

# КОНТУРНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ТРУБЫ – ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОНИКИ

Ю.Майданик, д.т.н.<sup>1</sup>

УДК 536.248,  
621.382  
ВАК 05.27.00

С конца 90-х годов прошлого века в системах терморегулирования космической техники начали применять контурные тепловые трубы (КТТ) – пассивные теплопередающие устройства, работающие по замкнутому испарительно-конденсационному циклу и использующие капиллярное давление для прокачки теплоносителя. КТТ обладают сверхвысокой эффективной теплопроводностью, легко адаптируются к условиям эксплуатации. Внедрение КТТ в наземной технике сдерживалось как высокой стоимостью их производства, так и недостаточной информированностью специалистов, занимающихся обеспечением тепловых режимов, о возможностях таких устройств. Однако после того, как в 2014 году в России было запущено серийное производство относительно недорогих КТТ, ситуация стала меняться. О возможностях и применении КТТ для охлаждения электроники рассказывается в статье.

**В**ыделение избыточного тепла – один из наиболее характерных процессов, сопровождающих работу различных технических объектов. Типичным примером являются полупроводниковые устройства, включая микропроцессоры, центральные и графические процессоры компьютеров, тиристоры, светодиоды и т.д., которые можно объединить термином "электроника". Во многих случаях это тепло оказывается избыточным, его необходимо отводить, чтобы обеспечить допустимую рабочую температуру указанных объектов, которая обычно находится в пределах 60–100 °С.

Поскольку плотность тепловых потоков, рассеиваемых такими объектами, может достигать нескольких десятков ватт на квадратный сантиметр, то задача отвода тепла становится экстремально сложной в условиях малой разности температур между источником и стоком тепла, их удаленности друг от друга и при одновременном дефиците пространства и ограничении по массе.

Такие условия типичны для многих современных устройств и оборудования. Решать эти задачи способны системы охлаждения с удаленным стоком тепла, в которых по тем или иным причинам невозможно обеспечить непосредственный тепловой контакт между источником и стоком тепла. Здесь ключевую роль играет элемент системы, выполняющий

<sup>1</sup> Институт теплофизики УрО РАН, заведующий лабораторией теплопередающих устройств, maidanik@itp.uran.ru.

тепловую связь между ними. Он должен обладать достаточно низким термическим сопротивлением и хорошо сопрягаться как с источником, так и со стоком тепла, легко конфигурироваться.

Именно такими свойствами обладают контурные тепловые трубы (КТТ). Эти устройства были изобретены в СССР в 70-х годах прошлого века [1, 2] для систем терморегулирования аэрокосмической техники [3, 4]. С тех пор было разработано много разнообразных вариантов КТТ, в частности, способных передавать сотни ватт на расстояния до нескольких десятков метров [5, 6].

На рубеже 2000-х годов, в связи с бурным развитием микроэлектроники и компьютерной техники, вектор развития КТТ был направлен в основном на создание небольших устройств мощностью до 300 Вт и длиной до 500 мм [7, 8]. КТТ – более сложные и, соответственно, более дорогостоящие устройства по сравнению с обычными тепловыми трубами [9]. Тем не менее в России удалось создать уникальное серийное производство КТТ, стоимость которых компенсируется значительно более высокой эффективностью и универсальностью [10]. Это важное обстоятельство открывает перспективу широкого использования КТТ в наземных условиях, в частности, в системах охлаждения электроники, содержащих компоненты, рассеивающие тепловые потоки с высокой плотностью.

### ЧТО ТАКОЕ КОНТУРНАЯ ТЕПЛОВАЯ ТРУБА

Контурные тепловые трубы относятся к числу пассивных теплопередающих устройств, работающих по замкнутому испарительно-конденсационному циклу и использующих капиллярное давление для прокачки теплоносителя. Устройство (рис.1) выполнено в виде замкнутого контура, включающего в себя испаритель с капиллярно-пористой структурой (фитилем) и конденсатор, которые соединены трубопроводами для раздельного движения паровой и жидкостной фаз теплоносителя (далее – паропровод и конденсатопровод, соответственно).

