

УДК 536.248.2

СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕПЛОЙ ТРУБЫ С УСТРОЙСТВОМ ПОГЛОЩЕНИЯ ТЕПЛОТЫ ОТ МОЩНЫХ ИСТОЧНИКОВ

А.В. Шарков^а, В.А. Кораблев^а, В.В. Герасютенко^а

^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: VictoryWiktorija@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 16.11.17, принята к печати 21.12.17

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-1-133-139

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Шарков А.В. Кораблев В.А. Герасютенко В.В. Система охлаждения на основе тепловой трубы с устройством поглощения теплоты от мощных источников // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 1. С. 133–139. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-1-133-139

Аннотация

Предмет исследования. Предложена система охлаждения, основанная на применении тепловой трубы с устройством поглощения теплоты от мощных источников – тепловым аккумулятором. **Метод.** Принцип работы теплового аккумулятора на основе фазовых переходов рабочего вещества заключается в том, что тепловая энергия расходуется на плавление рабочего вещества и частично отводится в окружающую среду. Для проведения исследований была собрана экспериментальная установка. Тепловая труба, использованная в эксперименте, снабжена плоскими фланцами, между ними устанавливался тепловой аккумулятор. В качестве плавящегося вещества в тепловом аккумуляторе использовалась стеариновая кислота. **Основные результаты.** В работе исследованы характеристики системы охлаждения на основе тепловой трубы с аккумулятором теплоты. Получена зависимость теплового сопротивления тепловой трубы и радиатора от подводимой мощности. Проведено сравнение зависимости температуры основания охлаждаемого объекта от времени в условиях, когда тепловая труба оснащена тепловым аккумулятором, и без него. На основании полученных результатов было определено время, в течение которого тепловой аккумулятор способен обеспечить тепловой режим тепловыделяющего объекта. **Практическая значимость.** Тепловой аккумулятор, примененный в разработанной системе охлаждения, обладает высокой теплотой фазовых переходов. Такие тепловые аккумуляторы предназначены для работы в условиях тепловыделений прибора, носящих импульсный или периодический характер. Применение теплового аккумулятора в системе охлаждения позволит уменьшить размеры радиатора, снизить амплитуду колебаний температуры охлаждаемого объекта и тем самым повысить надежность его работы.

Ключевые слова

система охлаждения, тепловой аккумулятор, тепловая труба, прибор электроники, тепловой режим, радиоэлектронная аппаратура

COOLING SYSTEM BASED ON HEAT PIPE WITH DEVICE FOR HEAT ABSORPTION FROM POWERFUL SOURCES

A.V. Sharkov^a, V.A. Korablev^a, V.V. Gerasiyutenko^a

^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: VictoryWiktorija@yandex.ru

Article info

Received 16.11.17, accepted 21.12.17

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-1-133-139

Article in Russian

For citation: Sharkov A.V., Korablev V.A., Gerasiyutenko V.V. Cooling system based on heat pipe with device for heat absorption from powerful sources. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 133–139 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-1-133-139

Abstract

Subject of Research. We have presented a cooling system based on a heat pipe usage with the device of heat absorption from powerful sources, that is, the heat accumulator. **Method.** The operation principle of heat accumulator based on phase changes is that the thermal energy is consumed for melting of working substance, and is removed partly into the environment. The experimental setup was assembled for the research. The heat pipe studied in the experiment had flat flanges. The heat accumulator was installed between them. The stearic acid was used as the melting substance in the heat accumulator. **Main Results.** We have studied the characteristics of cooling system based on the heat pipe with the heat accumulator. We have got

the heat resistance dependence of the heat pipe and heat-sink on input power. We have performed comparison of the temperature dependence of the cooling object base from time, in conditions, when the heat pipe is equipped with a heat accumulator and without it. Based on the obtained results the time was determined necessary for the heat accumulator to provide thermal behavior of the heat generation object. **Practical Relevance.** The heat accumulator, used in the cooling system, has high heat of phase changes. Such heat accumulators are used to work in conditions of heat generation of device, which can be pulsed or periodic. The heat accumulator usage in cooling system will reduce the heat-sink dimensions, reduce the amplitude of temperature fluctuations of cooled object and thereby improve its reliability.

Keywords

cooling system, heat accumulator, heat pipe, electronic device, thermal behavior, radio-electronic equipment

Введение

Совершенствование радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) направлено на улучшение ее качественных показателей работы. При этом происходит непрерывное усложнение РЭА, связанное с ростом количества используемых элементов в единице объема. Это приводит к возрастанию плотности рассеиваемой мощности и повышению температуры деталей в аппаратуре. Надежность деталей падает с повышением их температуры. Увеличение температуры деталей может привести к искажению сигналов на выходе аппарата или даже к выходу аппарата из строя. Обеспечение оптимального теплового режима РЭА достигается путем использования различных систем охлаждения. Одним из эффективных способов охлаждения современной РЭА является применение тепловых труб. Тепловые трубы позволяют отвести теплоту от труднодоступных теплонагруженных элементов, обладают высокой эффективной теплопроводностью, позволяют значительно сократить размеры и массу системы охлаждения [1–3]. Важной проблемой является обеспечение теплового режима РЭА, которая подвергается в процессе своей работы однократным или повторно-кратковременным «пиковым» тепловым нагрузкам. В этом случае при создании системы охлаждения используются способность конструкции к аккумулированию теплоты, или применяют тепловые аккумуляторы [4].

Перспективным методом охлаждения радиоэлектронной аппаратуры, в частности РЭА космических аппаратов, работающей в режиме кратковременных тепловыделений, является метод, основанный на использовании плавящихся рабочих веществ со стабильной температурой плавления [5, 6].

