# ХАРАКТЕРИСТИКИ ПУЛЬСАЦИОННОЙ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

## CHARACTERISTICS OF A PULSATING HEAT PIPE UNDER THE INFLUENCE OF AN ELECTRIC FIELD

*Олег МОТОРИН, ORCID: 0000-0001-7529-2616*
*Мирча БОЛОГА, ORCID: 0000-0002-5262-9666*
*ИПФ, Молдавский государственный университет, Кишинев, Молдова*

**CZU: 621.565.83 + 537.8**

e-mail: motorin@yahoo.com
e-mail: mbologa35@gmail.com

*Influence of electric field on thermal resistance of the closed-loop pulsating heat pipe (PHP) has been investigated experimentally. PHP is made from a long capillary copper tube with inner diameter of 1,9 mm and outer diameter of 3,0 mm bent into a planar serpentine with five U-turns filled with n-hexane. High voltage electrodes are located in the evaporation zone. Measurements of temperatures have been performed for range of 5-50 W applied heating power and for range of 5-18 kV DC voltage. At the heat input of 20 W and a voltage of 18 kV, a reduction in the thermal resistance of the PHP by 35% was obtained. A generalization of the obtained experimental data has been carried out. The temperature of the evaporation zone could be controlled within certain limits using the electric field, which can be used for thermostatting.*

***Ключевые слова**: тепловые трубы, термическое сопротивление, электрическое поле.*

## ВВЕДЕНИЕ

Ускоренный прогресс в создании новой и совершенствовании существующей аппаратуры самого разного назначения приводит к тепловыделениям порядка сотен ватт на квадратный сантиметр, управление которыми традиционными способами становится все более сложной задачей. Этим продиктована острая необходимость разработки высокоэффективных, надежных и малогабаритных систем охлаждения и терморегулирования, основанных на двухфазных переходах. Традиционные тепловые трубы это пассивные теплопередающие устройства, работающие по замкнутому испарительно-конденсационному циклу, в котором сконденсировавшийся пар возвращается в зону испарения капиллярно-пористыми структурами. Одним из прогрессивных видов тепловых труб являются пульсационные тепловые трубы (ПТТ), в которых пористая структура отсутствует. Они предложены в 70-е годы прошлого века [1], но определенное распространение получили после доработки конструкции [2]. Помимо использования в системах охлаждения и терморегулирования [3,4] ПТТ могут применяться и для охлаждения устройств со сложной геометрией или складывающихся устройств [5-7], рекуперации тепла [8-10] и хранения тепловой энергии [11,12]. Конструктивно ПТТ представляют собой параллельные

участки трубки малого диаметра, согнутой серпантинообразно и частично заполненной теплоносителем, одни концы ветвей нагреваются, другие – охлаждаются. При достаточной подводимой тепловой мощности в системе возникает пульсационное движение паровых пузырей и жидкости, вследствие чего происходит интенсивный перенос тепла из зоны нагрева в зону охлаждения.

Одним из основных параметров ПТТ является термическое сопротивление. Имеется значительное количество работ, в которых рассматривалось влияние конструкционных и рабочих параметров на термическое сопротивление ПТТ, среди которых: число витков [13,14], внутренний диаметр трубки [15,16], рабочая жидкость [17,18], степень заполнения теплоносителем [19,20], ориентация в пространстве [20,21]. В то же время обнаружена единственная работа [22], в которой рассматривается воздействие электрического поля на адиабатный участок ПТТ. Известно [23], что электрическое поле оказывает сильное интенсифицирующее влияние на теплообмен при кипении в большом объеме и целью данной работы является исследование влияние электрического поля в зоне нагрева на термическое сопротивление ПТТ.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования характеристик ПТТ проводились на экспериментальном стенде (рис. 1).

