

А. Н. НАУМОВА, к. т. н. В. Ю. КРАВЕЦ

Украина, НТУУ «Киевский политехнический институт»  
E-mail: kravetz\_kpi@ukr.net

Дата поступления в редакцию  
20.05 2010 г.

Оппонент к. т. н. В. Е. ТРОФИМОВ  
(ОНПУ, г. Одесса)

## ВЛИЯНИЕ НА ТЕПЛОПЕРЕДАЧУ В ПУЛЬСАЦИОННОЙ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЕ ЕЕ ОРИЕНТАЦИИ В ПРОСТРАНСТВЕ

*Рассмотрено влияние на термическое сопротивление и критическую плотность теплового потока в пульсационной тепловой трубе не только угла ее наклона к горизонту, но и общего пространственного положения.*

Стремление к снижению массогабаритных показателей современного теплонагруженного оборудования приводит к миниатюризации устройств и соответственно к росту удельных отводимых тепловых потоков. Для поддержания заданного температурного режима устройств необходимы эффективные системы охлаждения, которые при малых габаритах способны отводить значительные тепловые нагрузки и при этом иметь низкие значения термического сопротивления. Применение тепловых труб и термосифонов в системах охлаждения позволяет обеспечить необходимые условия отведения тепловой энергии, однако уменьшение их габаритов (диаметра парового пространства) приводит к увеличению термического сопротивления [1] и снижает эффективность их применения в системах охлаждения миниатюрных устройств. Также теплопередающие характеристики тепловых труб и, особенно, термосифонов [2] зависят от их ориентации в пространстве. В отличие от этих устройств, в пульсационных тепловых трубах (ПТТ), о которых впервые упоминается в [3], определяющей является капиллярная сила и поэтому ПТТ в общем случае мало чувствительны к влиянию сил гравитации на процесс переноса массы. Однако такая зависимость все же имеется и представляет интерес для исследования.

Исследование ПТТ с различными типами теплоносителя, проведенное в [4], показало, что критический тепловой поток имел наибольшее значение при использовании воды как в случае вертикальной, так и в случае горизонтальной ориентации трубы, а наименьшее — при использовании фреона R123, что напрямую связано с величиной скрытой теплоты парообразования, которая максимальна для воды.

В [5] для небольших значений передаваемого теплового потока показано, что термическое сопротивление с изменением угла наклона ПТТ ведет себя нелинейно, с увеличением угла наклона возрастает частота пульсаций как потока теплоносителя, так и температуры в зоне нагрева (ЗН) и в зоне конденсации (ЗК), что

улучшает тепловые характеристики ПТТ. Для меньших углов наклона возрастает время ожидания — время, за которое накапливается необходимое количество энергии для возникновения и роста паровых пузырей, и ПТТ работает менее интенсивно.

Однако ни в одной из указанных работ не учитывалось то, что исследуемые ПТТ представляют собой плоские змеевиковые конструкции, теплопередача в которых зависит и от угла наклона трубы к горизонту, и от ее общего пространственного положения. В проведенных в настоящей работе исследованиях изменялся не только угол наклона ПТТ к горизонту, но и ее ориентация относительно своей оси.

Для исследований была сконструирована экспериментальная установка, в которой кроме ПТТ имелись системы подвода и отвода теплоты и контрольно-измерительная аппаратура. ПТТ представляла собой медную капиллярную трубку с внутренним диаметром  $d_{\text{вн}} = 1$  мм и наружным диаметром  $d_{\text{нар}} = 2$  мм, согнутую в виде S-образного змеевика с семью петлями (рис. 1)

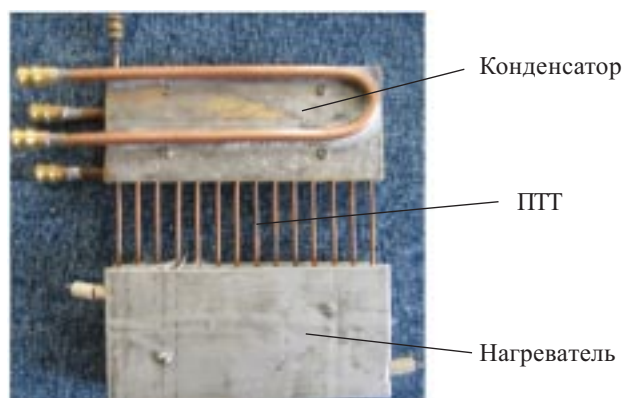


Рис. 1. ПТТ в сборке с нагревателем и конденсатором

Теплоносителем служила вода, коэффициент заполнения составлял 50% от внутреннего объема ПТТ. В ходе эксперимента изменяли положение ПТТ в пространстве, как это показано на рис. 2.

