

УДК 536.27:536.42:621.396.6

А. Г. Косторнов, А. А. Шаповал, А. Л. Мороз, Г. А. Фролов, И. В. Шаповал

Институт проблем материаловедения им. И. М. Францевича Национальной академии наук Украины, Київ

ТЕПЛОВЫЕ ТРУБЫ С КАПИЛЛЯРНЫМИ СТРУКТУРАМИ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ГРАДИЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКОГО И АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Представлено результати розробки теплових труб, які є елементами теплообмінних систем космічного та авіаційного призначення. Запропоновано і застосовано нові типи капілярних структур — основних елементів теплових труб. Досліджено теплофізичні характеристики розроблених труб з композиційними капілярними структурами: останні мають ряд технічних переваг у порівнянні з традиційними конструкціями, зокрема, при роботі теплових труб проти напрямку дії гравітаційних сил

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы развития теории и практики создания тепловых труб (ТТ), являющихся эффективными теплопередающими устройствами современных систем охлаждения и термостабилизации космических и авиационных приборов и аппаратов, остаются актуальными. Пристальный интерес к тепловым трубам [2–4, 12] возник в начале 70-х годов XX века и был вызван необходимостью преодолеть технические сложности эвакуации избыточной теплоты в условиях работы космических аппаратов. Теплофизические возможности относительно простых и надёжных систем воздушного охлаждения оказались исчерпанными; системы жидкостного охлаждения на борту летательных аппаратов часто не удовлетворяли требованиям высокой надёжности. Тепловые трубы оказались способными не только обеспечивать эффективный отвод тепла из труднодоступных теплонапряжённых зон оборудования, но и заполнили, в определённой степени, известную разницу между коэффициентами теплоотдачи α , типичную при переходе от воздушного охлаждения к жидкостному.

В развитии теории физических процессов двухфазного теплообмена в тепловых трубах

космического назначения есть некоторые особенности, обусловленные, в частности, условиями микрогравитации. До настоящего времени влияние микрогравитации на механизмы кипения и конденсации не только для условий работы ТТ, но и для прочих условий исследовано недостаточно. Имеющиеся немногочисленные данные свидетельствуют о том, что интенсивность теплообмена при кипении в условиях микрогравитации, например жидкого азота, существенно (до 40 %) уменьшается по сравнению с наземными условиями [1]. Возникает необходимость исследований влияния микрогравитации на теплофизические параметры ТТ при их функционировании в космических условиях.

Для успешного применения отечественных тепловых труб в космических аппаратах необходимы совершенные капиллярные структуры (КС), в значительной степени определяющие эффективность ТТ. Работы по созданию таких КС ведутся в Институте проблем материаловедения (ИПМ) им. И. Н. Францевича НАН Украины с 1972 г. [5, 6].

АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ ИЗВЕСТНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основным назначением тепловых труб является передача (отвод) тепловых потоков $Q_{\text{ТТ}}$ при малых значениях термических сопротивлений

© А. Г. КОСТОРНОВ, А. А. ШАПОВАЛ, А. Л. МОРОЗ,
Г. А. ФРОЛОВ, И. В. ШАПОВАЛ, 2009

труб $R_{ТТ}$. Известно, что для эффективного функционирования ТТ важнейшее значение имеет конструкция капиллярной структуры. Капиллярная структура ТТ должна выполнять две основных функции: 1) гидродинамическую (транспорт рабочей жидкости-теплоносителя при различной ориентации ТТ в гравитационном поле); 2) теплофизическую (высокая интенсивность теплообмена в зонах нагрева и охлаждения ТТ). Как и во многих теплофизических приложениях, одновременное влияние гидродинамических и теплофизических факторов на суммарный процесс обычно носит противоположный характер, т. е. улучшение гидродинамики процессов приводит к ухудшению их теплофизики.

Известно, что в первых конструкциях ТТ в качестве капиллярной структуры использовались слои металлических сеток [2, 4, 8, 10, 13]. Обоснованием такого применения была доступность сетчатых материалов, так как они серийно производятся промышленностью. Однако сетчатые материалы, как показал опыт их использования в тепловых трубах, имеют неудовлетворительные теплофизические и эксплуатационные характеристики. В частности, характерное для сетчатых материалов распределение пор по размерам приводит к срыву устойчивости процессов двухфазного теплообмена (кипения) в зонах нагрева ТТ, а также накладывает существенные ограничения на величины отводимых ТТ тепловых потоков. Кроме того, сетчатые материалы при изготовлении ТТ обычно укладываются в несколько слоёв, что приводит к образованию локальных и относительно больших термических сопротивлений R теплоотдачи, в том числе контактных термических сопротивлений.

Лучшие результаты, по сравнению с сетчатыми КС, обеспечивают металлические порошковые капиллярные структуры (МПКС) [9, 11]. В отличие от сетчатых ТТ, МПКС обладают распределением пор по размерам, обеспечивающим устойчивое кипение в зоне нагрева. Также порошковые КС обеспечивают относительно большие значения высоты капиллярного поднятия в ТТ рабочих жидкостей-теплоносителей. Однако и МПКС имеют некоторые недостатки.

К таковым, в частности, относятся: 1) наличие относительно большого количества закрытых (тупиковых) пор; 2) ухудшение проницаемости КС из-за повышенного гидравлического сопротивления, обусловленного особенностями строения металлических порошковых структур; 3) наличие так называемого «теплового гистерезиса», возникающего при периодическом увеличении и уменьшении значений подводимых к ТТ тепловых потоков [11]. Тепловой гистерезис ухудшает работу ТТ.

