ВЛИЯНИЕ ОДНОНАПРАВЛЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОВИТКОВОЙ ПУЛЬСАЦИОННОЙ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ

INFLUENCE OF UNIDIRECTIONAL CIRCULATION ON THE CHARACTERISTICS OF A MULTI-TURN PULSATING HEAT PIPE

CZU: 621.565.83:537.8 **https://doi.org/10.59295/spd2025e.122**

Олег МОТОРИН
ORCID: 0000-0001-7529-2616
E-mail: oleg.motorin@ifa.usm.md
Молдавский государственный университет, Кишинэу, Республика Молдова

Игорь ПОДЛЕСНЫЙ
ORCID: 0009-0001-0009-2318
E-mail: igor.podlesnii@ifa.usm.md
Молдавский государственный университет, Кишинэу, Республика Молдова

Summary*. The influence of heat flux density and voltage on the electrohydrodynamic (EHD) pump on thermal resistance, as well as on the temperatures of evaporation and condensation zones of a pulsating heat pipe with three and five turns is studied. A one-dimensional model of the EHD pump is considered. In the presence of EHD pumping, only a gradual start-up mode is observed, the temperature of the evaporation zone is lower than in its absence and it can be regulated within small limits. With an increase in the supplied power, the average temperatures of the evaporation and condensation zones increase. A generalization of the dependences of thermal resistance on the supplied thermal power is carried out.*

Keywords*: pulsating heat pipe, electrohydrodynamic pump, start-up, thermal resistance, generalization*.

ВВЕДЕНИЕ

Передача и отвод тепла, выделяющегося при работе различного оборудования, всегда были и остаются крайне важными задачами, актуальность которых в последние десятилетия только возросла в связи с мировой тенденцией к миниатюризации. Весьма перспективным направлением решения этих задач и повышения теплотехнических параметров процессов является использование замкнутых испарительно-конденсационных систем (ИКС). Примером ИКС могут служить тепловые трубы, впервые предложенные Р.С. Гоглером и Г.М. Гровером [1]. В тепловых трубах для передачи больших тепловых потоков при малых градиентах температуры используются фазовые переходы: в зоне нагрева жидкость превращается в пар, который переносится в зону конденсации, где, конденсируясь, отдает тепло. С

помощью капиллярно-пористой структуры конденсат возвращается в зону нагрева и цикл повторяется. Дальнейшее развитие тепловые трубы получили в патентах Г.Ф. Смирнова [2] и Х. Акачи [3] где приводится описание пульсационной тепловой трубы (ПТТ). За счет исключения капиллярно-пористой структуры им удалось значительно упростить устройство тепловой трубы. В наиболее простом виде пульсационная тепловая труба представляет собой змеевидно изогнутую трубку небольшого диаметра, из которой откачан воздух и которая заполнена определенным количеством жидкости. Одни части трубки нагреваются, а другие охлаждаются. При подведении определенной тепловой мощности в трубке начинается интенсивное пульсационное движение парожидкостной смеси и происходит перенос тепла из зоны нагрева в зону охлаждения. Несмотря на простую конструкцию, движение парожидкостной смеси внутри ПТТ носит очень сложный характер и зависит от многих факторов. Более того, в одинаковых условиях ПТТ может длительное время находиться в четырех различных квазистационарных состояниях [4]. Наиболее благоприятным, с теплотехнической точки зрения, является режим однонаправленной циркуляции теплоносителя. Так, в [4, 5] отмечается, что однонаправленная циркуляция улучшает теплообменные характеристики ПТТ. Ее можно добиться путем внесения определенных изменений в конструкцию ПТТ [6 - 9] или с помощью внешнего силового воздействия, например, используя электрогидродинамическую (ЭГД) прокачку [10]. В данной работе рассматривается влияние однонаправленной циркуляции, создаваемой ЭГД насосом, на термическое сопротивление трех- и пятивитковой ПТТ.

