно, ТТ) теплофизические характеристики; особенно при работе ТТ в условиях «нагрев ТТ сверху» (рис. 4, 5). Так, ТТ с композиционными КС устойчиво функционировали при тепловой нагрузке на ТТ до 25 Вт (рис. 4). В то же время ТТ с волоконными КС прекращали устойчивое функционирование при нагрузке 15 Вт (рис. 5).

2. При горизонтальном расположении ТТ и при их вертикальном расположении (подвод теплоты — «снизу») величины термических сопротивлений теплопроводности (R [К/Вт]) труб с композиционными КС не превышают значения R , типичные для ТТ с волоконными капиллярными структурами (рис. 6). В некоторых диапазонах изменения подводимой к ТТ мощности Q значения $R_{\text{тТ}}$ для труб с композиционными КС были меньше в 1,5–2 раза, по сравнению с «волоконными» ТТ.

3. Отмеченные особенности можно объяснить влиянием на теплофизические процессы внутри ТТ следующих факторов:

1) порошковые фракции КС, обладающие определенным наличием тупиковых и полузакрытых пор, лучше удерживают рабочие жидкости-теплоносители при их капиллярной подпитке и, соответственно, при капиллярном транспорте жидкости к зонам нагрева ТТ;

2) сравнительно небольшое количество вышеупомянутых пор еще существенно не препятствует выходу из КС паровой фазы, образующейся при нагреве ТТ. В то же время для собственно «порошковых» ТТ отмеченный фактор «препятствия» является нежелательным физическим явлением.

Проведенные исследования являются логичным продолжением научно-исследовательских работ, проводимых в Институте проблем материаловедения НАН Украины и в Национальном техническом университете Украины «Киевский политехнический институт». Целью исследований являлось создание и теплофизические исследования новых типов металлических пористых материалов, предназначенных для двухфазных теплопередающих устройств — тепловых труб и термосифонов. Такие устройства весьма перспективны и необходимы для разработок и конструирования энергосберегающих устройств: теплообменников-рекуператоров и гелиоколлекторов. Продолжение аналогичных разработок и исследований необходимо не только для Украины, но также представляет определенный интерес для стран, испытывающих недостаток энергоресурсов.

7. Выводы

В результате проведенных исследований авторам удалось достичь следующих результатов:

1. Исследовать основные характеристики (термические сопротивления и максимальную теплопередающую способность) тепловых труб с новыми типами капиллярных структур, разработанными в Институте проблем материаловедения НАН Украины.

2. Показать, что тепловые трубы с композиционными капиллярными структурами, созданными на основе синтеза волоконных и порошковых материалов, позволяют создавать современные двухфазные теплопередающие устройства с высокими значениями основных теплофизических характеристик.

3. Показать, что исследованные образцы тепловых труб не только не уступают аналогичным трубам, изготовленным на основе «традиционных» капиллярных структур (металлопорошковых и металловолоконных), но и в ряде случаев их превосходят.

Разработанные и исследованные тепловые трубы перспективны не только для энергосберегающего оборудования, но также могут быть использованы во многих технических объектах, системах и оборудовании, в которых необходимо обеспечивать эффективный отвод и подвод тепловой энергии.

Литература

1. Raveendiran, P. Heat transfer coefficient and friction factor characteristics of a gravity assisted baffled shell and heat-pipe heat exchanger [Text] / P. Raveendiran, B. Sivaraman // Journal of Engineering Science and Technology. — 2015. — Vol. 10, № 6. — P. 802–810.
2. Yau, Y. H. Heat pipe heat exchanger and its potential to energy recovery in the tropics [Text] / Y. H. Yau, M. Ahmadzadehtalatapeh // Thermal Science. — 2015. — Vol. 19, № 5. — P. 1685–1697. doi:10.2298/tsci100818020y
3. Wu, Z.-C. Comparison of heat transfer efficiency between heat pipe and tube bundles heat exchanger [Text] / Z.-C. Wu, X.-P. Zhu // Thermal Science. — 2015. — Vol. 19, № 5. — P. 1397–1402. doi:10.2298/tsci1504397w

