

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПРОНИЦАЕМОСТИ МЕТАЛЛОВОЛОКНИСТЫХ КАПИЛЛЯРНЫХ СТРУКТУР ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ РЕСИВЕРОВ

В разработках систем терморегулирования приборов космической техники, энергетики, в частности, гелиоэнергетики, систем охлаждения электронных приборов широко используются тепловые трубы (ТТ) или устройства на их основе, служащие для передачи теплоты от ее источника к стоку [1]. Одним из основных элементов тепловых труб является капиллярная структура (КС), которая выполняет функцию транспортировки жидкости и обеспечивает условия фазового перехода жидкость-пар. КС во многом определяет эффективность и надежность функционирования тепловой трубы. На кафедре атомных электростанций и инженерной теплофизики Киевского политехнического института более чем за 30-и летний период накоплен огромный опыт по разработке тепловых труб с использованием металловолоконистых капиллярных структур (МВКС), которые сочетают в себе хорошие транспортные характеристики и высокий капиллярный напор. Результаты разработок института включают, кроме технологии изготовления действующих образцов ТТ, и расчетные зависимости для определения оптимальных характеристик МВКС и тепловых труб [2]. Однако для создания ряда устройств, в частности гелиоэнергетики, сейчас разрабатываются новые методики изготовления КС, отличные от тех, для

которых были получены базовые расчетные зависимости.

Традиционный способ изготовления МВКС – воздушное войлокование путем засыпки волокон на плоскую поверхность с последующим прессованием полученного массива по плоскости, т.е. по направлению засыпки, до достижения необходимой пористости. Технология изготовления КС для разрабатываемых солнечных ресиверов предусматривает засыпку не на плоскость, а в зазор (плоская щель, кольцевой зазор), а прессование происходит перпендикулярно направлению засыпки. К тому же, несмотря на то, что МВКС относятся к хаотичным структурам, очевидно, существует анизотропность структурных характеристик, связанная с различными факторами, влияющими на формирование КС в процессе ее изготовления. Особенно важным это является для проницаемости, величина которой будет зависеть от направления фильтрации.

Одна из методик определения величины коэффициента проницаемости в зависимости от направления фильтрации, предложена в работе [3], где определялась проницаемость вдоль плоскости войлокования и поперек плоскости войлокования МВКС. Однако в ней не рассмотрен технологический вариант изготовления КС – войлокование в зазор.

Целью данной работы является экспериментальное определение жидкостной проницаемости МВКС, изготовленных по новой технологии, и определение возможности применения для этих структур расчетных зависимостей для коэффициента проницаемости, полученных в [2, 3]. Кроме того, в данной работе исследование проводилось как на отдельно изготовленных образцах КС, так и на КС, установленных в корпусе ТТ. Последние данные представляют особый интерес, т.к. подобные исследования и методика их проведения в литературе отсутствуют.

Опыты проводились на экспериментальных образцах, в качестве которых использовались (рис. 1, табл. 1):

- образцы, вырезанные из цилиндра, фильтрация осуществлялась в направлении, перпендикулярном образующей (рис. 1 а);

- пластина (рис. 1 б), фильтрация осуществлялась вдоль плоскости в различных направлениях, а для вырезанных из нее образцов - в направлении, перпендикулярном плоскости;

- оболочки труб с установленной капиллярной структурой, фильтрация осуществлялась вдоль оси трубы (рис. 1 в).

Все экспериментальные образцы изготавливались методом засыпки в зазор монодисперсных волокон с последующим спеканием в вакууме при температуре 1200 °С и прессованием по плоскости, перпендикулярной засыпке, до достижения необходимой пористости. Волокна, диаметром $d=30$ мкм, длиной $l=3$ мм изготовлены из стали марки 316L.

