

**ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА ВИТКОВ НА ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ОТДЕЛЬНО ВЗЯТОГО ВИТКА МНОГОВИТКОВЫХ ПУЛЬСАЦИОННЫХ ТЕПЛОВЫХ
ТРУБ**

Е.С. Алексеик, В.Ю. Кравец

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
г. Киев, Украина*

alexeik_kpi@ukr.net, kravetz_kpi@ukr.net

Пульсационные тепловые трубы имеют широкие перспективы использования в качестве теплопередающих устройств, т.к. сочетают в себе простоту конструкции и высокие теплопередающие характеристики. Поэтому они представляют значительный интерес для исследований. Одним из методов исследований данных объектов является выделение отдельного витка как элементарной составляющей пульсационной тепловой трубы. В докладе представлено описание экспериментальной установки для исследования теплопередающих характеристик отдельно взятого витка многовитковых пульсационных тепловых труб. Приведены результаты исследований, показано влияние количества витков на теплопередающие характеристики отдельно взятого витка, выделены и описаны основные режимы работы пульсационных тепловых труб.

Введение

Пульсационные тепловые трубы (ПТТ) являются одним из наиболее новых типов тепловых труб (ТТ), имеющих широкие перспективы использования в качестве теплопередающих устройств, благодаря простоте конструкции в сочетании с высокими

теплопередающими характеристиками. Однако на характеристики ПТТ оказывает значительное влияние ряд факторов, одним из которых является количество витков. Исследованию влияния данного фактора на теплопередающие характеристики ПТТ посвящен ряд работ [1-3], где ПТТ рассматривается как единое целое. Однако, как показано в [4-5] определенную ценность для исследований представляет и иной подход, где рассматривается один виток как элементарная составляющая ПТТ. Но в рамках данного подхода исследования проводились либо на замкнутой петле [4], либо на единичном U-образном колене, соединенном с компенсационной камерой [5], что не позволяет в полной мере учесть возможное влияние соседних витков реальной ПТТ на процессы, происходящие в отдельно взятом её витке. Целью данной работы было исследование влияния количества витков ПТТ на теплопередающие характеристики её отдельного витка.

Описание экспериментальной установки

Исследования проводились на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 1.

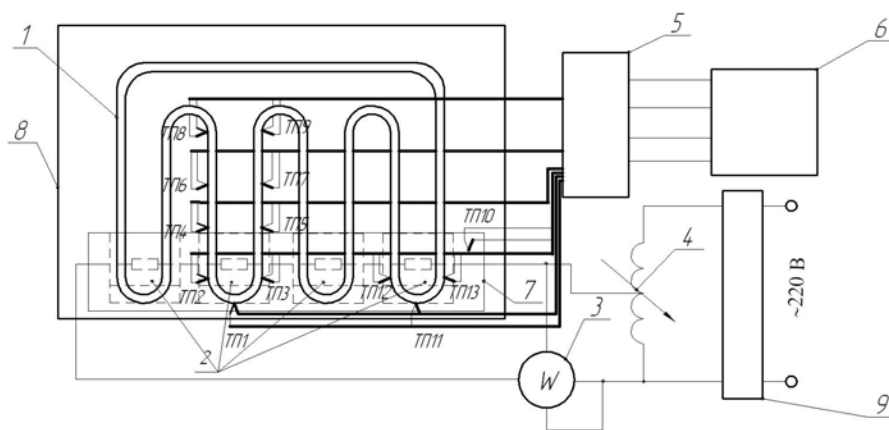


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – пульсационная тепловая труба; 2 – нагреватель; 3 – ваттметр; 4 – лабораторный автотрансформатор; 5 – аналого-цифровой преобразователь; 6 – персональный компьютер; 7 – тепловая изоляция; 8 – бокс; 9 – стабилизатор напряжения; ТП1-ТП10 – термопары

Объектами исследований были: стеклянная замкнутая пульсационная тепловая труба 1 (рис. 1) и единичная замкнутая петля с внутренним диаметром капилляра 3 мм. Стекло в