4. Sharmishtha, S. H. Influence of Different Parameters on Heat Pipe Performance [Text] / S. H. Sharmishtha, P. K. Jain // International Journal of Engineering Research and Applications. — 2015. — Vol. 5, № 10. — P. 93–98.
5. Jafarkazemi, F. Energy and exergy efficiency of heat pipe evacuated tube solar collectors [Text] / F. Jafarkazemi, E. Ahmadifard, H. Abdi // Thermal Science. — 2016. — Vol. 20, № 1. — P. 327–335. doi:10.2298/tsci130227150j
6. Mozumder, A. K. Characteristics of Heat Transfer for Heat Pipe and Its Correlation [Text] / A. K. Mozumder, M. S. H. Chowdhury, A. F. Akon // ISRN Mechanical Engineering. — 2011. — Vol. 2011. — P. 1–7. doi:10.5402/2011/825073
7. Ageenko, A. V. Theoretical calculation method for powder capillary structure of loop heat pipe with inverted meniscus [Text] / A. V. Ageenko, V. V. Maziuk // Nauka i Tehnika. — 2014. — № 4. — P. 20–25.
8. Hansen, G. Sintered Nickel Powder Wicks for Flat Vertical Heat Pipes [Text] / G. Hansen, E. Næss, K. Kristjansson // Energies. — 2015. — Vol. 8, № 4. — P. 2337–2357. doi:10.3390/en8042337
9. Косторнов, А. Г. Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов [Текст] / А. Г. Косторнов. — К.: Наукова думка, 2003. — 550 с.
10. Thamir, K. J. An experimental study for heat transfer enhancement by laminar forced convection from horizontal and inclined tube heated with constant heat flux, using two types of porous media [Text] / K. J. Thamir // Tikrit Journal of Engineering Science. — 2013. — Vol. 15, № 2. — P. 15–36.
11. Hudakorn, T. Effect of Inclination Angle on Performance Limit of a Closed-End Oscillating Heat Pipe [Text] / T. Hudakorn, P. Terdtoon, P. Sakulchang // American Journal of Engineering and Applied Sciences. — 2008. — Vol. 1, № 3. — P. 174–180. doi:10.3844/ajeassp.2008.174.180
12. Тепловая труба [Электронный ресурс]: Патент України № 96350 / Косторнов А. Г., Мороз А. Л., Шаповал А. А., Шаповал І. В. — № а201001632, заявл. 16.02.2010; опубл. 25.10.2011, Бюл. № 20. — Режим доступу: \www/URL: <http://uapatents.com/3-96350-teplova-truba.html>

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ТЕПЛОВИХ ТРУБ ДЛЯ ЕНЕРГООЩАДНОГО ОБЛАДНАННЯ

Досліджено вплив різних типів металевих капілярно-пористих матеріалів на теплофізичні властивості теплових труб, які є ефективними двофазними теплопередавальними пристроями багатопільового призначення. Встановлено, що у залежності від структурних, теплофізичних та інших характеристик і параметрів металевих пористих матеріалів експлуатаційні властивості теплових труб можуть бути істотно покращені (у порівнянні з аналогічними існуючими тепловими трубами).

Ключові слова: теплові труби, капілярні структури, композиційні пористі матеріали, волокнові пористі матеріали.

Шаповал Андрій Андреевич, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, кафедра химического машиностроения, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.

Стрельцова Юлия Валерьевна, аспирант, кафедра химического машиностроения, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина, e-mail: sylima2009@ukr.net.

Шаповал Андрій Андрійович, кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник, кафедра хімічного машинобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.

Стрельцова Юлія Валеріївна, аспірант, кафедра хімічного машинобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.

Shapoval Andrew, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine.

Streltsova Julia, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: sylima2009@ukr.net