

УДК 536.248.2

Е. С. АЛЕКСЕИК, к. т. н. В. Ю. КРАВЕЦ

Украина, г. Киев, НТУУ «Киевский политехнический институт»

E-mail: alexeik_kpi@ukr.net

СИСТЕМА ОТВОДА ТЕПЛОТЫ ОТ ТЕПЛОНАГРУЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РЭА НА ОСНОВЕ ПУЛЬСАЦИОННОЙ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ

Разработана компактная система отвода теплоты (СОТ) на основе пульсационной тепловой трубы с водой в качестве теплоносителя, работоспособная при любой ориентации в пространстве. В условиях вынужденной конвекции при отводимой мощности 120 Вт (160 Вт подводимой мощности) термическое сопротивление СОТ составляет 0,1 К/Вт и она обеспечивает среднюю температуру охлаждаемого объекта в диапазоне от 58 до 60°C. Теплопередающие характеристики СОТ могут быть улучшены, поскольку имеется потенциал для ее модифицирования.

Ключевые слова: система отвода теплоты, пульсационная тепловая труба, теплопередающие характеристики.

Малые размеры современных электронных компонентов в совокупности с высокими мощностями тепловыделения приводят к необходимости отведения от них тепловых потоков значительных плотностей. Перспективным для решения этой задачи является использование пульсационных тепловых труб (ПТТ) [1, 2], отличающихся от обычных тепловых труб (ТТ) отсутствием капиллярной структуры, что значительно упрощает их конструкцию и изготовление. При этом по теплопередающим характеристикам ПТТ не уступают ТТ с капиллярной структурой.

Однако, несмотря на преимущества ПТТ, на данный момент существует весьма ограниченное количество конструкций систем отвода теплоты (СОТ) на ПТТ, и все они не лишены недостатков. Так, например, описанная в [3] СОТ рассчитана на работу при мощности тепловыделения до 60–70 Вт, что недостаточно для современных электронных компонентов (например, тепловыделение многоядерных центральных процессоров персональных компьютеров может достигать 130–140 Вт). Авторам же [4] не удалось запустить СОТ в положении против сил тяжести, когда ПТТ была заправлена водой, а в

случае заправки метанолом или фреонами СОТ в таком положении работала. Следует также отметить, что в основном во всех известных работах (например, [3–6]) в качестве теплоносителей использовались различные фреоны.

В настоящей работе предложена компактная СОТ на ПТТ, работоспособная при любой ориентации в пространстве при использовании воды в качестве теплоносителя, с теплопередающими характеристиками не хуже, чем у аналогичных конструкций на ПТТ и других видах ТТ.

Конструкция системы теплоотвода

Основным элементом рассматриваемой системы отвода теплоты (рис. 1) является пульсационная тепловая труба замкнутого типа, изготовленная из медного капилляра внутренним диаметром 1 мм. Такой внутренний диаметр, согласно данным [7], обеспечивает работоспособность ПТТ при любой ориентации в гравитационном поле. Внешний диаметр капилляра составляет 2 мм.

Количество витков ПТТ было выбрано равным 24 исходя из ранее проведенных исследований [8–10], где показано, что увеличение количества витков приводит к уменьшению термического сопротивления ПТТ. Витки расположе-