Структура фитиля, расположенного в испарителе, обеспечивает создание капиллярного давления, необходимого для прокачки теплоносителя по замкнутому контуру. Величина этого давления определяется формулой Лапласа:

$$\Delta P_c = \frac{2\sigma}{r_c} \cos\theta, \tag{1}$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения теплоносителя на границе "жидкость – пар",  $r_c$  – эффективный радиус капилляров фитиля,  $\theta$  – краевой угол смачивания теплоносителем стенок капилляров фитиля.

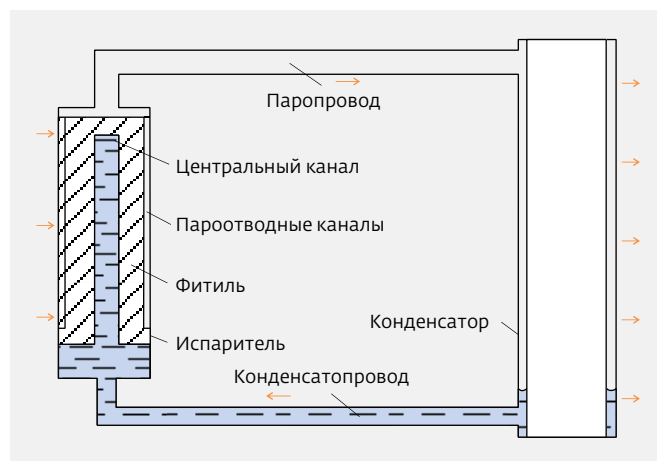


Рис.1. Принципиальная схема КТТ

Величина капиллярного давления должна соответствовать так называемому балансу потерь давления в КТТ:

$$\Delta P_c = \Delta P_v + \Delta P_l + \Delta P_g, \tag{2}$$

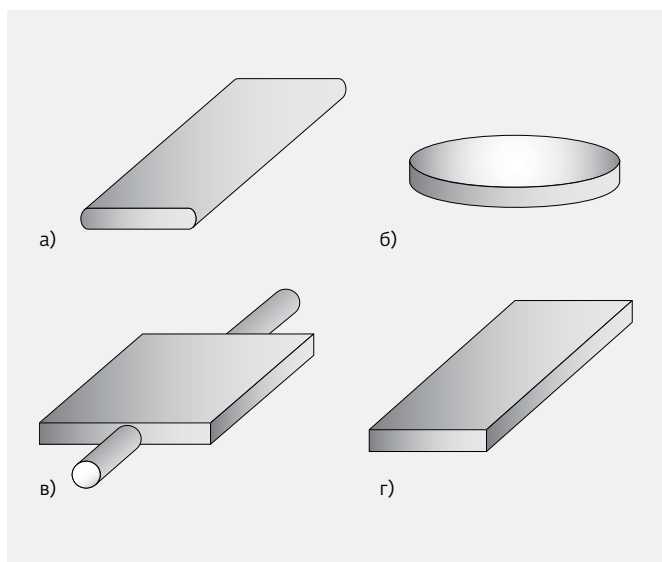
где  $\Delta P_v$ ,  $\Delta P_l$  – потери давления при движении теплоносителя в паровой и жидкой фазе,  $\Delta P_g$  – гидростатические потери давления.

Значения  $\Delta P_v$  и  $\Delta P_l$  зависят от геометрических параметров КТТ, режима течения теплоносителя и коэффициента проницаемости фитиля.  $\Delta P_g$  определяется формулой:

$$\Delta P_g = \rho_l g L \sin \varphi, \tag{3}$$

где  $\rho_l$  – плотность теплоносителя в жидкой фазе,  $g$  – гравитационная постоянная,  $L$  – длина КТТ,  $\varphi$  – угол наклона КТТ к горизонтальной плоскости.

