

V. I. Dmitrin, Yu. F. Maidanik, V. G. Pastuhov, Development and investigation of compact cooler using a pulsating heat pipe, *TVT*, 2010, Volume 48, Issue 4, 592–599

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use
<http://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.14.80

March 25, 2025, 09:28:10



УДК 536.24; 662.98

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПАКТНОГО ОХЛАДИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ

© 2010 г. В. И. Дмитрин, Ю. Ф. Майданик, В. Г. Пастухов

Институт теплофизики УрО РАН, г. Екатеринбург

Поступила в редакцию 17.03.2009 г.

Представлены результаты разработки и исследований компактного охладителя для электроники, сделанного на основе осциллирующей тепловой трубы с разомкнутым контуром. Исследована работа охладителя с водой, метанолом и фреоном R141b в качестве теплоносителей при равномерном и концентрированном подводе тепла. Продемонстрирована эффективная работа устройства в диапазоне тепловых нагрузок от 5 до 250 Вт. Минимальное термическое сопротивление “источник тепла – окружающий воздух”, равное $0.35^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$, было достигнуто с водой при равномерной тепловой нагрузке 250 Вт. При концентрации теплового потока на поверхности 1 см^2 максимальное значение плотности тепловой нагрузки составило $75\text{ Вт}/\text{см}^2$, когда в качестве теплоносителя использовался метанол.

ВВЕДЕНИЕ

Начиная с середины 90-х годов прошлого века, осциллирующие тепловые трубы (ОТТ) [1–3] заняли прочное место в ряду высокоэффективных теплопередающих устройств, работающих по замкнутому испарительно-конденсационному циклу. К данным устройствам относятся тепловые трубы [4, 5], двухфазные термосифоны [6] и контурные тепловые трубы [7].

По таким характеристикам, как теплопередающая способность, термическое сопротивление, чувствительность к ориентации в поле массовых сил, ОТТ во многих случаях могут быть сопоставимы с обычными тепловыми трубами. В то же время предельная простота конструкции и относительно низкая стоимость приближают их к двухфазным термосифонам.

По своей конструкции ОТТ разделяются на два основных типа: осциллирующие тепловые трубы с разомкнутым контуром и осциллирующие тепловые трубы с замкнутым контуром [8]. На рис. 1 представлены схемы этих устройств.

На основе известных публикаций [9, 10] можно сделать вывод о том, что нет существенной разницы между их тепловыми характеристиками. По-видимому, выбор типа конструкции должен определяться конкретными техническими требованиями.

В упомянутой выше работе [8] сформулированы основные конструктивные принципы, которыми должны соответствовать ОТТ любого типа:

а) устройства должны быть изготовлены из трубки капиллярного диаметра, иметь серпантиннообразную форму с достаточно большим числом

витков и быть частично заполненными теплоносителем;

б) ОТТ не должны содержать какой-либо капиллярной структуры внутри;

в) устройства должны иметь зону нагрева и зону охлаждения, которые при необходимости могут быть разделены адиабатической зоной.

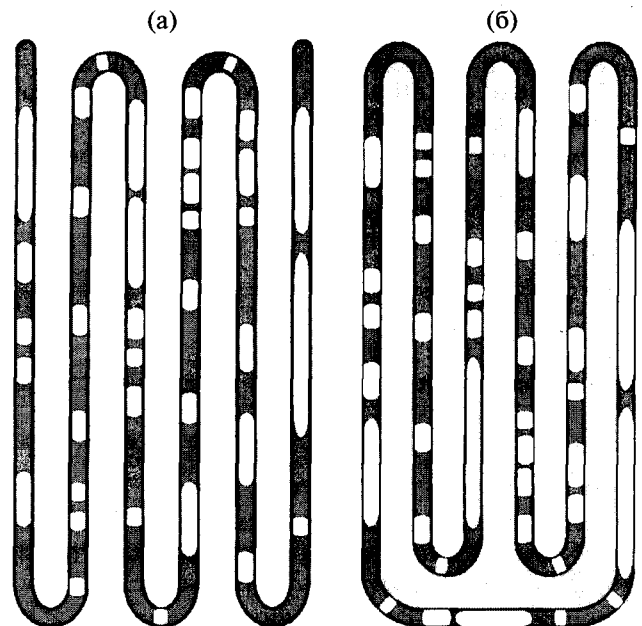


Рис. 1. Принципиальная схема осциллирующей тепловой трубы: (а) – с разомкнутым контуром, (б) – с замкнутым контуром.

Обычно для оценки максимального внутреннего (критического) диаметра капиллярной трубки используют формулу [11]

$$d_{кр} < 2\sqrt{\sigma/\rho_{жg}}, \quad (1)$$

или ее уточненный вариант [8]

$$d_{кр} \approx 2\sqrt{\sigma/(\rho_{ж} - \rho_{п})g}. \quad (2)$$

Здесь σ – коэффициент поверхностного натяжения теплоносителя, $\rho_{ж}$ и $\rho_{п}$ – плотности жидкости и пара, g – ускорение свободного падения.