Металлические волокновые капиллярные структуры (МВКС), разработанные и исследованные в ИПМ НАН Украины, практически лишены отмеченных выше недостатков. Благодаря особенностям строения в МВКС нет тупиковых пор, что исключает нежелательный тепловой гистерезис. Металлические волокновые капиллярные структуры обеспечивают высокие гидродинамические характеристики (хорошую проницаемость, относительно большую высоту капиллярного поднятия рабочей жидкости), высокие теплофизические характеристики (возможность функционирования ТТ в режимах устойчивого кипения рабочих жидкостей в зонах нагрева, высокую интенсивность теплообмена за счёт кипения, высокие предельные значения (по теплоотводу) критических тепловых потоков). МВКС обладают хорошими физико-механическими и эксплуатационными характеристиками. Технология изготовления МВКС обеспечивает стабильные и воспроизводимые параметры, большой ресурс работы, высокую надёжность функционирования, возможность пластической деформации при конструктивной необходимости. Последнее отличие ТТ с МВКС является важным фактором для практического использования ТТ в реальных системах и конструктивах современной аппаратуры.

Основные характеристики разработанных в ИПМ НАН Украины ТТ и МВКС следующие:

- материалы МВКС — медь, коррозионно-стойкие стали, углеродистая сталь, нихром;
- материалы корпусов ТТ — медь, коррозионно-стойкая сталь;
- пористость МВКС — 10...97 %;
- толщина МВКС — 0.2...10 мм;

- длина МВКС — до 4 м;
- диаметр исходных металлических волокон — 20...80 мкм;
- длина волокон — 2...10 мм;
- средний (эффективный) диаметр пор — 10...250 мкм;
- максимальный диаметр пор — 20...500 мкм.

Основными направлениями исследований ИПМ НАН Украины в области разработок тепловых труб и капиллярно-пористых структур для ТТ являются:

- исследования параметров порового пространства новых типов капиллярных структур, получаемых на основе волоконных и композиционных материалов;
- исследования гидродинамических характеристик слоистых и каркасных градиентных капиллярных структур;
- исследования теплофизических характеристик капиллярных структур различных типов, получаемых из волокон и композиций на их основе;
- исследования теплофизических процессов на границе между металлическими поверхностями и нанесёнными на них капиллярными структурами новых типов.

К таким исследованиям относятся: изучение процессов кипения на поверхностях с пористыми покрытиями в зависимости от их структурно-гидродинамических характеристик; исследование влияния этих характеристик на контактное термическое сопротивление границ раздела между пористым и сплошным слоями; исследование теплообмена при конденсации жидкостей на пористых поверхностях.

В настоящее время в ИПМ НАН Украины осуществляются работы по исследованию влияния микрогравитации на параметры и характеристики тепловых труб, предназначенных для использования в системах космической техники. Проведенные комплексные исследования и разработки позволили создать композиционные волоконно-порошковые капиллярные структуры, в которых эффективно сочетаются положительные качества и свойства капиллярных структур, выполненных из монопорошковых и моноволоконных материалов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИОННЫХ КАПИЛЛЯРНЫХ СТРУКТУР И ТЕПЛОВЫХ ТРУБ НА ИХ ОСНОВЕ

В традиционных пористых материалах (сетчатых, порошковых, волоконных) имеет место жёсткая корреляция зависимости практически всех свойств от пористости Θ . Сочетание в одном материале структурных элементов с разными геометрическими размерами, и следовательно, разной плотностью упаковки, позволяет устранить такую зависимость. Нами использованы новые композиционные слоистые материалы, содержащие как линейные (волокна) так и точечные (порошок) структурные элементы. В таких материалах реализуются различные механизмы уплотнения: контактный характер уплотнения порошков при облегчённом перемещении частиц путём взаимного скольжения и гибко-жёсткий характер уплотнения волокон, когда имеет место не только контактная, но и обратимая упругая и необратимая пластическая деформация. В зависимости от соотношения размеров порошковых и волоконных частиц, толщин волоконных и порошковых слоёв, диапазон изменения структурных характеристик таких материалов существенно расширяется.

Исследован процесс гравитационного формирования высокопористых композиционных материалов из металлических порошков и волокон. Листовые образцы материалов получали послойным осаждением при наложении вибрации волокон коррозионностойкой стали диаметром 30...100 мкм и порошка той же стали с размером частиц 0.04...0.3 мм.

Исследования свойств композиционных пористых материалов показали, что в зависимости от соотношения размеров порошковых ($d_{\text{п}}$) и волоконных ($d_{\text{в}}$) частиц, а также толщин волоконных и порошковых слоёв, формируются различные типы макроструктуры материалов. Структуры из отдельных волоконных и порошковых слоёв формируются при соотношении $d_{\text{п}}/d_{\text{в}} > 2$ (рис. 1). При значениях $d_{\text{п}}/d_{\text{в}} < 2$ порошок частично или полностью осаждается в предварительно сформованный высокопористый волоконный каркас (рис. 2, 3).

