

К. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО, Б. М. РАССАМАКИН,  
С. М. ХАЙРНАСОВ

Украина, г. Киев, НТУУ "КПИ"  
E-mail: nikol@industry.gov.ua

Дата поступления в редакцию  
07.02.2002 г.

Оппонент к. т. н. Е. В. БОНДАРЕНКО  
(НИИ "Шгорм", г. Одесса)

## КОНТУРНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ТРУБЫ С АЛЮМИНИЕВЫМ ИСПАРИТЕЛЕМ ДЛЯ КОМБИНИРОВАННЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ РЭА

*Исследованы тепловые трубы: корпус — алюминиевый сплав, нержавеющая сталь, теплоноситель — ацетон, аммиак, капиллярный насос — порошок на основе окисла алюминия.*

Наиболее общим видом систем охлаждения радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) подвижных объектов являются комбинированные системы охлаждения, использующие в теплопередающем тракте несколько теплопередающих элементов и устройств, работающих по разным физическим принципам (теплопередающие шины, радиаторы, термосифоны, термоэлектрические модули, вихревые трубы, оросительные испарительные устройства, воздушные и водяные нагнетатели, магистрали и теплообменники и т. п.). В ряде случаев в комбинированных системах охлаждения эффективным является использование тепловых труб. Так, использование двух тепловых труб в комбинированной системе охлаждения современного многоэлементного фотоприемного устройства "Гранат-32" космической инфракрасной техники нового поколения позволило обеспечить эффективный отвод теплоты от 3072 элементов фоторезисторов, размещенных в герметичном отсеке устройства, и обеспечить надежную работу фотоприемного устройства [1].

При использовании аналогичных фотоприемных устройств в мобильных изделиях авиационного или морского назначения, где охлаждаемая РЭА может изменять свою ориентацию в поле силы гравитации вплоть до 180 градусов, тепловые трубы должны обеспечить надежную передачу теплоты при самой неблагоприятной их ориентации (когда сила гравитации препятствует возврату теплоносителя в зону испарения тепловой трубы). Традиционные тепловые трубы мало пригодны для таких целей. Поэтому наиболее перспективным в комбинированных системах охлаждения РЭА подвижных объектов является использование более сложных, т. н. "антигравитационных" или контурных тепловых труб (КТТ), которые эффективно работают при любой ориентации в поле силы гравитации.

"Антигравитационные" или контурные тепловые трубы известны давно [2, 3], физические процессы, лежащие в основе их работы, изучены достаточно хорошо [4, 5]. Однако потенциальные возможности их пол-

ностью не реализованы, что объясняется в основном конструктивно-технологическими ограничениями [6]. В связи с этим разработка и исследование новых конструктивно-технологических решений по изготовлению КТТ является актуальной задачей.

Стоимостные характеристики, массу КТТ, технологичность изготовления и монтажа можно улучшить за счет использования материалов на основе алюминия вместо традиционно применяемых нержавеющей стали и титановых сплавов (для корпуса) и никелевых и титановых высокопористых структур в качестве капиллярного насоса КТТ. Так, в [7] было предложено разработать и изготовить недорогой образец КТТ, в основу которого были бы заложены доступные и недорогие конструкционные и технологические материалы. Корпус испарителя и контур КТТ было предложено изготовить из алюминиевого сплава АД-31, а капиллярный насос — из материала на основе окислов алюминия [8].

Однако высокая теплопроводность алюминиевого сплава АД-31 ( $\lambda_m = 188$  Вт/(м·К)) может вызвать целый ряд проблем при обеспечении работоспособности КТТ: увеличение полного термического сопротивления, снижение стабильности, особенно пусковых характеристик. Для оценки влияния выбора конструкционных материалов на рабочие характеристики КТТ авторами были изготовлены и испытаны два типа образцов: корпус одного из них был изготовлен из алюминиевого сплава АД-31, другого — из нержавеющей стали 10Н12Х1Т.

Принципиально новой задачей, которую предстояло решить, было создание капиллярного насоса из материалов на основе оксидов алюминия.

С использованием традиционных методов порошковой металлургии была разработана технология и получен необходимый материал (оксидная высокопористая (ОВП) керамика) на основе двух видов порошка  $Al_2O_3$  — ультрадисперсного криохимического (УДКХ) и мелкодисперсного порошка (МДП).