ЭГД НАСОС

Электрогидродинамический насос осуществляет прямое преобразование энергии электрического поля в кинетическую энергию заряженной жидкости. Имеются три основные механизма возникновения кулоновской силы: инжекция, индукция и проводимость. Система основных уравнений электрогидродинамики для слабопроводящих несжимаемых жидкостей имеет вид [11, 12]

$$\nabla(\varepsilon\mathbf{E}) = \rho, \tag{1}$$

$$\nabla\times\mathbf{E} = 0, \tag{2}$$

$$\nabla\,\mathbf{j} + \frac{\partial\rho}{\partial t} = 0, \tag{3}$$

$$\nabla\,\mathbf{v} = 0, \tag{4}$$

$$\rho_m\frac{\partial\mathbf{v}}{\partial t} + \rho_m(\mathbf{v}\nabla)\mathbf{v} = -\nabla p + \eta\nabla^2\mathbf{v} + \mathbf{f}, \tag{5}$$

где ε – диэлектрическая проницаемость среды, ρ – объемная плотность заряда, ρ_m – плотность жидкости, E – напряженность электрического поля, j – объемная плотность электрического тока, v – скорость жидкости, f – объемная плотность внешних сил, p – давление в жидкости, η – коэффициент динамической вязкости.

Для стационарного случая уравнение непрерывности тока (3) записывается следующим образом:

$$\nabla \mathbf{j} = 0 . \tag{6}$$

Плотность тока в жидкости можно разложить на две составляющие: конвекционную $j_к$ и миграционную j*, тогда $j = j_к + j^* = \rho \cdot v + \sigma \cdot E$. Получаем

$$\nabla (\rho \cdot \mathbf{v} + \sigma \cdot \mathbf{E}) = 0 . \tag{7}$$

В стационарных условиях и с учетом малости члена, учитывающего диффузию, уравнение движения жидкости (5) принимает вид:

$$\rho_m (\mathbf{v} \cdot \nabla)\mathbf{v} = -\nabla p + \mathbf{f} . \tag{8}$$

Поляризационные силы практически не оказывают влияние на течение жидкости при наличии в ней объемных зарядов [13], поэтому в уравнении импульсов можно учитывать только кулоновскую силу:

$$\rho_m (\mathbf{v} \cdot \nabla)\mathbf{v} = -\nabla p + \rho \mathbf{E} , \tag{9}$$

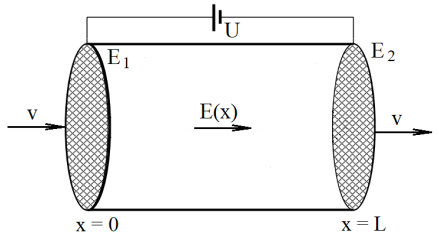


Рисунок 1. Расчётная схема ЭГД насоса

На рис. 1 представлена простейшая одномерная расчётная схема ЭГД насоса. Систему ЭГД уравнений (1), (2), (4), (7), (9) в этом случае можно записать в следующем виде:

$$\rho = \varepsilon_0 \varepsilon \, dE / dx , \tag{10}$$

$$\frac{d}{dx}(\rho \mathrm{v} + \sigma E) = 0 , \tag{11}$$

$$\frac{dp}{dx} - \rho E + \xi \, \rho_m \mathrm{v}^2 / (2L) = 0 , \tag{12}$$

$$dV / dx = 0. \tag{13}$$

где ξ – коэффициент местного сопротивления ЭГД насоса.

Граничные условия: E(0) = E_1, E(L) = E_2, v(0) = v. Здесь E_1 и E_2 – напряженности поля на эмиттере и коллекторе насоса, соответственно. Решение этой системы обыкновенных дифференциальных уравнений для создаваемого напора имеет вид:

$$p = 2\frac{k-1}{k+1}(\varepsilon_0 \varepsilon E_{cp}^2 + 4\frac{\mathrm{v}}{b}) - \frac{\xi \cdot \rho_m \mathrm{v}^2}{2},$$

где $E_{cp} = (E_1 + E_2)/2$, $k = E_2 / E_1$.

Максимальный напор будет в статическом режиме (при v = 0):

$$p_{\max} = 2\frac{k-1}{k+1}\varepsilon_0 \varepsilon E_{cp}^2.$$

Из последнего уравнения можно сделать вывод, что максимальный напор ЭГД насоса в целом пропорционален квадрату средней напряженности электрического поля в межэлектродном пространстве насоса.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследования проводились на экспериментальном стенде, описанном ранее в [14], где электрическое поле действовало на зону кипения. В данном исследовании вместо воздействия на зону кипения в контур ПТТ был встроен ЭГД насос (рис. 2). Это дало возможность упростить конструкцию устройства за счет исключения стеклянных вставок с соосно установленными высоковольтными электродами и, соответственно, уменьшить количество мест соединений участков трубки.

