

## ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРИСТЫХ ТОНКОВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

К. т. н. А. Н. Гершуни, к. т. н. А. П. Нищик

НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Украина, г. Киев  
politekhins@gmail.com

*Приведены результаты исследования гидродинамических характеристик металлических тонковолокнистых капиллярных структур, в том числе коэффициента жидкостной проницаемости, в зависимости от исходных структурных параметров (пористости, предельной пористости, диаметра и длины волокон).*

*Ключевые слова: система охлаждения, металлическая капиллярная структура, гидродинамические характеристики.*

Высокоэффективными средствами обеспечения тепловых режимов приборов и устройств электронной техники являются системы охлаждения на основе тепловых труб (ТТ) с металловолоконистыми капиллярными структурами (МВКС) [1]. Для проектирования и оптимизации характеристик таких ТТ необходима информация о характеристиках МВКС. В [2] рассмотрены основные результаты исследования структурных характеристик МВКС. Целью данной работы является получение информации о гидродинамических характеристиках таких капиллярных структур, в частности определение и исследование коэффициента жидкостной проницаемости МВКС.

Движение жидкого теплоносителя в МВКС представляет собой процесс капиллярной фильтрации, характеризуемый ламинарным режимом течения. Такое движение описывается одночленным линейным уравнением фильтрации (законом Дарси), которое для одномерного течения имеет вид

$$W = \frac{K_{\text{кк}}}{\mu_{\text{ж}}} \frac{dp}{dx}, \quad (1)$$

где  $W$  — скорость фильтрации, как отношение объемного расхода жидкости к полной площади сечения пористого тела;  $K_{\text{кк}}$  — коэффициент жидкостной проницаемости;  $\mu_{\text{ж}}$  — коэффициент динамической вязкости жидкости;  $dp/dx$  — градиент давления.

Из уравнения (1) следует, что коэффициент жидкостной проницаемости  $K_{\text{кк}}$  является коэффициентом пропорциональности между градиентом давления и скоростью фильтрации и по существу характеризует проводимость капиллярной структуры относительно жидкости.

Ввиду сложности аналитического исследования жидкостную проницаемость и ее зависимость от структурных параметров определяют, как правило, экспериментально. При этом используется принудительное движение жидкости через пористое тело или течение жидкости под действием гидростатического напора. Коэффициент  $K_{\text{кк}}$  вычисляют из зависимости (1), используя измеренные фильтрационные характеристики, а затем устанавливают функциональную связь полученных значений с определяющими параметрами.

Экспериментальное исследование жидкостной проницаемости в направлении, перпендикулярном плоскости войлокования МВКС, осуществлялось на опытных образцах цилиндрической формы, а в направлении, параллельном плоскости войлокования, — на образцах в виде дисков. Материалы волокон — медь и нержавеющая сталь. В качестве рабочей жидкости использовались вода, этанол, ацетон. Течение жидкости через пористые образцы осуществлялось под действием гидростатическо-

го напора. Различия методик проведения исследований для указанных направлений фильтрации связаны с тем, что фильтрация через опытные образцы в форме дисков является не аксиальной, как для цилиндрических образцов, а радиальной, т. е. от центральной зоны диска к периферийной. Если скорость аксиальной фильтрации по высоте цилиндрического образца неизменна, то скорость радиальной фильтрации по радиусу образца в форме диска уменьшается в направлении от центральной зоны к периферии диска, поскольку в этом направлении увеличивается полная площадь сечения образца.

Экспериментальные исследования жидкостной проницаемости выявили следующее.

1. В исследованном диапазоне гидростатического перепада давления 0,4—4,4 кПа зависимость объемного расхода жидкости от перепада давления для всех опытных образцов имеет четко выраженный линейный характер, что свидетельствует о ламинарном режиме течения.

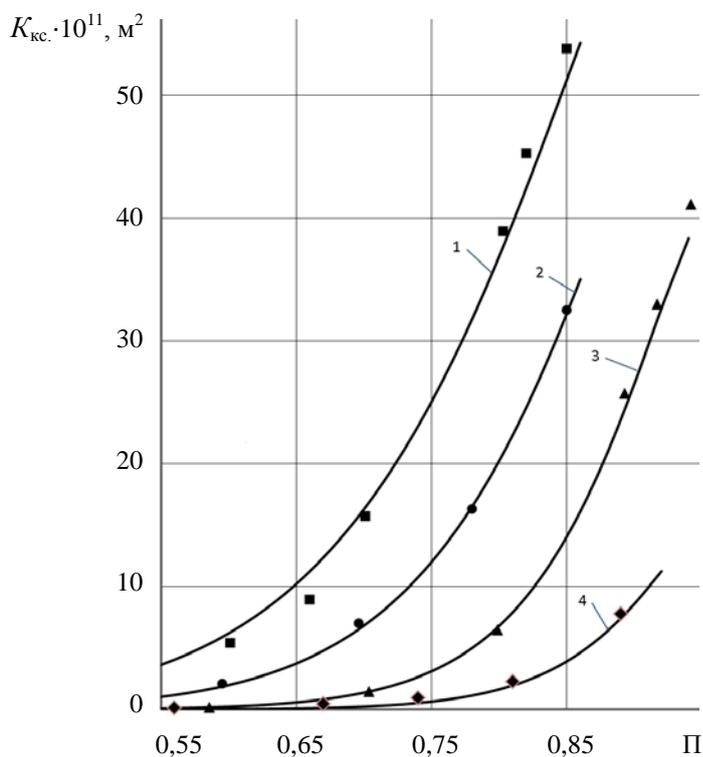
2. Для каждого из опытных образцов сравнение объемных расходов жидкости и газа показывает, что расход жидкости меньше расхода газа на величину, которая превышает ожидаемую, исходя из соотношения вязкостей жидкости и газа. Это явление закономерно для фильтрационных процессов и обусловлено так называемым фильтрационным эффектом.