В результате проведения экспериментов были получены зависимости температуры в зонах нагрева, транспорта и конденсации ПТТ от времени для разных величин подведенного теплового потока. Как и для строго вертикальной ориентации, работу в на-

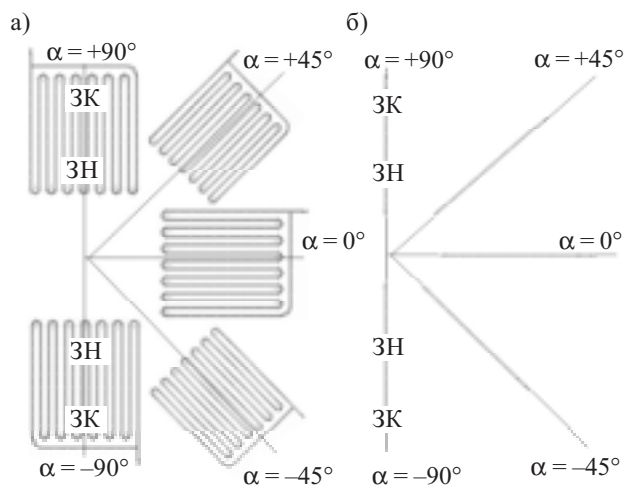


Рис. 2. Варианты размещения ПТТ в пространстве при ее фронтальном (а) и профильном (б) положениях

клоненной ПТТ можно условно разделить на два режима, соответствующих теплопередаче за счет теплопроводности стенки и конвекции (режим 1) и за счет кипения теплоносителя (режим 2) [6]. Однако в случае наклона ПТТ к горизонту наблюдается затягивание переходного режима, причем характер его одинаков для разных положений ПТТ относительно оси при одинаковых углах наклона (рис. 3).

Переход от первого режима работы ко второму имеет некоторые характерные особенности. При первом режиме в зоне нагрева ПТТ могут возникать одиночные пузыри с большим интервалом времени, необходимым для зарождения и роста парового пузыря. Диаметр пузыря в момент отрыва  $d_0$  прямо пропорционален капиллярной постоянной  $l_k$  [7, с. 144], которая является определяющей величиной при исследовании процессов, происходящих в капиллярах:

$$d_0 \sim l_k = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho' - \rho'')}} ,$$

где  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения;  
 $g$  — ускорение свободного падения;  
 $\rho', \rho''$  — соответственно плотность жидкости и пара.

Увеличение теплового потока способствует активизации центров парообразования. Появляющиеся в петлях пузырьки отрываются и двигаются в зону конденсации, поскольку там меньше температура, а следовательно, и давление. На место пузырька подтекает более холодный теплоноситель, и пузырьки из зоны конденсации начинают двигаться обратно, тем самым вызывая пульсационное перемещение парожидкостной смеси теплоносителя. Внешне это выражается периодическим колебанием температуры в зоне транспорта (рис. 4).

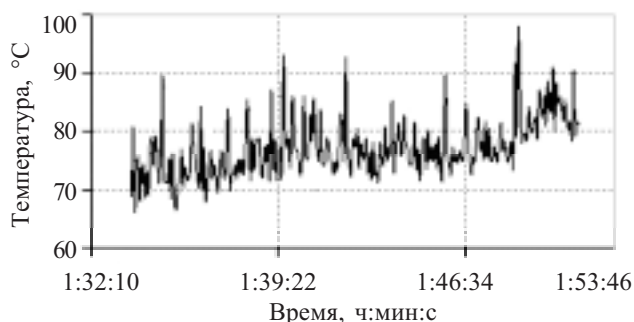


Рис. 4. Пульсации температуры теплоносителя в зоне транспорта, связанные с направлением его движения (указано время от начала эксперимента)