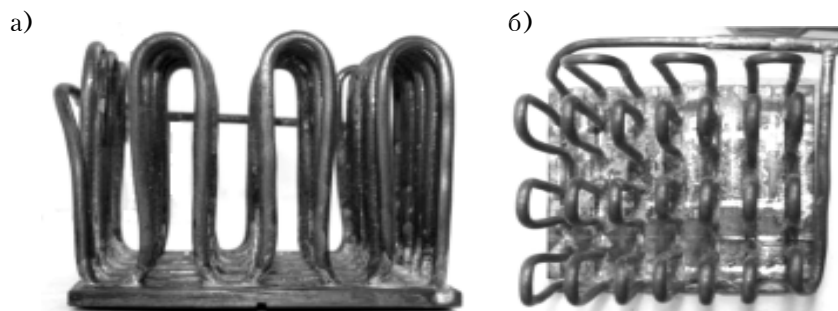


Рис. 1. Внешний вид СОТ на ПТТ: а — вид сбоку; б — вид сверху

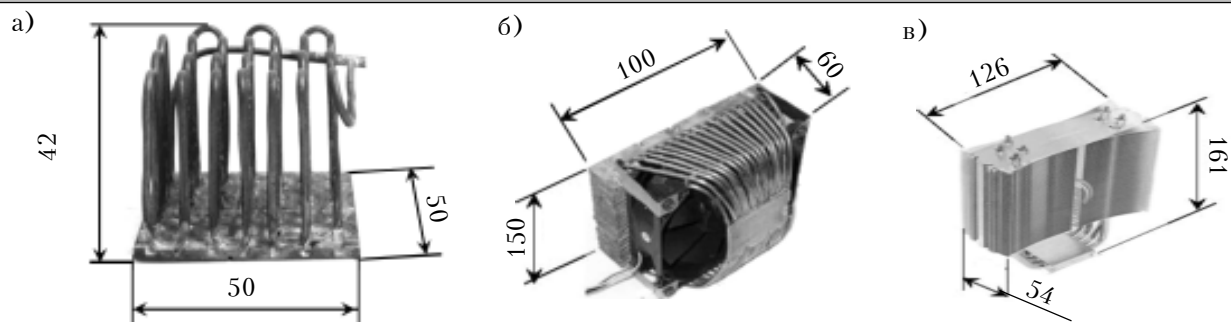


Рис. 2. Габаритные размеры (в мм) различных СОТ:

a — разработанная СОТ на ПТТ; *б* — СОТ на ПТТ Майданика Ю. Ф. и др. [4]; *в* — компьютерный кулер Thermalright True Spirit на обычных ТТ

ны таким образом (рис. 1, б), чтобы весь змеевик компактно помещался на основании размером 50×50 мм. В качестве основания использовалась медная пластина толщиной 3 мм. На одной из ее поверхностей были выфрезерованы канавки, в которые при помощи пайки устанавливалась ПТТ. Вторая поверхность была гладкой, к ней присоединялся охлаждаемый объект.

В качестве теплоносителя использовалась дистиллированная вода. Коэффициент заправки (отношение объема заправленной жидкости к общему объему ПТТ) составлял 50%.

Габаритные размеры СОТ — 50×50×42 мм — меньше, чем у аналогичных конструкций на ПТТ [4], а также у распространенных кулеров на обычных тепловых трубах для центральных процессоров персональных компьютеров (рис. 2).

Экспериментальная установка

Исследование теплопередающих характеристик рассматриваемой СОТ проводилось в условиях воздушного охлаждения при вынужденной и при естественной конвекции. Вынужденная конвекция рассматривалась, поскольку такой метод охлаждения является одним из наиболее распространенных в радиоэлектронной и компьютерной технике. Целью исследований в условиях естественной конвекции была провер-

ка возможности использования сконструированной СОТ в бесшумных системах охлаждения, т. е. системах, в которых отсутствуют вентиляторы и прочие движущиеся механические части, а также в различных герметичных устройствах, где невозможно организовать теплоотвод вынужденной конвекцией.

Исследование теплопередающих характеристик СОТ в условиях вынужденной конвекции проводилось на установке, схема которой приведена на рис. 3. СОТ 1 помещалась в рабочий участок аэродинамической трубы 3. Теплоподвод к СОТ осуществлялся с помощью электронагревателя 12, имитировавшего теплонагруженный элемент. Для улучшения термического контакта между корпусом нагревателя и СОТ использовалась теплопроводная паста КПТ-8. Для уменьшения теплопотерь в окружающую среду нагреватель покрывался слоем теплоизоляции из базальтового волокна. Мощность на нагревателе регулировалась при помощи лабораторного автотрансформатора (ЛАТР) 2 и контролировалась ваттметром 13. При проведении экспериментов она изменялась в пределах от 5 до 160 Вт, что полностью перекрывает диапазон тепловыделения современных центральных процессоров компьютеров, а также множества других полупроводниковых компонентов.

