

**Шевель Е.В., канд. техн. наук, Мельник Р.С.**

**Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев**  
пр. Победы, 37, корп. 5, 03056 Киев, Украина e-mail: euge28@bigmir.net

## **Исследование проницаемости металловолоконистых капиллярно-пористых структур вдоль плоскости войлокования**

Развитие техники и радиоэлектронной аппаратуры ставит новые задачи в области регулирования температурных режимов. Для этого активно используются тепловые трубы, основной структурной частью которых есть капиллярные пористые структуры. Пористые структуры также активно используются в других устройствах. Достаточно широко они используются в качестве фильтров. При использовании пористых структур учитывают их характеристики: пористость, наличие закрытых пор и т.д. Проницаемость структур является одной из важнейших характеристик, которая используется при расчетах тепловых труб. На данном этапе развития начинается использование капиллярных структур, изготовленных из волокон, диаметр которых меньше 10 мкм. Проницаемость таких структур мало исследована. В данной статье описываются результаты исследования проницаемости таких структур. *Библ. 4, рис. 2, табл. 2.*

**Ключевые слова:** капиллярно-пористая структура, проницаемость, тепловая труба.

Современное развитие электроники и оптоволоконной техники проходит в направлении уменьшения размеров и увеличения мощности устройств, что приводит к повышению уровня их тепловыделения. Увеличение удельных тепловых потоков значительно усложняет обеспечение температурных режимов, необходимых для нормального функционирования радиоэлектронной аппаратуры и отдельных, наиболее теплонагруженных ее компонентов.

Для обеспечения нормального функционирования теплонагруженных элементов радиоэлектронной аппаратуры используются различные методы регулирования температурных режимов. Активные методы требуют дополнительного источника питания, что увеличивает их габаритные размеры. В условиях современной тенденции уменьшения размеров радиоэлектронной аппаратуры использование таких методов не является оправданным. В таких случаях используют методы пассивного охлаждения, которые не требуют дополнительных источников энергии, что дает им существенное преимущество перед активными методами для использования в компактных устройствах.

Наиболее распространенными устройствами пассивного охлаждения являются термосифон и тепловые трубы [1]. Основным конструктивным элементом тепловой трубы являются капиллярная структура, которая обеспечивает перенос теплоносителя из зоны охлаждения в зо-

ну нагрева и равномерно распределяет его по всей ее поверхности [2].

### **Постановка задачи**

Одним из видов капиллярных структур, которые хорошо себя зарекомендовали и достаточно подробно изучены, являются металловолоконистые [3]. Они успешно применялись в конструкциях тепловых труб в течение длительного времени. Существуют экспериментально полученные зависимости для определения пористости, проницаемости, капиллярного напора. Эти структуры изготавливались в основном из волокон диаметром около 30 мкм, а на данном этапе развития промышленности возможно изготовление структур на основе сверхтонких волокон диаметром 6–10 мкм. Для таких капиллярных структур данные по приведенным выше характеристикам мало представлены в литературе либо отсутствуют.

Цель данного исследования — определить одну из важных характеристик металловолоконистой капиллярно-пористой структуры — коэффициент проницаемости.

### **Результаты исследований**

Исследуемые образцы представляли собой плоские диски капиллярной структуры с припеченными к обеим поверхностям тонкими пластинами из нержавеющей стали. Характеристики опытных образцов представлены в табл.1.

**Таблица 1. Характеристики образцов**

Номер образца	Пористость, %	Толщина, мм	Диаметр волокон, мкм	Диаметр образца, мм
1	93,2	5,38	22	60,3
2	96,5	3,52	12	58,6
3	97,9	1,35	6,5	57,4

Стенд для исследования проницаемости структур (рис.1) представляет собой напорный бак с жидкостью (1), из которого через регулирующийся клапан (3) жидкость подается в напорный цилиндр (2). Последний – полый стеклянный цилиндр, который обеспечивает равномерную подачу жидкости в исследуемый образец (10). Благодаря отводам (4–7) можно устанавливать заданный уровень жидкости, то есть всегда четко определять гидростатический напор, действующий на исследуемый образец (10). К отводам (4–7) присоединяется бак (9) для сбора избытка жидкости. Жидкость после образца попадает в воронку (11) и в мерную емкость (12). Зажим (8) используется при смене образца, чтобы не опустошать напорный цилиндр (2).

Опытный элемент (10) состоит из образца металловолоконистой структуры (14), который припечен между стальных пластин (13, 15). Верхняя пластина имеет по центру отверстие, к которому присоединяется трубка (17) для подачи жидкости в исследуемый образец.

