

УДК 621.565.83

ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА ВИТКОВ НА ТЕРМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПУЛЬСАЦИОННЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

В. Ю. Кравец

Кандидат технических наук*

Контактный тел.: (044) 454-96-03, 066-780-99-50

E-mail: kravetz_kpi@ukr.net

Е. С. Алексеик

Аспирант*

Контактный тел.: 063-261-79-59

E-mail: alexeik_kpi@ukr.net

А. Ю. Аполлонина

Магистрант

*Кафедра атомных электростанций и инженерной
теплофизики

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт»

пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

Контактный телефон: 096-320-63-41

E-mail: apollo1989@ukr.net

Приведено огляд існуючих досліджень впливу кількості витків на термічний опір пульсаційної теплової труби. Представлені опис експериментальної установки, методики проведення експериментів. Розглянуті особливості процесів теплообміну, які спостерігаються при роботі пульсаційної теплової труби. Наведені результати досліджень

Ключові слова: пульсаційна тепла труба, кількість витків, термічний опір

Дан обзор существующих исследований влияния количества витков на термическое сопротивление пульсационной тепловой трубы. Представлены описание экспериментальной установки, методики проведения экспериментов. Рассмотрены особенности процессов теплообмена, которые наблюдаются при работе пульсационной тепловой трубы. Приведены результаты исследований

Ключевые слова: пульсационная тепловая труба, количество витков, термическое сопротивление

This article represents an overview of investigation of effect of number of turns on thermal resistance of pulsation heat pipes. Experimental setup for investigation of this effect, a routine of experiment is described. The characteristics of heat transfer processes that occur when pulsation heat pipe are working. The results of investigation are presented

Keywords: pulsation heat pipe, number of turns, thermal resistance

1. Введение

В настоящее время все больше возникает потребность в отводе тепловых потоков больших плотностей. Для этого широко применяются системы с использованием двухфазных теплопередающих устройств - тепловых труб и термосифонов. Развитие радиоэлектроники, вычислительной техники и других отраслей приводит к необходимости миниатюризации устройств и способности их отводить значительные тепловые нагрузки. Однако, технология изготовления тепловых труб (ТТ) связана с определенными трудностями, вызванными изготовлением металлической капиллярно-пористой структуры и её соединением с оболочкой ТТ. Применение же термосифонов, изготовление которых проще за счет отсутствия капиллярно-пористой структуры, ограничено их неработоспособностью в горизонтальном положении, при малых углах наклона и против сил тяжести. Также у тепловых труб и термосифонов, при уменьшении их

габаритов, значительно ухудшаются теплопередающие характеристики. Это приводит к необходимости поиска новых устройств, которые могли бы передавать большие плотности теплового потока, имея небольшие размеры.

На сегодняшний день все большее внимание приобретают системы охлаждения на основе пульсационных тепловых труб (ПТТ). Впервые упоминание о ПТТ было в [1], где была показана возможность переноса тепловой энергии теплоносителем за счет инерционных сил в результате действия центров парообразования. В дальнейшем японским исследователем Акаши была запатентована ПТТ змеявиковой конструкции, изготовленной из металлического капилляра частично заполненного теплоносителем [2]. Уникальной особенностью ПТТ является то, что эти устройства имеют простую конструкцию, не содержат капиллярно-пористой структуры, клапанов и т.д., но при этом способны передавать тепловую энергию при любой ориентации в поле сил тяжести.

Механизм теплопереноса внутри ПТТ осуществляется за счет испарительно-конденсационного цикла. При подводе теплового потока в зоне нагрева возникает паровой пузырек, который в процессе роста и отрыва толкает весь парожидкостный поток. Далее поток движется по инерции, отдавая энергию в зоне конденсации. Одновременно холодная часть теплоносителя из зоны конденсации поступает в зону нагрева, в результате чего там температура снижается [3].