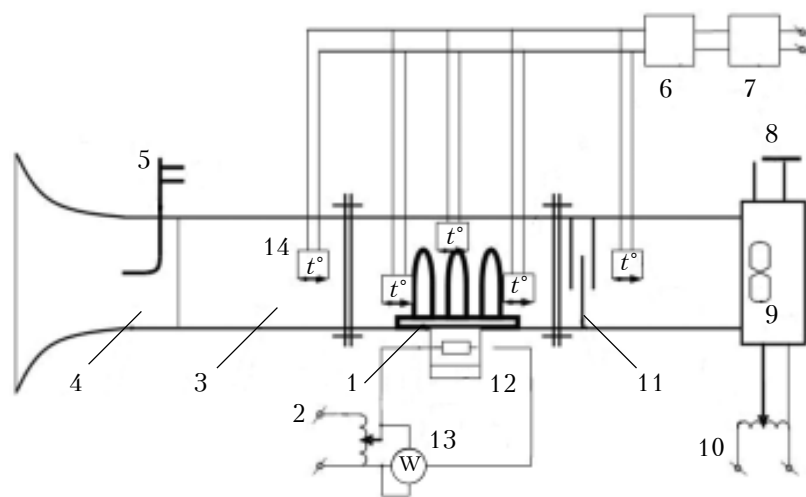


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для исследований в условиях вынужденной конвекции:

1 — СОТ; 2, 10 — ЛАТР; 3 — аэродинамическая труба; 4 — сопло Лаваля; 5 — трубка Пито—Прандтля; 6 — аналого-цифровой преобразователь; 7 — персональный компьютер; 8 — регулирующая заслонка; 9 — вентилятор; 11 — мешалка; 12 — электронагреватель; 13 — ваттметр; 14 — термопары

Поток охлаждающего воздуха в аэродинамической трубе создавался вентилятором 9. Скорость потока регулировалась при помощи ЛАТР 10 и заслонки 8, установленной на выхлопном патрубке вентилятора 9, и определялась по показаниям микроманометра, подключенного к трубке Пито — Прандтля 5, установленной во входном сечении аэродинамической трубы. При проведении опытов скорость потока изменялась от 4,2 до 9,4 м/с, что соответствует изменению расхода от $13,3 \cdot 10^{-3}$ до $29,5 \cdot 10^{-3}$ м³/с. Такой диапазон охватывает расходы, обеспечиваемые современными вентиляторами, которые применяются для охлаждения компьютерной техники.

Для обеспечения равномерного поля скоростей на входе аэродинамической трубы было установлено сопло Лавала 4.

Температура СОР измерялась четырнадцатью термопарами, установленными в три ряда по высоте СОР. Первый ряд состоял из четырех термопар, размещенных на основании СОР со стороны установки ПТТ. Второй и третий ряды, по пять термопар в каждом, находились в зоне конденсации ПТТ. Термопары второго ряда размещались на трубках определенных витков на расстоянии 19,5 мм от основания СОР, а термопары третьего ряда — на вершинах U-образных изгибов витков. Также были установлены две термопары на входе рабочего участка аэродинамической трубы и три на выходе для контроля средней входной и выходной температуры воздуха. По разности этих температур и расходу воздуха определялась величина передаваемого СОР теплового потока. Сигналы всех термопар через аналого-цифровой преобразователь 6 поступали на персональный компьютер 7. Установленное программное обеспечение позволяло отслеживать изменение показаний термопар в реальном времени и производить их запись. Для корректного измерения выходной температуры воздуха между выходом рабочего участка аэродинамической трубы и термопарами была установлена мешалка 11.

Для исследований в условиях естественной конвекции СОР помещалась в бокс, в котором обеспечивалось свободное движение воздушных масс, а сам бокс защищал СОР от внешних воздействий. При этом схема теплоподвода оставалась без изменений, элементы установки, связанные с аэродинамической трубой и контролем параметров потока воздуха, не использовались. В схему измерений была добавлена термопара на внешней поверхности тепловой изоляции нагревателя для учета теплопотерь в окружающую среду, а также ртутный термометр для контроля температуры окружающего воздуха.

Исследования проводились при различных положениях СОР. Опыты в условиях вынужденной конвекции производились при наиболее благоприятном для работы ПТТ вертикальном

положении СОР — с нагревом снизу, и в самом неблагоприятном — с нагревом сверху, а в условиях естественной конвекции — еще и в горизонтальном положении.