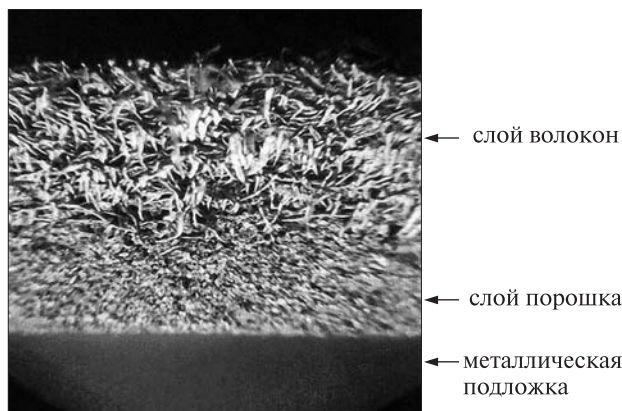


Рис. 1. Пористая слоистая волокнуно-порошковая композиция



Рис. 2. Строение волокнуной капиллярной структуры

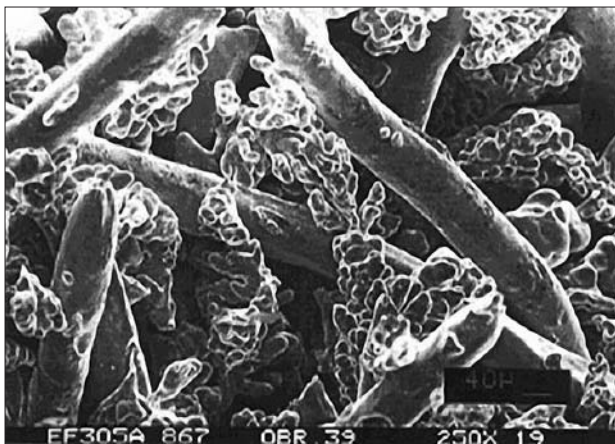


Рис. 3. Топограмма пористой каркасной волокнуно-порошковой композиции

Предварительно выполненные исследования показали, что наиболее перспективными для использования в ТТ являются материалы, выполненные в виде высокопроницаемого и прочного волокнуного каркаса. Он содержит один или несколько тонких волокнуно-порошковых слоёв, обеспечивающих интенсификацию как теплопереноса, так и массопереноса. В процессе разработки новых капиллярных структур были исследованы три типа слоистых КС: 1) волокнуные КС, содержащие слой из волокну диаметром 50 мкм, толщиной 0.75 мм и слой из волокну диаметром 30 мкм, толщиной 0.25 мм; 2) волокнуно-порошковые КС в виде каркасов из волокну диаметром 50 мкм и толщиной 1 мм, заполненных на глубину 0.25 мм порошком с размером частиц 60 мкм; 3) волокнуно-порошковые КС, представляющие собой волокнуные каркасы из волокну диаметром 30 мкм и толщиной 1 мм, заполненные на глубину 0.25 мм порошком с размером частиц 40 мкм.

Деформационные изменения в исследованных образцах КС удовлетворительно согласовывались с известными представлениями о механизмах уплотнения волокну и порошков [7]. Образцы из волокну, претерпевающих при уплотнении не только контактную, но и пластическую изгибную деформацию, значительно превосходили по деформационной способности порошковые образцы, отличающиеся контактным характером уплотнения.

В волокнуно-порошковых образцах имеют место оба вышеуказанных механизма уплотнения. В зависимости от размеров исходных волокну и порошков и соотношения толщин волокнуных и порошковых слоёв их деформационные кривые могут смещаться как в сторону волокнуных, так и в сторону порошковых материалов.

Характеристики опытной партии КС представлены в табл. 1.

Результаты исследований гидродинамических и структурных характеристик опытных образцов КС (рис. 4) свидетельствуют о том, что композиционные материалы несколько уступают моноволокнуным КС по проницаемости, однако при этом они обладают порами меньшего

размера (примерно в два раза). С уменьшением диаметра волокон размеры пор в моноволоконных материалах уменьшаются, но не достигают значений, которыми обладают композиционные материалы.

С учётом того фактора, что максимальный капиллярный напор в КС определяется величиной среднего гидравлического диаметра пор $D_{гр}$, перспективы применения разработанных композиционных материалов в тепловых трубах очевидны. Преимущества должны эффективно проявляться в экстремальных условиях работы ТТ, когда силы капиллярного давления и гравитации направлены противоположно друг другу. Дополнительным основанием для такого утверждения являются данные экспериментов, представленные на рис. 5: интегральная и дифференциальная кривые распределения пор в материале, образованном слоем волокон диаметром 30 мкм с максимальным и средним размером пор 100 и 45 мкм, а также слоем порошка дисперсностью 40 мкм с максимальным и средним размером пор 9 мкм и 2 мкм соответственно. Градиент размеров пор по толщине указанного материала, полученный по соотношению средних размеров пор, равен 22, а по отношению максимальных размеров пор — 10.

Ограничение теплопередающей способности из-за транспортных свойств является одним из основных в работе низкотемпературных тепловых труб. Транспортные свойства КС, определяемые проницаемостью, средним размером пор и распределением пор в материале, оценивают в конечном итоге по скорости течения и предель-

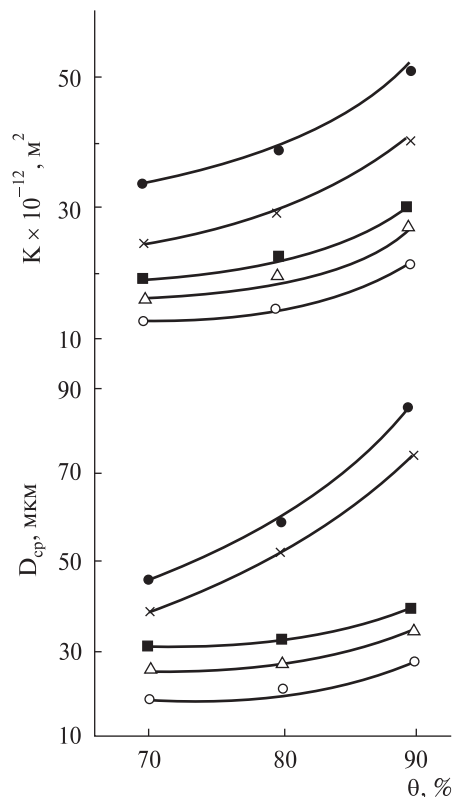


Рис. 4. Зависимость коэффициента проницаемости и среднего размера пор исследованных образцов КС от пористости $\Theta_{КС}$: ● — волокно \varnothing 50 мкм, × — волокно \varnothing 30 мкм, ■ — волокно \varnothing 50 мкм и порошок дисперсностью 30 мкм, Δ — волокно \varnothing 50 мкм и порошок дисперсностью 80 мкм, ○ — волокно \varnothing 30 мкм и порошок дисперсностью 40 мкм

