

УДК 62.192

А. Г. Косторнов, А. А. Шаповал, А. Л. Мороз, И. В. Шаповал, Н. Э. Скрынская

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

## РЕСУРС И НАДЕЖНОСТЬ РАБОТЫ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ С КАПИЛЛЯРНЫМИ СТРУКТУРАМИ ВОЛОКНИСТОГО СТРОЕНИЯ

---

*Представлены результаты ресурсных испытаний тепловых труб с капиллярными структурами волокнистого строения. Трубы предназначены для систем охлаждения и термостатирования космической и авиационной аппаратуры. Ресурсные исследования, проведенные с 1975 г. по настоящее время, продемонстрировали, что тепловые трубы, разработанные в Институте проблем материаловедения Национальной академии наук Украины, являются высоконадежными и долговечными теплопередающими устройствами.*

---

### ВВЕДЕНИЕ

Вопросы надежности работы и долговечности тепловых труб (ТТ), в том числе космического и авиационного назначения [1, 2, 4], важны для практического инженерного применения ТТ в разработках систем охлаждения и термостатирования приборов, устройств и оборудования при длительных сроках их функционирования в сложных эксплуатационных условиях.

С целью решения проблем надежности тепловых труб в Институте проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины на протяжении длительного периода, с 1975 г., непрерывно и по настоящее время проводятся ресурсные испытания ТТ. Целью таких испытаний является исследование долговечности ТТ, а также влияния времени на работоспособность и на теплофизические характеристики теплопередающих устройств такого типа.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ЭКСПЕРИМЕНТА

Использование тепловых труб в промышленных масштабах позволяет успешно решать ряд сложных задач теплообмена, в частности в сложных условиях эксплуатации новой техники. Ресурсные испытания тепловых труб позволяют прак-

тически и с высокой степенью достоверности оценивать эффективность технологических решений.

Выход из строя тепловых труб (внезапный или прогнозируемый) обусловлен обычно химической несовместимостью конструкционных материалов ТТ с рабочей жидкостью-теплоносителем. Второй фактор, обуславливающий отказы ТТ — несовершенство производственных технологий и некачественные технологические операции в процессе изготовления труб. При отказах ТТ либо разрушаются её элементы (с потерей необходимой герметичности), либо происходит химическое разложение жидкости-теплоносителя.

Дистиллированная вода в большинстве практических задач, решаемых при разработке систем охлаждения приборов и устройств, является наиболее подходящей жидкостью. Вода не токсична, обладает высокими теплофизическими характеристиками, пожаробезопасна и пр. К числу недостатков относятся высокие значения давления внутри ТТ (~1.5 МПа при 200 °С) и неудовлетворительная химическая совместимость с большинством сталей и сплавов на основе стали.

Внутри тепловых труб, созданных из коррозионностойких сталей и заполненных водой, в результате взаимодействия элементов ТТ с теплоносителем происходит постепенное разрушение пассивного поверхностного слоя, образованно-

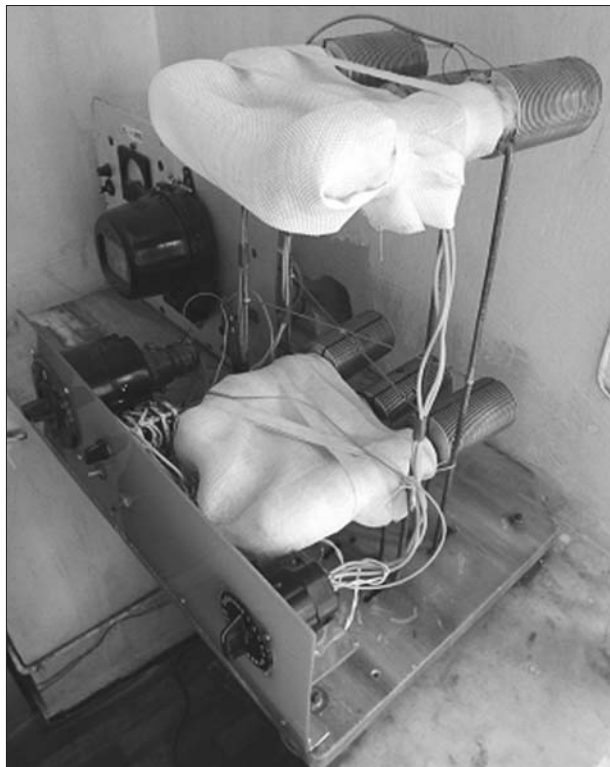


Рис. 1. Экспериментальный стенд для ресурсных исследований низкотемпературных тепловых труб

го химически адсорбированным кислородом на поверхности металлических элементов (корпуса ТТ и её капиллярной структуры). На некоторых участках ТТ вода или водяной пар вступают в электрохимическую реакцию с железом. При этом происходит незначительное выделение водорода. Водород скапливается в конце конденсационной зоны ТТ, блокируя при этом часть её теплоотводящей поверхности.