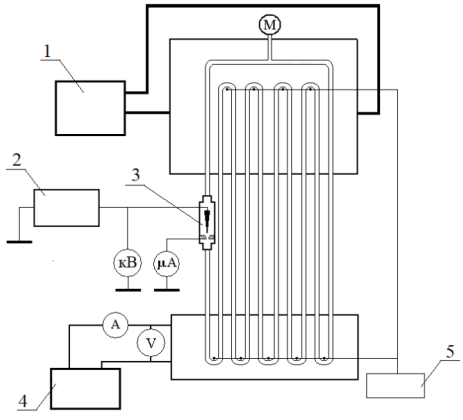


Рисунок 2. Схема экспериментального стенда: 1 – термостат, 2 – источник высокого напряжения; 3 – ЭГД насос; 4 – источник напряжения; 5 – микровольтметр

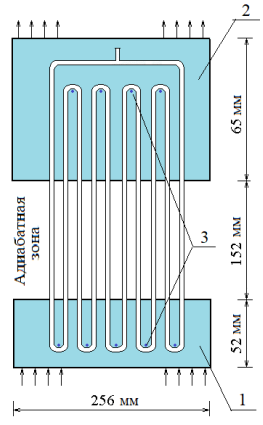


Рисунок 3. Схема ПТТ: 1 – зона испарения; 2 – зона конденсации; 3 – термопары

Попадание паровых пузырьков в ЭГД насос является нежелательным, так как возникает опасность электрического пробоя межэлектродного промежутка и нарушения работы насоса. Для исключения этого явления температура ЭГД насоса с помощью воздушного охлаждения поддерживалась на уровне менее 20 °С.

Геометрические размеры ПТТ остались неизменными (рис. 3) для возможности сравнения теплотехнических характеристик двух конструкций. В качестве теплоносителя использовался *н*-гексан. Для подвода тепла использовался алюминиевый блок, внутри которого были установлены два омических нагревателя мощностью по 50 Вт. Для обеспечения низкого термического сопротивления места контакта ПТТ с алюминиевым блоком смазывались термопастой.

Корпус ЭГД насоса изготовлен из органического стекла, а электроды - из латуни. В конструкции насоса предусмотрена возможность изменения межэлектродного расстояния без разборки насоса. В данной работе используется ЭГД насос инжекционного типа с электродной системой вида “игла-кольцо”, характеристики которого приведены ниже (рис. 4, 5):

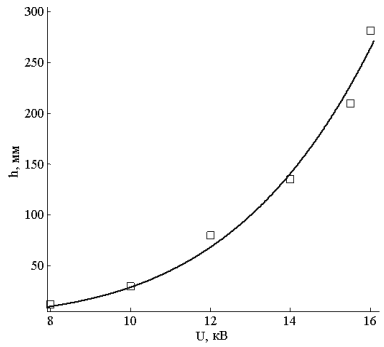


Рисунок 4. Напорная характеристика ЭГД насоса

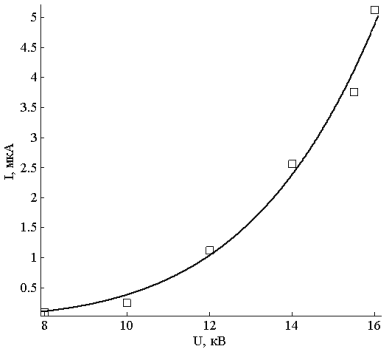


Рисунок 5. Вольтамперная характеристика ЭГД насоса

Методика проведения эксперимента и измерений описана в [14].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