Устройство работает следующим образом. При подводе тепловой нагрузки к активной зоне испарителя, длина которой соответствует длине пароотводных каналов, теплоноситель испаряется из фитиля, поглощая скрытую теплоту парообразования. Образовавшийся пар по паропроводу движется в конденсатор, находящийся в тепловом контакте со стоком тепла, где конденсируется и отдает тепло внешней среде, охлаждающей сток тепла. Затем сконденсировавшийся теплоноситель по конденсатопроводу поступает в испаритель и снова впитывается в фитиль, завершая рабочий цикл КТТ. Благодаря тому, что длина пути теплоносителя в мелкопористом фитиле относительно невелика – чаще всего несколько миллиметров, – потери давления в нем весьма незначительны. Это позволяет использовать капиллярно-пористые структуры с радиусом пор

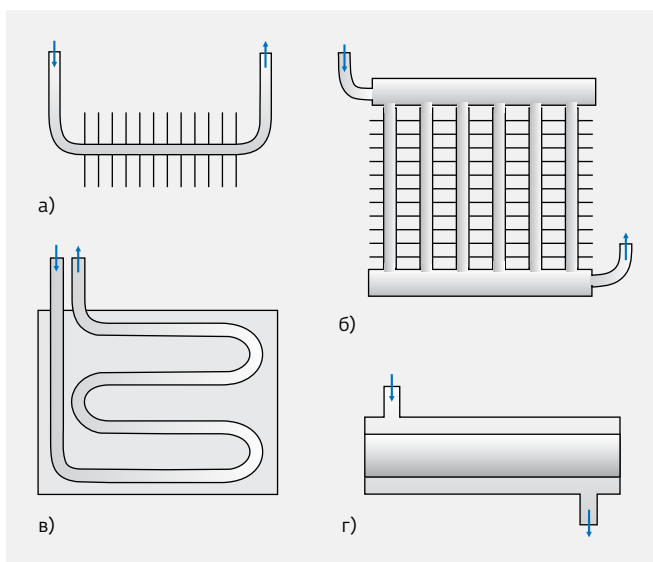


**Рис.2.** Варианты формы испарителей: а – плоскоовальный, б – плоский дискообразный, в – цилиндрический с плоским тепловым интерфейсом, г – плоский прямоугольный

1–10 мкм, создающие высокое капиллярное давление, измеряемое десятками килопаскалей. Такого давления вполне достаточно, чтобы использовать паропроводы и конденсаторопроводы диаметром 2–5 мм, которые легко изгибаются практически любым образом. Кроме того, появляется возможность обеспечить эффективную работу КТТ даже при неблагоприятной ориентации в гравитационном поле, когда теплоноситель в жидкой фазе должен двигаться снизу вверх, преодолевая гидростатическое сопротивление  $\Delta P_g$  (3). Таким образом удастся сделать устройства длиной до нескольких метров, работающие в так называемом антигравитационном режиме, который недоступен обычным тепловым трубам. Еще одно преимущество этих устройств в том, что испаритель и конденсатор – основные компоненты КТТ – могут иметь разные форму и размеры, адаптированные к условиям эксплуатации (рис.2, 3).

Плоские испарители (рис.2а, б и г) удобны тем, что они могут непосредственно сопрягаться с источниками тепла, контактная поверхность которых, как правило, имеет плоскую форму. Однако такие испарители могут использоваться в КТТ с теплоносителями, которые имеют давление не выше внешнего атмосферного. К числу таких теплоносителей относится, в частности, вода при температуре не выше 100 °С.

Цилиндрические испарители (рис.2в) значительно менее чувствительны к давлению теплоносителя. Например, КТТ с цилиндрическими испарителями



**Рис.3.** Варианты формы конденсаторов: а – трубчатый, б – коллекторный, в – змеевиковый (змеевиковый), г – щелевой ("труба в трубе")

из нержавеющей стали диаметром 8–10 мм и толщиной стенки 0,3 мм легко выдерживают давление в несколько десятков атмосфер. Наиболее эффективным теплоносителем для таких устройств, работающих при температуре до 80 °С, является аммиак, давление которого при этой температуре превышает 40 атмосфер. Однако для обеспечения надежного теплового контакта с плоскими источниками тепла такие испарители дополнительно снабжаются тепловыми интерфейсами, представляющими собой переходный элемент "цилиндр – плоскость", выполненный из теплопроводного металла, например, меди или алюминия.

