

Розглянутий принцип роботи пульсаційної теплової труби. Розраховані середні коефіцієнти тепловіддачі в зонах нагріву та конденсації в залежності від параметрів охолодження та теплового потоку, що передається. Виявлена нерівномірність тепловіддачі в різних петлях ПТТ

Ключові слова: пульсаційна тепла труба, коефіцієнт тепловіддачі, зона нагріву, зона конденсації

Рассмотрен принцип работы пульсационной тепловой трубы. Рассчитаны средние коэффициенты теплоотдачи в зонах нагрева и конденсации в зависимости от параметров охлаждения и передаваемого теплового потока. Выявлена неравномерность теплоотдачи в разных петлях ПТТ

Ключевые слова: пульсационная тепловая труба, коэффициент теплоотдачи, зона нагрева, зона конденсации

Given article considers principle of pulsating heat pipe operation. Average heat transfer coefficients for heating and cooling zones are calculated according to parameters of cooling and input heat flux. Heat transfer unevenness is established in different turns of PHP

Key words: pulsating heat pipe, heat transfer coefficient, heating zone, cooling zone

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ В ПУЛЬСАЦИОННОЙ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЕ

А.Н. Наумова

Аспирант*

Контактный тел.: 050-355-06-01

E-mail: yaya_2010@ukr.net

В.Ю. Кравец

Кандидат технических наук, доцент*

*Кафедра атомных электростанций и инженерной теплофизики

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт»

пр. Победы, 37, г. Киев, 03056

Контактный тел.: (044) 454-96-03

E-mail: kravetz.kpi@ukr.net

1. Введение

Массовый доступ к компьютерным технологиям порождает огромный спрос на высокомощные малогабаритные электронные устройства. Создание подобных технологий неизбежно сопровождается возрастающей тепловой нагрузкой на миниатюрные элементы конструкций. Если раньше для удовлетворения потребностей в охлаждении элементов было достаточно довольно простых способов интенсификации теплоотвода (например, разработка развитых поверхностей, снижение температуры либо увеличение расхода охлаждающей среды, использование теплоносителей с улучшенными характеристиками, увеличение количества теплоотводящих единиц), то сегодня основной упор делается на усовершенствование имеющихся или создание новых методик охлаждения. К последним относятся разработка новых более высокотеплопроводных материалов и сплавов, нанотехнологии, теплоотвод за счет кипения и конденсации в малом объеме, микро- и миниатюрные тепловые трубы, а также одна из их разновидностей – пульсационные тепловые трубы (ПТТ) [1].

При всем многообразии экспериментальных исследований ПТТ довольно слабое внимание уделяется расчету коэффициентов теплоотдачи внутри трубки. В основном, упор делается на изучение тепловых харак-

теристик: термического сопротивления и максимальной передаваемой мощности. Однако для оценки этих характеристик необходимо знать, какие факторы и как влияют на теплоотдачу в ПТТ. В имеющейся литературе [2] есть пример расчета теплоотдачи в ПТТ. Однако сама конструкция исследуемого устройства, которая состоит из 40 петель и имеет 2 зоны конденсации по краям и зону нагрева в середине, не позволяет считать этот пример типовым и делать обобщающие выводы. К тому же диапазон передаваемых тепловых потоков находится в пределах 0-2000 Вт, что затрудняет сравнение при малых и средних тепловых нагрузках. Данная статья призвана восполнить эти пробелы в имеющейся информации о ПТТ.

2. Схема и принцип работы ПТТ

В экспериментальном исследовании использовалась 7-витковая ПТТ, изготовленная из медного капилляра с внутренним диаметром 1мм и внешним диаметром 2мм [3]. Теплоносителем служила вода, коэффициент заполнения составлял 50% от внутреннего объема ПТТ, что, по мнению многих исследователей [4,5], является оптимальной величиной. Схема расположения термомпар на ПТТ представлена на рис. 1.