ной высоте подъёма теплоносителя. На скорость и высоту подъёма влияет также краевой угол смачивания, зависящий лишь от поверх-

Таблица 1. Характеристики опытных образцов КС из металлических волокон и порошков

Номер образца	Масса, г	Толщина мм	Ширина мм	Длина мм	Средняя пористость, %	Состав материала
1	35	1.0	50	300	70.2	Слой волокон \varnothing 50 мкм, толщиной 0.75 мм и слой волокон \varnothing 30 мкм, толщиной 0.25 мм
2	24	1.0	50	300	80.4	
3	10	1.0	50	300	91.5	
4	36	1.0	50	300	69.3	Слой волокон \varnothing 50 мкм, толщиной 1.0 мм, заполненный на глубину 0.25 мм порошком 60 мкм
5	28	1.0	50	300	76.2	
6	20	1.0	50	300	82.0	
7	34	1.1	50	300	70.0	Слой волокон \varnothing 50 мкм, толщиной 1.0 мм, заполненный на глубину 0.25 мм порошком 40 мкм
8	28	1.0	50	300	76.0	
9	20	1.0	50	300	82.0	

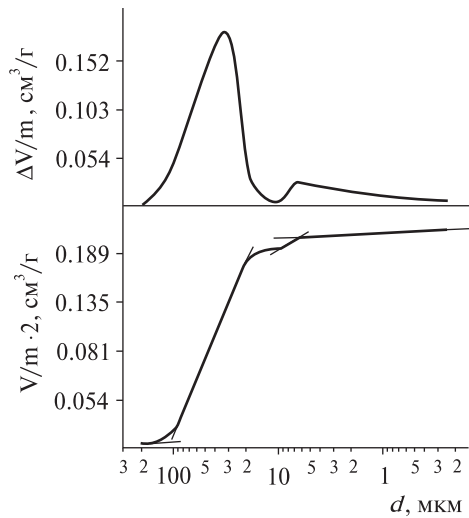


Рис. 5. Дифференциальная и интегральная кривые распределения пор в материале, образованном слоем из волокон \varnothing 30 мкм, толщиной 1.5 мм и слоем порошка дисперсностью 40 мкм, толщиной 0.5 мм

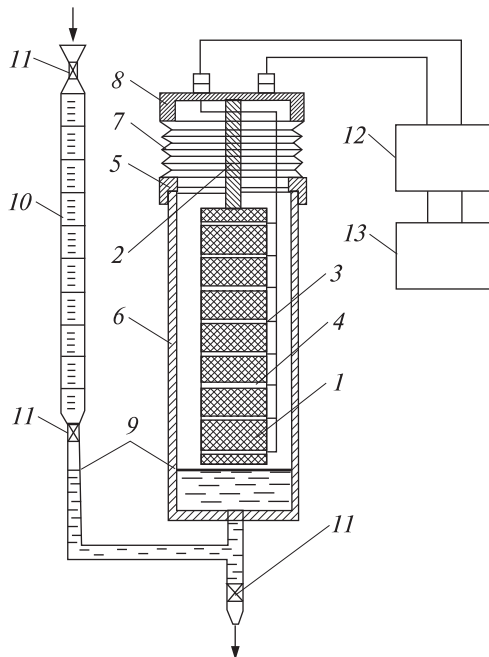


Рис. 6. Схема экспериментальной установки для исследования влияния структурных характеристик материала на высоту и скорость капиллярного поднятия жидкостей: 1 — образец КС, 2 — направляющий стержень, 3 — зажимы, 4 — датчики, 5 — прокладка, 6 — камера, 7 — сильфон, 8 — крышка, 9 — уровень жидкости, 10 — бюретка, 11 — вентиль, 12 — сигнализатор уровня, 13 — цифровой вольтметр

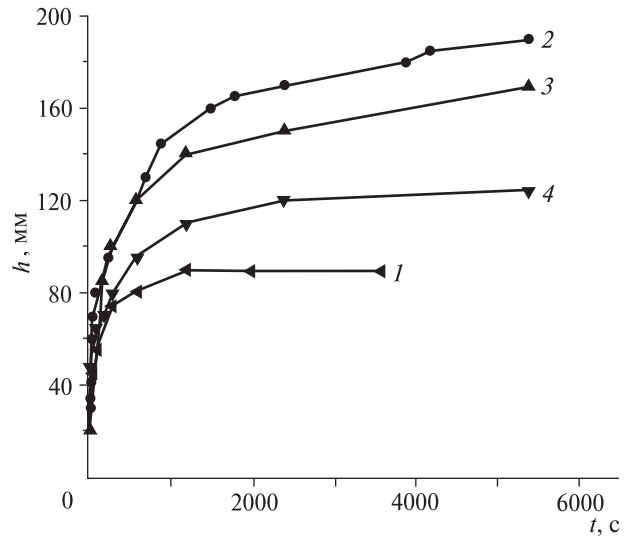


Рис. 7. Зависимости высоты капиллярного поднятия этанола в пористых материалах из волокон и порошков нержавеющей стали от времени: 1 — слой волокон \varnothing 30 мкм, пористость 82 %, 2 — композиции (волоконно \varnothing 50 мкм, порошок дисперсностью 80 мкм) с пористостью 67.5 %, 3 — композиции (волоконно \varnothing 30 мкм, порошок дисперсностью 40 мкм) с пористостью 65 %, 4 — композиции (волоконно \varnothing 50 мкм, порошок дисперсностью 80 мкм) с пористостью 85.6 %

ностных явлений на границе раздела «материал КС — теплоноситель».