3. Облитерация поровых каналов практически отсутствует.

4. Коэффициент жидкостной проницаемости является константой в линейном законе Дарси.

5. Отсутствует заметное влияние на коэффициент жидкостной проницаемости материала волокон и фильтрующей жидкости при фиксированных исходных структурных параметрах.

Эксперименты показали, что коэффициент жидкостной проницаемости, как и диаметр пор [2], является функцией пористости и размеров волокон МВКС. Результаты, приведенные на рисунке, показывают возрастающий характер зависимости  $K_{\text{жс}}$  от пористости  $\Pi$ , диаметра  $d_g$  и длины волокон  $l_g$ , причем влияние пористости на величину  $K_{\text{жс}}$  наибольшее, а длины волокон — наименьшее.



Зависимость коэффициента жидкостной проницаемости от пористости МВКС

при различных значениях размеров волокон  $d_g$ ,  $l_g$ :

1 —  $d_g = 70$  мкм,  $l_g = 3$  мм; 2 — 40 мкм, 3 мм; 3 — 20 мкм, 3 мм; 4 — 10 мкм, 2 мм

Математические выражения, характеризующие аналитические модели проницаемости для структур, образованных из цилиндрических частиц, имеют вид функции  $K_{\text{кв}}/d_e^2 = f(\Pi)$ . К таким моделям можно отнести модель гидравлического радиуса, тормозную и ячеечную модели. Проведенный анализ показывает, что ни одна из этих моделей удовлетворительно не описывает полученные экспериментальные данные, которые расслаиваются по величине отношения  $l/d_e$ . Это объясняется особенностями строения реальной структуры, которые можно учесть, принимая во внимание дополнительное влияние исходных структурных параметров на проницаемость. Указанные особенности МВКС проявляются при приближении пористости к предельному значению и представляют собой изменение ориентации волокон относительно формирующей силы при войлоковании, а также усиление неравномерности структуры. Кроме того, указанные модели не учитывают наличие фильтрационного эффекта, и поэтому они больше соответствуют реальной картине газовой проницаемости, чем жидкостной. Можно предположить, что фильтрационный эффект будет иметь большее влияние при меньших размерах пор (и соответственно, при меньших значениях проницаемости).

Проведенные сравнения показывают, что ячеечная модель течения, перпендикулярного осям цилиндров, точнее описывает полученные для МВКС экспериментальные данные. Примем эту модель за основу и учтем выявленные особенности строения реальных структур функцией величины, которая устанавливает степень близости строения данной структуры и структуры с предельной пористостью с теми же размерами волокон. Такой величиной может быть отношение  $(1-\Pi)/(1-\Pi_{\text{пр}})$ , которое, по сути, является степенью сжатия при прессовании структуры с предельной пористостью  $\Pi_{\text{пр}}$  до структуры с заданной пористостью  $\Pi$ .

В результате сопоставления экспериментальных данных с расчетными по указанной базовой модели и проведения соответствующего анализа получено обобщающее выражение для коэффициента жидкостной проницаемости полностью насыщенных МВКС:

$$K_{\text{кв}} = \frac{d_e^2}{16} \left[ \frac{1-\Pi}{1+(1-\Pi)^2} - \frac{1+\ln(1-\Pi)}{2(1-\Pi)} \right] \left( \frac{(1-\Pi)}{(1-\Pi_{\text{пр}})} \right)^2 \exp \left[ -1,45 \frac{1-\Pi}{(1-\Pi_{\text{пр}})^{0,7}} \right]. \quad (2)$$

В этой формуле первые два сомножителя являются математическим выражением базовой ячеечной модели, а последние два учитывают особенности строения реальных МВКС. Расхождение экспериментальных данных с результатами расчетов по формуле (2) не превышает  $\pm 20\%$ .

Таким образом, в результате исследования гидродинамических характеристик металлических тонковолокнистых капиллярных структур для ТТ систем охлаждения получена зависимость коэффициента жидкостной проницаемости от исходных структурных параметров.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Семена М.Г., Гершуни А.Н., Зарипов В.К. Тепловые трубы с металловолокнистыми капиллярными структурами. – Киев: Вища шк. Головное изд-во, 1984.
2. Гершуни А.Н., Нищик А.П. Структурные характеристики металлических пористых тонковолокнистых материалов для систем охлаждения электронной аппаратуры // Труды XVII Международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии». — Украина, Одесса. — 2016. — С. 170—171.

A. N. Gerchuni, A. P. Nishchik

#### **Hydrodynamic characteristics of metal porous thin fibrous materials for cooling systems of electronic equipment**

*The report presents the results of a study of hydrodynamic characteristics of metal thin fibrous capillary structures, including the liquid permeability coefficient, depending on the initial structural parameters (porosity, limiting porosity, diameter and length of fibers).*

*Keywords: cooling system, the metallic capillary structure, hydrodynamic characteristics.*