Наиболее простой тип конденсатора – трубчатый (рис.3а), который при необходимости может быть снабжен оребрением. Устройство можно использовать при отводе тепла путем естественной или вынужденной конвекции воздуха. Значительно более сложный тип конденсатора – коллекторный (рис.3б), который обладает хорошо развитой поверхностью теплообмена. Его целесообразно использовать при отводе высоких тепловых потоков путем вынужденной конвекции воздуха. Наиболее распространенным и универсальным является змеевиковый (змеевиковый) конденсатор (рис.3в), который можно применять при различных способах отвода тепла, в частности, путем теплового излучения с большой поверхности. Щелевой ("труба в трубе") конденсатор (рис.3г) может служить эффективным компактным теплообменником для отвода высоких тепловых потоков путем вынужденной жидкостной конвекции.



Рис.4. Внешний вид различных КТТ

Возможны также различные комбинации этих конденсаторов, которые наиболее подходят для конкретных условий эксплуатации КТТ.

На рис.4 показан внешний вид КТТ различной конфигурации, снабженных цилиндрическими испарителями и плоскими испарителями дискообразной и плоскоооальной формы.

В качестве материалов для изготовления корпусных деталей КТТ чаще всего используются нержавеющая сталь или медь. Фитиль изготавливается из спеченных металлических или полимерных порошков. Такие материалы могут иметь радиус пор от 1 до 50 мкм и пористость от 45 до 75%. Наиболее подходящими теплоносителями для устройств, работающих в диапазоне температур 50–100 °С, являются вода, этанол, метанол, ацетон, аммиак, некоторые фреоны, а также ряд других жидкостей, химически совместимых с конструкционными материалами КТТ.

Цилиндрические испарители КТТ, используемые в системах охлаждения электроники, имеют обычно диаметр от 6 до 10 мм, длину активной зоны 30–60 мм. Диаметр паропровода и конденсаторопровода у них составляет 2–3 мм. Плоские прямоугольные и плоскоооальные испарители имеют обычно толщину от 2 до 10 мм, длину и ширину в пределах 30–60 мм.

Что касается конденсаторов, то их габариты могут варьироваться в очень широких пределах в зависимости от размеров стока тепла и условий его охлаждения.

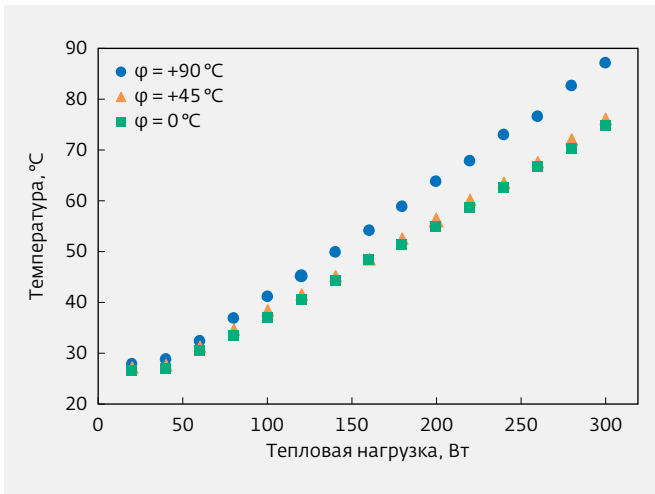


Рис.5. Зависимость температуры испарителя от тепловой нагрузки

**ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КТТ**

Одна из основных тепловых характеристик КТТ – зависимость ее рабочей температуры от величины тепловой нагрузки, которая представляется в графической форме. В качестве рабочей температуры обычно используется температура стенки испарителя в зоне нагрева. На рис.5 представлена типичная температурная зависимость, полученная для КТТ с аммиаком в качестве теплоносителя, снабженной цилиндрическим испарителем диаметром 10 мм (рис.6, см. таблицу).