Методика проведения эксперимента

После установки СОР в определенное положение включались все системы и устанавливалась определенная скорость охлаждающего потока воздуха. Далее с помощью ЛАТР устанавливалась начальная мощность нагревателя $Q_{\text{подв}}$. После выхода на стационарный режим производилась запись показаний термопар в течение определенного промежутка времени, а также контролировались и записывались показания микроманометра. При проведении опыта подводимая мощность ($Q_{\text{подв}}$) повышалась с фиксированным шагом и каждый раз в стационарном режиме производилась запись показаний термопар и микроманометра. При достижении $Q_{\text{подв}} = 160$ Вт опыт прекращался.

Опыты в условиях естественной конвекции проводились аналогичным образом, за исключением установки и контроля параметров потока воздуха. Когда температура основания СОР достигала 180°C, предельного для использования теплопроводной пасты КПТ-8 значения, опыт прекращался.

Методика обработки экспериментальных данных

По показаниям термопар, полученным в ходе проведения экспериментов, определялись средняя температуры основания СОР (T_o), зоны конденсации ПТТ (T_k), воздуха на входе и выходе рабочего участка аэродинамической трубы ($T_{\text{вх}}$, $T_{\text{вых}}$), а также средняя температура нагревателя. Затем рассчитывался перепад температур по СОР

$$\Delta T = T_o - T_k. \quad (1)$$

По показаниям микроманометра определялась скорость потока во входном сечении аэродинамической трубы $w_{\text{вх}}$, которая использовалась для нахождения расхода охлаждающего воздуха в аэродинамической трубе:

$$G = \rho_v w_{\text{вх}} S_{\text{вх}}, \quad (2)$$

где ρ_v — плотность воздуха;

$S_{\text{вх}}$ — площадь входного сечения аэродинамической трубы.

Затем определялись отведенная СОР тепловая мощность $Q_{\text{отв}}$ и ее термическое сопротивление R :

$$Q_{\text{отв}} = G c_p (T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}}); \quad (3)$$

$$R = \Delta T / Q_{\text{отв}}, \quad (4)$$

где c_p — изобарная теплоемкость воздуха.

В условиях естественной конвекции отведенная тепловая мощность рассчитывалась иначе:

$$Q_{\text{отв}} = Q_{\text{подв}} - Q_{\text{пот}}, \quad (5)$$

Входящие сюда тепловые потери с поверхности изоляции рассчитываются как

$$Q_{\text{пот}} = \alpha F_{\text{из}} (T_{\text{из}} - T_{\text{в}}),$$

где α — коэффициент теплоотдачи с внешней поверхности изоляции к окружающему воздуху (определялся по критериальным зависимостям, приведенным в [14, с. 224]);

$F_{\text{из}}$ — площадь поверхности изоляции;
 $T_{\text{из}}, T_{\text{в}}$ — средние температуры поверхности изоляции и воздуха соответственно.

Результаты исследований

Одними из основных теплопередающих характеристик СОТ являются ее термическое сопротивление и средняя температура охлаждаемого объекта, в нашем случае — средняя температура поверхности нагревателя, контактирующей с СОТ ($T_{\text{н}}$). Непосредственное измерение $T_{\text{н}}$ не проводилось, однако было установлено, что перепад температур по толщине основания СОТ не превышает $0,1^\circ\text{C}$, а перепадом температур по толщине слоя теплопроводной пасты между нагревателем и основанием СОТ можно пренебречь. Поэтому в качестве средней температуры поверхности нагревателя принималась средняя температура поверхности основания СОТ со стороны размещения ПТТ.

Как видно на рис. 4, а, б с увеличением отводимой мощности термическое сопротивление R снижается, причем положение СОТ в пространстве, способ охлаждения и скорость охлаждающего потока в случае вынужденной конвекции не влияют на характер его изменения.

В условиях вынужденной конвекции изменение скорости охлаждающего потока от 6 до $9,4 \text{ м/с}$ не влияет на величину R при любой ориентации СОТ в пространстве, но сама ориентация оказывает определенное влияние: при нагреве сверху R в $1,5\text{--}2$ раза выше, чем при нагреве снизу (рис. 4, а). Однако и в одном, и в другом случае оно достаточно мало, т. е. данная СОТ будет эффективной для охлаждения теплонагруженных элементов радиоэлектронной аппаратуры.

При естественной конвекции термическое сопротивление в случае нагрева сверху в $3\text{--}5$ раз выше, чем при нагреве снизу (рис. 4, б), а теплопередающие характеристики СОТ в горизонтальном положении занимают промежуточное положение между этими двумя.