Таблица 1  
Свойства ОВП-керамики на основе различных оксидов алюминия

Порошок основы	Пористость, %	Средний диаметр пор, мкм	Проницаемость $\times 10^{12}$ , м <sup>2</sup>	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Прочность на сжатие, МПа
УДКХ	65—80	0,2—2,8	0,5—0,8	0,4—0,7	20
МДП	60—70	2,0—10,0	0,6—0,8	0,3—0,5	12

При изготовлении ОВП-керамики ставилась задача получить материал со следующими параметрами: пористость более 60%, средний диаметр пор 1—10 мкм, проницаемость не ниже ранее применяемых материалов капиллярного насоса из металлических порошков, малая теплопроводность, достаточная технологическая прочность. Как показали результаты исследований, необходимый материал можно изготовить из каждого из указанных выше порошков. ОВП-керамика на основе УДКХ-порошка имела значительно лучшие характеристики пористой структуры по сравнению с ОВП-керамикой на основе МДП (см. табл. 1).

Методом ртутной порометрии изучалось распределение пор по размерам полученных материалов. Измерения производились на установке "Пор Сайзер 9300" фирмы Micromeretics (США).

Вид кривых распределения пор по размерам для ОВП на основе порошка МДП (см. рис. 1, а) указывает на наличие фракционной неоднородности порошка в начальной смеси, что приводит к заметной раз-

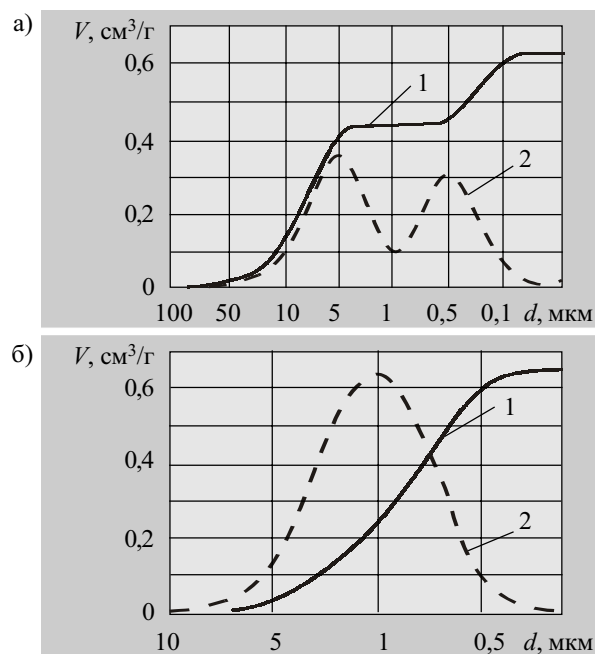


Рис. 1. Дифференциальная (1) и интегральная (2) кривые распределения пор по размерам для ОВП-керамики на основе МДП (а) и УДКХ-порошка  $Al_2O_3$  (б):  $V$  — объем пор в одном грамме образца ОВП-керамики;  $d$  — средний диаметр пор

нородности структуры материала и может привести к ухудшению гидродинамических свойств капиллярного насоса КТТ в процессе эксплуатации. С этой точки зрения более предпочтительным является материал на основе УДКХ-порошка  $Al_2O_3$ . Однако в данном исследовании, исходя из меньшей стоимости порошка МДП по сравнению с УДКХ (приблизительно на порядок) и более высокой степени отработанности технологии изготовления капиллярного насоса из ОВП-керамики на его основе, капиллярный насос был изготовлен из материала на основе МДП.

Для комбинированной системы охлаждения фотоприемного устройства инфракрасной техники была

разработана конструкция контурной тепловой трубы (рис. 2), учитывающая конструктивные особенности элементов охлаждения и объекта, в котором она функционирует. Площадка под установку тепловыделяющего элемента имеет размеры 30×30 мм, площадка конденсатора — 40×70 мм. Обе площадки были изготовлены из алюминиевого сплава. Диаметр испарителя 14 мм, расстояние между испарителем и конденсатором — 125 мм.