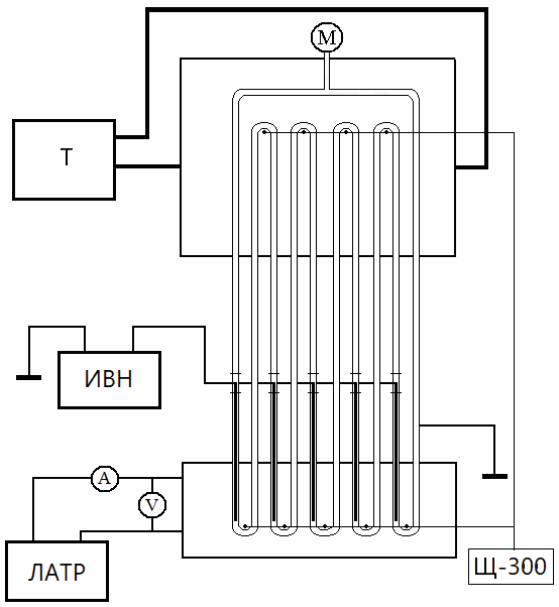



**Рис. 1.** Схема экспериментального стенда: Т – термостат; М – манометр; ИВН – источник высокого напряжения; А – амперметр; V – вольтметр.

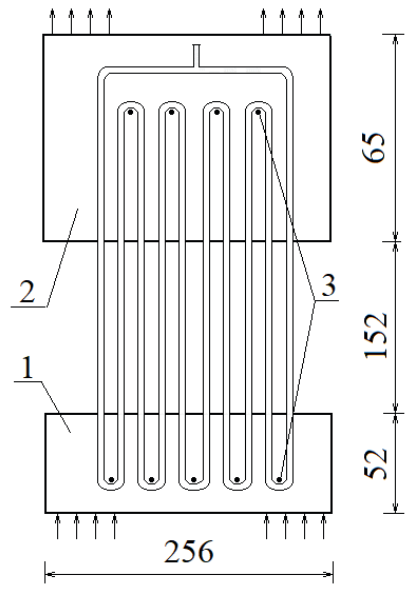



**Рис. 2.** Схема ПТТ: 1 – зона испарения; 2 – зона конденсации; 3 – термопары.

основные элементы которого следующие: собственно ПТТ, источник высокого напряжения, нагреватель с источником регулируемого напряжения, термостат для поддержания постоянной температуры жидкости, прокачиваемой через холодильник, вакуумный насос для откачки воздуха из ПТТ и измерительная система.

Высокое напряжение варьировалось в пределах 5 – 18 кВ, а подводимая тепловая мощность - в пределах 5-50 Вт. ПТТ содержит пять витков в зоне охлаждения и изготовлена из медной трубки с внутренним 1,9 мм и внешним диаметром 3 мм.

Схема ПТТ показана на рис. 2. Длина зоны нагрева равна 52 мм, адиабатной зоны 152 мм и зоны охлаждения 65 мм. В зоне нагрева ПТТ находятся пять стеклянных вставок длиной 25 мм, выполненных из трубки с внутренним 2,5 мм и внешним диаметром 5 мм (рис. 3). Внутри каждой стеклянной трубки размещен высоковольтный электрод, вторым электродом служил омический нагреватель, намотанный поверх стеклянной трубки. В отдельных экспериментах использовались электроды, установленные внутри медной трубки (рис. 4). В зоне охлаждения ПТТ вмонтирована в алюминиевый блок, в каналах которого циркулирует вода, подаваемая из термостата. В зоне испарения установлено пять термопар, в зоне конденсации четыре термопары, две термопары регистрировали температуру воды на входе и выходе зоны охлаждения и еще две термопары установлены в адиабатной зоне. Для уменьшения теплопотерь все зоны ПТТ тщательно теплоизолированы минеральной ватой. В качестве рабочей жидкости используется *n*-гексан, являющийся диэлектриком с низкой температурой кипения.