На термическое сопротивление пульсационной тепловой трубы влияют большое количество факторов. Одним из них является количество витков. Результаты исследований влияния этого фактора представлены в [4-6]. Однако данные этих авторов не дают однозначного ответа, а в некоторых вопросах противоречат друг другу. Поэтому экспериментальные исследования и моделирование ПТТ является актуальным.

Целью данной работы является определение влияния количества витков ПТТ на ее термической сопротивление.

2. Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Подвод теплоты к зоне нагрева осуществлялся при помощи нагревателя 2, который представлял собой нихромовый провод, намотанный на ПТТ. Для уменьшения потерь в окружающую среду нагреватель был изолирован базальтовым волокном с теплопроводностью $\lambda = 0,04 \text{ Вт/мК}$. Отвод теплоты осуществлялся естественной конвекцией к воздуху.

Измерение температуры осуществлялось медь-константановыми термопарами Т1...Т10, которые закреплялись на поверхности ПТТ. Сигнал от термопар через аналого-цифровой преобразователь 4 передавался на персональный компьютер 5.

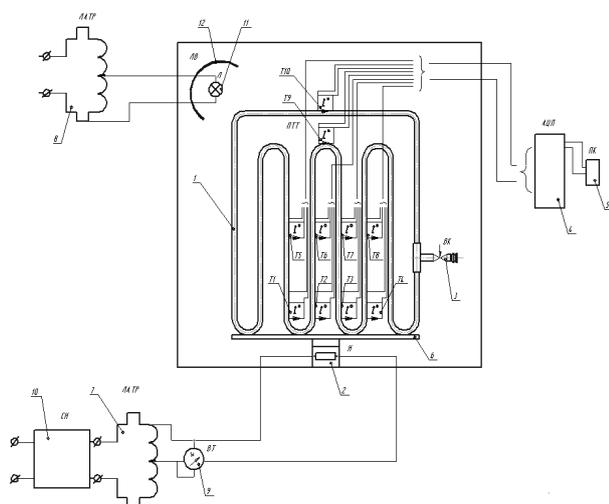


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – ПТТ; 2 – имитатор тепловой нагрузки (нагреватель); 3 – вакуумный кран; 4 – аналого-цифровой преобразователь; 5 – персональный компьютер; 6 – подставка; 7,8 – лабораторный автотрансформатор ЛАТР – 2М; 9 – ваттметр типа Д529; 10 – стабилизатор напряжения (СН-05); 11 – лампа; 12 – рефлектор

Было изготовлено несколько ПТТ из стеклянных трубок с внутренним диаметром 3,1 мм. Количество витков – 4, 6, 8, 10. Высота ПТТ составляла 200 мм, длина зоны нагрева – 50мм, длина зоны конденсации – 150мм. Зона транспорта отсутствовала. Теплоносителем служила деаэрированная дистиллированная вода. Коэффициент заполнения составлял 50% от всего внутреннего объема.

Перед началом экспериментов внутренняя полость ПТТ тщательно очищалась и промывалась этиловым спиртом. Затем пульсационная тепловая труба вакуумировалась при помощи специально оборудованного вакуумного стенда. Далее внутреннее пространство заполнялось теплоносителем и герметизировалось.

3. Методика проведения экспериментов

Вначале пульсационная тепловая труба устанавливалась в вертикальном положении, когда зона нагрева была ниже зоны конденсации. Далее на нагреватель подавалась начальная мощность. На персональном компьютере запускалось соответствующее программное обеспечение, которое записывало показания всех термопар во времени с частотой 1Гц. Величину теплового потока устанавливали при помощи ЛАТРа и контролировали по ваттметру. Тепловую мощность повышали постепенно с определенным фиксированным шагом. Переход на следующую ступень теплового потока производили после выхода ПТТ на стационарный режим работы, показателем которого служила неизменяющийся уровень средней температуры в зоне нагрева. В начале и в конце эксперимента фиксировали температуру охлаждающего воздуха.