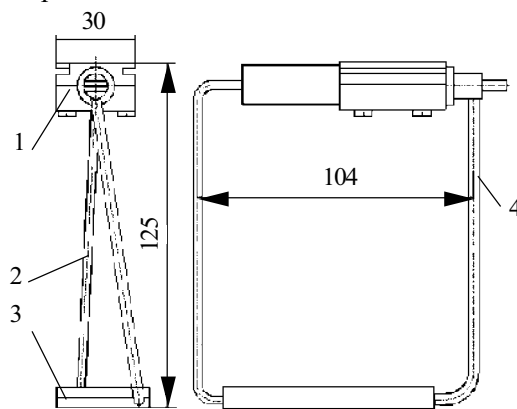


Рис. 2. Общий вид конструкции КТТ: 1 — испаритель; 2 — конденсаторопровод; 3 — конденсатор; 4 — паропровод

Для проведения исследований были изготовлены четыре экспериментальных образца контурных тепловых труб (по два образца каждого типа):

- А1, А2 (корпус — сплав АД-31, капиллярный насос — окись алюминия);
- Н1, Н2 (корпус — сталь 10Н12Х1Т, капиллярный насос — окись алюминия).

Отличительные геометрические параметры конструкций образцов А1, А2: внутренний диаметр паропровода  $d_{п}=3$  мм; внутренний диаметр жидкостного провода  $d_{ж}=2$  мм. Конденсатор выполнен в виде коаксиального канала. Параметры конструкций образцов Н1, Н2:  $d_{п}=3$  мм,  $d_{ж}=1,6$  мм. Конденсатор выполнен в виде змеевика из трубки внутреннего диаметром 1,6 мм, длиной 150 мм, уложенного в пределах площадки зоны конденсации.

Во всех образцах капиллярный насос был выполнен из ОВП-керамики на основе порошка МДП и имел следующие параметры: общая пористость 68%, открытая пористость 60%, средний диаметр пор 2 мкм, проницаемость  $0,8 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ . Образцы были заправлены ацетоном марки ЧДА (массовая доля основного вещества 99,8%). Масса заправки — 4 г.

Основной задачей испытаний было определение максимальной теплопередающей способности ( $Q_{max}$ ), минимальной тепловой мощности запуска ( $Q_{min}$ ), термического сопротивления и закономерности формирования температурного поля изготовленных экспериментальных образцов КТТ при различном их расположении в поле силы гравитации. Исследования проводились в стационарных режимах и в динамических (пусковые режимы, изменение характеристик КТТ при изменении ее ориентации в поле силы гравитации, переход на различные уровни тепловой нагрузки).

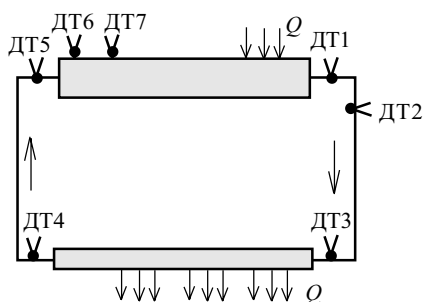


Рис. 3. Схема расположения датчиков температуры ДТ1—ДТ7

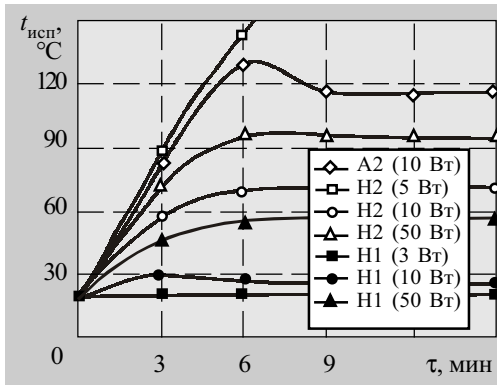


Рис. 4. Пусковые характеристики КТТ при  $h=+125$  мм и  $t_{\text{охл}}=20^{\circ}\text{C}$ :  $t_{\text{исп}}$  — температура стенки паропровода на выходе из испарителя (датчик ДТ1); А2, Н2 — ацетон; Н1 — аммиак