Кинетику капиллярного транспорта изучали на установке, конструкция которой представлена на рис. 6. Образец исследуемой КС в виде ленты с помощью направляющего стержня устанавливали вертикально в рабочей камере. Полоски сухого гигроскопичного материала прижимали к поверхности пористого образца зажимами, последовательно подключенными к многоканальному сигнализатору уровня и цифровому вольтметру. Рабочая камера с подсветкой позволяла визуально следить за перемещением фронта жидкости-теплоносителя при давлении, создаваемом насыщенным паром жидкости. Через мерную бюретку рабочая камера установки заполнялась жидкостью до определённого уровня. Для контакта с жидкостью образец КС опускался вниз с помощью сильфона. При подъёме жидкости под действием капиллярных сил поочерёдно в каждом из датчиков происходило замыкание электрической цепи,

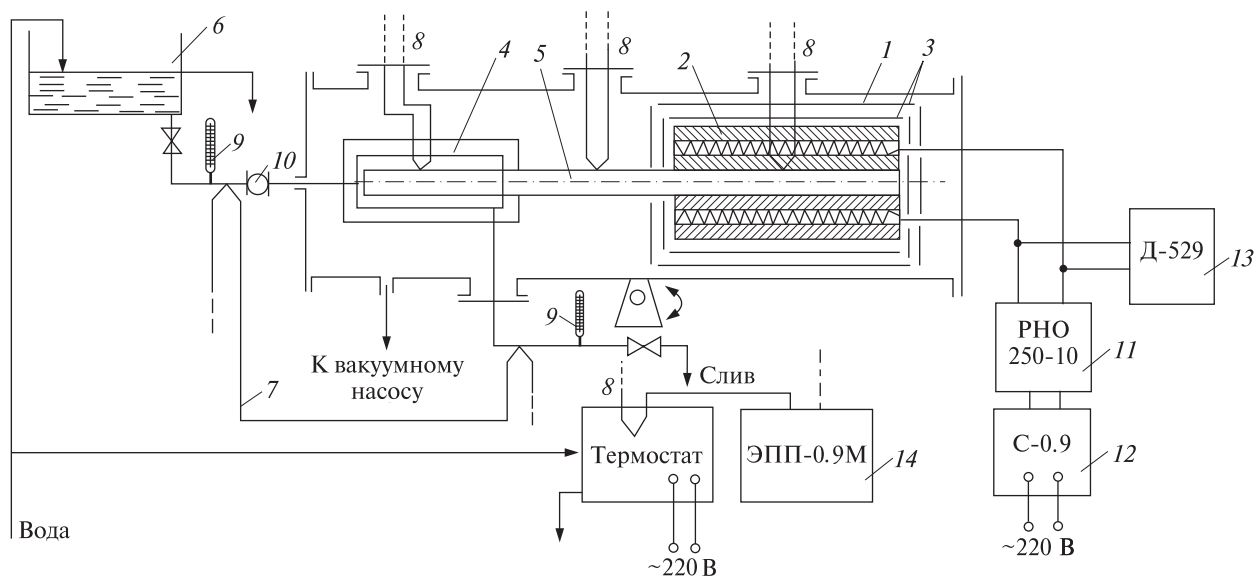


Рис. 8. Схема экспериментальной установки для испытаний тепловых труб и исследований их теплофизических характеристик: 1 — теплозащитная оболочка, 2 — электронагреватель, 3 — защитные экраны, 4 — кожух водяного охлаждения, 5 — тепловая труба, 6 — бак со стабильным уровнем воды, 7, 8 — термодары, 9 — ртутный термометр, 10 — расходомер (счётчик воды), 11 — регулятор напряжения электрического тока, 12 — стабилизатор напряжения, 13 — ваттметр

что фиксировалось посредством сигнализатора уровня и цифрового милливольтметра.

Данные исследований кинетики капиллярного впитывания разработанными композиционными материалами этанола представлены на рис. 7.

Волокново-порошковые композиции характеризуются высокой капиллярно-транспортной способностью и превосходят пористые однослойные моноволоконные материалы по высоте подъёма этанола в 1.5–2 раза при работе против сил гравитации. При этом композиции из волокон диаметром 50 мкм и порошка дисперсностью 80 мкм с лучшим сочетанием характеристик проницаемости и размеров пор обладают предельной высотой подъёма этанола. Каркасные волокново-порошковые композиции дополнительно обладают и другими положительными свойствами: они не только превосходят по высоте и скорости капиллярного подъёма жидкости (этанола) моноволоконные материалы, но и могут содержать один или несколько высокопроницаемых моноволоконных слоёв, обеспечивающих эффективный транспорт теплоносителя; один или несколько тонких волокново-порошковых слоёв с малым размером пор,

ответственных за величину капиллярного напора и интенсивность тепло- и массопереноса.