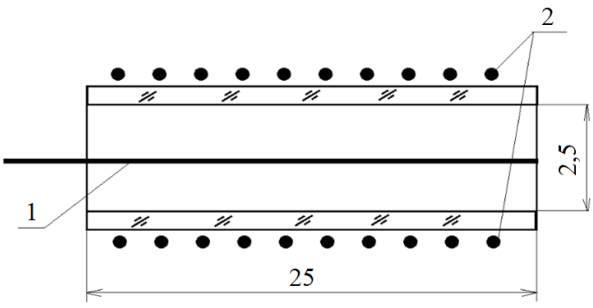



**Рис. 3.** Схема электрода внутри стеклянной трубки: 1 – медный провод d = 0,4 мм; 2 – омический нагреватель.

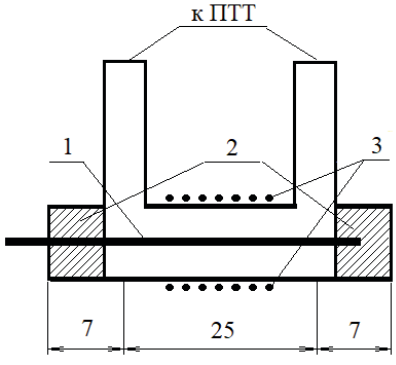



**Рис. 4.** Схема электрода внутри медной трубки: 1 – медный провод d = 0,4 мм; 2 –диэлектрическая вставка; 3 – омический нагреватель.

Нами исследовалось влияние подводимой тепловой мощности *P* при различных напряжениях *U* на термическое сопротивление *R*, а также динамика зависимости температуры зоны испарения от тепловой нагрузки.

После тщательной промывки ПТТ проводились откачка воздуха и заполне-

ние ПТТ определенным количеством теплоносителя. Затем включалась система охлаждения конденсатора ПТТ и на нагреватели, установленные в зоне испарения, подавалось заданное напряжение. После выхода установки на стационарный режим снимались показания термопар с помощью цифрового вольтамперметра Щ-300.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Пусковая (минимально необходимая) тепловая мощность и термическое сопротивление являются основными параметрами, характеризующими работу ПТТ. Динамика изменения температуры зоны испарения в зависимости от подводимой тепловой мощности показана на рис. 5. При мощности 10 Вт температура зоны испарения выходит на стационарное значение и далее не изменяется, что свидетельствует об отсутствии пульсаций теплоносителя. При повышении мощности до 15 Вт температура зоны испарения сначала начинает расти, а затем происходит ее уменьшение вследствие возникновения пульсаций, т.е. выхода ПТТ на рабочий режим. При дальнейшем повышении мощности температура зоны испарения растет, интенсивность пульсаций возрастает, что повышает стабильность работы.

Подача высокого напряжения на электроды при постоянной подводимой мощности приводит к повышению интенсивности теплообмена, вследствие чего температуры зоны испарения снижается (рис. 6).

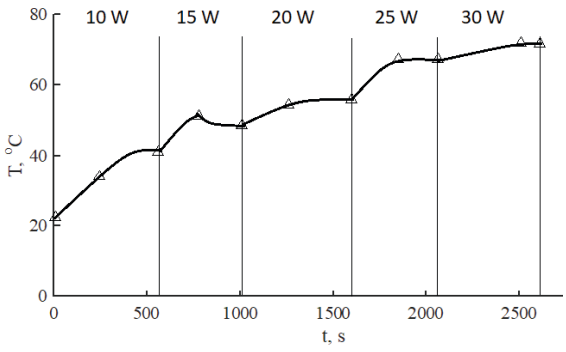



**Рис. 5.** Зависимость температуры испарителя ПТТ от подводимой тепловой мощности.

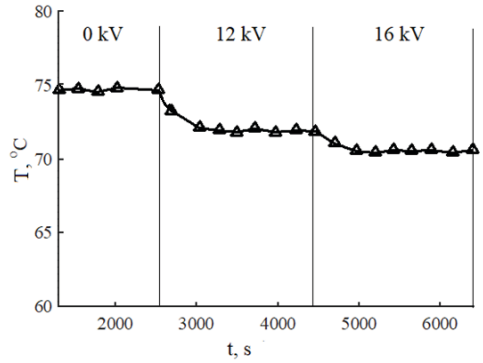



**Рис. 6.** Зависимость температуры испарителя от напряжения на электродах ЭГД насоса. P = 30 Вт.

Таким образом, появляется возможность с помощью электрического поля можно в некоторых пределах регулировать температуру зоны испарения.

