

УДК 536.42:621.891

А. Г. Косторнов<sup>1</sup>, Г. А. Фролов<sup>1</sup>, А. А. Шаповал<sup>1</sup>, А. Л. Мороз<sup>1</sup>, И. В. Шаповал<sup>1</sup>,  
Ю. А. Еланский<sup>2</sup>, В. Г. Тихий<sup>2</sup>, И. А. Гусарова<sup>2</sup>, М. Н. Сурду<sup>3</sup>, А. Л. Ламеко<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України, Київ

<sup>2</sup>Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпропетровськ

<sup>3</sup>Институт прецизійних вимірювань при «Укрметрестандарт»

## НАУЧНАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА «ТРУБКА» В ГЕРМООБЪЕМЕ РОССИЙСКОГО СЕГМЕНТА МКС

---

*Розглянуто стан робіт з виготовлення теплових труб та підготовки обладнання для космічного експерименту «Трубка». Представлено комплект наукової апаратури, яка включає блок теплових труб, блок вимірювання і керування, контейнери для доставки апаратури на РС МКС та проведення експерименту. Блок вимірювання і керування разом з блоком теплових труб розміщено в контейнері для доставки і проведення космічного експерименту.*

---

### ВВЕДЕНИЕ

Тепловые трубы (ТТ) являются элементарной базой для многих современных систем охлаждения и термостабилизации различного оборудования, в том числе для космических аппаратов (КА). Они представляют собой замкнутые испарительно-конденсационные устройства и отличаются сверхвысокой теплопроводностью, обусловленной особенностями их функционирования и конструкции [7, 8]. Для термостабилизации приборов КА тепловые трубы успешно применяются уже несколько десятилетий [1, 9, 10]. Однако целенаправленные исследования влияния микрогравитации на их параметры не проводились.

В перечень первоочередных совместных российско-украинских космических экспериментов (КЭ), запланированных к проведению на Российском сегменте Международной космической станции (РС МКС), включен КЭ под названием «Разработка и исследование параметров маломасштабных и миниатюрных тепловых труб для систем охлаждения и термо-

стабилизации приборов, аппаратуры и конструкции космических аппаратов» (шифр «Трубка»). Для проведения КЭ «Трубка» предполагается создание двух рабочих мест: ЛЭУ-ТТ1 и ЛЭУ-ТТ2. Летная установка ЛЭУ-ТТ1 размещается вне гермоотсека и изготавливается Россией [4], а летная установка ЛЭУ-ТТ2 изготавливается Украиной и размещается в гермоотсеке РС МКС. Подготовка КЭ «Трубка» представлена в работах [5, 6] и неоднократно докладывалась на конференциях.

Основной целью КЭ, который проводится на летной установке ЛЭУ-ТТ2, является исследование влияния микрогравитации на теплофизические и эксплуатационные характеристики ТТ, включая исследование тепломассопереноса внутри ТТ, и создание на РС МКС рабочего места для последующей сертификации ТТ для КА. При этом решаются следующие задачи:

- исследование влияния гравитационных сил на теплофизические и эксплуатационные параметры ТТ, предназначенных для систем охлаждения и термостабилизации оборудования КА внутри и вне гермоотсека;
- определение адекватности физических характеристик ТТ, полученных в наземных условиях и на орбите;

---

© А. Г. КОСТОРНОВ, Г. А. ФРОЛОВ, А. А. ШАПОВАЛ,  
А. Л. МОРОЗ, И. В. ШАПОВАЛ, Ю. А. ЕЛАНСКИЙ,  
В. Г. ТИХИЙ, И. А. ГУСАРОВА, М. Н. СУРДУ,  
А. Л. ЛАМЕКО, 2009

- разработка имитационной модели тепло-массопереноса внутри ТТ, получение универсальных зависимостей теплообмена ТТ в условиях микрогравитации; определение локальных и интегральных теплопередающих характеристик ТТ и прогнозирование тепловых режимов оборудования КА с ТТ при нештатных условиях полета.

В настоящее время над разработкой научной аппаратуры для КЭ «Трубка» в Украине работают Институт проблем материаловедения НАН Украины (ИПМ НАН Украины), Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля» (ГП «КБ «Южное») и Научно-исследовательский институт прецизионных измерений при Государственном предприятии Всеукраинский государственный научно-производственный центр стандартизации, метрологии, сертификации и защиты прав потребителей (ИПИ Укрметрестандарт).