качестве материала корпуса ПТТ выбрано с целью проведения визуализации её работы. Количество витков ПТТ было переменным и составляло 4, 6, 8 и 10. Длина зоны нагрева как ПТТ так и петли составляла 50 мм, коэффициент заправки (КЗ) – $50\pm 5\%$, теплоноситель – вода. Теплоподвод к зоне нагрева (ЗН) осуществлялся с помощью электрического нагревателя 2, а отвод теплоты от зоны конденсации (ЗК) – к окружающему воздуху при условиях естественной конвекции. Для контроля температурного поля исследуемого витка на внешнюю поверхность его стенок было установлено девять медь-константановых термопар ТП1-ТП9. Три из них (ТП1-ТП3) были установлены в ЗН, остальные в – ЗК. Также на внешнюю поверхность теплоизоляции 7 была установлена термопара ТП10 для контроля теплотерь. Сигналы термопар через аналого-цифровой преобразователь 5 подавались на персональный компьютер 6. Конструкция экспериментального стенда предполагала установку ПТТ в вертикальное положение с нагревом снизу, а также в горизонтальное положение. Однако в данной работе будут приведены результаты только для вертикального положения, т.к. исследуемые ПТТ оказались неработоспособны в горизонтальном положении.

Результаты исследований

Влияние количества витков на разность температур между ЗН и ЗК отдельно взятого витка, полученное в результате проведенных исследований, показано на рис. 2.

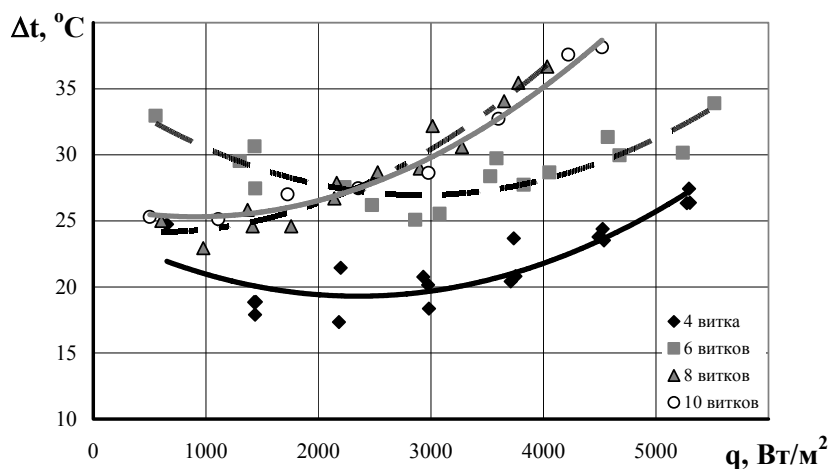
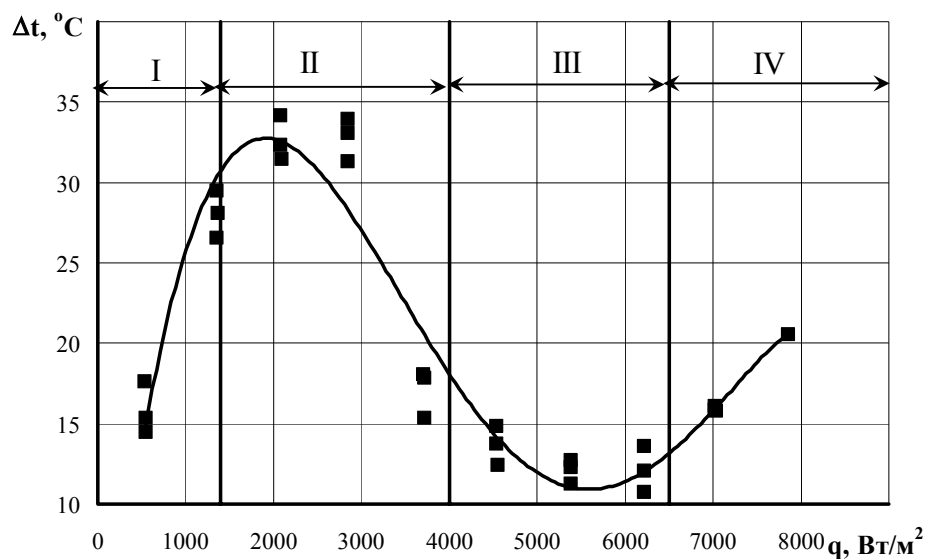