В качестве рабочей жидкости использовался 96 %-й раствор этилового спирта, образцы

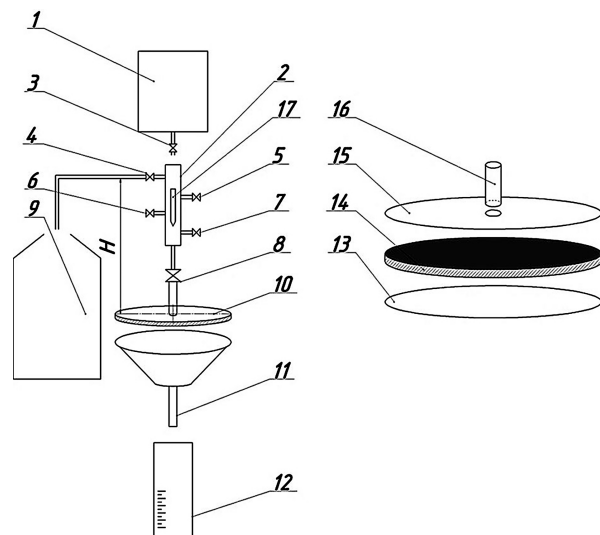


Рис.1. Стенд для определения коэффициента проницаемости вдоль плоскости образца: 1 – напорный бак; 2 – напорный цилиндр; 3 – клапан; 4–8 – зажимы; 9 – бак для сбора избытка жидкости; 10 – испытательный элемент; 11 – лейка; 12 – мерная емкость; 13 – нижняя пластина; 14 – испытательный образец; 15 – верхняя пластина; 16 – подводная трубка; 17 – термометр.

замачивались в нем на 1–2 сут для вытеснения воздуха из структуры. Перед каждым экспериментом исследуемый элемент четко горизонтировался, таким образом исключалась гравитационная составляющая, которая не учитывалась при дальнейшей обработке экспериментальных данных. Далее на исследуемый элемент (10) подавалась жидкость из напорного цилиндра (2), в котором измерялась ее температура с помощью термометра (17). Уровень жидкости (H) регулировался зажимами (4–7). Каждый образец исследовался при пяти уровнях жидкости, при каждом из которых было проведено по три испытания. После этого находилась объем жидкости и окончательно объемный расход через образец.

В ходе проверки пористости и геометрии образцов были обнаружены отклонения от запланированных значений. Для дальнейших расчетов использовались размеры, которые были определены с помощью измерительного микроскопа. Пористость каждого образца определялась объемно-весовым методом.

Для данных опытов коэффициент проницаемости  $K$  ( $m^2$ ) определялся по формуле:

$$K = [v V_1 \ln (r_0/r_i)] / (2\pi g H \delta),$$

где  $v$  – кинематический коэффициент вязкости,  $m^2/c$ ;  $V_1$  – объемный расход,  $m^3/c$ ;  $r_0$  – радиус образца, м;  $r_i$  – радиус подачи жидкости, м;  $H$  – высота столба жидкости, м;  $\delta$  – толщина образца, м.

Полученные данные (табл.2) сравнивались с результатами, представленными в [3]. На рис.2 приведено сравнение полученных результатов с литературными данными.

Как видно из графика, значение коэффициента проницаемости возрастает с увеличением пористости образцов, а также с ростом диаметров волокон. Это объясняется увеличением эффективных диаметров пор, при котором увеличивается общее проходное сечение для образца, а также уменьшаются капиллярные силы. При одинаковых значениях пористости для образцов с диаметром волокон 22 мкм (образец 1) значение коэффициента проницаемости, полученное

**Таблица 2. Коэффициенты проницаемости опытных образцов**

Номер образца	Диаметр волокон, мкм	Пористость, %	Коэффициент проницаемости, $\times 10^{-11}, m^2$
1	22	93,2	21,5
2	12	96,5	15,3
3	6,5	97,9	4,88

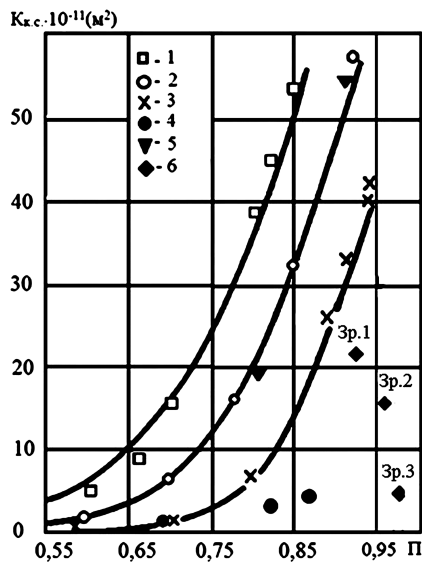


Рис.2. Зависимость коэффициента проницаемости металловолокнистых структур от пористости при разных величинах  $d_b$ , мкм: 1 – 70; 2 – 40; 3 – 20; 4 – 10; 5 – 33 [4]; 6 – экспериментальные данные образцов, приведенных в табл.2.