#### ТЕПЛОВЫЕ ТРУБЫ НА ОСНОВЕ НОВЫХ ТИПОВ КАПИЛЛЯРНЫХ СТРУКТУР

Основная задача ИПМ НАН Украины при подготовке КЭ «Трубка» заключается в разработке и исследованиях ТТ, предназначенных для охлаждения и термостабилизации оборудования КА. Известно, что характеристики тепловой трубы в основном определяются ее капиллярной структурой (КС) и теплоносителем. Были проведены сравнительные исследования КС различных типов и разработаны ТТ с новыми композицион-

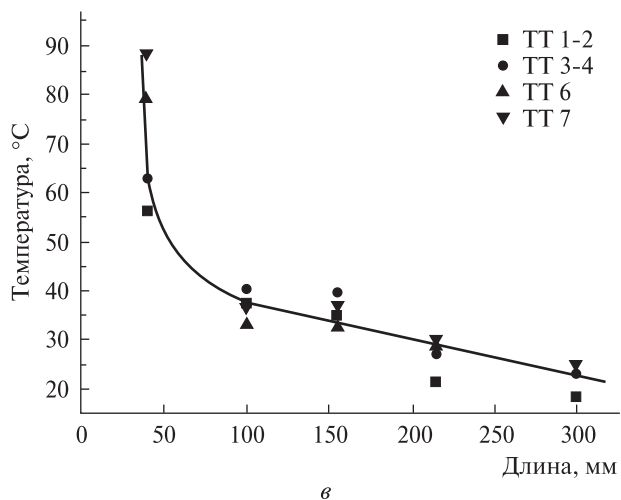
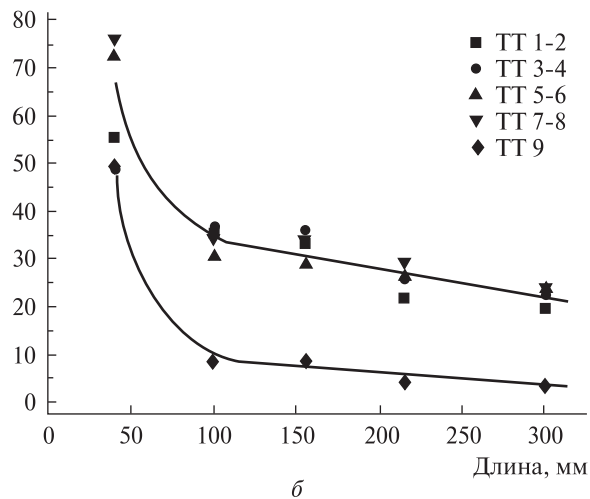
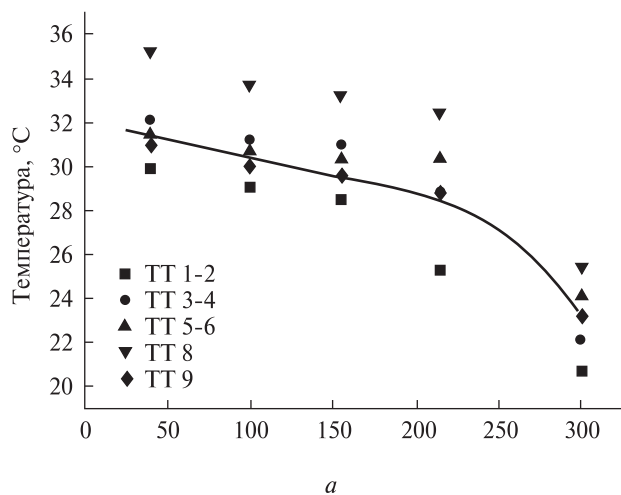
ными КС. Некоторые результаты исследований приведены ниже.

Скорость протекания жидкости через КС характеризуется вязкостным коэффициентом проницаемости  $K$  ( $\text{м}^2$ ) [2]. Волокновые капиллярные структуры отличаются от КС других типов, например порошковых, отсутствием тупиковых пор, препятствующих продольному движению жидкости. В результате коэффициенты проницаемости для волокновых высокопористых КС ( $\Theta_{\text{КС}} > 70 \%$ ) достигают значений  $K = 80 \dots 100 \text{ м}^2$  [3], что значительно больше, чем значения  $K$  для порошковых КС ( $K = 5 \dots 30 \text{ м}^2$ ). Поэтому в горизонтальном положении волокновые КС значительно быстрее транспортируют жидкость к зоне нагрева, чем порошковые или сетчатые. Однако при работе против сил гравитации (в положении «нагрев ТТ — сверху») высокопористые КС не могут обеспечить больших значений высоты  $H$ , м капиллярного поднятия жидкости по сравнению с порошковыми КС, так как средние размеры их пор существенно больше, чем у порошковых структур.