Как правило, внутренний диаметр ОТТ варьируется в пределах от 0.5 до 3 мм, а количество витков – от 10 и более. В значительной мере работа ОТТ зависит от степени заправки теплоносителем. Как отмечается в работе [12], при относительном объеме заправки 20% и менее каждый из витков устройства работает как независимый двухфазный термосифон, а при заправке более 70% условия работы устройства в пульсационном режиме становятся затруднительными. Наиболее оптимальной считается заправка в диапазоне 50–70%. В этом случае возможна эффективная работа ОТТ при разной ориентации, когда тепловая нагрузка подводится снизу или сверху, а также в горизонтальном положении устройства.

Тепловые характеристики ОТТ, такие, как максимальная тепловая нагрузка, плотность теплового потока и термическое сопротивление, зависят от геометрических и конструктивных параметров, типа теплоносителя, степени заправки и положения в пространстве. Вместе с тем простота конструкции в сочетании с достаточно высокими теплопроводными характеристиками и возможностью разнообразных конструктивных воплощений делают осциллирующие тепловые трубы весьма привлекательным объектом для реального использования в системах охлаждения электронных приборов. Одна из первых публикаций в этом направлении была связана с разработкой и исследованиями так называемых “L-KENZAN FINs” и “VL-KENZAN FINs” – устройств, созданных на основе ОТТ-технологии и предназначенных для охлаждения мощных электронных приборов [13]. В этой работе, в частности, рассматривается охладитель, созданный на основе ОТТ, сделанной из медной трубки с внутренним диаметром 1.2 мм, и имеющий 500 витков. С одной стороны, устройство снабжено тепловым интерфейсом для подвода тепловой нагрузки, выполненным в виде медной пластинки с размерами $80 \times 80 \times 2$ мм, а с другой – вентилятором соответствующего размера. Габариты охладителя составляют примерно $105 \times 80 \times 80$ мм. При тепловой нагрузке 450 Вт и скорости обдува 3 м/с температура на поверхности теплового интерфейса составляла около 80°C , а термическое сопротивление устройства было равно 0.089 К/Вт. При этом плотность тепловой нагрузки на поверх-

ности теплового интерфейса достигала 7 Вт/см^2 , а тепловая нагрузка на один виток составляла 0.9 Вт.

Аналогичная технология была использована также для охлаждения IGBT модулей, которые могут рассеивать тепловые потоки до нескольких киловатт [14]. Например, для этих целей был разработан охладитель на основе медной ОТТ с внутренним диаметром 1.6 мм, имеющий 424 витка. Размеры теплообменной части устройства составляли 200×150 мм, а теплового интерфейса – 110×190 мм. При тепловой нагрузке 1800 Вт и скорости обдува 3 м/с термическое сопротивление охладителя было равно 0.022 К/Вт. Столь низкое значение термического сопротивления таких охладителей обусловлено значительными размерами тепловых интерфейсов и хорошо развитой теплообменной поверхностью, которую формирует множество витков ОТТ, имеющих достаточно большую общую длину.

Интересные решения, основанные на использовании ОТТ, предложены также для охлаждения центрального процессора мобильных компьютеров, где проблема ограниченности габаритов внутреннего пространства является критической. В [15] рассматривается система охлаждения на основе T-образных и O-образных плоских ОТТ с фреоном R141b в качестве теплоносителя, сделанных из медных капилляров с внутренним диаметром 2 мм. ОТТ имели от 3 до 6 витков и были снабжены медным тепловым интерфейсом 40×40 мм, который находился в контакте с центральным процессором. В экспериментах длина устройств составляла от 170 до 260 мм, а объем заправки теплоносителя варьировался от 40 до 80%. Испытания проводились при горизонтальном положении устройства. Теплообменная часть ОТТ охлаждалась путем обдува воздухом со скоростью 2 м/с. Наилучшие результаты продемонстрировала O-образная ОТТ, имеющая 6 витков с объемом заправки 60%. При номинальной тепловой нагрузке 50 Вт термическое сопротивление системы “охлаждаемый объект – окружающий воздух” составляло 1.1 К/Вт. Температура процессора при этом поддерживалась на уровне 80°C .