Средние температуры зон испарения и конденсации определялись по формулам $T_e = \sum_{i=1}^{5} T_{e,i} / 5$ и $T_c = \sum_{i=1}^{4} T_{c,i} / 4$, где $T_{e,i}$ и $T_{c,i}$ - показания соответствующих термопар. Термическое сопротивление ПТТ определялось по формуле

$R = (T_e - T_c) / Q_e$, где $Q_e = U \cdot I$ – подводимый тепловой поток, Вт; $U$ – напряжение, В; $I$ – сила тока, А.

На рис. 7 представлены экспериментальные данные и аппроксимирующие кривые зависимости термического сопротивления ПТТ от подаваемой тепловой мощности в отсутствии поля и при напряжениях на электродах 15 кВ и 18 кВ.

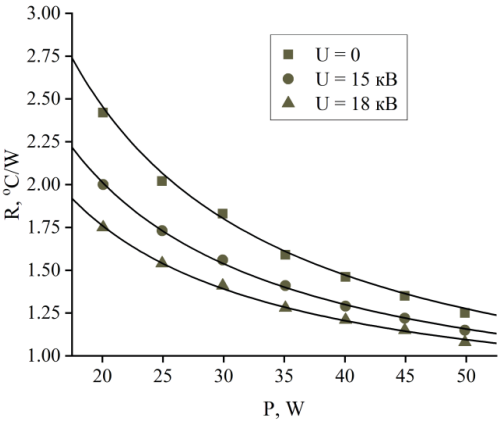



**Рис. 7.** Зависимость термического сопротивления ПТТ от подводимой мощности при различных напряжениях на электродах; степень заполнения 60%.

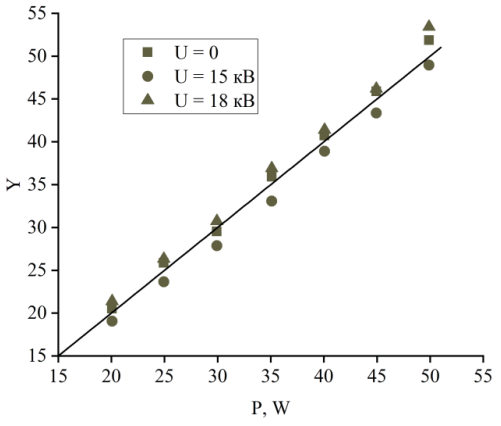



**Рис. 8.** Обобщенная зависимость $Y(P)$; степень заполнения 60%; жидкость - *n*-гексан.

Как видно из графика, с рост напряжения приводит к уменьшению термического сопротивления, также видно, что при малых значениях $P$ влияние поля сильнее. Обобщение полученных результатов проводилось согласно методике [24, 25]. При обработке данных в виде $R = f(P, U)$ замечено, что примерно с $P = 20$ Вт наши экспериментальные данные, а также данные исследователей [26-30] без электрического поля, хорошо аппроксимируются зависимостями вида $R = \dfrac{a}{P + b}$, где $a$ и $b$ - некоторые постоянные. Отложив по оси ординат выражение $Y \in a / R - b = P$ „ мы вместо нескольких кривых получим биссектрису первого координатного угла. В нашем случае $a$ и $b$ являются функцией от $U$, тогда с помощью аппроксимации получаем:

$$a = -0,8815U + 39,76; \quad b = 0,0083U + 0,4833.$$

Окончательно получаем

$$Y \in \frac{-0,8815U + 39,76}{R} + 0,0083U + 0,4833 = P.$$

Обобщенная зависимость $Y(P)$ показана на рис. 8.

## ВЫВОДЫ

Проведено экспериментальное исследование влияния электрического поля на термическое сопротивление ПТТ при воздействии поля на зону кипения. С увеличением тепловой мощности термическое сопротивление ПТТ снижается; при 20 Вт и напряжении 18 кВ термическое сопротивление ПТТ снижается на 35%. Влияние поле проявляется сильнее при малых значениях тепловой мощности. Использование электрического поля позволяет изменять в определенных пределах температуру зоны испарения.