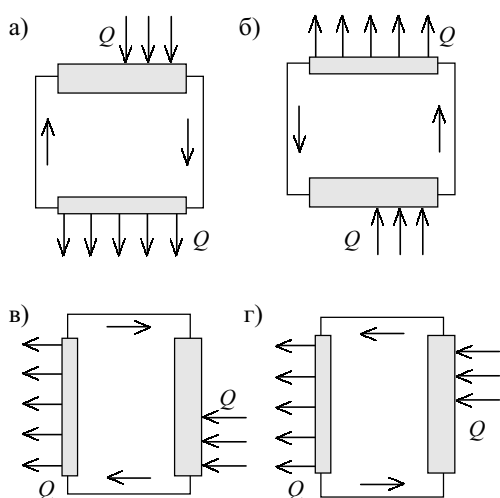


Рис. 5. Варианты ориентации КТТ

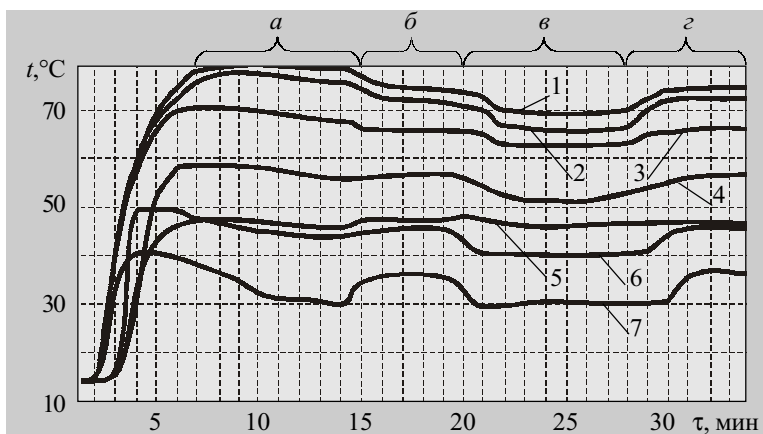


Рис. 6. Температурное поле КТТ Н2 при различной ориентации ее в поле силы гравитации ( $Q=30$  Вт,  $t_{\text{охл}}=15^{\circ}\text{C}$ ): 1 — ДТ1; 2 — ДТ2; 3 — ДТ3; 4 — ДТ7; 5 — ДТ6; 6 — ДТ5; 7 — ДТ4; а-г — варианты ориентации по рис. 5

Исследования рабочих характеристик КТТ проводились на экспериментальной установке, представляющей собой специальную информационно-измерительную систему, построенную на базе ПЭВМ "Pentium-II". Схема и устройство экспериментальной установки описаны в [7].

Установка позволяла задавать тепловой поток на испарителе в пределах от 0 до 500 Вт. Значения подводимой тепловой мощности измерялись ваттметром Д522 с классом точности 0,2. Все наружные поверхности КТТ покрывались теплоизоляцией на основе базальтовых волокон, что сводило к минимуму теплооттоки из системы. Температура вдоль контура измерялась 7 датчиками температуры (медь-константановыми термопарами с диаметром электродов 0,16 мм), которые располагались на наружных поверхностях КТТ (схема расположения приведена на рис. 3).

Установка предусматривает получение информации о распределении температуры в пусковых и переходных режимах с частотой опрашивания каналов (датчиков температуры) не ниже 2 датчиков за 1 с, а также обеспечивает переключение одного температурного уровня охлаждающей воды на другой не более чем за 60 с при расходе 0,9...2,5 л/мин.

Для изучения пусковых характеристик КТТ при фиксированном положении контура в пространстве скачкообразно (от 0 до заданного начального теплового потока

$Q_i^{\text{н}}=\text{const}$ ) подавалась мощность на нагреватель. Определялись значения температуры во всех контрольных точках КТТ. При определении максимальных значений теплового потока  $Q_{\text{max}}$  тепловая нагрузка  $Q_i^{\text{н}}$  плавно изменялась до предельной. Максимальная теплопередающая способность определялась при различной степени влияния силы гравитации. Изменение влияния силы гравитации имитировалось изменением высоты  $h$  превышения испарителя над конденсатором. Исследования проводились при температуре охлаждающей воды ( $t_{\text{охл}}$ ) 10, 15 и  $20^{\circ}\text{C}$ .