Экспериментально коэффициент проницаемости определялся как коэффициент пропорциональности между скоростью

фильтрации и градиентом давления в уравнении Дарси по формуле:

$$K = \frac{\mu \cdot A \cdot l}{F},$$

где μ - динамический коэффициент вязкости, [Па·с];

l - длина фильтрации, [м];

F - площадь поперечного сечения капиллярной структуры, [м²];

A - коэффициент в уравнении:

$$V = A \cdot \Delta P, \quad (1)$$

полученном при обобщении зависимости объемного расхода V , [м³/с] от перепада давления ΔP , [Па] методом наименьших квадратов.

Перепад давления ΔP рассчитывался по высоте гидростатического напора с учетом гидравлических потерь:

$$\Delta P = P_c - \Delta P_{\text{гидр}},$$

где $P_c = \rho g H$ - гидростатический напор жидкости, [Па];

ρ - плотность жидкости, [кг/м³];

H - высота столба жидкости над КС, [м];

$\Delta P_{\text{гидр}}$ - гидравлические потери в линии протекания жидкости, [Па].

Для проведения экспериментальных исследований по определению коэффициента проницаемости была создана экспериментальная установка, аналогичная, описанной в [4].

В установке обеспечивалась фильтрация жидкости через образец, исключая ее байпасирование, поддержание стабильного гидростатического напора, измерение расхода и перепада давления. Коэффициент динамической вязкости и плотность жидкости определялись по [5].

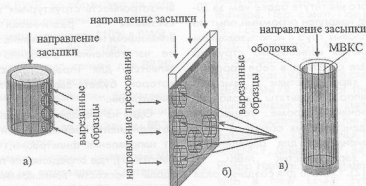


Рис. 1. Образцы капиллярных структур:

а) цилиндр, б) пластина, в) оболочка трубы с КС

Перечень исследуемых образцов и обозначения на графике (рис. 2)

Обozn.	Характеристики исследуемых элементов и направление фильтрации
1 ■	Пластина, вдоль направления засыпки б)
2 △	Пластина, перпендикулярно направлению засыпки, вдоль плоскости а)
3 ×	Образцы из пластины, перпендикулярно плоскости пластины, в)
4 ■	Образцы из цилиндра, перпендикулярно образующей цилиндра, в)
5 ◇	Труба S2, L=125 мм, по всей длине, б)
6 ◆	Труба S3, L=140 мм, по всей длине, б)
7 ○	Труба S4 с продольными пазами на КС, L=97 мм, по всей длине, б)
8 ●	Труба S6, перфорированная отверстиями, L=450 мм, по всей длине, б)

В связи с широким диапазоном длины фильтрации, от 4 мм до 450 мм, с целью более точного измерения расхода в (1) использовались различные рабочие жидкости - этиловый и бензиловый спирты. Этиловый спирт использовался при исследовании пластины и труб с КС, т.е. в случае достаточно большой длины фильтрации, а бензиловый, вязкость которого значительно выше - для образцов из пластины и из цилиндра, когда длина фильтрации незначительна.

Для предотвращения образования пузырьков газа в КС образцы перед заполнением рабочей жидкостью вакуумировались.

Полученные результаты представлены на рис. 2, здесь также показаны зависимости коэффициента проницаемости от пористости исследуемого образца, полученные на

основании расчета по формулам, предложенным в [2,3].

Полученные данные для образцов КС (образцы 1 - 4) коррелируются с данными [2,3], однако полного соответствия не наблюдается. Причиной расхождений, очевидно, является различная ориентация волокон в массиве структуры, а также то, что в данном случае при изготовлении КС прессование производилось перпендикулярно направлению засыпки (рис. 1), в то время как в предыдущих работах прессование совпадало с направлением засыпки. Общей закономерностью является тот факт, что коэффициент проницаемости при фильтрации в направлении, перпендикулярном засыпке, т.е. вдоль плоскости войлокования (случай а) несколько выше, чем вдоль засыпки, т.е. перпендикулярно плоскости войлокования (случай б).