В [16] представлены результаты испытаний плоских гибких ОТТ “прямого” и “крыльцеобразного” типов, которые были разработаны для той же цели. Устройства также были сделаны из медного капилляра, но в качестве теплоносителя использовался R134a с объемом заправки 70%. Размеры зоны нагрева и зоны охлаждения составляли соответственно 110×50 мм и 110×150 мм. Были испытаны устройства с внутренним диаметром 1.0 мм, 1.2 мм и 1.7 мм, имевшие 8 и 12 витков. Наиболее высокие результаты показала ОТТ “прямого” типа с диаметром капилляра 1 мм, имевшая 12 витков. При максимальной тепловой нагрузке 100 Вт она имела термическое сопротив-

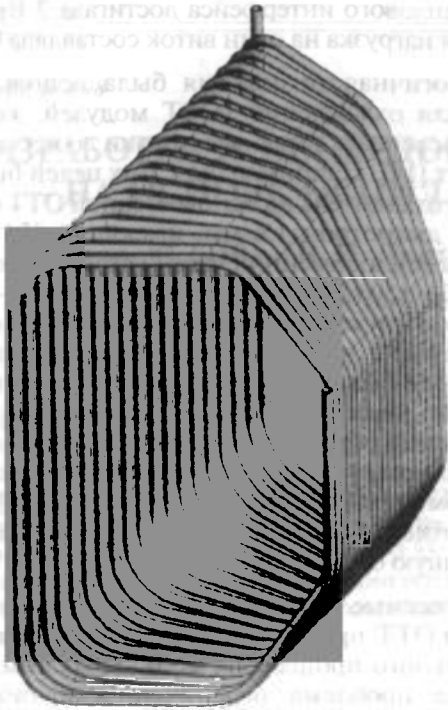


Рис. 2. Общий вид разомкнутой ОТТ.

ление около 0.28 К/Вт, обеспечивая температуру охлаждаемого объекта на уровне около 75°C.

В данной работе представлены результаты разработки легкого компактного охладителя для электроники, выполненного на основе медной разомкнутой осциллирующей тепловой трубы. Приведены результаты испытаний устройства с различными теплоносителями при равномерной и концентрированной тепловой нагрузке, а также при различных положениях охладителя в пространстве.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Для изготовления охладителя была выбрана разомкнутая ОТТ, поскольку именно этот вариант больше соответствовал предлагаемой компоновке устройства. Устройство было выполнено из медной трубки длиной 5.6 м с внутренним диаметром 1.2 мм в виде несимметричной относительно продольной оси объемной спирали (рис. 2). С одной из боковых сторон спирали витки были расположены плотно друг к другу и припаяны к медному теплому интерфейсу – медной пластине с размерами 40 × 35 × 0.5 мм, которая служила для подвода тепловой нагрузки. Такая конструкция позволяла обеспечивать равномерный подвод тепла одновременно ко всем виткам ОТТ. С противоположной стороны спирали витки, расходящиеся веером от теплового интерфейса, были

припаяны к легкому медному радиатору, площадь оребрения которого составляла 1670 см². Внутри спирали между радиатором и тепловым интерфейсом был размещен осевой вентилятор с диаметром крыльчатки 92 мм, который обеспечил расход воздуха 0.9 м³/мин при 1800 об/мин. Уровень шума при этом составлял менее 25 дБ. Габариты и масса охладителя, включая вентилятор, составляли соответственно 105 × 100 × 60 мм и 350 г. Внешний вид устройства показан на рис. 3.

В качестве теплоносителя были испытаны вода, метанол и фреон R141b, которые хорошо совместимы с медью. Кроме того, такой выбор теплоносителей позволял изучить работу охладителя с теплоносителями, теплофизические свойства которых различаются весьма значительно. Объем заправки для воды был 60%, а для метанола и R141b – 65%. Предполагалось, что такой объем заправки позволит обеспечить эффективную работу охладителя при минимальной зависимости от его положения в пространстве.

Внутренний диаметр капиллярной трубки ОТТ для всех выбранных теплоносителей соответствовал критериям (1) и (2) во всем диапазоне рабочих температур, при которых проводились испытания охладителя.

Работа и механизм теплопередачи в ОТТ основаны на возвратно-поступательном (пульсирующем) движении чередующихся пузырей пара и разделяющих их жидкостных пробок, которое происходит независимо в каждой ветви устройства и носит хаотический характер. В соответствии с этим, признаком нормальной работы ОТТ является наличие пульсаций температуры во всех точках устройства.

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

Испытания охладителя проводились при трех ориентациях в пространстве, когда тепловая нагрузка подводилась снизу, сверху и сбоку. Для испытаний использовались два различных источника тепла. Первый из них имел плоскую форму. Размеры его термодатной поверхности обеспечивали равномерный подвод тепловой нагрузки ко всей поверхности теплового интерфейса охладителя. Другой источник тепла позволял концентрировать тепловую нагрузку на ограниченном участке теплового интерфейса методом “теплового клина”. Он был сделан из меди в виде цилиндра, состоящего из двух частей разного диаметра и длины. На боковой поверхности более широкой части цилиндра был размещен нагреватель из нихромовой проволоки. Другая, более короткая, часть, имеющая относительно малый диаметр, обеспечивала концентрацию тепловой нагрузки на термодатной поверхности площадью 1 см². Эта часть служила также для измерения величины