Как видно из рис. 4, в, средняя температура охлаждаемого объекта линейно возрастает с увеличением отводимой мощности. На характер изменения этой температуры, как и в случае с термическим сопротивлением, не влияет способ охлаждения, ориентация в пространстве СОТ и скорость охлаждающего потока.

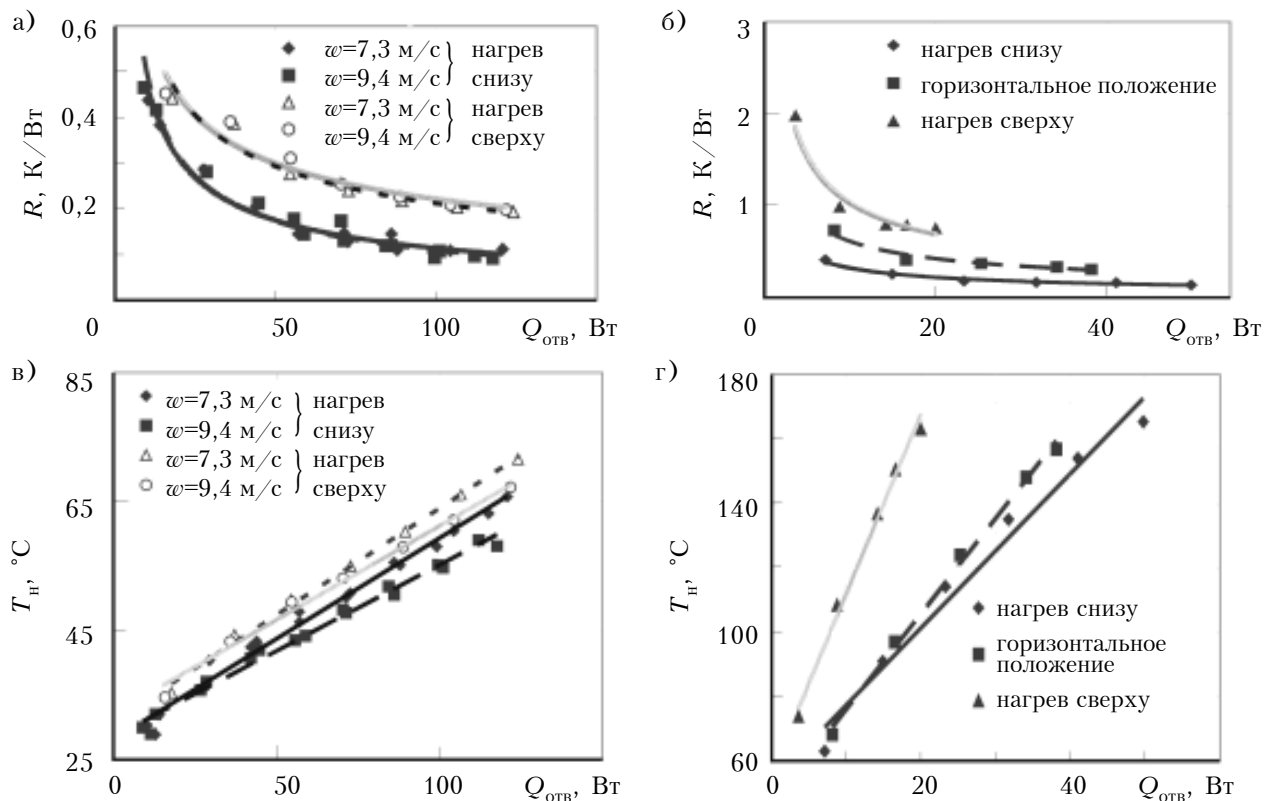


Рис. 4. Зависимость термического сопротивления СОТ (а, б) и средней температуры охлаждаемого объекта (в, г) от отводимой тепловой мощности в условиях вынужденной (а, в) и естественной (б, г) конвекции

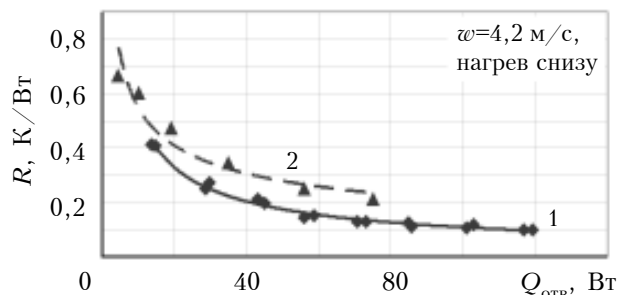


Рис. 5. Термическое сопротивление разработанной СОТ на ПТТ (1) и СОТ на МТТ [11, 12] (2)