Для исследований теплофизических параметров ТТ разработаны специальные стенды (рис. 8, 9), в которых угол наклона ТТ относительно горизонта изменялся на 180°. Тепловая труба нагревалась специальным нагревателем: отвод тепла от зоны конденсации осуществлялся воздуш-

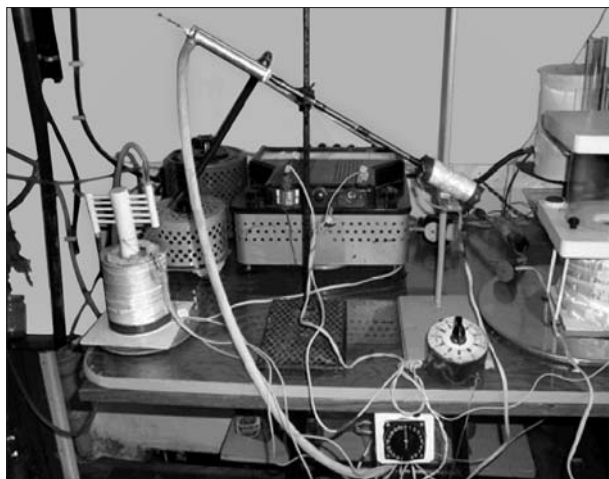


Рис. 9. Общий вид стенда для исследований тепловых труб

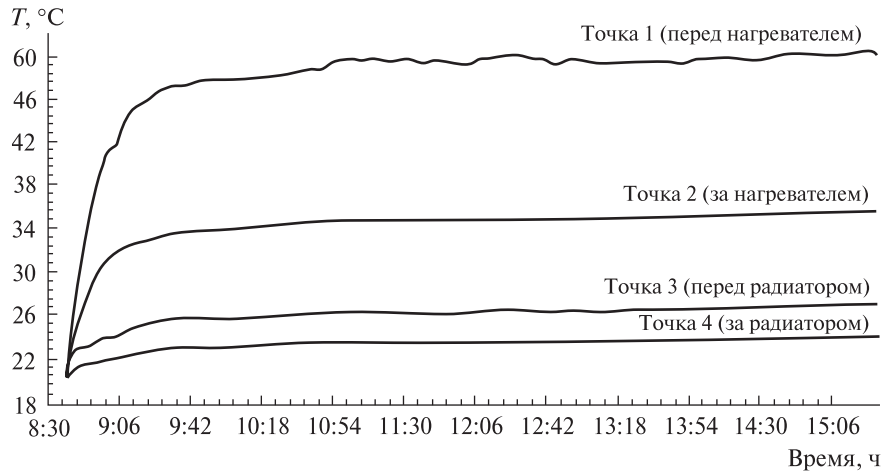


Рис. 10. Зависимость температуры корпуса опытной тепловой трубы от времени испытаний

ным или жидкостным охлаждением. Температуры по длине ТТ измеряли стандартными микро-термопарами.

В состав экспериментального стенда для исследований теплофизических характеристик тепловых труб входят: система подвода, регулирования и измерения мощности теплового потока; система высокоточного измерения температуры в контрольных точках ТТ; система обеспечения и измерения параметров теплоотвода; некоторые вспомогательные системы.

Методика исследований характеристик тепловых труб заключалась в следующем:

1) подготовка ТТ к испытаниям, установка термопар на поверхности трубы в 5–7 контрольных точках, с последующим креплением устройств теплоподвода и теплоотвода;

2) установка ТТ в рабочее положение («А» — нагрев ТТ «снизу»; «В» — ТТ расположена горизонтально; «С» — нагрев ТТ «сверху»);

3) подвод к ТТ тепла включением электронагревателя; при этом подводимый тепловой поток Q изменялся в диапазоне 0–70 Вт посредством лабораторного автотрансформатора с шагом 10 Вт. При установке ТТ в положении «С» тепловой поток изменялся в диапазоне 0–25 Вт с шагом $\Delta Q = 5$ Вт;

4) после достижения тепловой трубой стационарного теплового режима при определённом значении подводимого теплового потока, что

фиксировалось по показаниям термопар, производились измерения: подводимой мощности Q и температуры поверхности ТТ в 5–7 точках;

5) по экспериментальным данным определялись значения термических сопротивлений $R_{ТТ}$ исследуемых тепловых труб.

Для большей точности получаемых результатов количество и характеристики опытных тепловых труб были продублированы, т. е. изготовлено парное количество ТТ с максимально близкими определяющими характеристиками. Полученные экспериментальные результаты усреднялись для каждой пары ТТ; таким образом, погрешность результатов была уменьшена примерно в 1.5 раза.

Результаты проведения экспериментов представлены в виде графических зависимостей температуры в контрольной точке транспортной зоны на поверхности корпуса каждой исследованной тепловой трубы от времени испытаний τ и в виде зависимости термических сопротивлений $R_{ТТ}$ от подводимой мощности при изменении угла наклона ТТ относительно горизонта.

Типичная зависимость температуры распределения температуры поверхности ТТ от времени её функционирования представлена на рис. 10.

Зависимости термических сопротивлений $R_{ТТ}$ от подводимой мощности при изменении угла наклона ТТ относительно горизонта представлены на рис. 11, 12. Характеристики КС, ис-

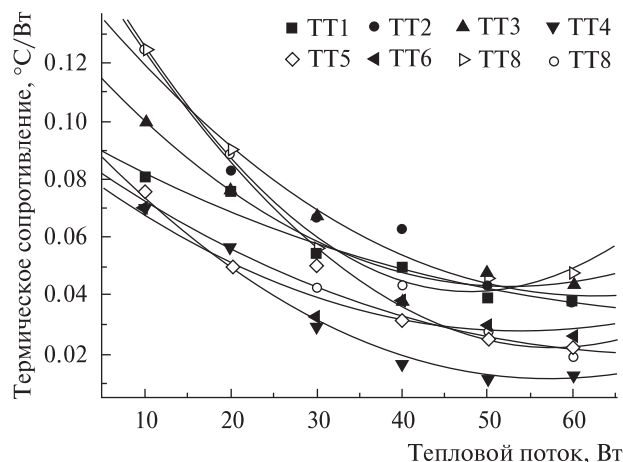


Рис. 11. Зависимость термических сопротивлений тепловых труб с композиционными капиллярными структурами от подводимого теплового потока при работе ТТ в режиме термосифона (нагрев ТТ — снизу)