Проведено обобщение экспериментальных данных путем сведения их к биссектрисе. Результаты представляют интерес в части интенсификации и термостатирования тепломассообменных процессов.

**Литература:**

1. ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. *Пульсирующая тепловая труба*: А.С. СССР № 504065, Изобретатели: СМИРНОВ, Г.Ф., САВЧЕНКОВ, Г.А. Опубликовано: 25.02.76 Бюллетень № 7.
2. TSENG, C.Y., YANG, K.S., CHIEN, K.H., JENG, M.S., WANG, C.C. Investigation of the performance of pulsating heat pipe subject to uniform/ alternating tube diameters. În: *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2014. V.54, p.85-92. ISSN 0894-1777.
3. JANG, D.S, KIM, D., HONG, S.H., KIM, Y. Comparative thermal performance evaluation between ultrathin flat plate pulsating heat pipe and graphite sheet for mobile electronic devices at various operating conditions. În: *Applied Thermal Engineering*. 2019. nr.149, p.1427–1434.
4. QIAN, N., Fu, Y., ZHANG, Y., CHEN, J., XU, J. Experimental investigation of thermal performance of the oscillating heat pipe for the grinding wheel. În: *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. nr.136, p.911–923.
5. MAMELI, M., BESAGNI, G., BANSAL, P.K., MARKIDES, Ch.N. Innovations in pulsating heat pipes: From origins to future perspectives. În: *Applied Thermal Engineering.* 2022. V. 203, 117921. ISSN 1359-4311,
6. LIM, J., KIM, S.J. Fabrication and experimental evaluation of a polymer-based flexible pulsating heat pipe. În: *Energy Conversion Management.* 2018. V. 156, p. 358–364.
7. JUNG, C., LIM, J., KIM, S.J. Fabrication and evaluation of a high-performance flexible pulsating heat pipe hermetically sealed with metal. În: *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. V.149, 119180.
8. DENG, Z., ZHENG, Y., LIU, X., ZHU, B., CHEN, Y. Experimental study on thermal performance of an anti-gravity pulsating heat pipe and its application on heat recovery utilization. În: *Applied Thermal Engineering*. 2017. V.125, p.1368–1378.

9. LIU, X., HAN, X., WANG, Z., HAO, G., ZHANG, Z., CHEN, Y. Application of an anti-gravity oscillating heat pipe on enhancement of waste heat recovery. În: *Energy Conversion Management*. 2020. V.205, 112404.
10. LI, Z., SARAFRAZ, M.M., MAZINANI, A., MORIA, H., TLILI, I., ALKANHAL, T.A., GOODARZI, M., SAFAEI, M.R. Operation analysis, response and performance evaluation of a pulsating heat pipe for low temperature heat recovery. În: *Energy Conversion and Management*. 2020. V.222, 113230. ISSN 0196-8904.
11. KHALILMOGHADAM, P., RAJABI-GHAHNAVIEH, A., SHAFII, M.B. A novel energy storage system for latent heat recovery in solar still using phase change material and pulsating heat pipe. În: *Renewable Energy*. 2021. V.163, p. 2115-2127. ISSN 0960-1481.
12. XU, X., ZHANG, X. Finite time thermodynamics analysis and research of pulsating heat pipe cold storage device. În: *Energy Storage and Saving*. 2022. V.1, p. 33–43.
13. JUN, S., KIM, S.J. Comparison of the thermal performances and flow characteristics between closed-loop and closed-end micro pulsating heat pipes. În: *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016. V.95, p. 890-901.
14. LI, M., LAIFENG, L., XU, D. Effect of number of turns and configurations on the heat transfer performance of helium cryogenic pulsating heat pipe. În: *Cryogenics*. 2018. V.96, p.159-165.
15. LIU, X., SUN, Q., ZHANG. C., WU. L. High-speed visual analysis of fluid flow and heat transfer in oscillating heat pipes with different diameters. În: Applied Sciences. 2016. V.6(11), 321.
16. WU, S., ZHOU, H., YAO, F., DENG, Z., ZHANG, Y., JIANG, S. Experimental study on two-phase flow and thermal performance in pulsating heat pipes. În: *Energy*. 2021. v.174, Issue 3, pp. 113-123.
17. FUMOTO, K., ISHIDA, T., KAWANAMI, T., INAMURA, T. Effect of working fluid in heat, transport characteristics of pulsating heat pipe. În: *Transactions of the JSME* (in Japanese). 2016. V.82, no.834.
18. RATHOD, J., LAKHERA, V., SHUKLA, V. Effect of working fluid, orientation, and cooling mode on thermal performance of miniature flat heat pipe. În: *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*. 2023. v.15(9), 091011.
19. SHI, W., PAN, L. Influence of filling ratio and working fluid thermal properties on starting up and heat transferring performance of closed loop plate oscillating heat pipe with parallel channels. În: *Journal of Thermal Science*. 2017, v. 26(1), p.73-81.
20. LI, M., LI, L., XU, D. Effect of filling ratio and orientation on the performance of a multiple turns helium pulsating heat pipe. În: *Cryogenics*. 2019. v.100, p.62-68. ISSN 0011-2275.

