

УДК 537.311.4

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

Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, Київ

## КОНТАКТНОЕ ТЕРМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ КАПИЛЛЯРНЫХ СТРУКТУР ТЕПЛОВЫХ ТРУБ В ТЕПЛОБМЕННЫХ СИСТЕМАХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И ГЕЛИОЭНЕРГЕТИКИ

*Представлено результати експериментальних досліджень впливу характеристик металевих капілярних структур (КС), приєднаних до суцільних нагрівних поверхонь, в умовах імітації роботи теплових труб. Досліджувався вплив способу приєднання різних структур на значення термічного опору  $R$  у місцях контакту «КС — суцільна поверхня». Отримано емпіричні формули, необхідні для конструювання теплових труб космічного призначення.*

### ВВЕДЕНИЕ

Теплофизические исследования пористых проницаемых материалов новых типов, в частности определение их теплопроводности (каркасной и эффективной) [1], тесно связаны с изучением влияния физических характеристик капиллярных структур (КС) на величину термического сопротивления ( $R_{\text{конт}}$ ) в местах контакта таких материалов со сплошными поверхностями. Указанная задача чрезвычайно важна для разработки и конструирования тепловых труб (ТТ), являющихся элементной базой систем охлаждения и термостабилизации приборов и аппаратов космического назначения, а также для теплообменных устройств гелиоэнергетики. Характеристики капиллярных структур и качество присоединения их к корпусам ТТ во многом определяют теплофизические параметры и эффективность тепловых труб.

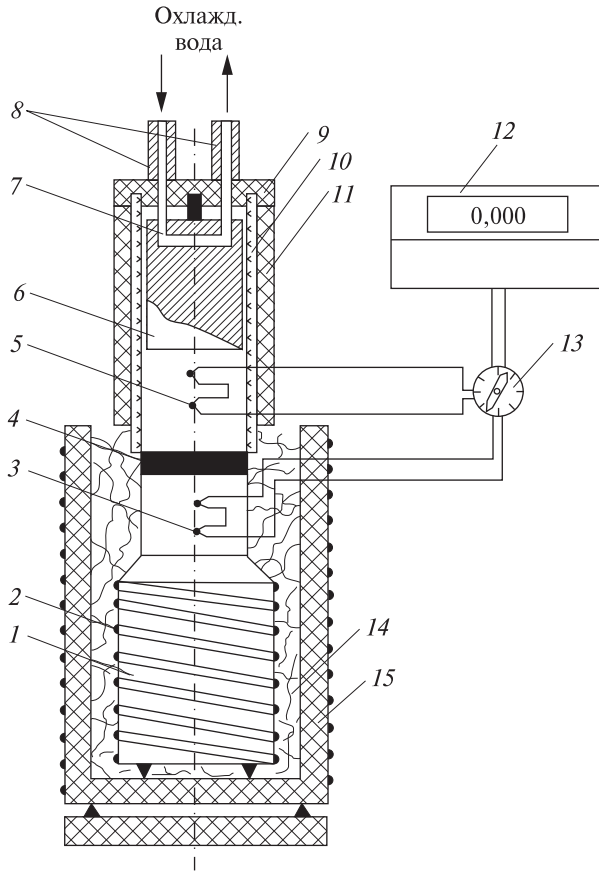
Теплопроводность  $\lambda_{\text{КС}}$  металлических волоконных материалов, являющихся перспективными капиллярными структурами тепловых труб и термосифонов, изучена в ряде работ [1, 2, 4, 6, 7]. В то же время практически нет сведений о влиянии характеристик КС на величины  $R_{\text{конт}}$ . Краткие сведения о значениях  $R_{\text{конт}}$  приведены в работе [4], не только не позволяют их использовать, но и нуждаются в эксперименталь-