Рис. 2. Зависимость перепада температур между ЗН и ЗК одного витка Δt от плотности подводимого теплового потока q для ПТТ с различным количеством витков

Как видно из рис. 2 увеличение количества витков ПТТ приводит к увеличению Δt единичного витка. Причем перепад температур между ЗН и ЗК витка 6-витковой ПТТ больше, чем 4-витковой во всем диапазоне исследованных плотностей подводимого теплового потока от $5 \cdot 10^2 \text{ Вт/м}^2$ до $5,5 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$ (под плотностью подведенного теплового потока здесь понимается величина подведенного теплового потока, отнесенная к площади внешней поверхности ЗН), в то время как при $q \approx 5 \cdot 10^2 - 2,5 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$ Δt витка 8- и 10-витковых ПТТ ниже, чем у 6-витковой, но выше, чем у 4-витковой, а при $q > 2,5 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$ 8- и 10-витковые ПТТ обладают наивысшими значениями перепада температур витка среди всех исследованных ПТТ. Следует отметить, что значения Δt витка для ПТТ с 8 и 10 витками практически одинаково.

Форма кривых, представленных на рис. 2 объясняется сменой режимов работы ПТТ, вызванной увеличением подводимого теплового потока. Детально рассмотреть эти режимы позволило исследование влияния плотности подводимого теплового потока на Δt замкнутой петли (рис. 3).



I – теплопередача теплопроводностью и конвекцией; II – термосифонный режим; III – пульсационный режим; IV – предкризисный режим

Рис. 3. Влияние плотности подводимого теплового потока на перепад температур между ЗН и ЗК замкнутой петли

При небольших плотностях подводимого теплового потока движение теплоносителя в петле отсутствует, и передача теплоты осуществляется теплопроводностью по корпусу и

конвекцией в отдельных жидкостных и паровых снарядах (режим I на рис. 3). Тепловые потоки, передаваемые в этом режиме, незначительны, поэтому происходит нагрев ЗН при практически неизменной средней температуре ЗК. В результате происходит рост Δt с увеличением q .

Дальнейшее увеличение плотности подводимого теплового потока приводит к активации первых центров парообразования (ЦПО) в ЗН. На рис. 3 момент активации первых ЦПО представлен перегибом кривой в области II. Паровые пузыри, образующиеся на данных ЦПО, либо срываются с них и поднимаются в ЗК, если их отрывной диаметр меньше внутреннего диаметра капилляра, либо превращаются в паровые снаряды, если их отрывной диаметр больше внутреннего диаметра капилляра. Образовавшиеся в ЗН паровые снаряды расширяются из-за роста давления в них. Повышение давления вызвано теплоподводом к пару и увеличением количества пара, благодаря испарению в паровой снаряд жидкости с менисков соседних жидкостных снарядов. Расширяясь, паровые снаряды приводят в движение теплоноситель в петле, в результате чего интенсифицируется теплообмен между ЗН и ЗК. Интенсификация теплообмена приводит к повышению средней температуры в ЗК и её понижению в ЗН, в результате перепад температур между зонами снижается. Следует отметить, что действие ЦПО в данном режиме не является постоянным. Активация ЦПО приводит к резкому выбросу теплоносителя из ЗН в ЗК. При этом в ЗН поступает холодный теплоноситель из ЗК. Он охлаждает стенки ЗН, в результате чего действие ЦПО прекращается. При этом прекращается и движение теплоносителя в петле. Возобновление активности ЦПО происходит лишь после того, как стенки ЗН приобретают перегрев, достаточный для начала кипения. Таким образом, работа петли в данном режиме характеризуется периодическими выбросами теплоносителя из ЗН в ЗК, которые чередуются с периодами покоя, когда движение теплоносителя в петле отсутствует. Поскольку такие явления характерны для термосифонов, данный режим назван термосифонным (режим II на рис. 3).