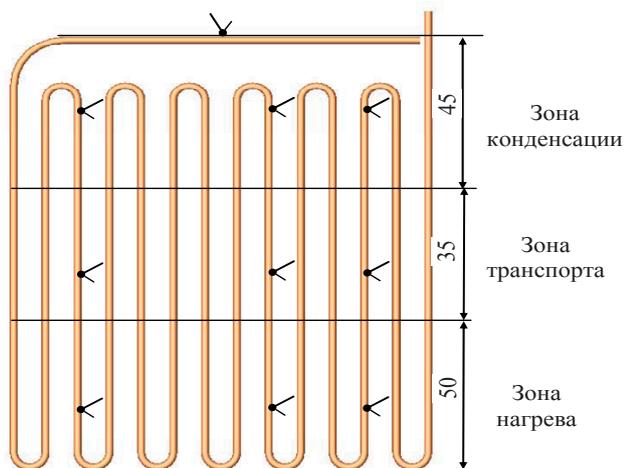


Рис. 1. Схема расположения термодар на ПТТ

ПТТ работает следующим образом. Сначала из ПТТ откачивают воздух, проводят дегазацию, затем заполняют определенным количеством рабочей жидкости. Теплоноситель распределяется таким образом, что паровые пробки чередуются с жидкостными снарядами, в результате представляя собой что-то наподобие парожидкостного «состава». Такое распределение происходит автоматически, без каких-либо затраченных извне усилий механической либо тепловой энергии. Определяющим фактором здесь является исключительно капиллярная сила. Не зависит этот процесс и от ориентации ПТТ в пространстве. К зоне нагрева подводится определенное количество теплоты, которое за счет пульсационного механизма передачи теплоты переносится в зону конденсации. Этот процесс постоянно сопровождается нестабильным состоянием двухфазной системы теплоносителя. Реально действующая ПТТ всегда имеет перепады температур не только между зонами нагрева и конденсации, но и между отдельными петлями. Это также способствует пульсационному движению теплоносителя.

Говоря о пульсациях теплоносителя, как правило, подразумевается движение жидкой фазы. При малых значениях передаваемого теплового потока пульсации (или осцилляции) жидкостных снарядов происходят, в основном, в транспортной зоне относительно какого-либо среднего положения снаряда, которое он занимает после заполнения ПТТ рабочей жидкостью (рис. 2).

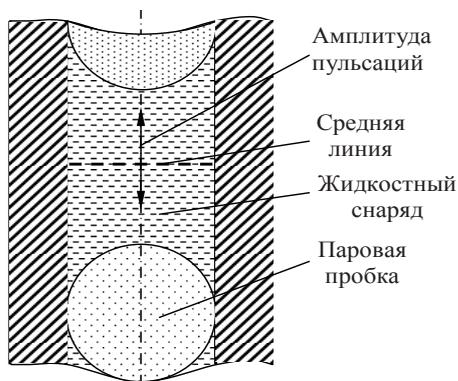


Рис. 2. Колебания жидкостного снаряда при подводе малых тепловых потоков

Эти колебания можно объяснить тем, что система испытывает некоторую термодинамическую нестабильность. Подводимый тепловой поток прогревает ту часть теплоносителя, которая находится в зоне нагрева. При этом если подвод теплоты осуществляется в месте расположения жидкостного снаряда, то происходит прогрев жидкости и аккумуляция энергии для последующего образования парового пузыря. Если же тепловой поток подводится локально к паровой пробке, то происходит испарение микрослоя жидкости вблизи стенки внутрь паровой пробки, таким образом, расширяя её и увеличивая по длине (поскольку считается, что по ширине пробка и так занимает все поперечное сечение трубы). Также рост температуры неизменно приводит к увеличению давления. Аналогичный процесс с уменьшением температуры, а, следовательно, и давления происходит и в зоне конденсации.

Названные факторы приводят к нарушению термодинамической стабильности системы и, как следствие, пульсациям температуры. Дальнейшее увеличение теплового потока приводит к образованию паровых пузырей внутри жидкостных снарядов в зоне нагрева, затем к их отрыву и движению в зону конденсации. Поскольку ПТТ является замкнутой системой, то попасть в зону конденсации, где меньше давление, паровые пузыри могут, только приводя в движение весь парожидкостный «состав» теплоносителя.

При этом можно наблюдать как движение во всей ПТТ, так и в отдельных её петлях. По-видимому, привести в движение всю массу теплоносителя способны несколько паровых пузырей, одновременно возникших и оторвавшихся в зоне нагрева. Отрыв одиночных пузырей приводит к тому, что часть парожидкостного «состава» теплоносителя движется до ближайшей достаточно большой паровой пробки, поглощающей момент инерции движения. При этом сама пробка либо сжимается, либо, что вероятнее, частично дробится на более мелкие пузырьки, которые, отрываясь, тормозят в следующем за пробкой жидкостном снаряде.