ном подтверждении. Необходимо отметить, что величины термических сопротивлений  $R_{\text{конт}}$  как в зонах теплоподвода тепловых труб и термосифонов, так и в зонах теплоотвода существенны для определения  $R_{\text{ТТ}}$  — суммарного термического сопротивления ТТ. В то же время знание величин  $R_{\text{ТТ}}$  позволяет уверенно прогнозировать технические характеристики теплопередающих устройств с ТТ.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Для решения актуальной задачи определения  $R_{\text{конт}}$  в Институте проблем материаловедения НАН Украины созданы экспериментальные установки и рабочие участки, позволяющие исследовать как теплопроводность пористых материалов различных типов, так и влияние физических характеристик таких материалов и капиллярных структур на их основе на величины  $R_{\text{конт}}$ . Конструкция-схема экспериментальной установки для проведения исследований в условиях стационарных тепловых режимов приведена на рис. 1.

Тепловой поток, создаваемый омическим проволочным нагревателем 2, регулируется посредством автотрансформатора и через цилиндрический стержень 1 подводится к опытному образцу 4 пористой структуры. Отвод тепла обеспечивается посредством верхнего медного цилиндрического блока 6, охлаждение которого



**Рис. 1.** Конструкция экспериментальной установки для исследований теплопроводности пористых металлов и контактного термического сопротивления: 1 — медный стержень; 2 — основной электронагреватель; 3, 5 — дифференциальные термопары; 4 — опытный образец КС; 6 — прижимное устройство; 7 — канал водяного охлаждения; 8 — штуцеры подвода и отвода воды; 9 — фланец; 10, 11 — теплоизолирующие цилиндры; 12 — милливольтметр; 13 — переключатель термопар; 14 — термостойкий алундовый стакан; 15 — базальтовая теплоизоляция

осуществляется либо воздушным потоком (при относительно небольших значениях плотности теплового потока  $q$ ), либо жидкостью 7 (при больших значениях  $q$ ). Измерение температуры осуществляется с помощью датчиков-термопар 3 и 5, расположенных в контрольных микроотверстиях в нержавеющей цилиндрах по ходу теплового потока. При этом рабочие спаи термопар располагаются в центре диаметров цилиндров. Вторичные измерительные приборы —

электронные милливольтметры 12. Не рабочие поверхности цилиндров теплоизолированы с помощью стеклоленты и базальтового волокна 15. Для обеспечения достоверности получаемых результатов измерений плотности тепловых потоков и температуры выполнены специальные тарировочные опыты как без КС, так и с использованием эталонных металлов (свинец) со стабильными значениями теплопроводности  $\lambda$ .

Физические характеристики опытных образцов пористых структур представлены в таблице. Выбранные образцы материалов по своим характеристикам (пористость  $\Theta = 50...95\%$ ; каркасная теплопроводность  $\lambda_{\text{к}} = 0.2...40 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ; толщина  $\delta_{\text{КС}} = 0.5...5 \text{ мм}$ ; материал КС — медь и коррозионностойкая сталь 9Х18Н10Т) обеспечили достаточно широкий диапазон изменения измеряемой характеристики — контактного термического сопротивления  $R_{\text{конт}}$ .

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Методика проведения эксперимента состояла в следующем. Опытный образец пористой структуры ( $\varnothing 20 \text{ мм}$ ) устанавливали между измерительными цилиндрами. После сборки узлов рабочего участка осуществляли подвод заданного значения теплового потока; при этом наступление стационарного теплового потока контроли-

#### Характеристики опытных образцов пористых волоконных (В) и волоконно-порошковых структур (В + П); ( $d_{\text{в}} = 40 \text{ мкм}$ ; $l_{\text{в}} = 3 \text{ мм}$ )

Материал КС	$\theta, \%$	Толщина, мм	Структура образцов
Медь	84	0.5	В
Медь	71.2	1.0	
Медь (окисл.)	83	1.1	
Медь	71.5	1.5	
Медь	58.9	2.3	
Медь	62.4	4.6	
Нерж.сталь	83.7	0.4	
Нерж.сталь	84.8	0.94	
Нерж.сталь	94.2	1.2	
Нерж.сталь	84.5	1.5	
Нерж.сталь	91.6	1.8	
Нерж.сталь	74	0.55	В+П
Нерж.сталь	81.5	0.75	
Нерж.сталь	57.4	1.17	

ровали по показаниям термопар. Производили измерения плотности теплового потока (посредством ваттметра) и температур в контрольных точках. Затем подводимую мощность увеличивали, и процесс повторяли вплоть до предельных значений  $q$ .