#### Параметры и характеристики опытных тепловых труб

№	Материал корпуса	Материал капиллярной структуры	Пористость капиллярной структуры, %	Длина, мм	Диаметр, мм	Диаметр волокон, мкм
1	медь	медь	78	250	12	40
2	медь	медь	78	250	12	40
3	сталь	сталь неоксидированная	78	250	12	30
4	сталь	сталь оксидированная	78	250	12	30
5	медь	медь	78	250	12	40
6	сталь	медь оксидированная	78	250	12	40

Для увеличения ресурса устойчивой работы ТТ из коррозионностойких сталей (важных для практического применения в космической аппаратуре) рекомендуется:

- 1) использование сталей с содержанием углерода меньше 0.03 %,
- 2) легирование сталей молибденом,
- 3) создание защитных поверхностных слоёв методом травления элементов ТТ,
- 4) интенсификация образования пассивирующего слоя на внутренних поверхностях ТТ (длительное низкотемпературное оксидирование),
- 5) использование качественной бидистиллированной воды и пр.

Одним из методов решения проблем совместимости сталей с водой является омеднение её внутренней поверхности.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ

Создан экспериментальный стенд (рис. 1), посредством которого осуществляются ресурсные испытания ТТ. В состав стенда входят шесть тепловых труб с металлическими волоконными капиллярными структурами (КС): медными (медь марки М1) и КС, выполненными из коррозионностойкой стали (9Х18Н10Т). Выбор материалов ТТ и КС обусловлен в основном диапазоном величин теплопроводности исходных металлов. Рабочая жидкость-теплоноситель — дистиллированная вода. Обоснованием использования воды в ТТ является её приемлемый для систем охлаждения рабочий температурный диапазон и нетоксичность.

Тепловые трубы установлены в горизонтальном положении и снабжены электронагревате-

лями, алюминиевыми теплоотводами-радиаторами, термопарами, предназначенными для измерения температур ТТ. Термопары расположены вдоль внешней поверхности корпусов ТТ. Тепловые трубы функционируют циклически, по девять часов в сутки. Стенд снабжён электросчётчиком, позволяющим контролировать время функционирования ТТ под нагрузкой.

Медные ТТ снабжены высокопористыми медными капиллярными структурами, которые предварительно, для лучшего смачивания их водой, были подвергнуты оксидированию (нагрев на воздухе до 250 °С). Трубы № 3, 4 из стали (см. таблицу) снабжены стальными КС (из аналогичной стали); при этом КС в трубке № 4 также подвергалась оксидированию. Стальная труба № 6 имела капиллярную структуру из меди, которая припекалась к внутренней поверхности корпуса с предварительно нанесенным медным покрытием. Опытные ТТ неоднократно подвергались так называемым «ударным» испытаниям, во время которых они функционировали в режиме периодических кратковременных включений-выключений.

Характеристики ТТ с волокновыми капиллярными структурами представлены в таблице.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты ресурсных испытаний ТТ представлены на рис. 2, 3. Первые 11000 часов тепловые трубы функционировали непрерывно, при охлаждении их конденсационных зон проточной водой. При этом подводимая к ТТ мощность составляла 20 Вт. Затем ТТ работали в циклических режимах (периодичность включения — 9 ч), с воздушным охлаждением (отвод тепла — через ребристый радиатор). Количество циклов на первоначальном этапе регулярных испытаний — более 400 опытов. В дальнейшем испытания ТТ осуществлялись постоянно.