Результаты тепловых испытаний получены при различных углах наклона КТТ. Горизонтальное положение устройства характеризуется углом наклона φ = 0°, а вертикальное, когда КТТ работала в наиболее тяжелом, антигравитационном режиме, углом наклона

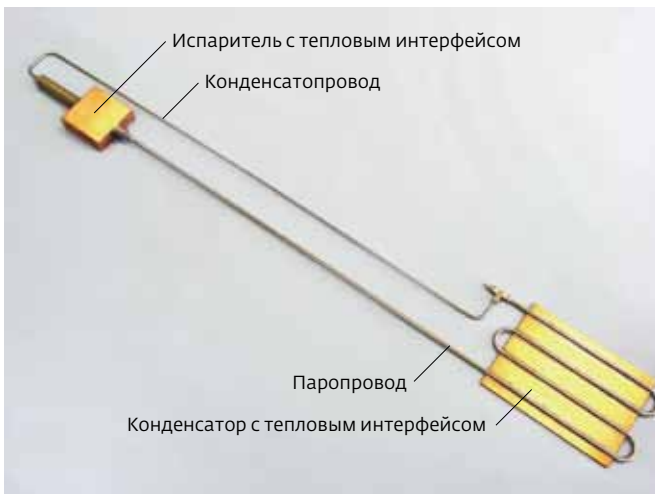


Рис.6. КТТ, которая использовалась в экспериментах

φ = +90°. Источником тепла служил алюминиевый блок размерами 40 × 40 × 10 мм, снабженный патронными нагревателями. В качестве стока тепла использовался медный плоский теплообменник, через который прокачивалась вода с расходом G<sub>охл.</sub> = 4 л/мин и постоянной температурой T<sub>охл.</sub> = 20 °С.

Другая важная тепловая характеристика КТТ – ее термическое сопротивление, которое рассчитывается по формуле:

$$R = \frac{Q}{T_{ev} - T_{con}}, \tag{4}$$

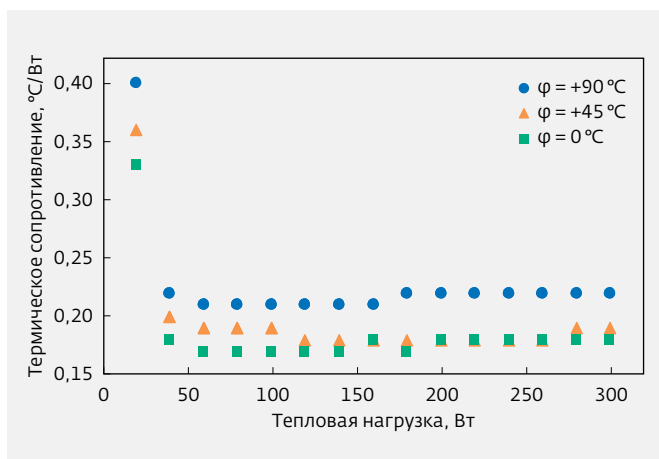
где Q – тепловая нагрузка (тепловой поток, подводимый к испарителю), T<sub>ev</sub> – температура испарителя в зоне нагрева, T<sub>con</sub> – температура конденсатора.

На рис.7 представлена зависимость термического сопротивления КТТ от тепловой нагрузки, полученная при тех же условиях.

Максимальная тепловая нагрузка 300 Вт, достигнутая при испытаниях КТТ, соответствует мощности, рассеиваемой современным графическим процессором (graphics processing unit, GPU) Nvidia GP100. При этом температура источника тепла, равная 75°С, была на 5°С ниже ее максимально допустимого значения для GPU. При тепловой нагрузке 140 Вт, которая соответствует самому мощному на сегодняшний день центральному процессору (central processing unit, CPU) Intel Core i7-5820K, температура источника тепла составляет 45°С. Это на 23,8°С ниже максимального значения, указанного в спецификации на этот процессор. Следует отметить, что нагрузка