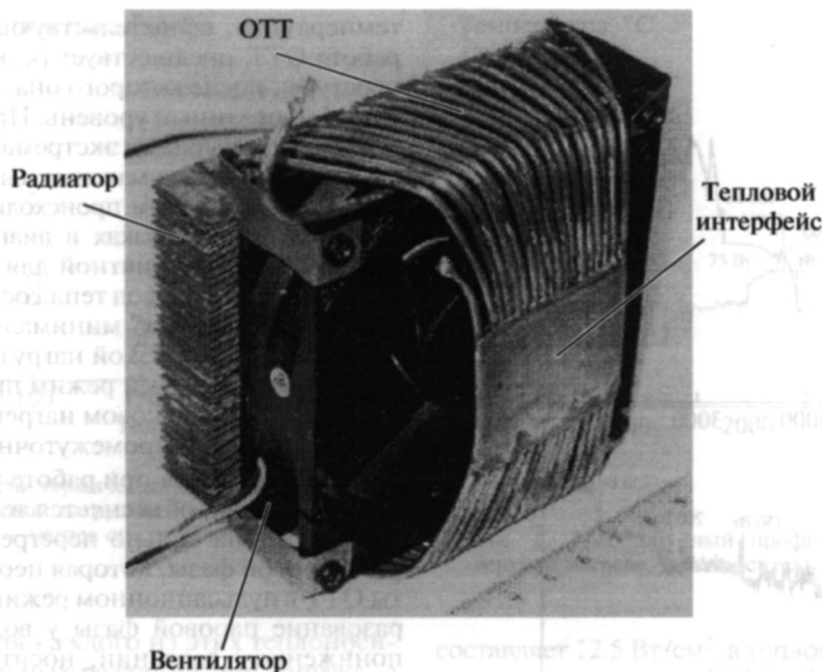


Рис. 3. Общий вид охладителя на основе ОТТ.

теплового потока. Для этой цели использовались три радиальных канала, расположенных на различном расстоянии по ее длине, в которых устанавливались термопары. Тепловая нагрузка измерялась ваттметром. При испытаниях ее величина изменялась ступенчато с помощью лабораторного автотрансформатора, начиная с 5 Вт и заканчивая максимальным значением, при котором температура на термоконтактной поверхности источника тепла достигала или незначительно превосходила 100°C . Измерение температуры производилось стандартными медь-константановыми термопарами "OMEGA" типа ТТ-Т-30 с диаметром электродов 0.254 мм, которые использовались в комплекте с персональным компьютером и системой автоматического сбора и обработки информации "Agilent 34970A". Температура плоского нагревателя, использовавшегося для равномерного подвода тепловой нагрузки, измерялась термопарой, установленной непосредственно на его термоконтактной поверхности. Температура термоконтактной поверхности "теплового клина", который использовался для концентрации тепловой нагрузки, определялась линейной экстраполяцией показаний трех термопар, размещенных в его измерительной части. Все испытания проводились при температуре окружающего воздуха $23 \pm 1^{\circ}\text{C}$.

Величина полного термического сопротивления системы "источник тепла – окружающий воздух" рассчитывалась по формуле

$$R = \frac{T_n - T_a}{Q}, \quad (3)$$

где T_n – температура на термоконтактной поверхности нагревателя, T_a – температура воздуха, Q – тепловая нагрузка.

Рассчитывалась также максимальная величина плотности теплового потока, соответствующая максимальной тепловой нагрузке

$$q_{\max} = \frac{Q_{\max}}{F_n}$$

Здесь Q_{\max} – максимальная тепловая нагрузка, F_n – площадь нагреваемой поверхности.

Максимальная величина тепловой нагрузки, приходящаяся на 1 виток ОТТ, определялась как

$$q_{\max} = \frac{Q_{\max}}{N}$$

где N – количество витков.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ПРИ РАВНОМЕРНОЙ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКЕ

Равномерный подвод тепловой нагрузки к охладителю обеспечивался тем, что его тепловой интерфейс обогревался равномерно по всей поверхности, площадь которой составляла 14 см^2 . Важнейшей тепловой характеристикой охладителя является температура охлаждаемого объекта (нагревателя), которую он способен обеспечить при различной тепловой нагрузке и при опреде-