Как правило, первые пульсации происходят в зоне транспорта. Под действием теплового потока в зоне нагрева возникают паровые пузырьки в жидкостном снаряде, или тонкий микрослой жидкости испаряется внутрь паровой фазы, тем самым увеличивая её объем. Поскольку увеличение объема паровой фазы может осуществляться только за счет роста паровых пузырей, то именно таким образом парожидкостная смесь как бы выталкивается из зоны нагрева, и первыми индикаторами этого явления становятся термодары в зоне транспорта.

3. Результаты исследования

Коэффициенты теплоотдачи в зонах нагрева и конденсации ПТТ зависят от многих факторов: геометрии устройства, коэффициента заполнения и теплофизических свойств теплоносителя, условий охлаждения и уровня передаваемого теплового потока. К сожалению, однозначно установить степень влияния всех исходных величин довольно затруднительно, поэтому

была исследована зависимость теплоотдачи в ПТТ от передаваемого теплового потока и температуры жидкости, охлаждающей зону конденсации (расход был постоянным и равнялся $G = 1,734 \cdot 10^{-3}$ кг/с).

Сложность определения коэффициентов теплоотдачи в ПТТ состоит в том, что температуры в зонах нагрева и конденсации постоянно изменяются вследствие пульсационного движения потока теплоносителя, представляющего собой двухфазную смесь.

Поэтому при расчете коэффициентов теплоотдачи брались усредненные температуры по зонам ПТТ (рис. 3)

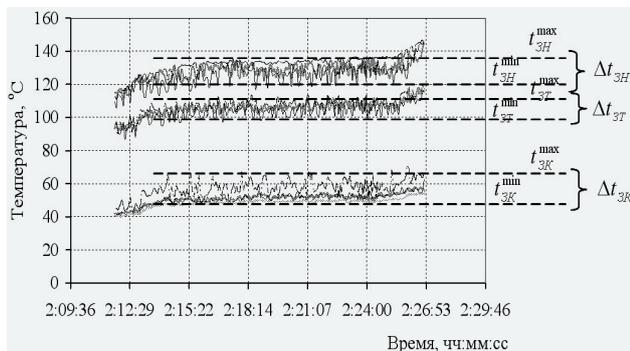


Рис.3. Усреднение температур по зонам ПТТ

С учетом обозначений на рис. 3, средние температуры можно выразить как:

$$t_{\text{ЗН}} = t_{\text{ЗН}}^{\text{min}} + \frac{\Delta t_{\text{ЗН}}}{2}; t_{\text{ЗТ}} = t_{\text{ЗТ}}^{\text{min}} + \frac{\Delta t_{\text{ЗТ}}}{2}; t_{\text{ЗК}} = t_{\text{ЗК}}^{\text{min}} + \frac{\Delta t_{\text{ЗК}}}{2} \quad (1)$$

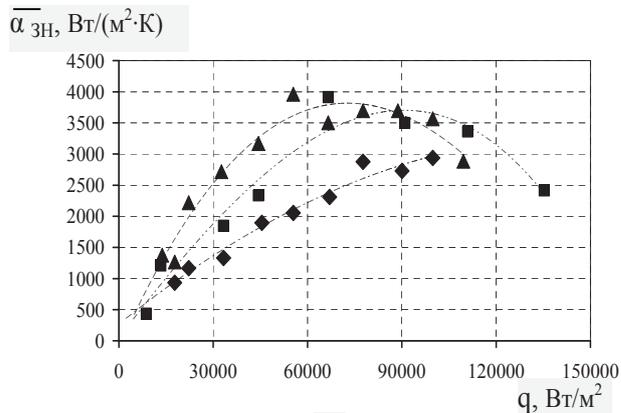
Таким образом, мы получаем усредненные коэффициенты теплоотдачи, которые рассчитываются по формулам:

$$\alpha_{\text{ЗН}} = \frac{Q}{F_{\text{ЗН}} \cdot (t_{\text{ЗН}} - t_{\text{ЗТ}})}; \alpha_{\text{ЗК}} = \frac{Q}{F_{\text{ЗК}} \cdot (t_{\text{ЗТ}} - t_{\text{ЗК}})}, \quad (2)$$