На рис. 4 представлены результаты испытаний образцов КТТ А2 и Н2 при имитации режима запуска. На образце А2 наблюдался перегрев компенсационной полости образца, что привело к значительному росту полного термического сопротивления. Исследования показали, что при тепловом потоке 10 Вт движущий температурный напор (разность температур корпуса КТТ на выходе из испарителя и на входе в компенсационную полость) у образца А2 на  $45^{\circ}\text{C}$  выше, чем у образца Н2. Время выхода на стационарный режим составляет 9 и 6 мин для образцов А2 и Н2, соответственно.

Влияние превышения зоны испарения над зоной конденсации (в пределах его изменения от  $-125$  до  $+125$  мм) исследовалось путем снятия температурного поля КТТ при различной (рис. 5) ориентации теп-

ловой трубы. На **рис. 6** представлено температурное поле образца Н2 при различных значениях  $h$  (номера датчиков — в соответствии с рис. 3).

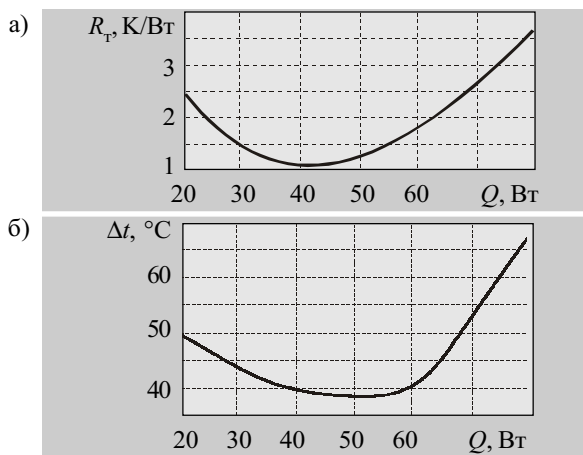


Рис. 7. Зависимость полного термического сопротивления  $R_T$  (а) и движущего температурного напора  $\Delta t$  (б) от подводимой тепловой нагрузки для образца Н2 (ацетон,  $h=+125$  мм)

На **рис. 7, а** приведена зависимость термического сопротивления КТТ Н2 от подводимой тепловой нагрузки при  $t_{\text{охл}}=15^\circ\text{C}$ , а на **рис. 7, б** — зависимость движущего температурного напора. Испытания подтвердили, что для КТТ малые значения подводимой тепловой нагрузки ( $Q < 20$  Вт) отрицательно сказываются на движущем температурном напоре. Для образца Н2 наиболее благоприятный диапазон подводимой тепловой мощности составляет 20...65 Вт.

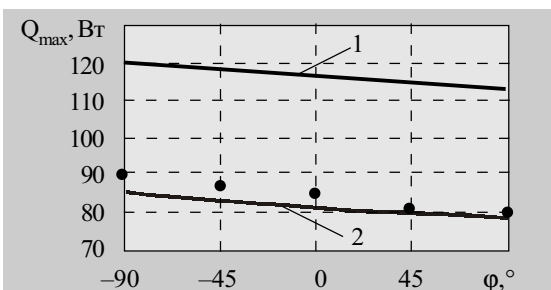


Рис. 8. Зависимость максимальной теплопередающей способности от угла превышения  $\phi$  зоны испарения над зоной конденсации (КТТ Н2, ацетон): 1 — расчет,  $t_v=43^\circ\text{C}$ ,  $t_c=-4^\circ\text{C}$ ; 2 — расчет,  $t_v=124^\circ\text{C}$ ,  $t_c=43^\circ\text{C}$ ; ● — эксперимент,  $t_v=124^\circ\text{C}$ ,  $t_c=43^\circ\text{C}$

Была также исследована максимальная теплопередающая способность ( $Q_{\text{max}}$ ) образца Н2 в зависимости от различной ориентации КТТ в поле силы гравитации. Сопоставление экспериментальных результатов и результатов расчета  $Q_{\text{max}}$  по модели, представленной в [6], приведены на **рис. 8**. (Здесь  $t_v$  — температура пара в испарителе,  $t_c$  — температура жидкой фазы теплоносителя на выходе из конденсатора.) Как видно из рисунка, наблюдается достаточно удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных.