При разработке новых КС предполагалось, что соединение положительных свойств двух разных типов пористых материалов в одной композиционной структуре должно обеспечить высокие характеристики ТТ как при их горизонтальном положении, так и при работе ТТ против сил тяжести. Результаты сравнительных исследований ТТ, изготовленных с моноволоконной КС (ТТ № 9) и с композиционными КС (ТТ № 1–8, таблица), подтвердили эти предпо-

**Характеристики капиллярной структуры из металлических волокон и порошков в опытных тепловых трубах**

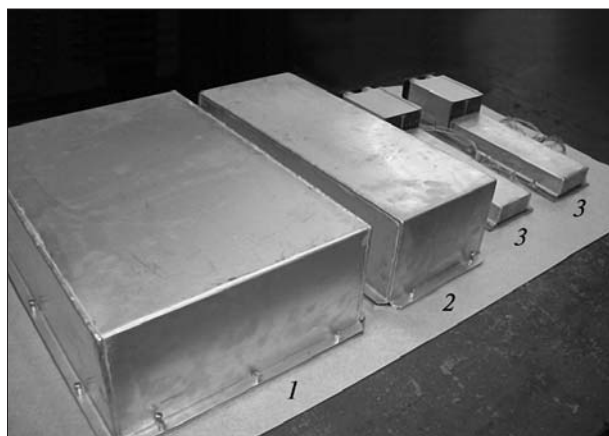
Обозначение ТТ	Масса, г	Толщина, мм	Ширина, мм	Длина, мм	Средняя пористость, %	Состав КС
ТТ 1	35	1.0	50	300	70.2	Слой волокон $\varnothing 50$ мкм, толщиной 0.75 мм и слой волокон $\varnothing 30$ мкм, толщиной 0.25 мм
ТТ 2	24	1.0	50	300	80.4	
ТТ 3	10	1.0	50	300	91.5	
ТТ 4	36	1.0	50	300	69.3	Слой волокон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



**Рис. 1.** Распределение температур по длине тепловых труб при их вертикальном расположении: *a* – нагрев «снизу» для мощности теплового потока  $Q = 20$  Вт, кривая – аппроксимация для ТТ № 9; *б* – нагрев «сверху» для мощности  $Q = 15$  Вт, кривая 1 – аппроксимация для ТТ № 9, 2 – для ТТ с композиционными КС; *в* – нагрев «сверху» для мощности  $Q = 20$  Вт

ложения. Исследования выполнены при различной ориентации труб в пространстве: вертикальной (нагрев «снизу» и «сверху») и горизонтальной. Мощность теплового потока при вертикальном (нагрев «снизу») и горизонтальном положениях ТТ изменялась в диапазоне 0–70 Вт, а при нагреве «сверху» — 0–25 Вт.

На рис. 1 представлены распределения температур по длине вертикальных ТТ, полученные при мощности теплового потока 15 и 20 Вт. В «термосифонном» режиме (нагрев ТТ — «снизу», рис. 1, *a*) характеристики ТТ № 9 с моноволоконной КС практически не отличались от характеристик ТТ с композиционными КС. При нагреве «сверху» ТТ работает против направления действия сил гравитации.