Используя полученные данные, строили графики зависимости температур от времени в каждой точке установки термопар. Затем для каждого значения подведенной мощности рассчитывали значения средних температур в зонах нагрева и конденсации, как среднеарифметические показания термопар в каждой зоне за период времени стационарного режима. По полученным значениям определяли разность температур между зонами нагрева и конденсации.

Подведенная мощность определялась как разность показаний ваттметра и тепловых потерь через изоляцию.

Для конечного анализа данных строились графики зависимости термического сопротивления ПТТ от подведенного теплового потока. Термическое сопротивление рассчитывалась по формуле:

$$R = \frac{\overline{t_{\text{зн}}} - \overline{t_{\text{зк}}}}{Q_{\text{подв}}}; \quad (1)$$

где $\overline{t_{\text{зн}}}$, $\overline{t_{\text{зк}}}$ – средние температуры зон нагрева и конденсации, К.

4. Результаты исследований

Работу пульсационной тепловой трубы можно разделить на два режима [7]. Первый режим соответствует малым тепловым потокам и большим значениям

термического сопротивления, когда отсутствует активация центров парообразования (рис.2).

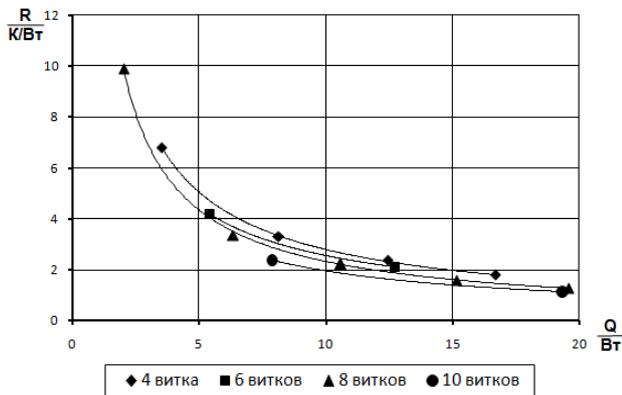


Рис. 2. Зависимость термического сопротивления от передаваемого теплового потока (первый режим)

Рассмотрим физические процессы, которые происходят при первом режиме работы ПТТ (рис.3). До начала подвода теплоты, жидкость 1, 3 и пар 2 находятся в равновесном состоянии. Которое возможно, на примере столбика жидкости 1, если выполняется следующее равенство давлений:

$$P = P_K + P_{II}, \tag{2}$$

где P_K – капиллярное давление; P_{II} – давление в паровом пространстве.

$$mgh = \frac{2\sigma}{R} \cos\theta + P \tag{3}$$

где m - масса столбика жидкости 1; h - высота столбика жидкости; σ - коэффициент поверхностного натяжения; R - радиус капилляра; θ - угол смачивания.

При подводе теплоты в зоне 1 (граница жидкость-пар) начинается процесс испарения жидкости, в это же время, за счет разницы температур жидкости 1 и пара 2, на межфазной границе в зоне 2 происходит конденсация пара. Масса жидкости 1 начинает увеличиваться, и за счет сил гравитации столбик жидкости 1 опускается, т.к. $P < P_K + P_{II}$. При дальнейшем подводе теплоты, количество пара 2, за счет испарения из зоны 1, увеличивается и давление пара возрастает. Это приводит к расширению парового пространства ($P < P_K + P_{II}$) и выталкивания столбика жидкости 1 вверх. Далее опять происходит конденсация на межфазной границе в зоне 2 и процесс повторяется снова. Таким образом, возникают небольшие пульсации температур в первом режиме работы.

Падение термического сопротивления при увеличении подводимого теплового потока, в данном режиме работы ПТТ, объясняется пульсациями теплоносителя в зоне конденсации, которые увеличивают коэффициент теплоотдачи, что, соответственно, приводит к падению разности температур и снижению термического сопротивления.