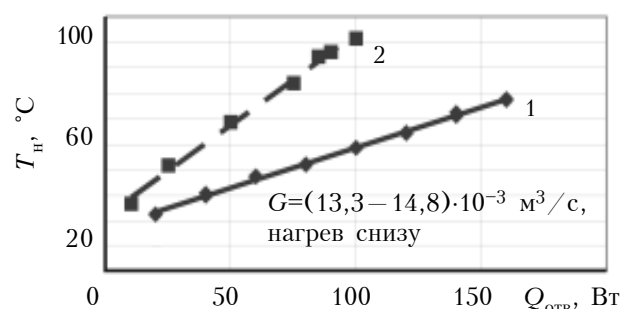


Рис. 6. Зависимость средней температуры охлаждаемого объекта от $Q_{\text{отв}}$ разработанной СОТ на ПТТ (1) и СОТ на ПТТ Майданника Ю. Ф. и др. [4] (2)

В условиях вынужденной конвекции при нагреве сверху температура была несколько выше, чем при нагреве снизу, а увеличение скорости потока приводило к уменьшению средней температуры охлаждаемого объекта в обоих случаях. Это наблюдалось во всем диапазоне изменения отводимой мощности от 5 до 120 Вт. Минимальная температура при отводимой мощности 120 Вт была достигнута при скорости охлаждающего потока 9,4 м/с и составляла 58,1°C при нагреве снизу и 67,3°C при нагреве сверху.

В случае естественной конвекции наименьшие значения T_n также наблюдались при нагреве снизу, а наивысшие — при нагреве сверху, однако находились они в диапазоне 60–170°C при отводимых мощностях 5–50 Вт, что неприемлемо для большинства электронных компонентов с тепловыделением до 100–150 Вт.

Теплопередающие характеристики рассматриваемой СОТ в условиях вынужденной конвекции сравнивались с характеристиками СОТ на ПТТ, описанных в литературе, СОТ на миниатюрных тепловых трубах (МТТ) и кулеров на обычных ТТ для центральных процессоров ПК.

Из рис. 5 видно, что термическое сопротивление разработанной СОТ на ПТТ на 25–40% ниже, чем у СОТ на МТТ [11, 12], при большей отводимой тепловой мощности.

По своим теплопередающим характеристикам исследуемая СОТ превосходит также СОТ на ПТТ, описанные в литературе. В качестве примера на рис. 6 представлены средние температуры охлаждаемого объекта при использовании

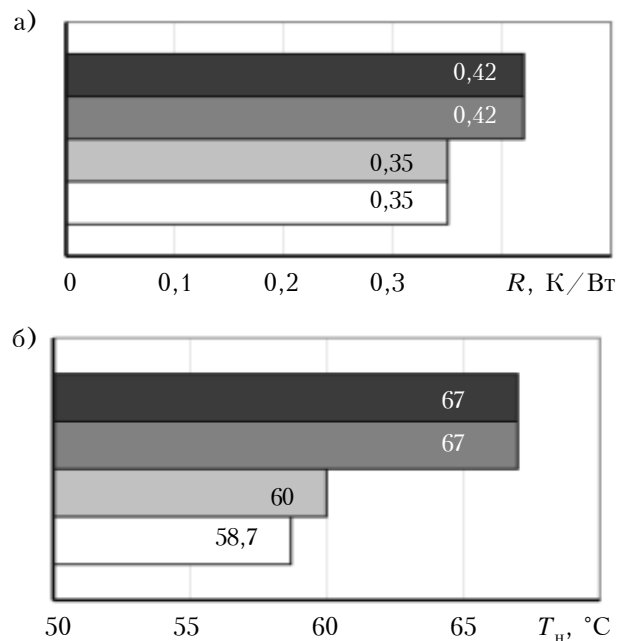


Рис. 7. Термическое сопротивление «охлаждаемый объект — воздух» (а) и средняя температура охлаждаемого объекта (б) для разработанной СОТ (□) на ПТТ и для кулеров центральных процессоров ПК [13]:

■ Thermaltake Slim X3; ■ Intel i-5 2400 boxed cooler; □ Cooler Master Hyper 101

рассматриваемой СОТ и СОТ на ПТТ, описанной в [4], для различных значений подводимой мощности. Здесь видно, что при подводимой мощности 100 Вт температура охлаждаемого объекта при использовании СОТ [4] составляет приблизительно 100–101°C, в то время как разработанная СОТ при той же мощности обеспечивает температуру 59–60°C.