Основные конструктивные параметры КТТ

| Компонент КТТ          | Характеристика           | Значение, мм |
|------------------------|--------------------------|--------------|
| Испаритель             | Диаметр                  | 10           |
|                        | Длина активной зоны      | 40           |
|                        | Полная длина             | 90           |
| Конденсатопровод       | Диаметр                  | 2            |
|                        | Длина                    | 390          |
| Паропровод             | Диаметр                  | 3            |
|                        | Длина                    | 330          |
| Конденсатор            | Диаметр                  | 3            |
|                        | Длина                    | 508          |
| Интерфейс испарителя   | Длина × ширина × толщина | 40 × 40 × 13 |
| Интерфейс конденсатора | Длина × ширина × толщина | 100 × 75 × 4 |



**Рис.7.** Зависимость термического сопротивления КТТ от тепловой нагрузки

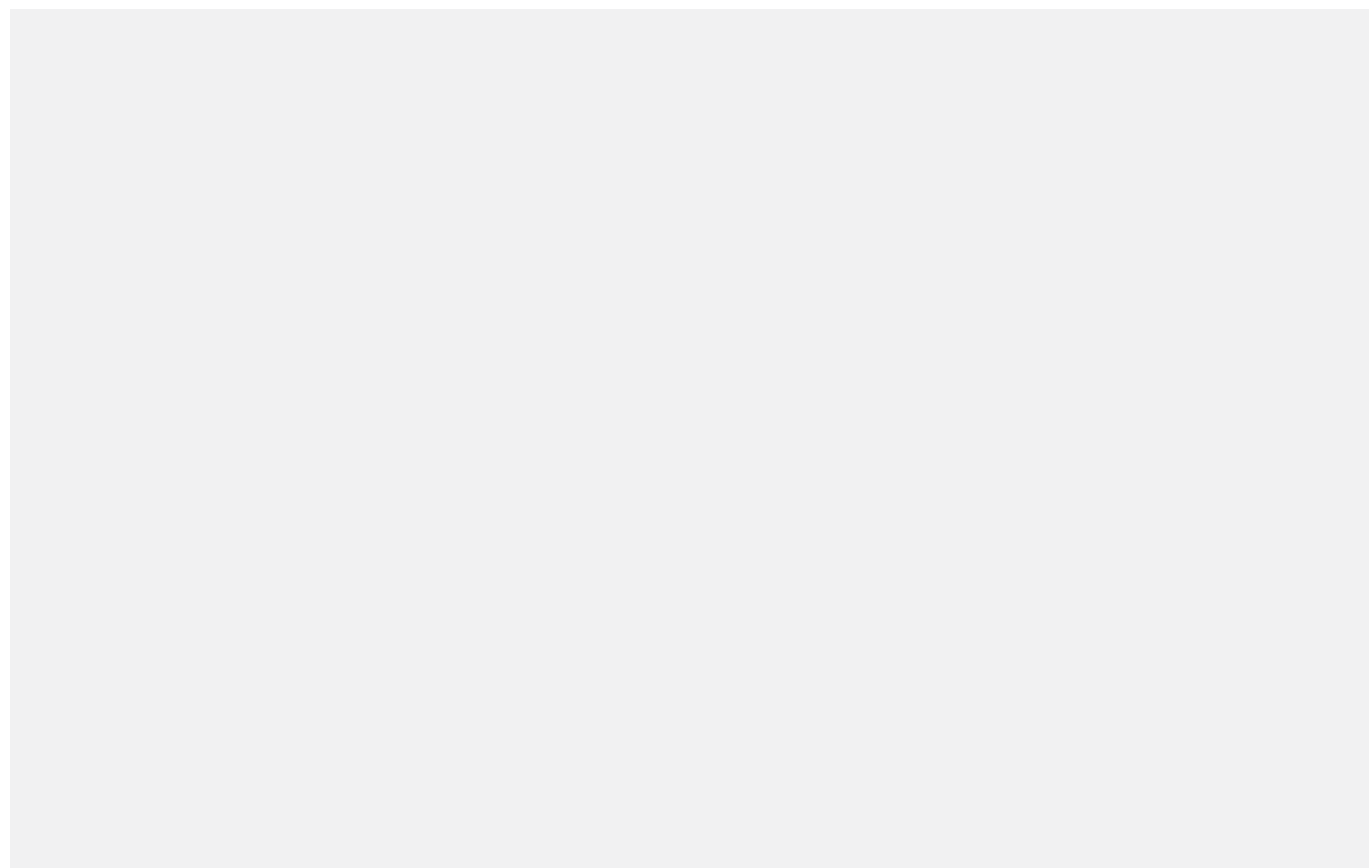
300 Вт не является критической для КТТ. Ее термическое сопротивление, которое находится на уровне 0,15°C/Вт, не имеет тенденции к росту, что свидетельствовало бы о наступлении кризиса теплообмена. Еще более высокие тепловые нагрузки, достигающие 500 Вт и более, могут быть получены на медных КТТ с водой в качестве теплоносителя, снабженных плоскими испарителями [11]. Что касается мощности