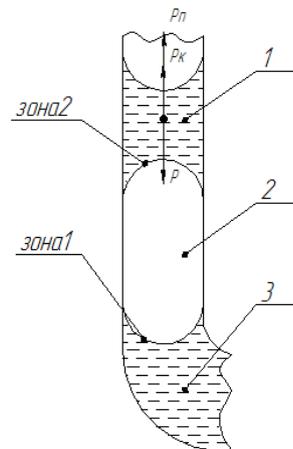


Рис. 3. Физические процессы внутри ПТТ

Второй режим работы ПТТ характеризуется теплопереносом за счет кипения теплоносителя. Границей между первым и вторым режим была принята визуальная фиксация первых паровых пузырьков. Начало второго режима сопровождается резким падением температуры в зоне нагрева с одновременным скачком температуры в зоне конденсации. При этом наблюдаются пульсации температур во всех зонах ПТТ [7], что свидетельствует об активации центров парообразования в зоне нагрева. В результате роста парового пузыря, возникает инерционная сила, которая выталкивает нагретую жидкость в зону конденсации, а холодную в зону нагрева. Скорость перемещения горячих и холодных масс будет зависеть от температуры холодного теплоносителя. Чем ниже температура теплоносителя, который попадает в зону нагрева ПТТ, тем пульсации температуры будут реже, поскольку времени догрева его до температуры насыщения необходимо больше. Распределение сопротивления при втором режиме работы ПТТ представлено на рис. 4. Из рисунка видно, что при увеличении подводимого теплового потока, термическое сопротивление монотонно снижается.

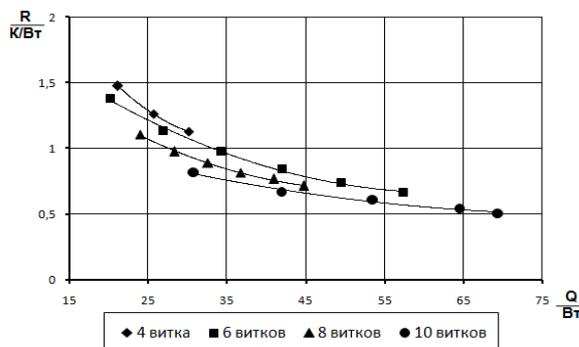


Рис. 4. Зависимость термического сопротивления от передаваемого теплового потока (второй режим)

Причем как в первом, так и во втором режимах замечено, что с увеличением количества витков падение термического сопротивления ПТТ происходит во всем диапазоне исследованных тепловых потоков (рис. 5-6).

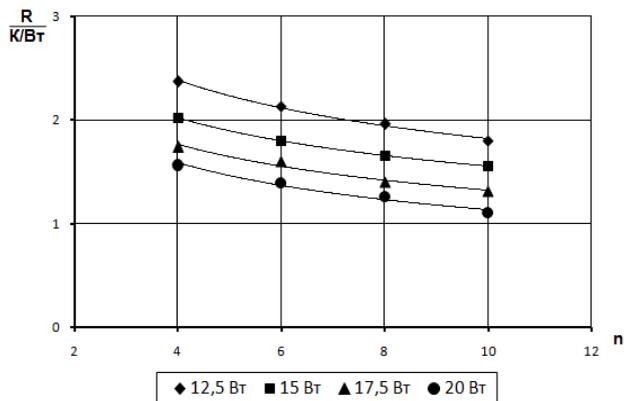


Рис.5. Зависимость термического сопротивления от количества витков (первый режим)