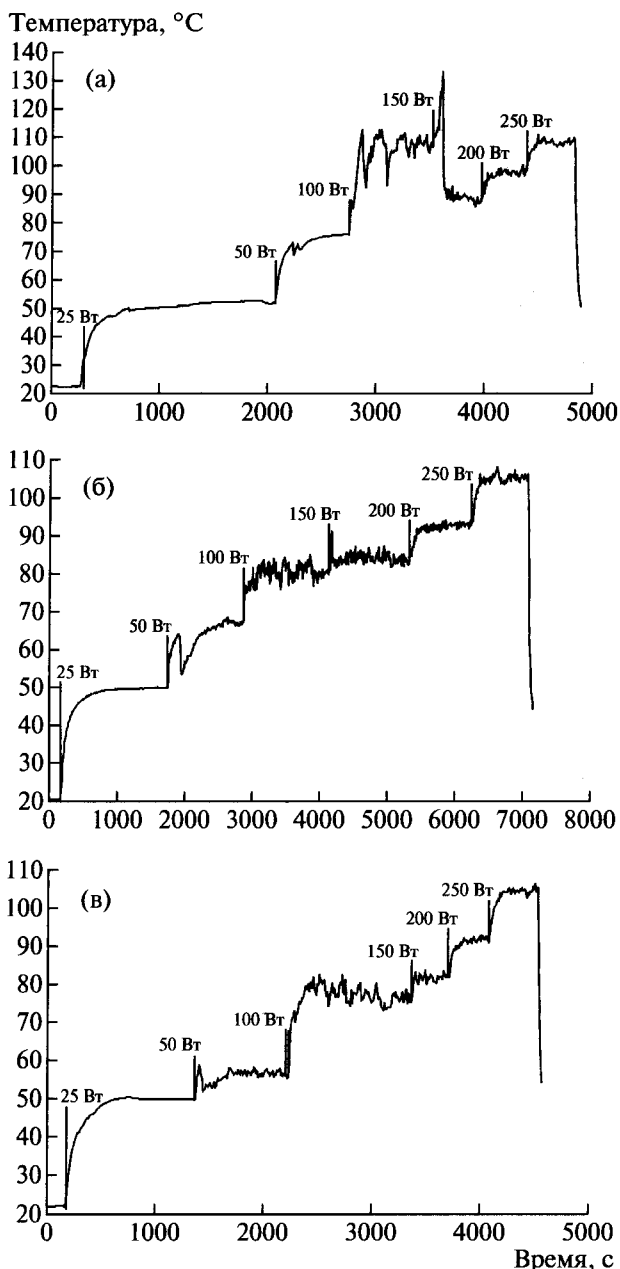


Рис. 4. Температурные профили нагревателя при различной ориентации охладителя: (а) – нагрев сверху, (б) – нагрев сбоку, (в) – нагрев снизу; теплоноситель – вода.

ленных внешних условиях. В данном случае такими условиями были температура окружающего воздуха и ориентация охладителя в пространстве, изменявшаяся на 90° . На рис. 4 представлены температурные профили нагревателя при изменении тепловой нагрузки от минимальной до максимальной, полученные для трех различных ориентаций охладителя, заправленного водой в качестве теплоносителя. Экспериментальные результаты показывают, что началу стабильных пульсаций

температуры, свидетельствующих о нормальной работе ОТТ, предшествует резкий “выброс” температуры, после которого она переходит на некоторый постоянный уровень. При верхнем нагреве этот эффект выражен экстремально, когда высота “выброса” является максимальной, а переход к стабильным пульсациям происходит при более высоких тепловых нагрузках в диапазоне 100–150 Вт. При более благоприятной для запуска ОТТ ориентации, когда подвод тепла осуществляется снизу, высота “выброса” минимальна, запуск происходит при более низкой нагрузке, равной 50 Вт, а выход на стабильный режим протекает достаточно плавно. При боковом нагреве картина запуска носит некоторый промежуточный характер.

Такая аномалия при работе устройства, заполненного водой, объясняется тем, что, во-первых, вода способна сильно перегреваться до появления паровой фазы, которая необходима для работы ОТТ в пульсационном режиме. Во-вторых, образование паровой фазы у воды, особенно при пониженном давлении, носит взрывной характер. При верхнем нагреве этот процесс более выражен, поскольку уровень жидкости находится ниже обогреваемого участка ОТТ и для запуска необходима более высокая тепловая нагрузка. В свою очередь, при более высокой нагрузке процесс запуска происходит более энергично. Начиная с 150 Вт, существенных различий в поведении рабочей температуры не наблюдается. При достижении максимального значения 250 Вт она примерно одинакова для всех ориентаций, а ее значение находится на уровне около 105°C . Максимальная плотность теплового потока при этом составляет 17.8 Вт/см^2 , а тепловая нагрузка на 1 виток равна 14.7 Вт.