Однако результаты экспериментального исследования КТТ из алюминиевого сплава и нержавеющей стали с ацетоном в качестве теплоноси-

теля свидетельствуют об ограниченной эффективности таких КТТ. Как и ожидалось, использование в качестве материала корпуса высокотеплопроводного алюминиевого сплава АД31 приводит к росту движущего температурного напора, ухудшению и снижению стабильности характеристик, особенно пусковых. Образцы Н1 и Н2 со стальным корпусом показали более стабильную работу как в стационарных, так и в динамических режимах. Вместе с тем значение полного термического сопротивления образцов Н1 и Н2 все же остается достаточно высоким. Для некоторых комбинированных систем охлаждения полученного термического сопротивления может оказаться вполне достаточно, но для комбинированных систем охлаждения фотоприемных устройств желательно иметь КТТ с меньшим термическим сопротивлением при передаче тепловых потоков в диапазоне 5...50 Вт.

В связи с этим был проработан вариант использования другого теплоносителя (аммиака) с более высоким значением крутизны линии насыщения  $dP/dT$  (см. **табл. 2**).

С этой целью образец Н1 был исследован с аммиаком в качестве теплоносителя (масса заправки 3,5 г).

Таблица 2

Сравнительная характеристика параметров теплоносителей КТТ (при температуре теплоносителя  $50^\circ\text{C}$ )

Теплоноситель	Поверхностное натяжение, $\sigma \cdot 10^2$ , Н/м	Крутизна линии насыщения, $dP/dT$ , кПа/К	Капиллярное давление, $\Delta P_{\text{стmax}}$ (при $d_{\text{п}} = 2$ мкм), кПа
Ацетон	2,0	2,8	40,0
Аммиак	1,6	72,0	32,0

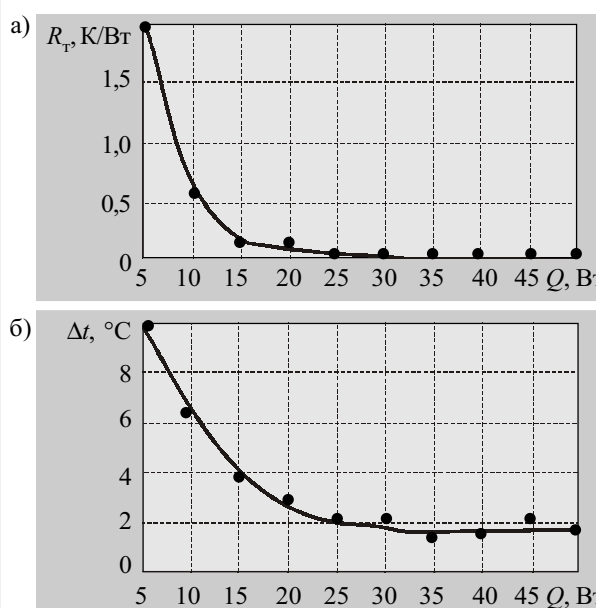


Рис. 9. Зависимость  $R_T$  (а) и  $\Delta t$  (б) от подводимой тепловой нагрузки для образца Н1 (аммиак,  $h=+125$  мм)

Пусковые характеристики образца Н1 с аммиаком показаны на рис. 4. Значения минимального (3 Вт) и максимального (50 Вт) передаваемого теплового потока выбраны исходя из требований, предъявляемых к конкретной системе охлаждения.

Время выхода на стационарный режим составляет 5...7 мин. Перепад температуры между зонами испарения и конденсации аммиачной КТТ значительно ниже, чем у ацетоновой, и не превышает 10°C при тепловой нагрузке от 3 до 50 Вт.

Из рис. 9 видно, что полное термическое сопротивление и движущий температурный напор аммиачной КТТ в исследованном диапазоне передаваемого теплового потока значительно ниже, чем у ацетоновой КТТ (см. рис. 7), что позволяет использовать ее в комбинированной системе охлаждения фотоприемного устройства.

\* \* \*

Таким образом, экспериментальные исследования контурных тепловых труб с относительно небольшим расстоянием между испарителем и конденсатором (до 125 мм) и капиллярным насосом, выполненным из порошка на основе окисла алюминия, показали, что использование алюминиевых сплавов в качестве корпуса КТТ не всегда может быть оправданным с точки зрения получения минимального термического сопротивления КТТ. В этой связи наиболее перспективным является использование в качестве материала корпуса нержавеющей стали, а в качестве теплоносителя — аммиака.