**Рис. 2.** Комплект научной аппаратуры «Трубка» для ЛЭУ-ТТ2: 1 – контейнер КТ № 2, 2 – контейнер КТ № 1, 3 – блоки БТТ

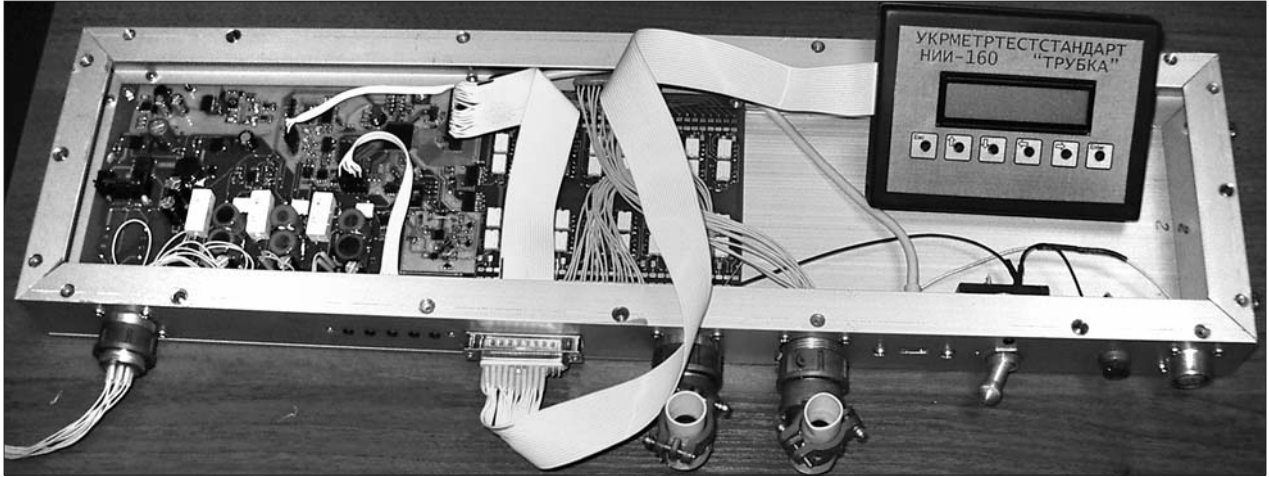


Рис. 3. Внешний вид блока измерения и управления научной аппаратуры «Трубка» (крышка снята)

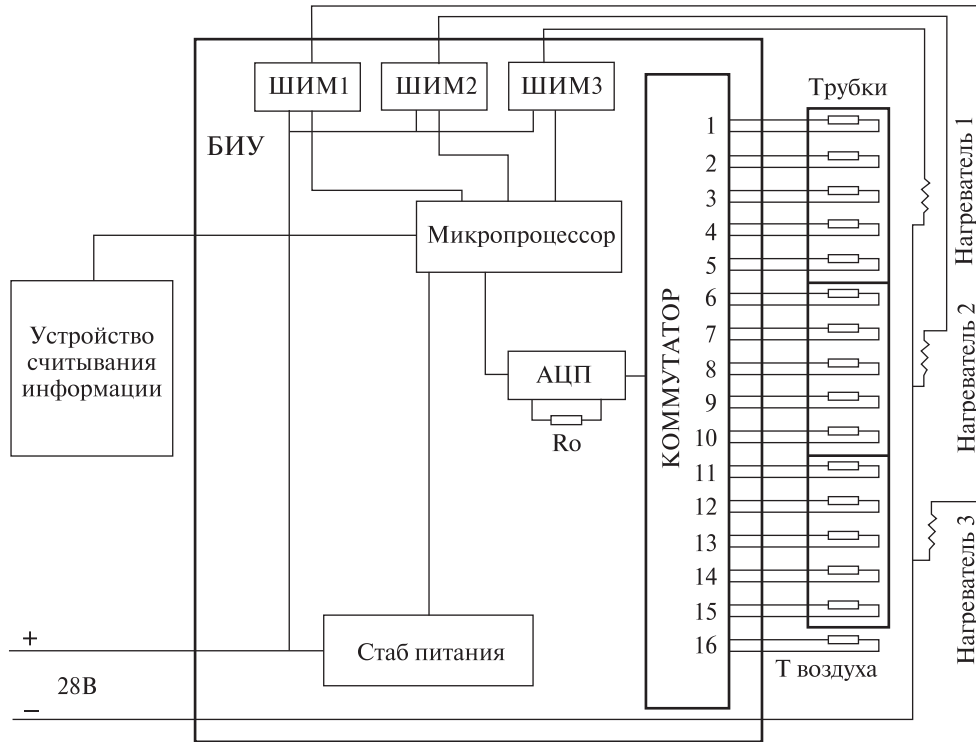


Рис. 4. Структурная схема блока измерения и управления

Как видно из рис. 1, б, ТТ с моноволоконной КС (№ 9) устойчиво функционировала при подводе тепла «сверху» только до величины  $Q = 15$  Вт. При увеличении теплового потока до значения  $Q = 20$  Вт работоспособность сох-

раняют только ТТ с композиционными КС (рис. 1, в). При этом температура зоны нагрева ТТ выше, чем при другом расположении труб в пространстве. Некоторые образцы ТТ с композиционными КС обеспечивали квазиста-

ционарный тепловой режим до величины  $Q = 25$  Вт.

Итак, тепловые трубы с композиционными КС надежно функционируют в любых положениях. Они должны также эффективно работать в системах охлаждения и термостабилизации приборов и аппаратуры космического назначения в условиях орбитального полета, т. е. в условиях микрогравитации.