Другим важным параметром охладителя является термическое сопротивление (3), которое характеризует его тепловую эффективность. На рис. 5 представлена зависимость этого параметра от тепловой нагрузки. Вид зависимости в полной мере отражает поведение температуры нагревателя, представленное на рис. 4. При тепловой нагрузке 25 Вт, когда пульсации температуры отсутствуют, величина термического сопротивления примерно одинакова для всех ориентаций устройства и является максимальной. При нагрузке 50 Вт для случаев нижнего и бокового нагрева и нагрузке 100 Вт для верхнего, когда включается пульсационный механизм передачи тепла, термическое сопротивление резко снижается. Когда нагрузка достигает 150 Вт, пульсации распространяются на весь объем ОТТ, и термическое сопротивление становится также примерно одинаковым для всех ориентаций охладителя. Его минимальное значение $0.33\text{--}0.36^\circ\text{C/Вт}$ достигается при максимальной тепловой нагрузке 250 Вт.

Существенно иная картина наблюдается при работе охладителей, заправленных метанолом и

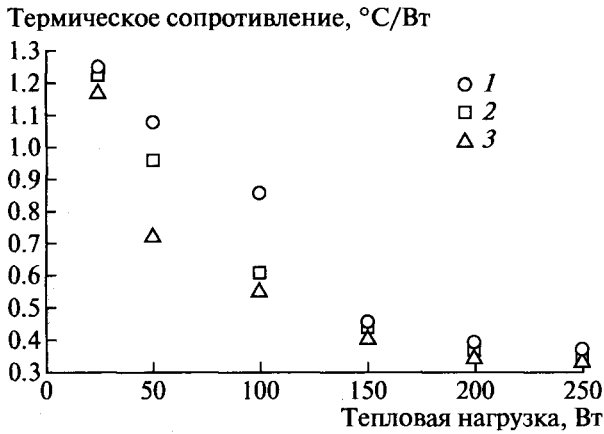


Рис. 5. Зависимость термического сопротивления охладителя от тепловой нагрузки: 1 – нагрев сверху, 2 – нагрев сбоку, 3 – нагрев снизу; теплоноситель – вода.

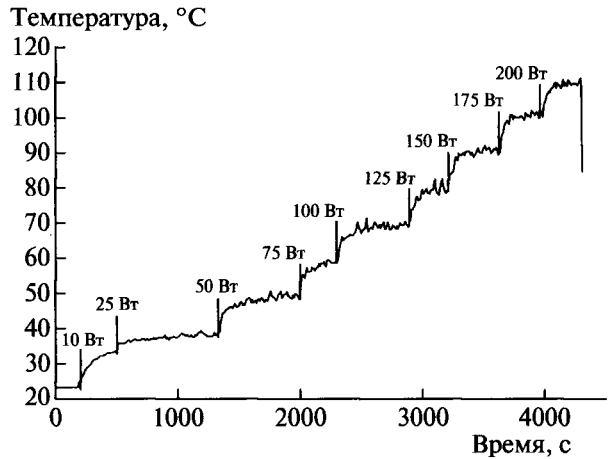


Рис. 6. Температурный профиль нагревателя при верхнем нагреве, теплоноситель – метанол.

фреоном R141b. Для каждого из этих теплоносителей нет значительных различий при запуске, а также в характере пульсаций и температурной зависимости от тепловой нагрузки для разных ориентаций охладителя. Типичный вид температурного профиля для метанола при верхнем нагреве представлен на рис. 6. Аналогичный вид температурные профили имеют также при боковом и нижнем нагреве. При всех ориентациях охладителя запуск происходит при более низкой, чем с водой, тепловой нагрузке, которая не превышает 25 Вт. Максимальная тепловая нагрузка, при которой температура нагревателя достигает величины, близкой к 100°C, составляет 175 Вт. Профиль температуры нагревателя, полученный для охладителя с фреоном R141b при верхнем нагреве, представлен на рис. 7. Так же как и с метанолом, температурные профили для R141b имеют идентичный вид при всех ориентациях охладителя. Однако характерной особенностью здесь является то, что амплитуда пульсаций заметно ниже, чем с водой и метанолом. Это происходит вследствие того, что образование паровой фазы у фреона, который имеет существенно более низкое поверхностное натяжение, не сопровождается заметным перегревом жидкости. Кроме того, запуск происходит уже при тепловой нагрузке 10 Вт, когда температура нагревателя равна примерно 31–32°C, в то время как с метанолом запуск происходит при температуре около 37°C, а с водой – при температуре 55–65°C. Вместе с тем термическое сопротивление охладителя с метанолом и с R141b выше, чем с водой. Его минимальное значение с метанолом равно 0.43°C/Вт, а с фреоном – 0.53°C/Вт. При этом оно остается постоянным или изменяется очень слабо в более широком, чем с водой, интервале тепловых нагрузок. Максимальная плотность тепловой нагрузки у охладителя с метанолом

составляет 12.5 Вт/см², а тепловая нагрузка на один виток при этом равна 10.3 Вт. Для R141b эти величины составляют соответственно 10.7 Вт/см² и 8.8 Вт.

