



Алексей О. С.

# ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ КИПЕНИЯ В ТЕПЛОВОЙ ТРУБЕ

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния диаметра и длины волокон медной метало-волоконистой структуры на процесс теплоотдачи в зоне нагрева миниатюрной тепловой трубы. Установлен характер влияния внешних условий охлаждения тепловой трубы на ее внутренние характеристики, а именно интенсивность теплоотдачи при фазовых переходах.

**Ключевые слова:** миниатюрная тепловая труба, зона нагрева, коэффициент теплоотдачи, пористая структура.

## 1. Введение

Миниатюрные тепловые трубы нашли применение в качестве элементов пассивных систем охлаждения радиоэлектронной аппаратуры, компьютерной и космической техники. Обладая небольшими массогабаритными показателями, они способны отводить значительные тепловые потоки, обеспечивая нормальный температурный режим теплонагруженных элементов. Кроме того, возможность изготовления тепловых труб любых форм и размеров позволяет эффективно применять их для охлаждения систем сложной конфигурации.

## 2. Современное состояние проблемы

В связи с широкой областью применения миниатюрных тепловых труб (МТТ) в литературе представлено значительное количество данных по исследованию теплопередающих характеристик данных устройств. Основное внимание уделяется изучению влияния режимных характеристик [1, 2], геометрических размеров МТТ [3] на распределение температур, общее термическое сопротивление или тепловую проводимость. Также представлены данные о максимальной теплопередающей способности МТТ [4, 5].

Вместе с этим, значительный интерес представляют внутренние процессы, протекающие в тепловых трубах, в частности интенсивность процесса фазового перехода в зонах нагрева МТТ. Так, в литературе представлены данные о влиянии физических параметров (рабочей температуры) [6], положения в пространстве [7], эффективной длины и других факторов [8, 9] на коэффициент теплоотдачи в зоне нагрева МТТ.

В данной работе проведено изучение характера влияния размеров волокон капиллярной структуры (КС) на интенсивность теплоотдачи в зоне нагрева МТТ.

## 3. Экспериментальная установка и опытные образцы

В качестве объекта исследования были выбраны миниатюрные тепловые трубы с метало-волоконистой капиллярной структурой. Характеристики МТТ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики исследованных тепловых труб

| Номер образца               | 1       | 2  | 3  | 4  |
|-----------------------------|---------|----|----|----|
| Общая длина, мм             | 428     |    |    |    |
| Длина зоны нагрева, мм      | 99.5    |    |    |    |
| Длина зоны конденсации, мм  | 83      |    |    |    |
| Внешний диаметр ТТ, м       | 6       |    |    |    |
| Толщина стенки, мм          | 0.5     |    |    |    |
| Диаметр парового канала, мм | 3       |    |    |    |
| Пористость КС, %            | 74      | 80 | 80 | 80 |
| Диаметр волокна КС, мкм     | 50      | 50 | 50 | 70 |
| Длина волокна КС, мм        | 3       | 3  | 7  | 7  |
| Теплоноситель               | Метанол |    |    |    |

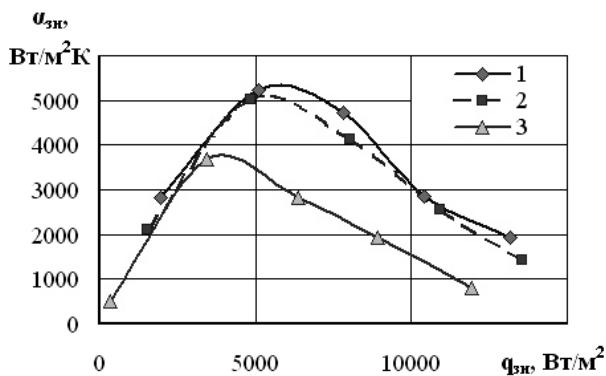
Описание экспериментальной установки, методик проведения эксперимента и обработки опытных данных детально представлены в [2, 7].

При исследованиях МТТ располагались горизонтально, что позволяло нивелировать влияние массовых сил на процессы, протекающие в тепловых трубах.