аммиачных КТТ с цилиндрическими испарителями меньшего диаметра, например 6 и 8 мм, то она может составлять 100–200 Вт, соответственно [7, 8].

### КТТ В СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТЕХНИКИ

Одна из наиболее перспективных областей применения КТТ для отвода тепла от электронных компонентов – системы охлаждения компьютеров различного назначения. Здесь весьма эффективно может быть использована концепция системы охлаждения с удаленным стоком тепла. Преимущество ее состоит в том, что сток тепла можно расположить в том месте, где это наиболее удобно с точки зрения компоновки или там, где его охлаждение может быть организовано наиболее эффективно. КТТ в такой системе выполняет роль почти идеальной тепловой связи между источником и стоком тепла.

Классический пример реализации концепции – система охлаждения компьютерного сервера, в котором КТТ использовались для отвода тепла от центральных процессоров на теплообменник, расположенный за пределами шасси сервера (рис.8). Теплообменник охлаждался проточной жидкостью с температурой 20 °C. При максимальной нагрузке, когда каждый из процессоров рассеивал по 130 Вт,

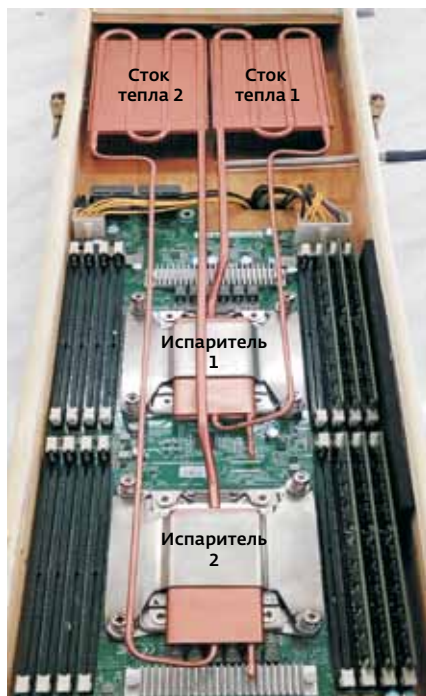




**Рис.8.** Система охлаждения компьютерного сервера с внешним жидкостным теплообменником

их температура находилась в пределах 68–69°C. При этом восемь вентиляторов, которые использовались в штатной комплектации сервера, были удалены.

В данном случае жидкостной теплообменник, расположенный за пределами сервера, позволял избежать нежелательного попадания охлаждающей воды на системную плату и тем самым существенно



**Рис.9.** Система охлаждения компьютерного сервера с удаленными воздушными радиаторами

уменьшить риск серьезной аварии. Кроме того, снижались затраты энергии на величину, потребляемую вентиляторами, и появилась возможность утилизации энергии, рассеиваемой центральными процессорами.

Аналогичный подход был реализован также в сервере, где две КТТ использовались для передачи тепла от двух 105-Вт центральных процессоров на охлаждаемые воздухом радиаторы, которые расположены на периферии шасси (рис.9). В этом месте достаточно пространства, чтобы почти на 50% увеличить поверхность радиаторов и за счет этого уменьшить на 20% расход охлаждающего воздуха.