Обработку полученных экспериментальных данных выполняли в следующей последовательности: 1) для каждого опытного образца КС устанавливали значение каркасной теплопроводности  $\lambda_{кк}$  [1, 2]; 2) для заданного значения плотности теплового потока рассчитывали падение температуры по толщине опытного образца КС [3, 5]; 3) используя показания термопар в обоих измерительных цилиндрах, рассчитывали среднее значение плотности теплового потока, проходящего через опытный образец, а также падение температуры по высоте измерительных цилиндров от термопар до поверхности контакта торца цилиндра с пористым материалом [5]; 4) вычитая из общего измеренного температурного перепада по расчётной толщине значения температурных перепадов по толщине образца КС и цилиндров, получали разности температур на границах контакта «сплошная поверхность — пористая структура». Полученные результаты определяли значения контактных термических сопротивлений  $R_{конт}$  в зависимости от характеристик пористых структур и плотности теплового потока  $q$ .

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ, АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные из экспериментов результаты для различных КС представлены на рис. 2 и 3 в виде зависимостей разности (перепада) температур в контрольных точках по толщине измерительных цилиндров от времени эксперимента.

Наименьший перепад температур (рис. 2) наблюдался на образце 4, который обладал наибольшим значением коэффициента теплопроводности  $\lambda_{кк}$ . В то же время наибольшее термосопротивление по толщине КС имели образцы 2 и 3, имеющие относительно низкие значения  $\lambda_{кк}$ .

Серия экспериментов, выполненная с различными усилиями прижима КС к гладкой сплошной поверхности (рис. 3), показала, что

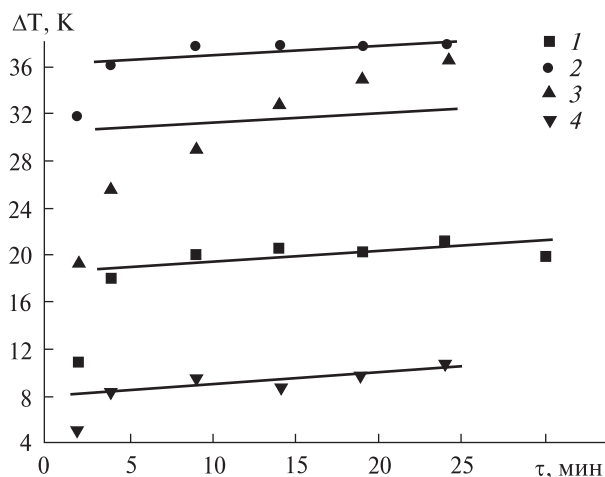


Рис. 2. Экспериментальные значения перепада температур для медных волоконных структур: 1 —  $\delta_{кк} = 0.5$  мм;  $\Theta = 84$  %;  $\lambda_{кк} = 3.7$  Вт/(м·К); 2 —  $\delta_{кк} = 1.0$  мм;  $\Theta = 71.2$  %;  $\lambda_{кк} = 8.9$  Вт/(м·К); 3 —  $\delta_{кк} = 1.1$  мм;  $\Theta = 83$  %;  $\lambda_{кк} = 2.8$  Вт/(м·К); 4 —  $\delta_{кк} = 2.3$  мм;  $\Theta = 59$  %;  $\lambda_{кк} = 35.2$  Вт/(м·К)