С увеличением плотности подводимого теплового потока растет количество действующих ЦПО. Это приводит к более интенсивным пульсациям жидкостных снарядов и

уменьшению длительностей периодов покоя. В определенный момент периоды покоя исчезают, а пульсирующее движение жидкого теплоносителя, вызванное действием ЦПО, становится непрерывным. Это пульсационный режим работы ПТТ (режим III на рис. 3). Непрерывное пульсирующее движение жидкостных снарядов из ЗН в ЗК способствует значительному увеличению передаваемых тепловых потоков и, как следствие, уменьшению перепада температур между зонами. В данном режиме, как замкнутая петля, так и единичный виток ПТТ имеют наименьший Δt .

При дальнейшем увеличении плотности подводимого теплового потока петля переходит из пульсационного в предкризисный режим работы (режим IV на рис. 3). Он характеризуется периодическими осушениями ЗН. Осушение ЗН происходит, когда вся зона занята паром. Причины данного явления – активная работа большого количества ЦПО и увеличение общего паросодержания в ПТТ во время её работы, вследствие которого в трубе могут образовываться длинные паровые снаряды, которые могут занимать всю ЗН. Во время осушения ЗН действие ЦПО прекращается и, как следствие, прекращается движение теплоносителя в петле. Поскольку коэффициент теплоотдачи к пару ниже, чем к жидкости, происходит быстрый разогрев ЗН. При этом средняя температура ЗК либо остается практически неизменной, либо понижается вследствие охлаждения находящейся в ней жидкости. В результате перепад температур между ЗН и ЗК увеличивается.

Таким образом, анализируя представленные на рис. 2 кривые с точки зрения режимов работы ПТТ, можно сделать вывод, что при $q \approx 5 \cdot 10^2 - 6 \cdot 10^2 \text{ Вт/м}^2$ витки 4- и 6-витковых ПТТ работают в термосифонном режиме. Дальнейшее уменьшение Δt и наличие прогиба на кривых объясняется переходом к пульсационному режиму, а увеличение Δt в диапазоне плотностей подводимого теплового потока от $4 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$ до $5,5 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$ – переходом к предкризисному режиму. Витки 8- и 10-витковых ПТТ начинали работу с пульсационного режима и постепенно переходили к предкризисному, чем и объясняется увеличение перепада температур между ЗН и ЗК с ростом плотности подводимого теплового потока.

Влияние количества витков на термическое сопротивление отдельно взятого витка,

полученное в результате проведенных исследований, показано на рис. 4.

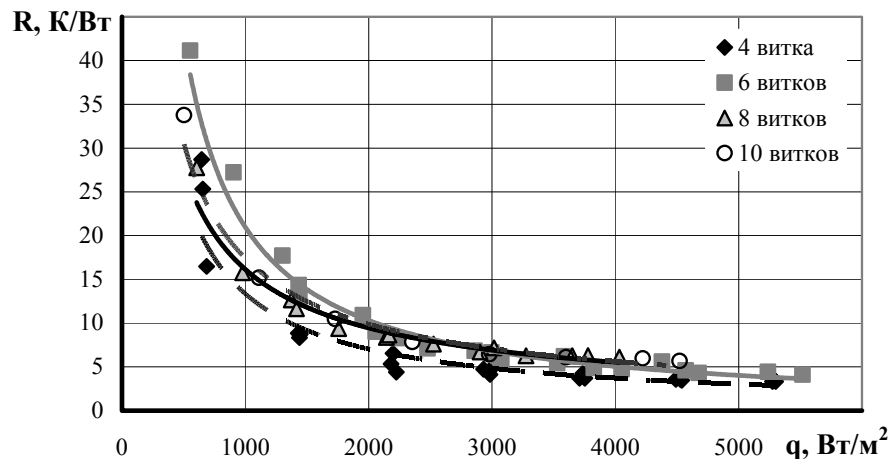


Рис. 4. Зависимость термического сопротивления одного витка R от плотности подводимого теплового потока q для ПТТ с различным количеством витков