## 4. Результаты исследования

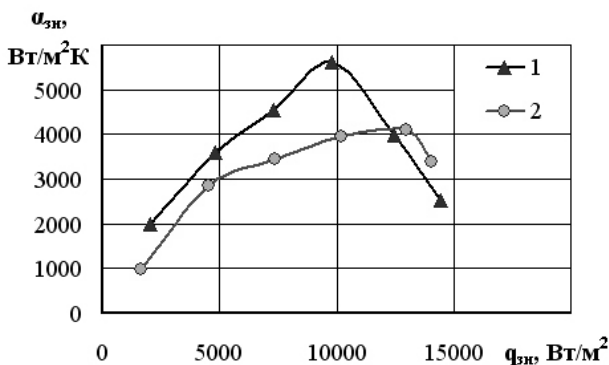
Анализ экспериментальных данных показал, что на интенсивность теплоотдачи в зоне нагрева МТТ изменение внешних условий теплообмена в зоне охлаждения тепловой трубы оказывает несущественное влияние (рис. 1, кривые 1, 2). Так, увеличение расхода охлаждающей жидкости  $G$  более, чем в 1,5 раза не привело к существенному изменению средних температур зон нагрева, транспорта и конденсации МТТ, в связи с чем, коэффициенты теплоотдачи практически не изменились.

Однако при определенных условиях увеличение расхода приводит к ухудшению условий теплообмена внутри тепловой трубы (рис. 1, кривая 3,  $q_{\text{н}} > 5000$ ), что, вероятно, можно объяснить следующим образом. При увеличении интенсивности отвода теплоты от зоны охлаждения тепловой трубы, конденсация пара внутри нее происходит интенсивнее. Вследствие этого происходит накопление теплоносителя в зоне конденсации и, соответственно, нехватка его в зоне испарения МТТ. Это и приводит к ухудшению условий теплоотвода в зоне нагрева.



**Рис. 1.** Влияние плотности теплового потока  $q_{жн}$  на интенсивность теплоотдачи в зоне нагрева  $\alpha_{жн}$  для МТТ №1 при различных условиях охлаждения зоны конденсации: 1 –  $G=2.9 \cdot 10^{-3}$  кг/с; 2 –  $G=5.0 \cdot 10^{-3}$  кг/с; 3 –  $G=7.3 \cdot 10^{-3}$  кг/с

Также было установлено, что на интенсивность кипения в зоне нагрева тепловой трубы существенно влияют геометрические размеры волокон: их длина и диаметр. Так, увеличение диаметра волокон при их равной длине и одинаковой пористости капиллярной структуры привело к некоторому снижению коэффициента теплоотдачи в зоне нагрева тепловой трубы (рис. 2). Вероятно, это связано с тем, что увеличение диаметра волокон, из которых изготовлена КС, приводит к уменьшению эффективного диаметра пор  $D_{эф}$  [10]. В связи с этим несколько возрастает гидравлическое сопротивление пористой структуры, что приводит к ухудшению подвода теплоносителя к области парообразования.

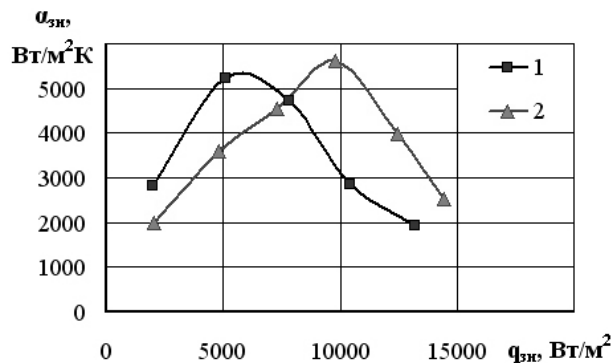


**Рис. 2.** Влияние диаметра волокон КПС на интенсивность теплоотдачи в зоне нагрева  $\alpha_{жн}$  МТТ при различных плотностях теплового потока  $q_{жн}$ : 1 – МТТ №3,  $d_b=50$  мкм; 2 – МТТ №4,  $d_b=70$  мкм

Кроме этого, существенное влияние на коэффициент теплоотдачи в зоне нагрева тепловой трубы оказывает интенсивность испарения теплоносителя с менисков жидкости на поверхности капиллярной структуры. Уменьшение диаметра пор приводит, соответственно, к уменьшению общей площади поверхности испарения. Совокупность указанных факторов и приводит к снижению общей интенсивности теплоотвода.