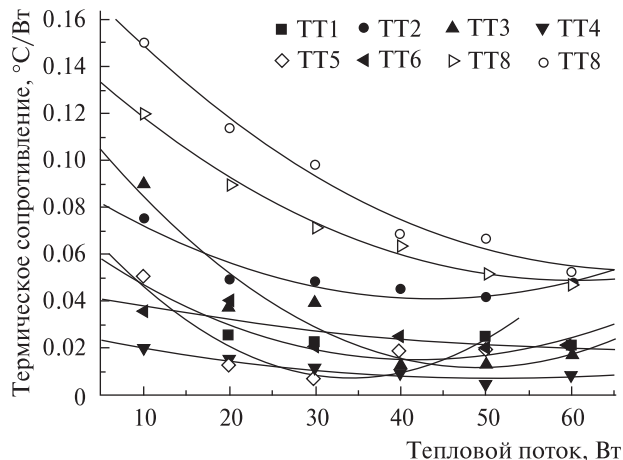


Рис. 12. Зависимость термических сопротивлений тепловых труб с композиционными капиллярными структурами от подводимого теплового потока при работе ТТ в горизонтальном положении

пользованных в опытной партии ТТ, представлены в табл. 2.

Экспериментальное определение максимальных тепловых потоков, передаваемых разработанными ТТ, не являлось целью настоящих исследований. Для оценки предельных тепловых потоков Q_{\max} нами использованы известные зависимости [2–4]. Результаты расчётов подтвердили тот факт, что высокопористые структуры обеспечивают большие максимальные тепловые потоки при положениях, близких к горизонтальному. Структуры со средней пористостью ($\Theta \cong 40\%$), по сравнению с высокопористыми КС, лучше работают в положении «нагрев ТТ — сверху». Необходимо отметить, что расчёты по известным формулам выполнены с учётом допущений о полном насыщении жидкостью капиллярной структуры ТТ. В реальных условиях функционирования ТТ с высокопористыми КС может иметь место частичное осушение КС (в случае расположения зоны нагрева ТТ выше зоны её охлаждения).

Известно, что скорость протекания жидкости через капиллярные структуры характеризуется вязкостным коэффициентом проницаемости K . Волокновые структуры отличаются от КС других типов, например порошковых, отсутствием тупиковых пор, препятствующих продольному

движению жидкости. В результате коэффициенты проницаемости для волокновых высокопористых КС ($\Theta > 70\%$) достигают значений $K = 80\text{--}100\text{ м}^2$, что значительно больше, чем для порошковых КС ($K = 5\text{--}30\text{ м}^2$). Таким образом, в горизонтальном положении волокновые КС значительно быстрее транспортируют жидкость к зоне нагрева по сравнению с порошковыми и сетчатыми КС. При работе против сил гравитации (в положении «нагрев ТТ — сверху») волокновые КС предельно высокой пористости не всегда могут обеспечить большие значения высоты капиллярного поднятия жидкости H , так как в таких структурах содержатся крупные поры. Соединение положительных свойств двух

Таблица 2. Характеристики КС, использованных в опытной партии ТТ

Номер ТТ	Состав КС	Пористость КС, %	Толщина КС, мм
ТТ 1	волокно \varnothing 50 мкм, поро-	71	1
ТТ 2	шок 80 мкм	74	1
ТТ 3	волокно \varnothing 30 мкм, поро-	79	1
ТТ 4	шок 40 мкм	78	1
ТТ 5	волокно \varnothing 50 мкм, поро-	85	0.8
ТТ 6	шок 80 мкм	85	0.8
ТТ 7	волокно \varnothing 30 мкм, поро-	83	0.8
ТТ 8	шок 40 мкм	85	0.8
ТТ 9	волокно \varnothing 80 мкм	89	0.8

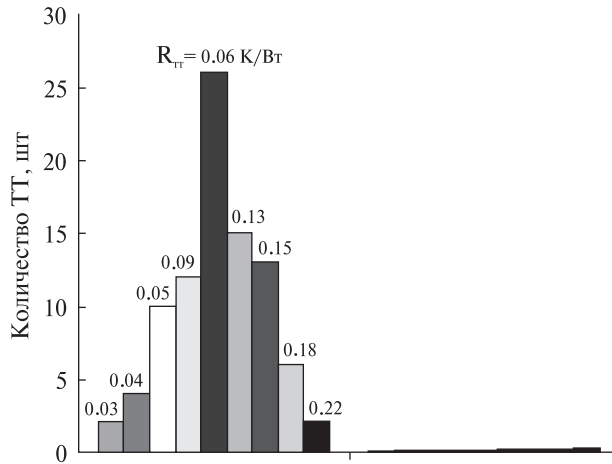


Рис. 13. Разброс значений термических сопротивлений тепловых труб для партии 90 шт. с одинаковыми характеристиками капиллярных структур

разных типов капиллярных структур в одной композиционной структуре способно обеспечить высокие характеристики созданных тепловых труб как при работе в горизонтальном положении ТТ, так и против гравитационных сил.

Результаты исследований подтвердили это утверждение. В положениях «А» (угол наклона $\varphi = -90^\circ$, нагрев ТТ «снизу») и «В» ($\varphi = 0^\circ$, горизонтальное положение ТТ) тепловые трубы с композиционными КС работали устойчиво, обеспечивая уровень температур транспортной зоны в диапазоне, аналогичном диапазону температур ТТ 9 с моноволоконной КС.