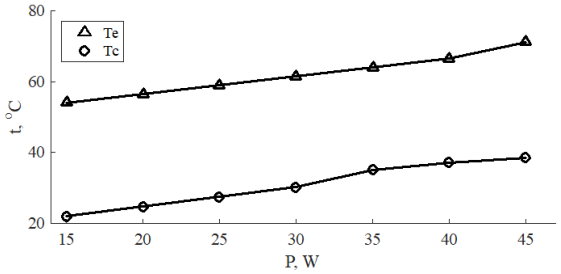
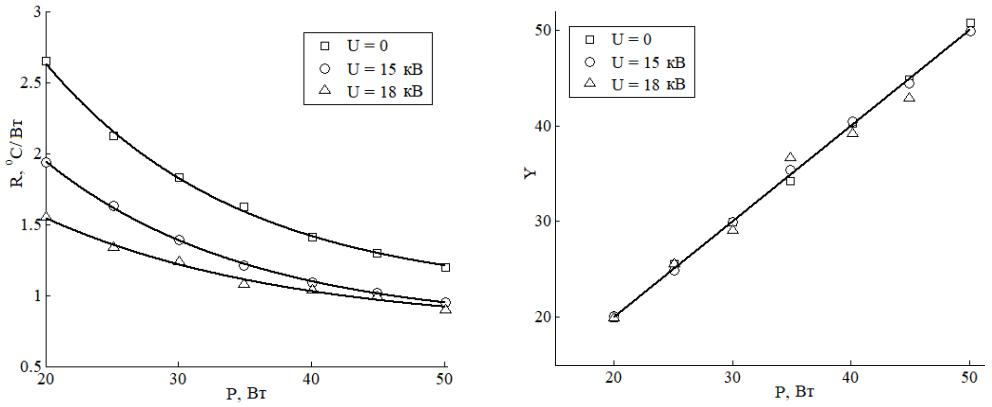


Рисунок 6. Средние стационарные температуры зон испарения и конденсации в зависимости от подводимой тепловой мощности. Количество витков – 3, рабочая жидкость – н-гексан, степень заполнения 0,7

Применение ЭГД насоса для интенсификации теплообменных процессов в ПТТ имеет ряд преимуществ по сравнению с воздействием электрического поля на зону кипения: упрощается конструкция, всегда происходит плавный запуск ПТТ и получены меньшие значения термического сопротивления. Средние температуры зон испарения и конденсации при увеличении подводимой тепловой мощности линейно возрастают (рис. 6), при подаче высокого напряжения на ЭГД-насос происходит снижение температуры этих зон на 2-4 °С. При малых тепловых мощностях ЭГД прокачка позволяет уменьшить термическое сопротивление ПТТ в 1,7 раза (рис. 7а).

Обобщение экспериментальных данных проводилось по методике, описанной в [15]. Для аппроксимации использовались зависимости вида $R = a \cdot e^{-bP} + c$, где a, b и c - некоторые коэффициенты, зависящие от напряжения U, подаваемого на ЭГД насос. Отложив по оси ординат выражение $Y = -\dfrac{\ln((R - c)/a)}{b} = P$, мы вместо трех кривых получаем биссектрису первой четверти. Аппроксимируя a, b и c как функции от U, получаем:
$a = -0{,}1988 \cdot U + 6{,}538$; $b = -0{,}0005537 \cdot U + 0{,}06907$; $c = -0{,}0132 \cdot U + 0{,}9976$.



а) Термическое сопротивление б) Обобщенная зависимость Y(P,U)

Рисунок 7. Тепловые характеристики пятивитковой ПТТ от подводимой мощности при различных напряжениях на электродах: степень заполнения 60%, жидкость - н-гексан

Обобщенная зависимость $Y(P,U)$ приведена на рис. 7б.

ВЫВОДЫ

Проведено экспериментальное исследование влияния ЭГД прокачки на термическое сопротивление ПТТ. С увеличением тепловой мощности термическое сопротивление ПТТ снижается. При наличии ЭГД прокачки наблюдается снижение термического сопротивления во всем исследованном диапазоне тепловых мощно-

стей. Влияние прокачки сильнее проявляется при малых значениях тепловой мощности. С ростом тепловой мощности температуры зон испарения и конденсации линейно возрастают, включение ЭГД прокачки позволяет уменьшить температуру зоны испарения на 2-4 °С.

Проведено обобщение зависимостей термического сопротивления от подводимой тепловой мощности и напряжения на электродах ЭГД насоса путем сведения их к биссектрисе первой четверти.