21. NEKRASHEVYCH, I., NIKOLAYEV, V. Pulsating heat pipe simulations: impact of PHP orientation. În: *Microgravity Science and Technology*. 2019. v.31, p. 241-248.
22. CREATINI F., MARCO, P.DI, FILIPPESCHI, S., FIORITI, D., MAMELI, M. Effect of the application of an electric field on the performance of a two-phase loop device: preliminary results. În: *Journal of Physics: Conference Series.* 2015. v.655, 012043.
23. CHERNICA, I.M., BOLOGA, M.K., MOTORIN, O.V., KOZHEVNIKOV, I.V. Enhancement of heat transfer at boiling in electrohydrodynamic flow. În: *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. 2088 012005.
24. ГРОСУ, Ф.П., БОЛОГА, АН.М., ПАУР, Х.-Р., БОЛОГА, М.К., МОТОРИН, О.В. Обобщение таунсендовских вольтамперных характеристик коронного разряда. În: *Электронная обработка материалов.* 2014. Т. 50(4), с. 23-28.
25. БОЛОГА, М.К., ГРОСУ, Ф.П., КОЖЕВНИКОВ, И.В., ПОЛИКАРПОВ, А.А., МОТОРИН, О.В. Теплообмен в тепловой трубе со встроенным электрогидродинамическим насосом. În: *Труды Шестой Российской национальной конференции по теплообмену РНКТ6*. Т.2. – М.: Издательский дом МЭИ, 2014. с. 181-182.
26. ZAMANI, R., KALAN, K. & SHAFII, M.B. Experimental investigation on thermal performance of closed loop pulsating heat pipes with soluble and insoluble binary working fluids and a proposed correlation. În: *Heat Mass Transfer* 55, 375–384 (2019).
27. SHAFII, M.B., ARABNEJAD, S., SABOOHI, Y., JAMSHIDI, H. Experimental investigation of pulsating heat pipes and a proposed correlation. In: *Heat Transfer Engineering*. 2010. V.31, no.10, p. 854-861.
28. LIN, Z., WANG, S., CHEN, J., HUO, J., HU, Y., ZHANG, W. Experimental study on effective range of miniature oscillating heat pipes. In: *Applied Thermal Engineering*. 2011. V.31, no. 5, p. 880-886.
29. PUTRA, N., WINARTA, A., KOESTOER, R.A., PAMITRAN, A.S., HAKIM, I. Heat transfer performance of oscillating heat pipe with ethanol and methanol working fluid with different inclinations for heat recovery application. In: *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2021. V.57(2), p.148–157.
30. WINARTA, A., PUTRA, N., BAKHTIAR, F. Thermal performance of oscillating heat pipe with ethanol/methanol for heat recovery application design. In: *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*. 2017. v.7, no. 4, p. 1268-1274. ISSN: 2088-5334.

*Работа выполнена в рамках проекта ANCD 20.80009.5007.06.*