Сравнение рассматриваемой СОТ на ПТТ с кулерами на обычных ТТ для центральных процессоров ПК [13] производилось по следующим параметрам: термическое сопротивление теплопередачи от охлаждаемого объекта к воздуху и средняя температура охлаждаемого объекта. Результаты сравнения приведены на рис. 7 (данные получены в условиях вынужденной конвекции при подводимой мощности 150–160 Вт и расходе воздуха $(12,2-13,3) \cdot 10^{-3}$ м³/с). Из рисунка видно, что термическое сопротивление «охлаждаемый объект — воздух» исследуемой СОТ меньше или такое же, как и у серийно выпускаемых кулеров на обычных ТТ, и при этом обеспечивается более низкая температура охлаждаемого объекта.

Следует отметить, что одним из факторов, обеспечивающих высокие теплопередающие характеристики кулеров для процессоров, является значительная площадь оребрения зон конденсации ТТ. В то же время, при использовании ПТТ аналогичные, а в ряде случаев и лучшие параметры были получены без оребрения. Это свидетельствует о том, что теплопередающие характеристики собственно ПТТ, примененной в

исследуемой СОТ, выше, чем у ТТ, используемых в серийно выпускаемых кулерах.

Заключение

Теплопередающие характеристики разработанной системы отвода теплоты указывают на то, что она может быть использована для эффективного охлаждения теплонагруженных элементов радиоэлектронной и компьютерной техники в условиях вынужденной конвекции при любой ее ориентации в пространстве. При отводимой мощности $Q_{\text{отв}} = 5 - 120$ Вт (что соответствует подводимой мощности 10 – 160 Вт) термическое сопротивление СОТ находится в пределах 0,5 – 0,1 К/Вт, а при $Q_{\text{отв}} = 120$ Вт СОТ может обеспечить среднюю температуру охлаждаемого объекта 58 – 67°C.

В условиях естественной конвекции теплопередающие характеристики СОТ значительно ухудшаются, поэтому ее использование в таких условиях нецелесообразно.

Представленная СОТ обладает лучшими теплопередающими характеристиками и меньшими габаритами по сравнению с известными аналогичными системами на ПТТ, МТТ, а также серийно выпускаемыми кулерами на ТТ для центральных процессоров персональных компьютеров. К тому же, они могут быть еще улучшены, поскольку СОТ на ПТТ имеет потенциал для модифицирования (например, оребрение зоны конденсации ПТТ).

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Кузнецов И.О., Смирнов Г.Ф. Экспериментальное и математическое моделирование характеристик пульсационных тепловых труб (ПТТ) // Холодильная техника и технология. – 2005. – №5. – С. 61-69. [Kuznetsov I.O., Smirnov G.F. // Kholodil'naya tekhnika i tekhnologiya. 2005. N 5. P. 61]
2. Дмитриев В.И., Майданик Ю.Ф., Пастухов В.Г. Разработка и исследование компактного охладителя на основе осциллирующей тепловой трубы // Теплофизика высоких температур. – 2010. – Т. 48. – №4. – С. 592–599. [Dmitrin V.I., Maidanik Yu.F., Pastukhov V.G. // Teplofizika vysokikh temperatur. 2010. Vol. 48. N 4. P. 592]
3. Rittidech S., Boonyaem A., Tipnet P. CPU Cooling of Desktop PC by Closed-end Oscillating Heat-pipe (CEOHP) // American Journal of Applied Sciences. – 2005. – N 2 (12). – P. 1574–1577.
4. Maidanik Yu.F., Dmitrin V.I., Pastukhov V.G. Compact cooler for electronics on the basis of a pulsating heat pipe // Applied Thermal Engineering. – 2009. – Vol. 29. – P. 3511–3517.
5. Gi K., Maezawa S., Kojima Y., Yamazaki N. CPU cooling of notebook PC by oscillating heat pipe // 11th International Heat Pipe Conf. – Japan, Tokyo. – 1999. – P. 469–472.
6. Miyazaki Y. Flexible oscillating heat pipes for cooling of notebook PCs // 8th International Heat Pipe Symp. – Kumamoto (Japan). – 2006 – P. 226–230.
7. Yang H., Khandekar S., Groll M. Operational limit of closed loop pulsating heat pipes // Applied Thermal Engineering. – 2008. – vol. 28. – P. 49–59.
8. 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. [Kravets V.Yu., Alekseik E.S. // Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii. 2010. N 6/7. Vol. 59]
9. Алексеик Е.С., Кравец В.Ю. Зависимость теплопередающих характеристик пульсационных тепловых труб от количе-