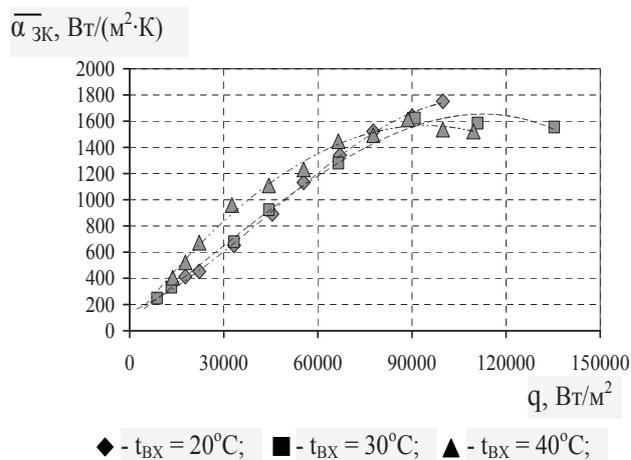
где $\alpha_{\text{ЗН}}, \alpha_{\text{ЗК}}$ – средние значения коэффициентов в зоне нагрева и зоне конденсации, Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{К}$); Q – передаваемый тепловой поток, Вт; $F_{\text{ЗН}}, F_{\text{ЗК}}$ – внутренняя площадь трубки, которая находится, соответственно, в зоне нагрева и зоне конденсации, м^2 ; $t_{\text{ЗН}}, t_{\text{ЗТ}}, t_{\text{ЗК}}$ – средние температуры в зоне нагрева, транспорта и конденсации, $^{\circ}\text{C}$.

В зависимости от величины подведенного теплового потока различают два режима работы ПТТ [6]. Средние коэффициенты теплоотдачи существенно отличаются для разных режимов.

Так, для первого режима работы, когда теплопередача осуществляется за счет теплопроводности стенки, коэффициенты теплоотдачи для зоны нагрева не превышают 400-450 Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{К}$), а для зоны конденсации – 200-250 Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{К}$). В то же время для второго режима работы ПТТ, когда, собственно, «включается» пульсационный механизм теплопередачи, коэффициенты теплоотдачи в зоне нагрева могут достигать 5-6 кВт/($\text{м}^2 \cdot \text{К}$), а для зоны конденсации – 1,8 кВт/($\text{м}^2 \cdot \text{К}$) (рис. 4).



а)



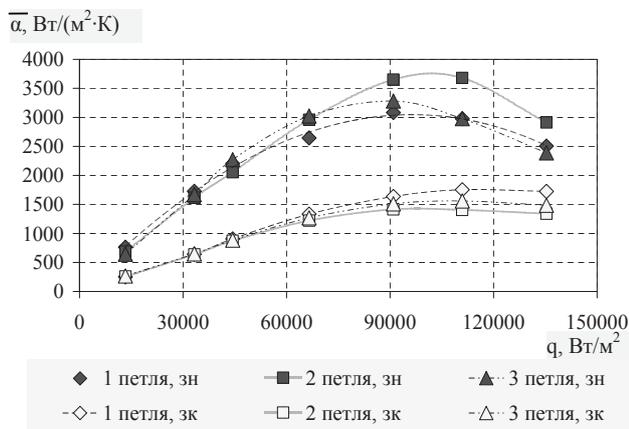
б)

Рис. 4. Зависимость средних коэффициентов теплоотдачи от плотности передаваемого теплового потока и температуры охлаждающей среды на входе в конденсатор t_{BX}
а) теплоотдача в зоне нагрева; б) теплоотдача в зоне конденсации

Как следует из графиков на рис. 4, коэффициенты теплоотдачи растут до какого-то определенного значения плотности передаваемого теплового потока, затем наступает спад. С физической точки зрения это можно связать с режимами течения теплоносителя внутри ПТТ. Так, самые низкие значения коэффициентов теплоотдачи приходятся на первый режим работы ПТТ и передачу теплоты за счет теплопроводности стенки трубы. Дальнейшее возрастание говорит о «включении» пульсационного механизма теплопередачи и активизации центров парообразования. При этом можно говорить о снарядном течении теплоносителя, когда паровые пузыри перемежаются с жидкостными пробками. Самым оптимальным с точки зрения теплоотдачи является, безусловно, кольцевой режим течения, когда испарение происходит через тонкую пленку жидкости. Максимальные значения средних коэффициентов теплоотдачи характеризуют, на наш взгляд, именно переход от снарядного режима течения к кольцевому. Причем особенностью, отмеченной в данной серии экспериментов, является то, что чем выше температура охлаждающей среды, тем меньше плотность