Следует отметить также, что достигнутые значения максимальной тепловой нагрузки во всех случаях не были предельными, поскольку никаких признаков критических явлений не наблюдалось.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ПРИ КОНЦЕНТРИРОВАННОЙ ТЕПЛОЙ НАГРУЗКЕ

Для эффективной работы в нормальном для нее пульсирующем режиме ОТГ, как отмечалось выше, должна иметь достаточно большое число витков, в каждом из которых необходима генера-

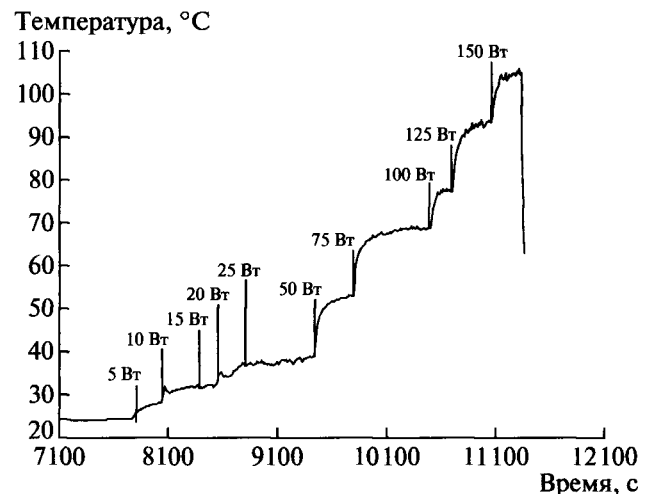


Рис. 7. Температурный профиль нагревателя при верхнем нагреве, теплоноситель – фреон R141b.

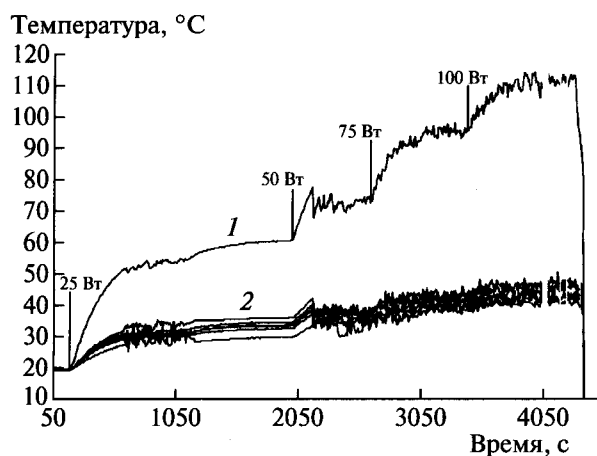


Рис. 8. Температурные профили при концентрированном нагреве снизу: 1 — температура нагревателя, 2 — температура витков; теплоноситель — вода.

ция пузырей пара, чередующихся с жидкостными “пробками”. Поэтому тепло должно подводиться к каждому витку. Для этого обычно используют тепловой интерфейс — пластину из теплопроводного материала, которая распределяет тепло, полученное от нагревателя, между всеми витками. Очевидно, что тепловой интерфейс должен иметь соответствующие размеры. Проблема, которая возникает при этом, состоит в том, что эти размеры иногда существенно превышают размеры термодаточной поверхности охлаждаемого объекта. В этом случае можно говорить о концентрированном подводе тепловой нагрузки. Тепловой поток от источника тепла к удаленным виткам передается только за счет теплопроводности вдоль теплового интерфейса. Такая ситуация неизбежно влечет за собой увеличение термического сопротивления охладителя. Вместе с тем она позволяет достичь значительно более высокой плотности тепловой нагрузки по сравнению с равномерным нагревом. При испытаниях охладителя, заправленного водой, с “верхним” подводом тепловой нагрузки, которая изменялась от 25 до 75 Вт и концентрировалась на участке теплового интерфейса площадью 1 см^2 , запустить охладитель не удалось, несмотря на то что его температура возросла почти до 150°C . Спорадические пульсации, которые при этом появлялись, быстро затухали. Вместе с тем при боковом и нижнем нагреве запуск осуществлялся успешно при тепловой нагрузке 50 Вт. Температура нагревателя при этом составляла $75 \pm 2^\circ\text{C}$, а термическое сопротивление было равно $1.1^\circ\text{C}/\text{Вт}$. Несмотря на локальный подвод тепла, пульсации наблюдались во всех витках устройства (рис. 8). При увеличении тепловой нагрузки до 100 Вт работоспособность ОТТ сохранялась, но температура нагревателя возросла до 112°C , а термическое сопротивление снижалось до $0.97^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

Когда в качестве теплоносителей использовались метанол и фреон R141b, ОТТ начинала работать в пульсирующем режиме при всех ориентациях уже с тепловой нагрузки 15 Вт, при которой температура нагревателя находилась на уровне $35\text{--}40^\circ\text{C}$. Для метанола максимальная температура, близкая к 100°C , достигалась при тепловой нагрузке 100 Вт, а для фреона — при 80 Вт. Величина термического сопротивления при этом снижалась до 0.74 и $0.95^\circ\text{C}/\text{Вт}$ соответственно. Профиль и характер пульсаций температуры при концентрированном нагреве для этих теплоносителей во всех случаях имел вид, аналогичный тому, который имел место при равномерном нагреве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан и испытан легкий компактный охладитель для мощной электроники на основе медной осциллирующей тепловой трубы с разомкнутым контуром с водой, метанолом и фреоном R141b в качестве теплоносителей.