Как видно на рис. 4 термическое сопротивление отдельно взятого витка с увеличением плотности подводимого теплового потока падает для всех исследованных ПТТ. Самым низким термическим сопротивлением во всем диапазоне плотностей подведенного теплового потока обладает виток 4-витковой ПТТ. При q меньше $2 \cdot 10^3$ Вт/м² наибольшее термическое сопротивление наблюдается у витка 6-витковой ПТТ, а для 8- и 10-витковой ПТТ R практически совпадает. При плотностях подведенного теплового потока больше $2 \cdot 10^3$ Вт/м² изменение количества витков практически не влияет на термическое сопротивление отдельно взятого витка, но в то же время, как показано в [6], оказывает значительное влияние на полное термическое сопротивление ПТТ. Следует заметить, что термическое сопротивление одного витка значительно превышает полное термическое сопротивление ПТТ.

Изменение термического сопротивления замкнутой петли с увеличением плотности подводимого теплового потока показано на рис. 5.

Сравнивая кривые, представленные на рис. 4 и рис. 5 можно заметить, что характер изменения термического сопротивления для отдельно взятого витка ПТТ и для замкнутой петли одинаков, но значения R при этом отличаются. Также заметно некоторое увеличение термического сопротивления замкнутой петли при $q \approx 7 \cdot 10^3 - 8 \cdot 10^3$ Вт/м². Это связано с возникновением кризисных явлений в петле.

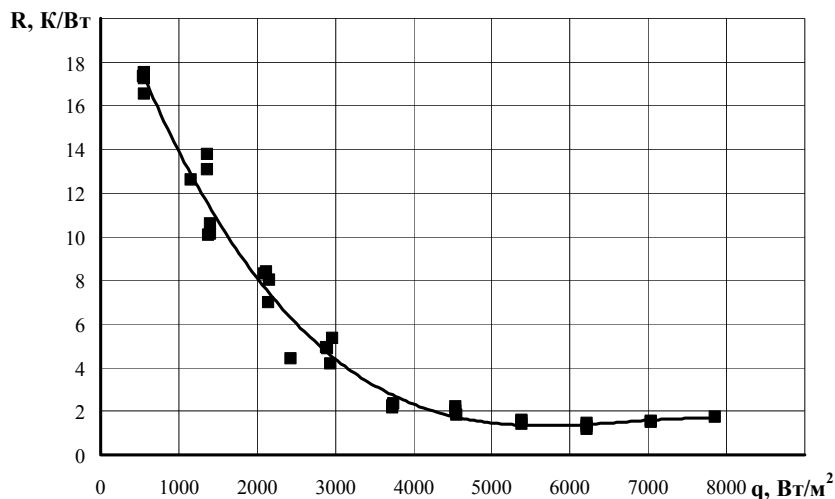


Рис. 5. Зависимость термического сопротивления замкнутой петли от плотности подводимого теплового потока

Как показало визуальное наблюдение при работе ПТТ КЗ отдельно взятого витка (здесь под КЗ отдельно взятого витка понимается отношение объема жидкости в витке к полному объему витка) может изменяться в достаточно широких пределах (приблизительно от 5% до 80-85%). Это связано с перетоками жидкости из витка в виток при движении теплоносителя внутри ПТТ. Возможно, этим объясняется как влияние количества витков на теплопередающие характеристики отдельно взятого витка и различие в значениях этих характеристик для отдельного витка и замкнутой петли. При одинаковом КЗ увеличение количества витков приводит к увеличению объема жидкости, заправленной в ПТТ, что может влиять на характер изменения КЗ отдельного витка при работе ПТТ, и таким образом оказывать влияние и на теплопередающие характеристики отдельного витка. КЗ замкнутой петли, в отличие от единичного витка, не изменяется при её работе, чем, скорее всего, и вызвано различие теплопередающих характеристик этих двух объектов.

При проведении исследований было замечено, что существует некоторый градиент температур между показаниями термопар, установленных на соседних трубках витка (рис. 6).