Изменение длины волокон  $l_b$  капиллярной структуры существенно не повлияло на величины коэффициентов теплоотдачи в зоне нагрева тепловой трубы, характер зависимости коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока остался неизменным (рис. 3). Однако увеличение  $l_b$  привело к смещению максимума теплоотдачи в область более высоких тепловых потоков. Можно

предположить, что это связано с изменением распределения пор по размерам в капиллярной структуре [10].



**Рис. 3.** Влияние длины волокон КПС на интенсивность теплоотдачи в зоне нагрева  $\alpha_{жн}$  МТТ при различных плотностях теплового потока  $q_{жн}$ : 1 – МТТ №2,  $l_b=3$  мм; 2 – МТТ №3,  $l_b=7$  мм

### 5. Выводы

Экспериментально установлено, что увеличение диаметра волокон капиллярной структуры приводит к ухудшению условий теплоотвода, в то время как изменение их длины не оказывает существенного влияния на величины коэффициентов теплоотдачи.

Также показано, что на внутренние процессы передачи теплоты в зоне нагрева тепловой трубы могут оказывать влияние внешние условия охлаждения МТТ.

### Литература

- Shung-Wen Kang. Experimental and numerical analysis of the transient response of a miniature heat pipe [Text] / Shung-Wen Kang, Sheng-Hong Tsai, Hong-Chih Chen // Applied Thermal Engineering. – 2002. – №22. – P. 1559–1568.
- Кравец, В. Ю. Исследование термического сопротивления миниатюрных тепловых труб [Текст] / В. Ю. Кравец, Я. В. Некрашевич, А. П. Гончарова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 1/9(49). – С. 55-60.
- Николаенко, Ю. Е. Влияние режимных параметров на теплопередающие характеристики миниатюрных тепловых труб [Текст] / Ю. Е. Николаенко, В. Ю. Кравец // ТКЭА. – 2001. – №6. – С. 36-38.
- Possamai, F. C. Miniature heat pipes as compressor cooling devices [Text] / F. C. Possamai, I. Setter, L. L. Vasiliev // Applied Thermal Engineering. – 2009. – №29. – P. 3218–3223.
- Ha, J. M. The Maximum Heat Transport Capacity of Micro Heat Pipes [Text] / J. M. Ha, G. P. Peterson // ASME J. Heat Transfer. – 1998. – Vol. 120, №4. – P. 1064-1071.
- Lin, L. High performance miniature heat pipe [Text] / L. Lin, R. Ponnappanb, J. Leland // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2002. – №45. – P. 3131-3142.
- Кравец, В. Ю. Интенсивность теплоотдачи в зоне испарения миниатюрных тепловых труб [Текст] / В. Ю. Кравец, Е. Н. Письменный, Я. В. Некрашевич, Д. Э. Сологуб // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 6/8(54). – С. 26-31.
- Vasiliev, L. Heat pipes in modern heat exchangers [Text] / L. Vasiliev // Applied Thermal Engineering. – 2005. – №25. – P. 1–19.
- Kimura Yuichi. Steady and Transient Heat Transfer Characteristics of Flat Micro Heatpipe [Text] / Yuichi Kimura, Yoshio Nakamura, Junji Sotani and others // Furukawa Review. – 2005. – №27. – P. 3-8.
- Семена, М. Г. Тепловые трубы с металловолнистыми капиллярными структурами [Текст] / М. Г. Семена, А. Н. Гершуни, В. К. Зарипов. – К: Вища шк., 1984. – 215 с.

**ВПЛИВ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРИСТОЇ СТРУКТУРИ НА ІНТЕНСИВНІСТЬ КИПІННЯ В ТЕПЛОВІЙ ТРУБІ**

Представлено результати експериментального дослідження впливу діаметра та довжини волокон мідної метало-волоконистої капілярної структури на процес тепловіддачі в зоні нагріву мініатюрної теплової труби. Встановлено характер впливу зовнішніх умов охолодження теплової труби на її внутрішні характеристики, а саме інтенсивність при фазових переходах.