Продемонстрирована работоспособность охладителя при всех условиях испытаний за исключением случая верхнего нагрева при концентрированном нагреве, когда в качестве теплоносителя использовалась вода.

Установлено, что при работе охладителя имеют место режимы с переменной и постоянной проводимостью. Первый из них реализуется в области низких тепловых нагрузок, когда передача тепла в ОТТ осуществляется за счет теплопроводности и конвекции в жидкой фазе теплоносителя. Он характеризуется сильным снижением термического сопротивления с ростом тепловой нагрузки. Переход ко второму режиму происходит при включении пульсационного механизма, когда передача тепла осуществляется при хаотическом движении паровых пузырей, чередующихся с жидкостными пробками. В этом режиме термическое сопротивление слабо изменяется с ростом тепловой нагрузки и достигает минимальных значений.

Максимальная мощность 250 Вт при температуре нагревателя $106 \pm 2^\circ\text{C}$ была достигнута при равномерном подводе тепла к охладителю, заправленному водой. При этих же условиях устройство имело минимальное термическое сопротивление, равное $0.33^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

При концентрированном нагреве наиболее высокие тепловые характеристики были получены с метанолом, с которым охладитель устойчиво работал в пульсационном режиме в диапазоне тепловых нагрузок с плотностью от 15 до $75 \text{ Вт}/\text{см}^2$. Достигнутая при этом минимальная величина термического сопротивления была равна $0.74^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Akachi H.* Structure of a Heat Pipe. US patent. № 4 991 041. 1990.
2. *Akachi H.* Structure of Micro Heat Pipe. US patent. № 5 219 020. 1993.
3. *Smirnov G.* Method of Action of the Pulsating Heat Pipe, its Construction and the Device on its Base. US Patent Pub. № US 2003/0037910A1. 2003.
4. *Reay D., Kew P.* Heat Pipes (fifth edition). Elsevier, 2006.
5. *Faghri A.* Heat Pipes Science and Technology. Washington: Taylor and Francis, 1995.
6. *Пиоро Л.С., Пиоро И.Л.* Двухфазные термосифоны и их применение в промышленности. Киев: Наукова думка, 1988.
7. *Maydanik Yu.F.* Loop Heat Pipes // Appl. Therm. Eng. 2005. V. 25. P. 635.
8. *Khandekar S., Groll M.* Closed and Open Loop Pulsating Heat Pipes // Proc. 13th Int. Heat Pipe Conf. Shanghai, 2004. P. 38.
9. *Yang H., Khandekar S., Groll M.* Performance Comparison of Open Loop and Closed Loop Pulsating Heat Pipes // Proc. 8th Int. Heat Pipe Conf. Kumamoto, 2006. P. 119.
10. *Дмитрин В.И., Майданик Ю.Ф.* Экспериментальные исследования замкнутой осциллирующей тепловой трубы // ТВТ. 2007. Т. 45. № 5. С. 772.
11. *Maezawa S., Gi K., Minamisawa A., Akachi H.* Thermal Performance of Capillary Tube Thermosyphon // Proc. 9th Int. Heat Pipe Conf. Albuquerque, 1995. P. 791.
12. *Yang H., Khandekar S., Groll M.* Operational Characteristics of Flat Plate Closed Loop Pulsating Heat Pipes // Proc. 13th Int. Heat Pipe Conf. Shanghai, 2004. P. 291.
13. *Acachi H., Polasek F., Stuls P.* Pulsating Heat Pipes // Proc. 5th Int. Heat Pipe Symp. Melbourne, 1996. P. 208.
14. *Acachi H., Polasek F.* Thermal Control of IGBT Modules in Traction Drivers by Pulsating Heat Pipes // Prep. 10th Int. Heat Pipe Conf. Stuttgart, 1997. Paper E-1.
15. *Gi K., Maezawa S., Kojima Y. et al.* CPU Cooling of Notebook PC by Oscillating Heat Pipe // Proc. 11th Int. Heat Pipe Conf. Tokyo, 1999. P. 469.
16. *Miyazaki Y.* Flexible Oscillating Heat Pipes for Cooling of Notebook PCs // Proc. 8th Int. Heat Pipe Symp. Kumamoto, 2006. P. 226.