теплового потока, необходимого для наступления этого перехода. По графикам также можно судить о том, что максимального значения средние коэффициенты теплоотдачи достигают в зоне нагрева. Это логично объясняется тем, что в зоне нагрева ПТТ переход от снарядного режима течения к кольцевому также наступает раньше, чем в зоне конденсации. Можно также предположить, что дальнейший подвод теплового потока провоцирует частичное осушение тонкой пленки теплоносителя у стенки ПТТ, и вследствие этого наблюдается уменьшение значений коэффициентов теплоотдачи.

Средние коэффициенты теплоотдачи также можно считать для каждой петли отдельно, поскольку их температура, как правило, различается даже в пределах одной ПТТ (рис. 5).



зн — зона нагрева; зк — зона конденсации

Рис. 5. Зависимость $\alpha = f(q)$ для разных петель ПТТ

Как следует из рис. 5, коэффициенты теплоотдачи в ПТТ являются непостоянной величиной и могут существенно отличаться для разных петель. Причем некая суммарная теплоотдача в каждой петле остается величиной постоянной. На рис. 5 видно, что чем выше значение среднего коэффициента теплоотдачи в зоне нагрева петли, тем меньше оно в зоне конденсации. Это объясняется тем, что величина перепада температур между зоной нагрева и зоной конденсации, как правило, является величиной постоянной. Поэтому определяющим параметром является средний уровень температуры в зоне транспорта. Логично предположить, что если средняя температура в зоне транспорта находится ближе к зоне нагрева, то и разница температур $(t_{зн} - t_{зт})$, определяющая величину среднего коэффициента теплоотдачи в зоне нагрева, будет меньше. И, наоборот, для зоны конденсации. С физической точки зрения это можно объяснить направлением течения теплоносителя. Естественно, если теплоноси-

тель движется из зоны нагрева в зону конденсации, то и средний уровень температуры в зоне транспорта будет выше, чем если бы теплоноситель двигался в обратном направлении.

4. Выводы

В результате анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- Теплопередающие характеристики ПТТ в значительной мере зависят от условий охлаждения и передаваемого теплового потока.
- Существует несколько режимов течения теплоносителя в ПТТ. Сразу после наступления пульсационного механизма переноса теплоты имеет место снарядный режим течения, когда паровые пузыри перемежаются с жидкостными снарядами, а с ростом передаваемого теплового потока происходит переход от снарядного режима течения теплоносителя к кольцевому. Момент перехода создает оптимальные условия для теплоотдачи, как в зоне нагрева, так и в зоне конденсации ПТТ, о чем можно судить по максимальным значениям средних коэффициентов теплоотдачи.
- Неравномерность температурного поля по длине ПТТ сказывается на различии коэффициентов теплоотдачи в зоне нагрева и конденсации в разных петлях. Причем некоторое суммарное значение теплоотдачи от каждой петли остается неизменным.

Литература

1. Pat. 5219020 US. Structure of micro-heat pipe / Akachi H. – 1993.
2. Lanchao Lin. Experimental investigation of oscillating heat pipes for actuator cooling // Thermal management research studies. – Final report for period 20 August 1996 – 31 December 2000. – Volume 2. – March 2001. – 32 p.
3. Наумова А.Н., Кравец В.Ю. Технологические аспекты изготовления плоской пульсационной тепловой трубы // Збірник наукових праць СНУЯЕтаП. – 2009. - №1 (29). – с. 120-127.
4. Yang H., Khandekar S. and Groll M. Operational limit of closed loop pulsating heat pipes // Applied Thermal Engineering. –2008. – Vol. 28, Issue 1. – P. 49-59.
5. Cao X. A novel design of pulsating heat pipes with improved performance // 13th Int. Heat Pipe Conf., pp. 302-307, China, 2004.
6. Кравец В. Ю., Наумова А. Н., Вовкогон А.Н. Исследование режимов теплообмена в пульсационной тепловой трубе // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2010. – № 1(85). – С. 39-43.