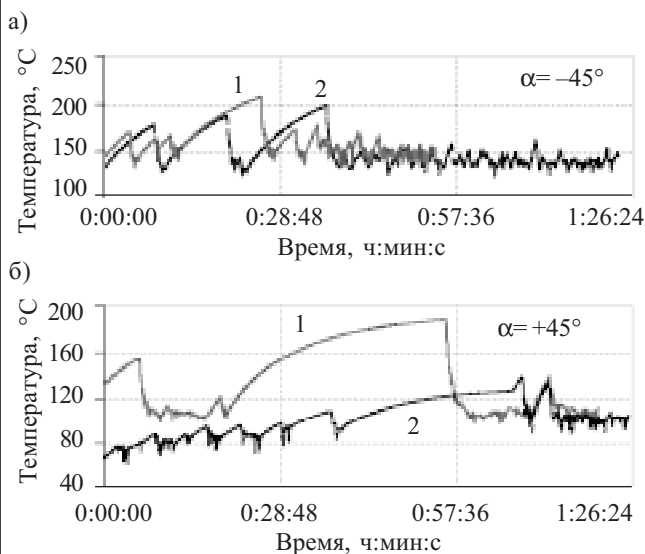


Рис. 3. Переход от первого режима работы ко второму при фронтальном (1) и профильном (2) расположении ПТТ для двух значений угла ее наклона (указано время от начала переходного режима)

По результатам проведения эксперимента были рассчитаны значения минимального термического сопротивления в зависимости от ориентации ПТТ в пространстве. Как видно из рис. 5, для наклонно расположенной ПТТ минимальное термическое сопротивление достигается при более низких значениях передаваемого теплового потока, чем для вертикальной.

Ориентация ПТТ в пространстве влияет на теплопередачу трубы в целом. Парообразование в зоне нагрева ПТТ начинается после подвода определенного

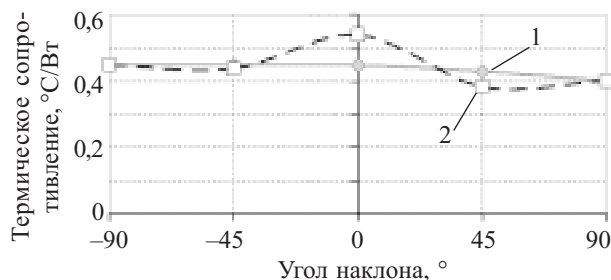


Рис. 5. Зависимость минимального термического сопротивления от угла наклона ПТТ к горизонту при профильном (1) и фронтальном (2) расположении

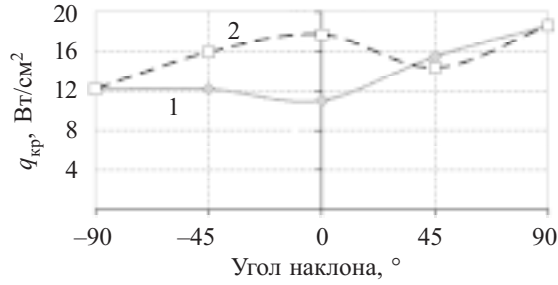


Рис. 6. Зависимость критической плотности теплового потока от ориентации ПТТ в пространстве при профильном (1) и фронтальном (2) расположении

количества теплоты, и с увеличением теплового потока паровая фаза будет двигаться с достаточно большой скоростью, препятствуя жидкой сконденсированной фазе возвращаться из конденсатора. В результате возникает затопление зоны конденсации, а ПТТ уже не способна функционировать из-за недостаточного количества жидкости в зоне нагрева. В горизонтальном же режиме явление затопления зоны конденсации ПТТ не является доминирующим.

В отличие от наклонного расположения ПТТ, для вертикального, когда зона нагрева находится ниже зоны конденсации, начало кризисных явлений соответствует большим значениям передаваемого теплового потока (рис. 6).

Как следует из рис. 6, значения плотности критического теплового потока различаются для фронтального и профильного вариантов расположения ПТТ. При фронтальном расположении ПТТ сила тяжести способствует перетеканию теплоносителя из одной петли в другую при положительных углах наклона и 0°, а при отрицательных, наоборот, препятствует, перемещая парожидкостной состав в зону конденсации. Поскольку ПТТ является замкнутой системой, движущийся теплоноситель способствует лучшему охлаждению зоны нагрева. Когда же ПТТ находится в профильном положении, сила тяжести равномерно распределена во всех петлях и имеет одинаковое влияние на движение теплоносителя во всех петлях, и в то же время, не препятствует его перемещению при отрицательных углах наклона (-45°). Этим можно объяснить тот факт, что для положительных значений угла наклона величины критического теплового потока меньше при профильном расположении, а для отрицательных — при фронтальном.