Результаты исследования могут быть использованы при проектировании устройств для охлаждения и термостатирования различного оборудования.

Н.Б. Работа выполнена благодаря финансовой поддержке Министерства образования и исследований Республики Молдова, подпрограмма 011203.

ЛИТЕРАТУРА:

1. MUELLER, C., TSVETKOV, P. A review of heat-pipe modeling and simulation approaches in nuclear systems design and analysis. În: *Annals of Nuclear Energy*. 2021. v. 160, 108393. ISSN 1873-2100.
2. ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. *Пульсирующая тепловая труба*: Авторское свидетельство № 504065, Изобретатели СМИРНОВ, Г.Ф., САВЧЕНКОВ, Г.А. кл. F 28D 15/00. Опубл. 25.02.76, Бюллетень №7.
3. AKACHI, H. Structure of micro-heat pipe, US Patent 4921041. June 15, 1993.
4. KHANDEKAR, S., GAUTAM, A.P., SHARMA, P.K. Multiple quasi-steady states in a closed loop pulsating heat pipe. În: *International Journal of Thermal Sciences*. 229. v. 48, nr. 3, p. 535-546. ISSN 1778-4166.
5. PASTUKHOV, V.G., MAYDANIK, Yu.F. Development of a pulsating heat pipe with a directional circulation of a working fluid. In: *Applied Thermal Engineering*. 2016. v. 109, part. A, p. 155–161. ISSN 1359-4311.
6. MEENA, P., RITTIDECH, S., POOMSA-AD, N. Application of closed-loop oscillating heat-pipe with check valves (CLOHP/CV) air-preheater for reduced relative-humidity in drying systems. In: *Applied Energy*. 2007. v. 84, nr. 5, p. 553-564. ISSN 0306-2619.
7. KWON, G.H., KIM, S.J. Operational characteristics of pulsating heat pipes with a dual-diameter tube. În: *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014. v. 75, p. 184-195. ISSN 0017-9310.
8. EBRAHIMI, M., SHAFII, M.B., BIJARCHI, M.A. Experimental investigation of the thermal management of flat-plate closed-loop pulsating heat pipes with interconnecting channels. În: *Applied Thermal Engineering*. 2015. v. 90, p. 838-847. ISSN 1359-4311.
9. JANG, D.S., LEE, J.S., AHN, J.H., KIM, D., KIM, Y. Flow patterns and heat

transfer characteristics of flat plate pulsating heat pipes with various asymmetric and aspect ratios of the channels. În: *Applied Thermal Engineering*. 2017. v. 114, p. 211-220. ISSN 1359-4311.

10. BOLOGA, M.K., GROSU, F.P., KOZHEVNIKOV, I.V., POLIKARPOV, A.A., MOTORIN, O.V. Heat transfer at electrohydrodynamic pumping through in an evaporator-condensing system. În: *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2014. v. 50, p. 238–245. ISSN 1068-3755.
11. MELCHER, J. R. *Continuum electromechanics*. Cambridge, MA: MIT Press, 1981. 627 p. ISBN 9780262131650.
12. RAMOS A. (Ed.) *Electrokinetics and electrohydrodynamics in microsystems*, 2011, Springer, 302 p. (CISM, v. 530), ISBN 978-3-7091-0899-4.
13. ПАНКРАТЬЕВА, И. Л., ПОЛЯНСКИЙ, В. А. Моделирование электрогидродинамических течений в слабопроводящих жидкостях. În: *Прикладная механика и техническая физика*. 1995. т. 36, в. 4, с. 36–44. ISSN 0869-5032.
14. МОТОРИН, О., БОЛОГА, М. Характеристики пульсационной тепловой трубы при воздействии электрического поля. În: *Conferinţa ştiinţifică naţională cu participare internaţională «Integrare prin Cercetare şi Inovare»,* 9−10 noiembrie 2023, Chisinau, CEP USM, 2024, p. 660−667. ISBN 978-9975-62-687-3.
15. GROSU, F.P., BOLOGA, AN.M., PAUR, H.-R., BOLOGA, M.K., MOTORIN, O.V. Generalization of the Townsend current-voltage characteristics of a corona discharge. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2014. v. 50, nr. 4, p. 306–310. ISSN 1934-8002.