Вместе с тем в дальнейшем планируется исследовать возможность снижения полного термического сопротивления КТТ с корпусом из алюминиевого сплава путем создания теплового затвора, препятствующего перетеканию теплоты по корпусу испарителя из зоны нагрева в компенсационную полость.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Буткевич В. Г., Бочков В. Д., Глобус Е. Р. Фотоприемники и фотоприемные устройства на основе поликристаллических и эпитаксиальных слоев халькогенидов свинца // Прикладная физика.— 2001.— № 6.— С. 66—112.
2. Герасимов Ю. Ф., Майданик Ю. Ф., Щеголев Г. Т. и др. Низкотемпературные тепловые трубы с отдельными каналами для пара и жидкости // ИФЖ.— 1975.— Т. 28, № 6.— С. 957—960.
3. Герасимов Ю. Ф., Майданик Ю. Ф., Долгирев Ю. Е. и др. Некоторые результаты исследования низкотемпературных тепловых труб, работающих против сил тяжести // ИФЖ.— 1976.— Т. 30, № 4.— С. 581—586.
4. Майданик Ю. Ф. Контурные тепловые трубы и двухфазные теплопередающие контуры с капиллярной прокачкой // Автореф. дисс. ... д. т. н.— М.— 1993.
5. Кисеев В. М. Теплоперенос и фазовые превращения в капиллярных структурах // Автореф. дисс. ... д. ф.-м. н.— Екатеринбург.— 2001.
6. Кисеев В. М., Погорелов Н. П. Контурные тепловые трубы: анализ и нерешенные проблемы // Сб. науч. тр. "Вторая Российская национальная конференция по теплообмену".— М.: Изд-во МЭИ.— 1998.— Т. 5.— С. 203—207.
7. Хайрнасов С. М., Письменный Е. Н., Николаенко Ю. Е., Рассамкин Б. М. Экспериментальное моделирование контурной тепловой трубы // Тепловые режимы и охлаждение радиоэлектронной аппаратуры.— 1999.— Вып. 1.— С. 57—61.
8. Михайленко А. А., Фокина Г. А. Структура, свойства и применение порошков на основе  $Al_2O_3$ , полученных методом криохимической технологии // Физика и химия обр. материалов.— 1990.— № 6.— С. 119—123.

в портфеле редакции

в портфеле редакции

в портфеле редакции

в портфеле редакции

в портфеле редакции

- О возможности использования керамики на основе твердых растворов  $(Ni, Co, Mn, Cu)_3O_4$  для создания толстопленочных резисторов. *О. И. Шпотьок, И. В. Гадзаман, Р. В. Охримо-вич, Н. М. Вакив, С. И. Осечкин, В. М. Цмоць (Украина, г. Львов)*
- Двухканальные контролепригодные логические схемы цифровых компараторов. *А. И. Тимошкин (Украина, г. Днепрпетровск)*
- Получение структуры цифрового фильтра из описания в пространстве состояний. *В. С. Ситников, П. В. Ступень, И. В. Бадерко (Украина, г. Одесса)*
- Анизотропный термоэлектрический компаратор. *А. А. Ащеулов, И. В. Гуцул (Украина, г. Черновцы)*
- Влияние теплопереходов на температурный перепад многокаскадной термоэлектрической батареи. *Ю. Е. Николаенко, Л. Н. Вихор (Украина, г. Киев)*
- Методы уменьшения температурных погрешностей датчиков давления. *В. А. Васильев (Россия, г. Пенза)*
- Планарные взаимоиндуктивные сенсоры для датчиков положения и приближения. *О. Н. Негоденко, С. А. Черевко (Россия, г. Таганрог)*



- Влияние ионизирующего излучения на токоперенос в арсенидгаллиевом полевом транзисторе. *Ф. Д. Касимов, А. Э. Лютфалибекова (Азербайджан, г. Баку)*
- Экоинформационная система диагностического и экологического контроля транспортных средств. *В. Ф. Примиский (Украина, г. Киев)*
- О контроле токсичности выхлопа двигателей транспортных средств. *М. Д. Скубилин, О. Б. Спиридонов (Россия, г. Таганрог)*

в портфеле редакции

в портфеле редакции

в портфеле редакции

в портфеле редакции

в портфеле редакции