**Ключові слова:** мініатюрна тепла труба, зона нагріву, коефіцієнт тепловіддачі, пориста структура

*Алексеїк Ольга Сергеевна, младший научный сотрудник,*

*ассистент, кафедра атомных электростанций и инженерной теплофизики, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина, e-mail: Helga-Gor@mail.ru*

*Алексеїк Ольга Сергіївна, молодший науковий співробітник, асистент, кафедра атомних електростанцій та інженерної теплофізики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, e-mail: Helga-Gor@mail.ru*

*Alekseik Olga, National Technical University "Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine, e-mail: Helga-Gor@mail.ru*

УДК 536.24

Неїло Р. В.

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІКИ ТА ТЕПЛООБМІНУ В УМОВАХ ВІЛЬНОЇ КОНВЕКЦІЇ**

В роботі представлено узагальнення результатів експериментальної роботи з дослідження теплообміну та гідродинаміки на поверхні горизонтального циліндра в умовах вільної конвекції. Візуалізація динамічного шару, що утворюється навколо нагрітого циліндра, дозволяє наочно підтвердити підходи, що використано при аналізі результатів.

**Ключові слова:** теплообмін, вільна конвекція, горизонтальна труба, гідродинаміка

**1. Вступ**

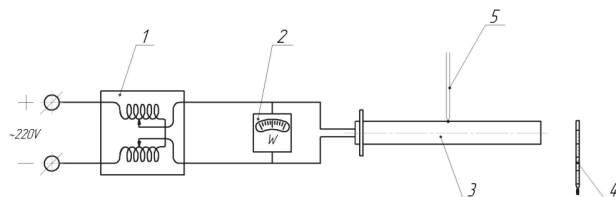
Теплова вільна конвекція – одне з найпоширеніших тепло-гідравлічних явищ на планеті. Воно виникає всюди у рідких середовищах, де існують нерівномірності температури окремих областей.

Не зважаючи на досить тривалий період дослідження теплообміну на поверхні горизонтального циліндра, в літературі відсутні однозначні дані як з аналітичного визначення загальної інтенсивності процесу [1 – 5], так і багатьох специфічних питань, наприклад, визначальної температури, та іншого. Більш того, часом такі дані протиречать одне одному (як показано в [4]).

В роботі описано порядок експериментальної роботи, результати експериментів з визначення інтенсивності тепловіддачі, візуалізації гідродинамічної сторони вільноконвективного теплообміну, та інше.

**2. Експериментальна установка**

Експериментальна ділянка представляє собою алюмінієву трубу круглого перерізу, Ø 22 мм, товщиною стінки 3 мм, довжиною 380 мм. В трубі розміщено електронагрівач. На відстані 175 мм від торцевої поверхні в товщі труби розміщено термоелектричний перетворювач (термопара). Експериментальний стенд представляє собою горизонтально розміщений експериментальний зразок до якого підводиться електричний струм через регулюючий трансформатор (РНО) (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема експериментального стенду: 1 – регулятор напруги (РНО-250-5); 2 – ватметр (Д522); 3 – експериментальний зразок; 4 – термометр ртутний лабораторний; 5 – термоелектричний перетворювач

**3. Аналіз отриманих результатів**

Характеристичне рівняння, що, за загальноприйнятими оцінками, описує процес вільноконвективного теплообміну:

$$Nu = a \cdot Ra^n, \quad (1)$$

де  $Ra$  – число Релея (за характерної температури, якою, відповідно до [4], прийнято температуру теплоносія далеко від поверхні теплообміну), а  $a$  та  $n$  визначаються відповідно до аналізу отриманої графічної інтерпретації залежності в логарифмічних координатах, та, в загальному випадку, залежить від геометричної поверхні, на якій відбувається процес теплообміну, напрямку теплового потоку, інтенсивності процесу, тощо.

На рис. 2 представлено результати експериментальної роботи, та їх співставлення з існуючими методиками визначення інтенсивності теплообміну в описаних умо-