### КОМПЛЕКТ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ «ТРУБКА» ДЛЯ ЛЭУ-ТТ2

При доработке технического задания на научную аппаратуру «Трубка» было предложено использовать два контейнера для транспортировки и проведения КЭ. С этой целью была проведена интеграция блока измерения и управления (БИУ) с блоком тепловых труб (БТТ). В настоящее время аппаратура, расположенная в контейнере №1, подготовлена к проведению необходимого комплекса испытаний (ЛОИ, КДИ и т. д.). Контейнер №2 предназначен для транспортировки 3-х блоков БТТ и одного БИУ на РС МКС и их утилизации после испытаний. Для накопления и хранения информации планируется использовать съемный носитель (флешка), который позволяет организовать проведение КЭ «Трубка» в гермообъеме РС МКС без вмешательства в бортовой компьютер. По окончании эксперимента (3 ч) осуществляется передача информации со съемного носителя на Землю в течение одних суток. Комплект НА «Трубка» показан на рис. 2.

Блок измерения и управления для НА «Трубка» (рис. 3) состоит из измерительного модуля, обеспечивающего питание и прием сигналов от шестнадцати термометров сопротивления (на каждой из трех тепловых труб расположено по пять датчиков, а один предназначен для измерения температуры окружающей среды). Измерения должны происходить с периодом, позволяющим сохранить информацию с учетом инерционности термометров. Поскольку высокой скорости измерений не требуется, то используется один аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) с коммутатором, обеспечивающим при-

ем шестнадцати каналов. Было выбрано АЦП AD7793 с 24 разрядами преобразования. Для измерения температуры используются датчики сопротивления Pt1000. При коэффициенте усиления АЦП, равном 4, предельное значение измеряемой температуры составляет 550 °С. Три нагревателя в БТТ управляются по заданному алгоритму, который должен быть запрограммирован в БИУ и реализован с помощью ШИМ-регуляторов. Максимальная мощность нагревателя 60 Вт. Из-за ограничения потребляемой мощности предусмотрена поочередная работа нагревателей. Установка мощности задается в процентах.

Настройка режимов БИУ и считывание информации осуществляется внешним устройством ввода и считывания информации, роль которого может выполнять специальная ПЭВМ. Структурная схема разработанной БИУ приведена на рис. 4.

Разработанный комплект НА «Трубка» прошел функциональные испытания, которые подтвердили его работоспособность.

1. *Воронин В. Г., Ревякин А. В. и др.* Низкотемпературные тепловые трубы для летательных аппаратов. — М.: Машиностроение, 1976. — 200 с.
2. *Косторнов А. Г.* Проницаемые металлические волокновые материалы. — Киев: Техника, 1983. — 128 с.
3. *Косторнов А. Г.* Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов. — Киев: Наук. думка, 2002. — Т. 2. — 550 с.
4. *Косторнов А. Г., Гуля В. М., Еланский Ю. А. и др.* Особенности проведения КЭ «Трубка» в гермообъеме и на внешней поверхности РС МКС // Проблемы управления и информатики. — 2008. — № 1. — С. 114–120.
5. *Косторнов А. Г., Сурду М. Н., Фролов Г. А. и др.* Космический эксперимент «Трубка»: Автоматизированное управление и система измерения температуры // Проблемы управления и информатики. — 2008. — № 3. — С. 127–132.
6. *Скоруход В. В., Косторнов А. Г., Фролов Г. А.* Подготовка космических экспериментов «Материал–Трение» и «Трубка» для исследования антифрикционных материалов и тепловых труб на борту РС МКС // Космічні дослідження в Україні 2002–2004 р. — Київ: НКАУ, 2004. — С. 71–76.

7. *Тепловые трубы* / Под ред. Э. Э. Шпильрайна. — М.: Мир, 1972. — 420 с.
8. *Фаворский О. Н., Каданер Я. С.* Вопросы теплообмена в космосе. — М.: Высшая шк., 1972. — 280 с.
9. *Чи С.* Тепловые трубы. Теория и практика. — М.: Машиностроение, 1981. — 208 с.
10. *Goncharov K. A., Barantsevich V. L., Orlov A. A.* Experience of development of heat pipes applied in Russian spacecrafts // V Minsk International Seminar «Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators» Minsk, Belarus, September 8-t 1, 2003. — Minsk, 2003.

*Поступила в редакцию 03.03.09*

*A. G. Kostornov, G. A. Frolov,  
A. A. Shapoval, A. L. Moroz, I. V. Shapoval,  
Yu. A. Elanskii, V. G. Tikhii, I. A. Gusarova,  
M. N. Surdu, A. L. Lameko*

#### SCIENTIFIC EQUIPMENT FOR THE SPACE EXPERIMENT «PIPE» ON THE RS OF THE ISS

The state of the preparation of the scientific equipment for realization of the space experiment «Pipe» is considered. Our results of investigation of heat pipes with new composition structures providing the possibility to work against the gravity are given. The complete set of the scientific equipment for the space experiment «Pipe» is presented.