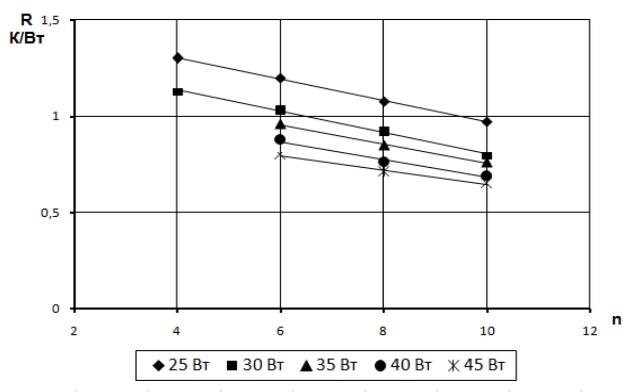


Рис.6. Зависимость термического сопротивления от количества витков (второй режим)

Одной из характерных особенностей работы ПТТ является переход из первого режима (конвективный) во второй (пузырьковый). В первом режиме эффективность передачи тепловой энергии ПТТ довольно низкая. Высокие значения термического сопротивления приводят к большим перепадам температур между зонами нагрева и конденсации, что может привести

к значительным перегревам объекта охлаждения при небольших тепловых потоках. Поэтому необходимо найти способ перехода режима теплообмена в ПТТ из конвективного в пузырьковый даже при небольших значениях тепловой нагрузки.

Как было замечено в экспериментах при увеличении количества витков тепловой поток, при котором начинается активация первых центров парообразования, существенно снижается. Это приводит к падению перепада температур между зонами нагрева и конденсации и более стабильному температурному режиму объекта охлаждения.

Следует также учитывать тот фактор, что исследование было проведено на образцах ПТТ, выполненных из стекла. А поскольку внутренняя поверхность ПТТ имела очень маленькую шероховатость (полированная поверхность), то процесс возникновения паровых пузырей там приближается к гомогенному парообразованию. То есть количество потенциальных центров парообразования на таких поверхностях минимальное. Увеличение шероховатости внутренней поверхности должно снизить тепловые потоки, при которых конвективный режим переходит в пузырьковый (пульсационный).

Выводы

Таким образом, проведенное исследование показало, что с увеличением количества витков ПТТ термическое сопротивление снижается. Увеличение количества витков в 2,5 раза приводит к снижению термического сопротивления примерно в 1,5 раза. При этом переход к эффективной передаче тепловой энергии (режим активации центров парообразования) происходит при меньших тепловых потоках, чем при небольшом количестве витков.

Поскольку пузырьковый режим кипения носит вероятностный характер, то при проектировании систем охлаждения на основе ПТТ необходимо учитывать факторы, которые оказывают наибольшее влияние на этот процесс

Литература

1. А.с. 504065 СССР, F28D 15/00 Пульсирующая тепловая труба/ Смирнов Г.Ф., Г.Л. Савченков – 1971.
2. Patent 4,921,041 U.S.A., F28D 15/02 Structure of a Heat Pipe / Akachi H. 1990.
3. Кузнецов И.О., Смирнов Г.Ф. Экспериментальное и математическое моделирование характеристик пульсационных тепловых труб (ПТТ)/ И.О. Кузнецов, Г.Ф. Смирнов // Холодильная техника и технология. – 2005. – №5. – С. 61-69.
4. Charoensawan P. Thermal performance of horizontal closed-loop oscillating heat pipes [Текст] / P.Charoensawan, P. Terdtoon// Applied Thermal Engineering. - 2008. – vol. 28, iss. 5-6. – P. 460-466.
5. Charoensawan P. Closed loop pulsating heat pipes. Part A: parametric experimental investigations [Текст] / P.Charoensawan, S. Khandekar, M. Groll, P. Terdtoon // Applied Thermal Engineering. – 2003. – vol. 23. – P. 2009–2020.
6. Кравец В.Ю. Влияние количества витков на теплопередающие характеристики пульсационных тепловых труб [Текст] / В.Ю. Кравец, Е.С. Алексеик// Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – Вып.6/7(48). – С. 59-68.
7. Кравец В.Ю. Исследование режимов теплообмена в пульсационной тепловой трубе / В.Ю. Кравец, А.Н. Наумова, А.Н. Вовагон// Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2010. – №1. – С. 39 – 43.