Из рис. 7 видно, что полученные в настоящей работе результаты хорошо согласуются с данными из других источников. Различия приведенных данных отмечаются для ПТТ с разным количеством петель или внутренним сечением и при использовании разных теплоносителей, а для труб, аналогичных по конструкции, но выполненных из разного материала,

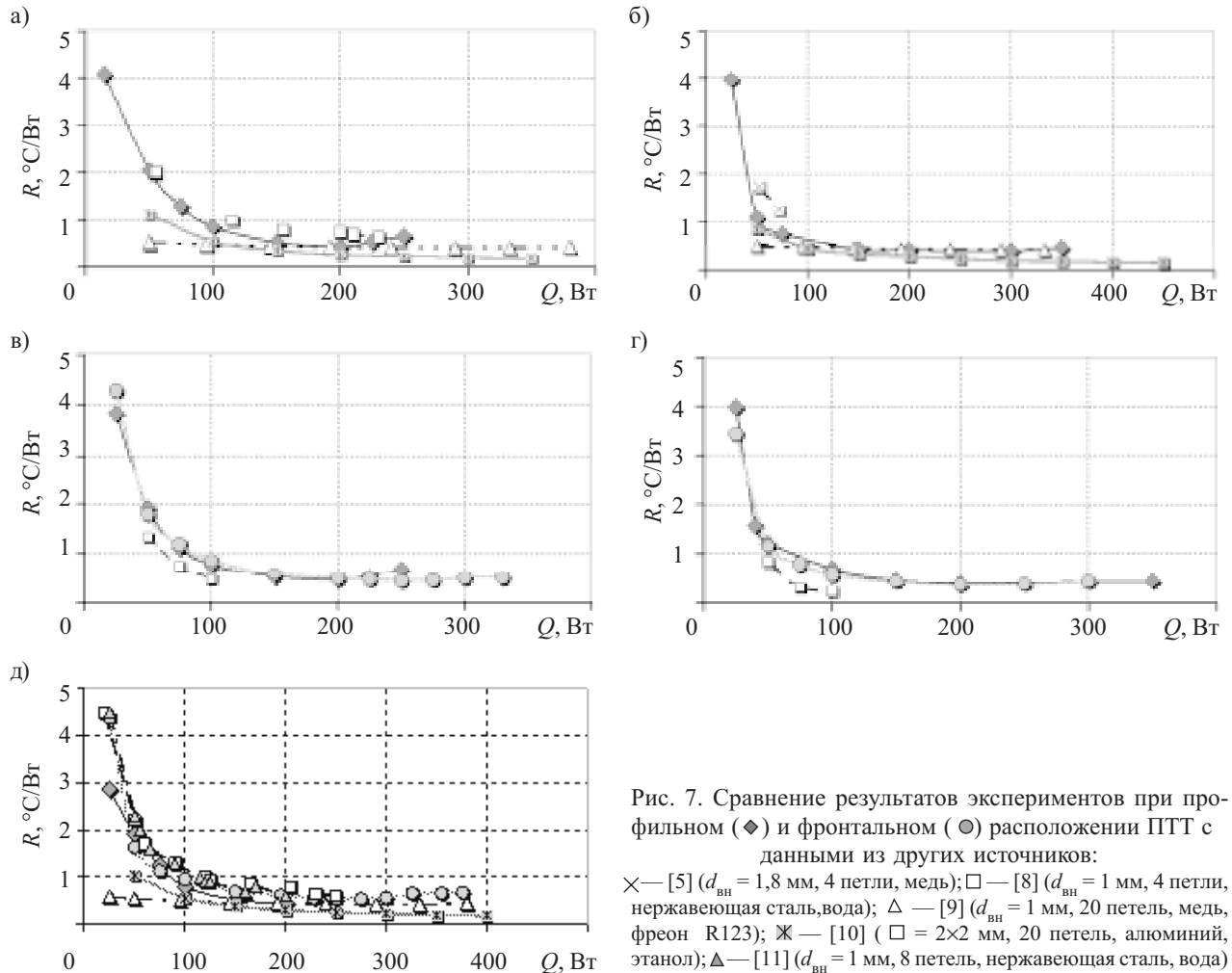


Рис. 7. Сравнение результатов экспериментов при профильном (♦) и фронтальном (●) расположении ПТТ с данными из других источников:

× — [5] ( $d_{вн} = 1,8$  мм, 4 петли, медь); □ — [8] ( $d_{вн} = 1$  мм, 4 петли, нержавеющая сталь, вода); △ — [9] ( $d_{вн} = 1$  мм, 20 петель, медь, фреон R123); Ж — [10] (□ = 2×2 мм, 20 петель, алюминий, этанол); ▲ — [11] ( $d_{вн} = 1$  мм, 8 петель, нержавеющая сталь, вода)

различия в величине термического сопротивления практически отсутствуют. Это указывает на то, что основным фактором, влияющими на термическое сопротивление ПТТ, помимо ориентации в пространстве, является ее геометрия. По всей видимости, материал стенки трубы играет решающую роль только при подводе малых тепловых потоков, когда перенос тепла осуществляется за счет теплопроводности стенки. После «включения» пульсационного механизма действия, т. е. закипания теплоносителя, величина теплоты, переносимой теплопроводностью, становится пренебрежительно малой по сравнению с конвективной составляющей.

\*\*\*

Таким образом, проведенные исследования показали, что на работу пульсационной тепловой трубы, в частности на величину критической плотности теплового потока, существенно влияет не только угол наклона к горизонту, но и ее ориентация в пространстве относительно своей оси.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Kravets V. Yu., Nikolaenko Yu. E., Nekrashevich Ya. V. Experimental studies of heat-transfer characteristics of miniaturized heat pipes // Heat transfer research.— 2007.— Vol. 38.— № 6.— P. 553—563.

2. Shiraishi M., Terdtoon P., Chiang Mai, Murakami M. Visual study on flow behavior in an inclined two-phase closed thermosyphon // Heat transfer engineering.— 1995.— № 16.— P. 53—59.

3. А. с. 504065 СССР. Пульсирующая тепловая труба / Г. Ф. Смирнов, Г. А. Савченков.— 30.04.1971.

4. Katpradit T., Wongratanaphisan T., Terdtoon P. et al. Correlation to predict heat transfer characteristics of a closed end oscillating heat pipe at critical state // Applied thermal engineering.— 2005.— № 25.— P. 2138—2151.

5. Qu W., Ma T. Experimental investigation on flow and heat transfer of a pulsating heat pipe // 12<sup>th</sup> Int. Heat Pipe Conf., P. 226—231, Moscow, 2002.

6. Кравец В. Ю., Наумова А. Н. Исследование термического сопротивления пульсационной тепловой трубы // Труды 10-й МНПК «СИЭТ-2009».— Украина, г. Одесса.— 2009.— С. 46.

7. Толубинский В. И. Теплообмен при кипении.— Киев: Наукова думка, 1980.

8. Кузнецов И. О., Смирнов Г. Ф. Экспериментальное изучение характеристик пульсационных тепловых труб // Холодильна техника і технологія.— 2005.— № 6 (98).— С. 50—54.

9. Yang Honghai, Khandekar S., Groll M. Operational limit of closed loop pulsating heat pipes // Applied thermal engineering.— 2008.— № 28.— P. 49—59.

10. Yang H, Khandekar S, Groll M. Operational characteristics of flat plate closed loop pulsating heat pipes // 13<sup>th</sup> Int. Heat Pipe Conf.— 2004.— China.— P. 283—289.

11. Borisov V., Buz V., Coba A. etc. Modeling and experimentation of pulsating heat pipes // 12<sup>th</sup> Int. Heat Pipe Conf., Moscow.— 2002.— P. 214—219.

#### НОВЫЕ КНИГИ

#### НОВЫЕ КНИГИ

**Зайков В. П., Киншова Л. А., Моисеев В. Ф.** Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Кн. 1. Однокаскадные устройства.— Одесса: Политехпериодика, 2009.— 120 с.

Книга посвящена оценке и прогнозированию показателей надежности однокаскадных термоэлектрических охлаждающих устройств, качественному и количественному описанию этих показателей в зависимости от токового режима работы термоэлемента, величины тепловой нагрузки, условий эксплуатации, а также с учетом воздействия повышенной или пониженной температуры среды как на стадии проектирования термоэлектрического устройства, так и на стадии его эксплуатации.

Книга предназначена для инженеров, научных работников, а также студентов соответствующих специальностей, занимающихся вопросами надежности элементов электроники и в целом РЭА, и разработкой и проектированием термоэлектрических устройств.