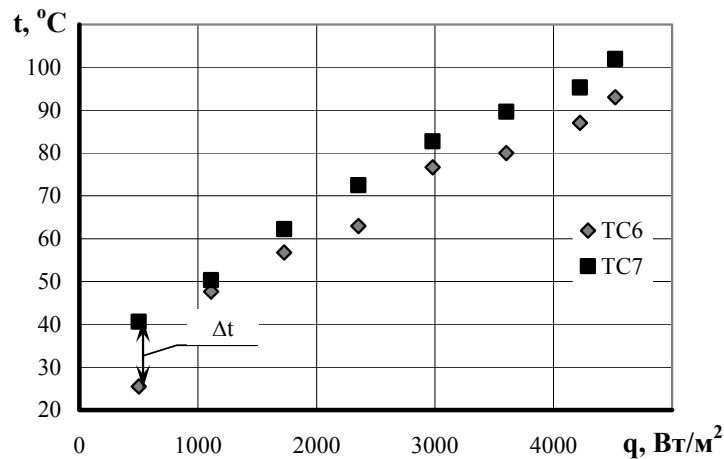


Рис. 6. Градиент температур между показаниями термопар, установленных на соседних трубках витка 10-витковой ПТТ

На рис. 6 в качестве примера показано изменение температур в точках установки термопар ТП6 и ТП7 (см. рис. 1) с увеличением плотности передаваемого теплового потока для 10-витковой ПТТ. Заметно наличие градиента между показаниями этих термопар. Аналогично, наличие градиента отмечалось и между показаниями других термопар, установленных в ЗК на соседних трубках витка у всех исследованных ПТТ и замкнутой петли. Это говорит о том, что между соседними трубками одного витка существует некоторый градиент давлений, влияющий на движение потока теплоносителя внутри ПТТ, а, следовательно, и на тепломассообмен между ЗН и ЗК.

Выводы

1. Исследовано влияние количества витков на теплопередающие характеристики отдельно взятого витка многовитковых ПТТ. Также выделены и описаны основные режимы работы ПТТ.
2. Увеличение количества витков ПТТ от 4 до 8 приводит к увеличению перепада температур между ЗН и ЗК отдельно взятого витка. Изменение количества витков от 8 до 10 практически не оказывает влияния на данную характеристику.
3. Самым низким термическим сопротивлением во всем диапазоне исследованных плотностей теплового потока ($5 \cdot 10^2 - 5,5 \cdot 10^3$ Вт/м²) обладает виток 4-витковой ПТТ. При

$q > 2 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$ изменение количества витков от 6 до 10 практически не оказывает влияния на термическое сопротивление отдельного витка.

4. Увеличение количества витков от 4 до 10 не оказывает влияния на характер изменения Δt и R отдельно взятого витка с увеличением q .

5. Различие между теплопередающими характеристиками отдельных витков ПТТ с различным количеством витков и замкнутой петли, возможно, вызвано изменением в достаточно широких пределах КЗ отдельно взятого витка при работе ПТТ.

Литература

1. Charoensawan P., Terdtoon P. Thermal performance of horizontal closed-loop oscillating heat pipes. Applied Thermal Engineering. 2008. vol. 28, iss. 5-6. pp. 460-466.

2. Charoensawan P., Khandekar S., Groll M., Terdtoon P. Closed loop pulsating heat pipes. Part A: parametric experimental investigations. Applied Thermal Engineering. 2003. vol. 23. pp. 2009–2020.

3. Rittidech S., Terdtoon P., Murakami M., Kamonpet P., Jompakdee W. Correlation to predict heat transfer characteristics of a closed-end oscillating heat pipe at normal operating condition. Applied Thermal Engineering. 2003. vol. 23. pp. 497–510.

4. Khandekar S., Groll M. Pulsating heat pipes: study on a two-phase loop. THERMO: 13th International Conference on Thermal Engineering and Thermogrammetry, Budapest, Hungary, 2003.

5. Конев С.В., Олехнович В.А. Экспериментальное исследование пульсирующей капиллярной тепловой трубы. VI Minsk International Seminar “Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators”, Minsk, Belarus, 2004.

6. Кравец В.Ю., Алексеик Е.С. Влияние количества витков на теплопередающие характеристики пульсационных тепловых труб. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2010. №6/7. с. 59-63.