ства витков и угла наклона // Тр. 12-й Междунар. науч.-практич. конф. «СИЭТ-2011». – Украина, Одесса. – 2011. – С. 228. [Alekseik E.S., Kravets V.Yu. // Tr. 12-i Mezhdunar. nauch.-praktich. konf. «SIET-2011». Ukraina, Odessa. 2011. P. 228]

10. Кравец В.Ю., Алексеик Е.С., Аполлонина А.Ю. Влияние количества витков на термическое сопротивление пульсационных тепловых труб // Восточно-Европейский журнал передовых технологий – 2012. – №2/8. – С. 54-57. [Kravets V.Yu., Alekseik E.S., Apollonina A.Yu. // Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii. 2012. N 2/8. P. 54]

11. Пат. ПМ 3525 Украины. Радиатор / В.Ю. Кравец, А.Я. Паламарчук, А.И. Руденко, Ю.Е. Николаенко. – 15.11.2004. [Pat. PM 3525 Ukrainy / V.Yu. Kravets, A.Ya. Palamarchuk, A.I. Rudenko, Yu.E. Nikolaenko. 15.11.2004]

12. Кравец В.Ю., Николаенко Ю.Е., Руденко А.И. и др. Радиатор на основе миниатюрных тепловых труб // Тр. 5-й Междунар. научн.-практич. конф. «СИЭТ-2004». – Одесса – 2004 – С. 193. [Kravets V.Yu., Nikolaenko Yu.E., Rudenko A.I. i dr. // Tr. 5-i Mezhdunar. nauchn.praktich. konf. «SIET-2004». Odessa 2004 P. 193]

13. <http://www.ixbt.com/cpu/thermaltake-slimx3.shtml>.

14. Исаченко В.П. Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – Москва – Ленинград: Энергия, 1965. [Isachenko V.P. Osipova V.A., Sukomel A.S. Teploperedacha. Moscow – Leningrad: Energiya, 1965]

*Дата поступления рукописи
в редакцию 09.08 2012 г.*

Alekseik E. S., Kravets V. Yu. **Oscillating heat pipe cooler for heat-generating elements of electronics.**

Key words: cooler, oscillating heat pipe, heat transfer capabilities.

The article presents a newly-developed compact heat removal system (HRS) with water used for coolant, operable in any position in space. In conditions of forced convection at output power of 120 Wt (160 Wt input power) thermal resistance of the HRS is 0.1 K/Wt and the system provides the average temperature of the cooled object over the range of 58 to 60°C. Heat transfer characteristics of the HRS can be improved, as there is potential for its modification.

Ukraine, NTUU "Kyiv polytechnical institute".

Алексеик Є.С., Кравець В.Ю. **Система відводу теплоти від теплонавантажених елементів РЕА на основі пульсаційної теплової труби.**

Ключові слова: система відводу теплоти, пульсаційна теплова труба, теплопередавальні характеристики.

Розроблено компактну систему відводу теплоти (СВТ) на основі пульсаційної теплової труби з водою як теплоносієм, працездатну при будь-якій орієнтації в просторі. В умовах вимушеної конвекції при потужності, що відводиться, 120 Вт (160 Вт потужності, що підводиться) термічний опір СВТ становить 0,1 К/Вт і вона забезпечує середню температуру охолоджуваного об'єкта в діапазоні від 58 до 60°C. Теплопередавальні характеристики СВТ можуть бути поліпшені, оскільки є потенціал для її модифікування.

Україна, НТУУ «Київський політехнічний інститут».