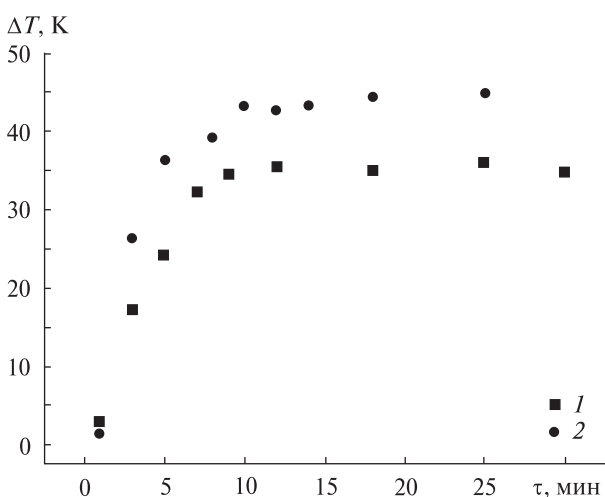
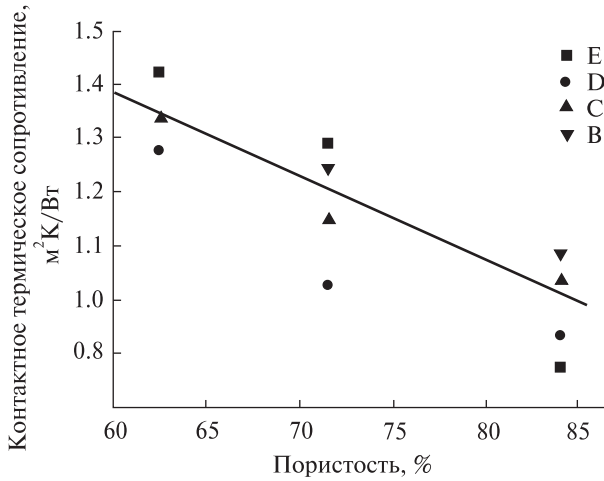


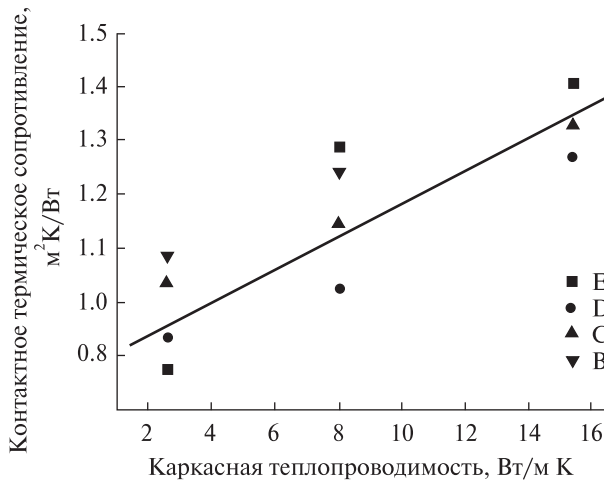
Рис. 3. Экспериментальные значения перепада температур в условиях прижима (квадратики) и прилегания (точки) медной КС к сплошной поверхности ( $\delta_{кк} = 0.5$  мм;  $\Theta = 84$  %)

качественное присоединение КС, осуществляемое способом припекания в соответствующих печах, снижает величину  $R_{конт}$ , по сравнению с плотным прилеганием неприпеченных КС, на 25...35 %.

На рис. 4 и 5 приведены результаты проведенных экспериментов по влиянию таких опреде-



**Рис. 4.** Влияние пористости  $\theta$  волоконных структур на величину контактного термического сопротивления  $R_{\text{конт}}$  в стационарном тепловом режиме. Разными значками обозначены серии экспериментов с различными КС. Кривая — результаты расчётов  $R_{\text{конт}}$  по формуле (1)



**Рис. 5.** Влияние каркасной теплопроводности пористых волоконных структур на величину контактного термического сопротивления в стационарном тепловом режиме в сериях экспериментов с различными КС. Кривая — результаты расчётов  $R_{\text{конт}}$  по формуле (2)

ляющих характеристик КС как пористость  $\theta$  (%) и каркасная теплопроводность  $\lambda_{\text{кск}}$  (Вт/(м·К)) на значения контактного термического сопротивления  $R_{\text{конт}}$  (м²·К/Вт).