в данной работе, ниже, чем для образцов с диаметром волокон 20 мкм, полученное в работе [3]. Это несоответствие является следствием различных направлений фильтрации жидкости по отношению к плоскости войлокования, а именно: в данной работе фильтрация происходила в плоскости войлокования, а в работе [3] – перпендикулярно этой плоскости.

### Выводы

При расчете кризиса работы тепловых труб по гидравлическому пределу данными, полученными в [3], можно пользоваться, если фильтрация происходит поперек волокон, в противном случае результаты дают определенную погрешность. Целесообразность применения капиллярных структур с диаметром волокон меньше 10 мкм заключается в уменьшении средних диаметров пор, при одновременном увеличении пористости. Это повышает капиллярный напор, при неизменном значении коэффициента проницаемости.

### Список литературы

1. Чи С. Тепловые трубы : Теория и практика / Пер. с англ. В.Я. Сидорова. – М. : Машиностроение, 1981. – 207 с.
2. Васильев Л.Л., Гракович Л. П., Рабецкий М. И. и др. Влияние пористого покрытия на испарение из капиллярных канавок // XIV Минский международный форум по тепло- и массообмену : Тезисы докладов и сообщений. – 2012. – Т. 1, ч. 2. – Минск : Институт тепло- и массообмена им. А.В.Лыкова НАН Беларуси.
3. Семена М.Г., Гершуни А.Н., Зарипов В.К. Тепловые трубы с металловолокнистыми капиллярными структурами. – Киев : Выща шк., 1984. – 215 с.
4. Langston L.S., Kunz H.R. Liquid transport properties of some heat pipe wicking materials // ASME Paper. – 1969. – № 17. – P. 1–11.

Поступила в редакцию 01.04.15

**Шевель Є.В., канд. техн. наук, Мельник Р.С.**

*Національний технічний університет України «КПІ»  
пр. Перемоги, 37, корп. 5, 03056 Київ, Україна, e-mail: euge28@bigmir.net*

## Дослідження проникності металоволокнистих капілярно-пористих структур вздовж площини войлокування

Розвиток техніки та радіоелектронної апаратури ставить нові завдання в області регулювання температурних режимів. Для цього активно використовуються теплові труби, основною структурною частиною яких є капілярні пористі структури. Пористі структури також активно використовуються в інших пристроях. Досить широко вони використовуються як фільтри. При використанні пористих структур зважають на їх характеристики: пористість, наявність закритих пор та ін. Проникність структур є однією з найважливіших характеристик, що використовується при розрахунках теплових труб. На даному етапі розвитку розпочинається використання капілярних структур, виготовлених з волокон, діаметр яких менше 10 мкм. Проникність таких структур мало досліджена. В даній статті описуються результати та дослідження проникності таких структур. *Бібл. 4, рис.2, табл. 2.*

**Ключові слова:** капілярно-пориста структура, проникність, теплова труба, металеві волокна.

**Shevel E.V.**, Candidate of Technical Sciences, **Melnyk R.S.**

**National Technical University of Ukraine «KPI», Kiev**

37, Pobedy Ave., 03056 Kiev, Ukraine, e-mail: euge28@bigmir.net

## Research of Metal Fibrous Capillary Porous Structures Permeability along Felting Surface

Development of technology and electronic equipment poses new challenges in the field of temperature regulation. Heat pipes are widely used, for solving these tasks. The main structural part of heat pipes is capillary porous structure. Porous structures are widely used in various devices. They are also widely used as filters. When porous structures are used their characteristics such as porosity, the presence of closed pores, etc. are taken into account. Structures permeability is one of the most important characteristics which is used in the calculation of heat pipes. At this stage of development the active application of capillary structures which are produced from fibers with a diameter of less than 10 microns occurs. The permeability of these structures is less investigated. This article describes the results and such structures permeability research. *Bibl. 4, Fig. 2, Table 2.*

**Key words:** capillary porous structure, permeability, heat pipe, metal fibres.

### References

1. Chi C. Teplovie trubi : Teoria i praktika. — Moscow : Mashinostroenie, 1981, 207 p. (Rus.)
2. Vasiliev L.L., Grakovich L.P., Rabetskiy M.I., Tulin D.V., Afanasieva N.A. Vlianie poristogo pokrytiya na ispareniye iz kapillyarnyh kanavok, *XIV Minskiy mejdunarodnyj forum po teplo- i massoobmeny : Tezisi dokladov i soobcheniy*, 2012, 1, iss. 2, Minsk : Institut teplo- i massoobmena im. A.V.Lykova NAN Belarusi. (Rus.)
3. Semena M.G., Hershuni A.N., Zaripov V.K. Teplovie trubi s metalovoloknistumi kapillarnumi strukturami, Kiev : Vischa shkola, 1984, 215 p. (Rus.)
4. Langston L.S., Kunz H.R. Liquid transport properties of some heat pipe wicking materials, *ASME Paper*, 1969 (17), pp. 1–11.

Received April 1, 2015