До настоящего времени, как свидетельствуют полученные результаты, все испытываемые трубы функционируют без отказов. По истечении 100000 часов функционирования тепловые трубы являются полностью работоспособными. На рис. 2 представлены результаты испытаний медных труб с медными капиллярными струк-

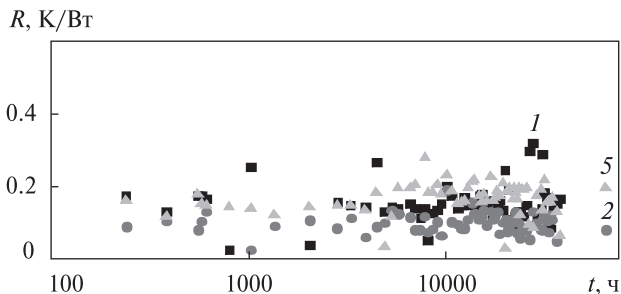


Рис. 2. Изменение со временем термического сопротивления  $R$  медных тепловых труб №№ 1, 2 и 5 с медными волокновыми капиллярными структурами

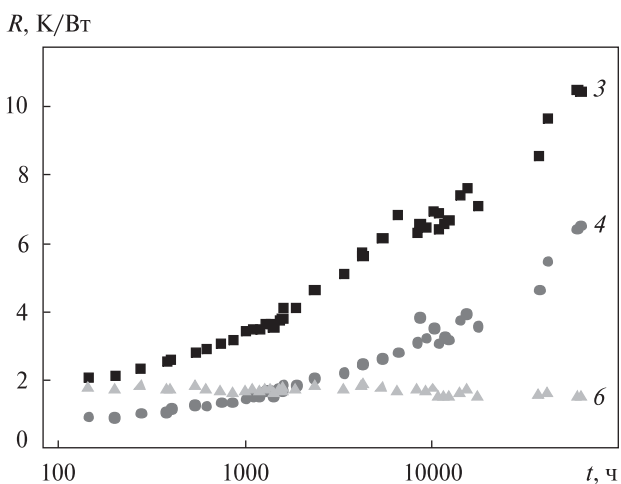


Рис. 3. Изменение со временем термического сопротивления  $R$  тепловых труб №№ 3, 4 и 6 из коррозионностойкой стали со стальными и медными волокновыми капиллярными структурами

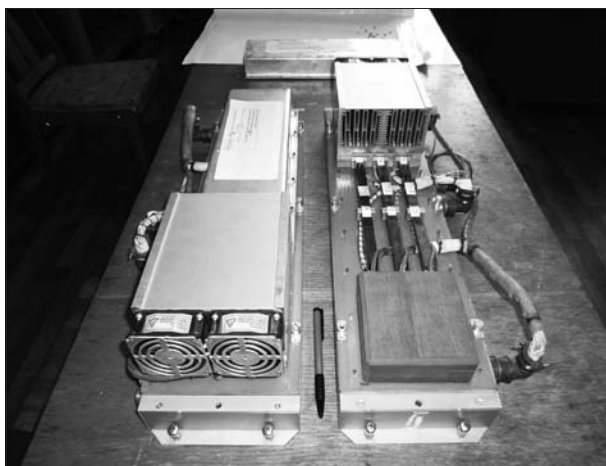


Рис. 4. Блок тепловых труб, подготовленных для космических экспериментов

турами в виде зависимости термического сопротивления  $R$  [К/Вт] (одной из основных физико-технических характеристик тепловой трубы) от времени  $t$ .

Анализ полученных данных свидетельствует, что данная характеристика практически не изменяется в течение достаточно большого временного периода. Разброс значений измеряемых температур по длине ТТ связан с изменением температур в лабораторном помещении, однако диапазон термических сопротивлений при этом остаётся неизменным.

Тепловые трубы, выполненные из омедненной внутри коррозионностойкой стали, снабжённые медными капиллярными структурами, в процессе длительного функционирования не снижают своих теплопередающих характеристик (рис. 3). Несколько иначе изменяется аналогичная характеристика  $R$  тепловых труб, корпуса и капиллярные структуры которых выполнены из коррозионностойкой стали. Стальные ТТ №№ 3 и 4 с капиллярной структурой из коррозионностойкой стали на протяжении длительных сроков эксплуатации работают устойчиво. Однако их термические сопротивления  $R$  с течением времени увеличиваются в 4—6 раз. Этот факт в теории тепловых труб известен; он объясняется некоторым увеличением количества водорода внутри трубы, выделяемым как корпусом ТТ, так и развитой поверхностью пористой капиллярной структуры. Наличие водорода несколько ухудшает теплофизические характеристики таких ТТ, однако не нарушает (существенно) процесс функционирования испытываемых теплопередающих устройств. В тоже время в коррозионностойкой ТТ № 6 с медной капиллярной структурой значения термического сопротивления со временем остаются практически неизменными, что свидетельствует о её высокой надёжности и работоспособности.

#### ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Выбор конструкции тепловых труб низкотемпературного диапазона, предназначенных для космического эксперимента (КЭ) «Трубка», реализация которого предполагается на борту Меж-

дународной космической станции (МКС) [3], выполнен с учётом результатов ресурсных испытаний ТТ. Одной из целей такого эксперимента является изучение влияния микрогравитации на теплофизические характеристики и параметры работоспособности ТТ, функционирующих в космических условиях. Влияние временных факторов на характеристики ТТ, находящихся (и хранящихся некоторое время) на борту МКС, должно быть минимальным. По этой причине, руководствуясь полученными данными о надёжности ТТ, для выполнения КЭ были отобраны медные ТТ с медными капиллярными структурами (рис. 4).

#### ВЫВОДЫ

1. Тепловые трубы с металлическими волоконными капиллярными структурами являются высоконадёжными двухфазными теплопередающими устройствами, обладающими большим ресурсом работоспособности и долговечности.

2. Медные тепловые трубы с медными капиллярными структурами способны функционировать длительно, без ухудшения основных теплофизических характеристик.

3. Применение воды в качестве жидкости-теплоносителя в тепловых трубах из нержавеющей стали со стальными капиллярными структурами возможно для ТТ, использование которых ограничено непродолжительными сроками эксплуатации.

*Работа выполнена при поддержке Государственного космического агентства Украины (Договор № 378 от 05.03.2014 г. «Разработка и исследование характеристик и параметров миниатюрных и плоских тепловых труб с композиционными капиллярными структурами, предназначенных для систем термостабилизации космического и авиационного оборудования»).*

1. Воронин Г. Н., Ревякин А. В., Сасин В. Я. и др. Низкотемпературные тепловые трубы для летательных аппаратов. — М.: Машиностроение, 1978. — 200 с.
2. Косторнов А. Г. Проницаемые металлические волоконные материалы. — К.: Техника, 1983. — 128 с.
3. Косторнов А. Г., Фролов Г. А., Шаповал А. А. и др. Научная аппаратура для проведения космического экспе-

риента «Трубка» в гермооб'ємі російського сегмента МКС // Космічна наука і технологія. — 2009. — 15, № 3. — С. 5—10.

4. Косторнов А. Г., Шаповал А. А., Фролов Г. А. и др. Тепловые трубы с капиллярными структурами на основе композиционных градиентных материалов для теплообменных систем космического и авиационного назначения // Космічна наука і технологія. — 2009. — 15, № 2. — С. 69—79.

*Стаття надійшла до редакції 18.09.14*

*А. Г. Косторнов, А. А. Шаповал,  
А. Л. Мороз, И. В. Шаповал, Н. Э. Скрынская*

#### РЕСУРС ТА НАДІЙНІСТЬ РОБОТИ ТЕПЛОВИХ ТРУБ З КАПІЛЯРНИМИ СТРУКТУРАМИ ВОЛОКНИСТОЇ БУДОВИ

Представлено результати ресурсних випробувань теплових труб з капілярними структурами волокнистої будови, призначених для систем охолодження і термостатування космічної та авіаційної апаратури. Ресурсні дослідження, проведені з 1975 р. по теперішній час, продемонстрували, що теплові труби, розроблені в Ін-

ституті проблем матеріалознавства НАН України, є високонадійними і довговічними теплопередавальними пристроями.

*A. G. Kostornov, A. A. Shapoval,  
A. L. Moroz, I. V. Shapoval, N. E. Skrynskaia*

#### RESOURCES AND RELIABILITY OF HEAT PIPES WITH FIBER CAPILLARY STRUCTURE

Some results of long-term endurance tests for heat pipes (HP) with capillary fiber structures are presented. The HP tested are primarily intended for the use in cooling and temperature control of space and aviation equipment. A special stand was created for endurance tests conducting for heat pipes. Six heat pipes with copper and corrosion-resistant casing and capillary structures have been constantly tested for 40 years, since 1975. The tests showed that a copper heat pipe with copper capillary structures can normally function over a very long period. At the same time, thermal characteristics of such heat pipes are almost not changed. In contrast to copper heat pipes, HP with corrosion-resistant casing and steel capillary structures increased their thermal resistance. As this takes place, such HP also worked without a hitch.