Как следует из анализа полученных результатов, с ростом пористости  $\Theta$  значения контакт-

ных термических сопротивлений уменьшаются, что объясняется уменьшением площади контактной поверхности между сплошным и пористым элементами образца. При увеличении пористости КС, при прочих равных условиях, каркасная теплопроводность  $\lambda_{\text{кск}}$  уменьшается. Отсюда понятно, почему с увеличением каркасной теплопроводности (рис. 5) контактное термическое сопротивление растёт.

## ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты удовлетворительно обобщаются эмпирическими формулами (1) и (2) (см. рис. 4, 5) и позволяют определять значения контактных термических сопротивлений  $R_{\text{конт}}$ , необходимые для конструирования под заданные тепловые задачи различных теплообменных систем с использованием пористых капиллярных структур:

$$R_{\text{конт}} = 55 \cdot \Theta^{-0.9} (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}, \quad (1)$$

$$R_{\text{конт}} = 0.85 \cdot \lambda_{\text{кск}}^{0.15} (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}. \quad (2)$$

Здесь значения пористости КС  $\theta$  — в %, каркасной теплопроводности  $\lambda_{\text{кск}}$  — в Вт/(м·К).

## ВЫВОДЫ

Полученные экспериментальные результаты и обобщающие их формулы (1) и (2) могут использоваться для волоконных КС в диапазоне пористости  $\Theta = 50 \dots 95$  % и каркасной теплопроводности  $\lambda_{\text{кск}} = 0.5 \dots 20$  Вт/(м²·К).

*Работа выполнена при поддержке Украинского научно-технологического Центра по проекту № 3984 «Солнечные коллекторы на основе тепловых труб для подогрева воды: разработка, изготовление, исследования».*

1. Косторнов А. Г. Проницаемые металлические волоконные материалы. — Киев: Техника, 1983. — 127 с.
2. Косторнов А. Г., Шевчук М. С., Леженин Ф. Ф., Федорченко И. М. Экспериментальное исследование тепло- и электропроводности материалов из металлических волокон // Порошковая металлургия. — 1977. — № 3. — С. 45–49.
3. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. — М.: Энергия, 1976. — 344 с.

4. Семена М. Г., Гершуни А. Н., Зарипов В. К. Тепловые трубы с металловолокнистыми структурами. — Киев: Вища школа, 1984. — 128 с.
5. Шлыков Ю. П., Ганин Е. А., Царевский С. Н. Контактное термическое сопротивление. — М.: Энергия, 1977. — 328 с.
6. Singh B. S., Dybbs A., Lyman F. A. Experimental study of the effective thermal conductivity of liquid saturated sintered fiber metal wicks // Int. J. Heat and Mass Transfer. — 1973. — N 16. — P. 1–12.
7. Soliman M. M., Grauman D. W., Berenson P. I. Effective thermal conductivity of dry and liquid-saturated fiber metal wicks // ASME Paper. — 1970. — 70 — HT/Sp T-40. — P. 9.

Надійшла до редакції 03.09.08

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

CONTACT THERMAL RESISTANCE  
OF CAPILLARY STRUCTURES  
OF HEAT PIPES IN HEAT-EXCHANGE SYSTEMS  
OF SPACECRAFTS AND HELIOENERGETICS

We present our results of experimental research of the influence of characteristics of metal capillary structures (CS) connected with solid heating surfaces in imitation of the operation of heat pipes. The aim of the investigation was to determine the influence of a way of connection of various structures on the value of thermal resistance R in the places of «CS-surface» contact. Our results generalized as empirical formulas are necessary for designing heat pipes of space purpose.