Успешно применяются КТТ и в так называемой пассивной системе охлаждения персональных компьютеров, которая позволила сделать их бесшумными. Две КТТ использовались, в частности, для отвода тепла от центрального процессора Intel i5/4460 и от графического процессора Nvidia GTX660, которые при максимальной нагрузке рассеивали 84 и 120 Вт, соответственно (рис.10). С помощью КТТ все отводимое тепло распределялось по алюминиевому радиатору, заменяющему часть правой боковой стенки корпуса системного блока. При этом температура



**Рис.10.** Бесшумная система охлаждения персонального компьютера: а – внешний вид системного блока, б – вид со стороны радиатора, в – вид изнутри, г – размещение конденсаторов КТТ на внутренней поверхности радиатора

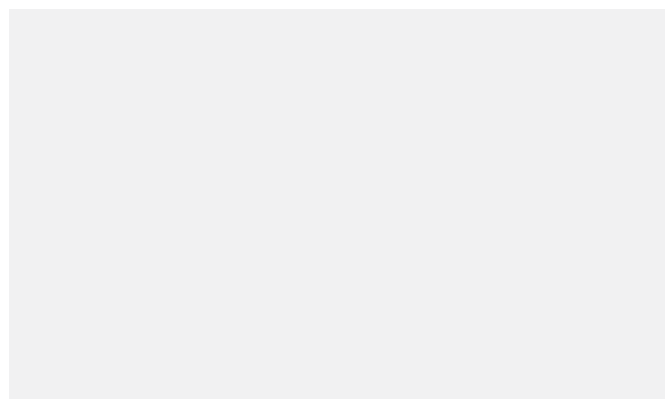


**Рис.11.** Компьютерный моноблок с бесшумной системой охлаждения: а – внешний вид, б – вид с обратной стороны, в – КТТ

радиатора во время работы компьютера не превышала безопасной для окружающих величины 50 °С.

Такое же решение было использовано в системе охлаждения компьютерного моноблока, в которой КТТ распределяла тепло, отводимое от процессора, по алюминиевому радиатору, встроенному в заднюю стенку корпуса моноблока (рис.11). Поскольку мощность процессора была невелика, поверхности радиатора было достаточно, чтобы рассеивать тепло в окружающую среду путем естественной конвекции. При этом температура радиатора не превышала 40 °С.

В заключение можно отметить, что интерес к КТТ растет, есть уверенность, что эти устройства, изобретенные в СССР, массовое применение впервые получат в России. В этом контексте данную статью можно рассматривать как один из инструментов популяризации передовой российской технологии в области систем охлаждения электроники.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Тепловая труба. Авторское свидетельство СССР № 449213, 1974.
2. Heat transfer apparatus. US' Patent № 4.515.209, 1984.
3. **Goncharov K., Kolesnikov V.** Development of Propylene LHP for Spacecraft Thermal Control System. – Proceedings of the 12-th Int. Heat Pipe Conference, Moscow, Russia, 2002, p. 171–176.
4. **Goncharov K. et. al.** 10-Years Experience of operation of Loop Heat Pipes Mounted on Board "Yamal-200" Satellite. – Proceedings of the 17-th In. Heat Pipe Conference, Kanpur, India, 2013, p. 539–546.
5. **Maydanik Yu.** Loop Heat Pipes // Applied Thermal Engineering. 2005. № 25. P. 635–657.
6. **Майданик Ю. Ф.** Контурные тепловые трубы – высокоэффективные теплопередающие устройства // Инновации. 2003. № 5. С. 83–36.
7. **Pastukhov V. G. et. al.** Miniature loop heat pipes for electronics cooling // Applied Thermal Engineering. 2003. № 23. P. 1125–1135.
8. **Майданик Ю. Ф., Вершинин С. В., Чернышева М. А.** Разработка и исследование аммиачной миниатюрной контурной тепловой трубы при различных внешних условиях // Тепловые процессы в технике. 2016. Т. 8. № 7. С. 312–320.
9. **Дан П., Рей Д.** Тепловые трубы. – М.: Энергия, 1979. 272 с.
10. www.loopheatpipes.com
11. **Maydanik Yu., Pastukhov V.** Copper-water Loop Heat Pipes: Issues and Achievements // Heat Pipe Science and Technology, An International Journal. 2015. Vol. 6. № 3. P. 1–16.