В положении «С» (угол наклона $\varphi = +90^\circ$, нагрев ТТ «сверху») ТТ 2 и ТТ 3 обеспечивали более высокие значения отводимого теплового потока ($Q_{\max} = 20$ Вт) по сравнению со значением $Q_{\max} = 10$ Вт для ТТ 9. Последний факт объясняется наличием в композиционной структуре порошковой составляющей (части КС), которая, обладая существенно меньшими по величине порами, обеспечивала лучший капиллярный подъем жидкости в зону нагрева ТТ.

Аналогичные результаты получены на остальных исследованных ТТ с композиционными КС (рис. 11, 12).

Результаты исследований разработанных ТТ с капиллярными структурами новых типов свидетельствуют о следующем.

1. В горизонтальном положении и в положении «нагрев ТТ — внизу» тепловые трубы в диапазоне передаваемых тепловых потоков $Q = 0-70$ Вт функционируют устойчиво, обеспечивая низкие значения термических сопротивлений R_{tt} и высокие теплофизические характеристики, которые не уступали характеристикам ТТ с моноволоконными структурами.

2. В положении «нагрев ТТ — сверху» тепловые трубы в диапазоне передаваемых тепловых потоков $Q = 0-20$ Вт также работают устойчиво и обеспечивают удовлетворительные значения термических сопротивлений R_{tt} .

Результаты исследований влияния характеристик разработанных ТТ с композиционными КС на величины термических сопротивлений R_{tt} показали, что с увеличением теплового потока Q термическое сопротивление разработанных ТТ несколько уменьшалось, что объясняется увеличением интенсивности теплообмена в зонах теплоподвода и охлаждения.

Относительно термических сопротивлений тепловых труб R_{tt} необходимо отметить следующее. Разработанная в ИПМ НАН Украины технология создания тепловых труб отдельными партиями по 50–100 шт. позволяет получать ТТ с близкими по величине характеристиками. Однако есть небольшие отклонения характеристик R_{tt} от средних значений для одной партии труб (рис. 13).

ВЫВОДЫ

1. Разработаны и исследованы тепловые трубы с композиционными капиллярными структурами нового типа, обеспечивающие высокие теплофизические и эксплуатационные характеристики.

2. Созданные тепловые трубы способны эффективно функционировать в любых положениях при нахождении в гравитационном поле.

Работа выполнена при совместной финансовой поддержке Фондов INTAS и Национального космического агентства Украины по проекту № 06-1000024-9339 «Development and creation of Heat Pipes on a Basis Metal-Fibrous Capillary Structures with Improved Thermophysic Characteristics for Temperature control Systems of the Perspective Space Vehicles».

1. Веркин Б. И., Кириченко Ю. А., Русанов К. В. Теплообмен при кипении в полях массовых сил различной интенсивности. — Киев: Наук. думка, 1988. — 255 с.
2. Воронин В. Г., Ревакин А. В., Сасин В. Я., Тарасов В. С. Низкотемпературные тепловые трубы для летательных аппаратов. — М.: Машиностроение, 1976. — 200 с.
3. Дан П., Рей Д. Тепловые трубы. — М.: Энергия, 1979. — 272 с.
4. Ивановский М. Н., Сорокин В. П., Ягодкин И. В. Физические основы тепловых труб. — М.: Атомиздат, 1978. — 256 с.
5. Косторнов А. Г. Проницаемые металлические волокновые материалы. — Киев: Техника, 1983. — 128 с.
6. Косторнов А. Г. Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов. — Киев: Наук. думка, 2002. — Т. 2. — 550 с.
7. Косторнов А. Г., Подрезов Ю. Н., Безмянный Ю. Г. и др. Пористые слоистые и каркасные волокнуно-порошковые композиции из нержавеющей стали // Порошковая металлургия. — 2006. — № 1/2. — С. 45–50.
8. Присняков В. Ф., Луценко В. И., Наврузов Ю. В. и др. Процессы переноса тепла и массы в тепловых трубах. — Киев: Наук. думка, 1992. — 160 с.
9. Смирнов Г. Ф., Цой А. Д. Теплообмен при парообразовании в капиллярах и капиллярно-пористых структурах. — М.: Изд-во МЭИ, 1999. — 440 с.
10. Тепловые трубы / Под ред. Э. Э Шпильрайна. — М.: Мир, 1972. — 420 с.
11. Техвер Я. Х., Суй Х. Н., Темкина В. С. Закипание жидкости на пористой поверхности и гистерезис теплоотдачи. — Таллинн, 1989. — 47 с. — (Препринт /АН ЭССР).
12. Фаворский О. Н., Каданер Я. С. Вопросы теплообмена в космосе. — М.: Высш. шк., 1972. — 280 с.
13. Эва В. К., Асакявичюс Й. П., Гайгалис В. А. Низкотемпературные тепловые трубы. — Вильнюс: Моклас, 1982. — 184 с.

Поступила в редакцию 20.02.09

A. G. Kostornov, A. A. Shapoval,
A. L. Moroz, G. A. Frolov, I. V. Shapoval

HEAT PIPES WITH CAPILLARY STRUCTURES ON THE BASIS OF COMPOSITE GRADIENT MATERIALS FOR SPACE AND AVIATION HEAT SYSTEMS ENGINEERING

Some results of development of heat pipes and elements of heat transfer systems in space and aviation assignment are presented. New types of basic elements in the capillary structures of heat pipes are offered and applied. Thermophysical characteristics of the developed heat pipes with composite capillary structures are researched. Such structures have some technical advantages in comparison with traditional designs, in particular, during the work of heat pipes against a direction of the gravitational force action.