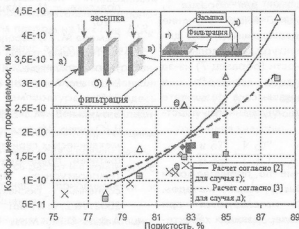


Рис. 2. Экспериментальные данные по определению коэффициента проницаемости

Особый интерес представляют данные по исследованию проницаемости КС, установленной в корпусе ТТ (рис. 3), т.к. в этом случае мы получаем наиболее достоверные результаты, учитывающие особенности изготовления и соединения КС с оболочкой. Получение таких данных усложняется необходимостью обеспечить фильтрацию рабочей жидкости только через КС, исключая байпасирование, в условиях криволинейной поверхности и значительной длины. Разработанная нами методика позволяет получить экспериментальные значения коэффициента проницаемости для оболочек с внутренним диаметром до 80 мм и длиной до 450 мм. При этом КС и оболочка в процессе испытаний не подвергаются никаким изменениям и в дальнейшем они могут проходить все технологические стадии изготовления ТТ.

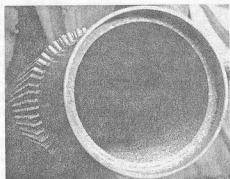


Рис. 3. Образец №5 – Труба 56

Полученные результаты по коэффициенту проницаемости структуры в составе изделия (образцы 5,6,8) позволяют заключить, что он практически совпадает со значениями, полученными для образца 1, (случай б). Несколько выше значение коэффициента проницаемости получено для трубы, имеющей структуру с продольными канавками на поверхности (образец 7) из-за возможной фильтрации жидкости в микрощелях, образовавшихся в результате неполной блокировки внутреннего пространства оболочки.

Выводы

Полученные данные по проницаемости МВКС, изготовленных новым методом засыпки в зазор, используются при прогнозировании теплопередающих характеристик по методике [1] тепловых труб с натрием на температурном уровне

700...900°C. Новый способ изготовления МВКС может быть применен для изготовления тепловых труб произвольной (например, сфероидальной) конфигурации, где происходит трехмерная фильтрация теплоносителя, и данные по коэффициенту проницаемости в различных направлениях имеют решающее значение для расчета таких устройств.

Экспериментальные данные по коэффициенту проницаемости новых МВКС, в основном, коррелируются с [2], однако представленные результаты получены на стадии отработки технологии изготовления МВКС и носят предварительный, или оценочный характер. Для получения обобщающих зависимостей типа [2] необходимы дополнительные исследования значительного количества изготовленных по однотипной технологии образцов в диапазоне пористости 70...90 %.

Благодарность

Результаты статьи получены в ходе совместного проекта №Т1-0013UA "Development of Advanced Heat Pipe Wicks for High Temperature Solar Receivers", поддерживаемого Министерством Энергетики США в рамках программы «Инициативы по нераспространению вооружений» (IPP). Участниками проекта являются Sandia National Laboratories (США), National Renewable Energy Laboratory (США) и НТУУ «КПИ», Лаборатория тепловых труб (Украина).

Литература

1. Чи С. Тепловые трубы. Теория и практика. – М.: Машиностроение, 1981. – 207 с.
2. Семена М. Г., Гершуни А. Н., Зарипов В. К. Тепловые трубы с металловолоконистыми капиллярными структурами.- К. : Вища шк. Головное издательство, 1984.- 215 с.
3. Батуркин В. М., Зарипов В. К., Кравец В.Ю. и др. Исследование структурных и механических свойств металловолокнистых фитилей, предназначенных для высокотемпературных тепловых труб – солнечных ресиверов.- Энергетика, 2002, № 2, с. 41-46.
4. Adkins D.R., Moss T.A., Andracka C.E., Andreas N.H., Cole H.M., An examination of metal felt wick for heat-pipe applications.

ISSN 1813-5420

Енергетика: економіка, технології, екологія

– Sandia National Laboratories, SAND 94
0657 C. – P. 553-558.

5. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойст-
ва газов и жидкостей: Справочное посо-

бие /Пер.с англ. под ред. Б.И. Соколова.
-Л.: Химия, 1982. - 592с.