Авторами настоящей работы была разработана система охлаждения для отвода теплоты от электронного прибора большой мощности, работающего в режиме повторно-кратковременных тепловых воздействий. Прототипом технического решения стал патент от 1994 г. [7]. Недостатком указанного прототипа является низкая теплопроводность углеводородов, входящих в состав теплового аккумулятора. Теплоаккумулирующая среда, расположенная в корпусе тепловой трубы, в процессе нагрева превращается в теплоизолятор. Решением данной проблемы стало размещение теплового аккумулятора между ребрами тепловой трубы. Ребра тепловой трубы позволяют дополнительно рассеивать теплоту.

Методика проведения эксперимента. Экспериментальная установка

Для проведения исследований была собрана экспериментальная установка, схема и фотография которой представлены на рис. 1, 2.

Радиатор 2 на рис. 1 представляет собой две пластины площадью $31,5 \text{ см}^2$ каждая, сделанные из алюминиевого сплава с нанесенным лакокрасочным покрытием. Радиатор прикреплен винтами на зону конденсации тепловой трубы 1. На зоне испарения закрепляется нагреватель 5 из нихромового провода диаметром 0,2 мм в кремнеземной изоляции. Для уменьшения тепловых потерь непосредственно от нагревателя и тепловой трубы в среду они теплоизолируются с помощью пенополиэтилена. На транспортную часть тепловой трубы и на ту часть, где помещен нагреватель, прикрепляется тепловая изоляция из пенополиэтилена 3. Толщина изоляции составляет 8 мм (на нагревателе) и 10 мм (на транспортной части тепловой трубы). Тепловой аккумулятор 4 установлен между ребрами тепловой трубы. Нагреватель 5 подсоединяется к источнику питания 6 ТЕС-23, что дает возможность варьировать величину подаваемой мощности. На концах тепловой трубы – в зоне испарения и конденсации – установлены две термопары хромель–алюмель 7, 8 для измерения температуры. Свободным концом термопары закрепляются в устройстве для измерения и контроля температуры УКТ38-Щ4.ТП. В процессе измерения на источнике питания выставляется напряжение, затем, после выхода установки на стационарный режим, снимаются показания с датчика температуры (устройства УКТ38-Щ4.ТП).

На рис. 3 приведены приборы, использованные в данной работе, и их классы точности.

Отличительной особенностью исследуемой тепловой трубы является наличие плоских фланцев, что обеспечивает применимость к охлаждению РЭА.

Характеристики данной тепловой трубы:

1. материал корпуса – АМг-2;
2. теплоноситель – аммиак;
3. максимальная мощность – до 500 Вт;
4. минимальная мощность – до 10 Вт.

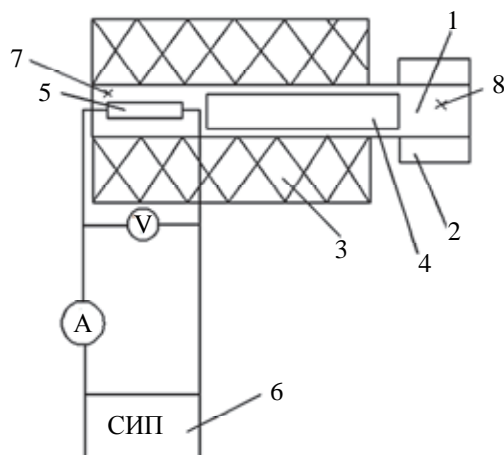


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – тепловая труба; 2 – радиатор; 3 – тепловая изоляция; 4 – тепловой аккумулятор; 5 – нагреватель; 6 – стабилизированный источник питания (СИП) ТЕС 23; 7, 8 – термопары хромель–алюмель, установленные в зоне испарения и конденсации тепловой трубы. На схеме условными обозначениями «А» и «V» обозначены амперметр и вольтметр соответственно



Рис. 2. Фотография экспериментальной установки: 1 – источник питания ТЕС-23; 2 – устройство для измерения и контроля температуры УКТ38-Щ4.ТП; 3 – тепловая труба в изоляции из пенополиэтилена

Название прибора	Класс точности
Источник питания ТЕС-23 	± 0.01
Устройство для измерения и контроля температуры УКТ38-Щ4.ТП 	± 0.5

Рис. 3. Класс точности приборов, использованных при проведении эксперимента

Тепловая труба изготовлена из профиля ТР14ПД, профиль имеет 36 продольных прямоугольных канавок шириной 0,7 мм и глубиной 1,0 мм. Длина рабочей части тепловой трубы 35 см. Аммиак имеет уникальные теплофизические свойства – высокая теплота испарения (1186 кДж/кг) и низкая температура замерзания (77,7°С) по сравнению с другими подобными химическими соединениями с близкой молекулярной массой. Аммиак способен обеспечить весьма высокий перенос теплоты, сочетающийся с низкой

температурой плавления [8]. Тепловые трубы для систем терморегулирования космических аппаратов успешно применяются в системах охлаждения наземной аппаратуры [9].

В данной работе рассматривается способ аккумулирования тепловой энергии, основанный на использовании обратимого процесса фазового перехода плавление–затвердевание. В качестве теплоаккумулирующего материала используется фазоменяющий материал. В работе [10] представлена основная классификация фазоменяющих материалов и тепловых аккумуляторов на их основе. Наибольшие перспективы для аккумулирования теплоты могут иметь органические кислоты и парафины [11–14].

Тепловой аккумулятор, сделанный на основе стеариновой кислоты, был установлен между ребрами тепловой трубы (рис. 4, 5).

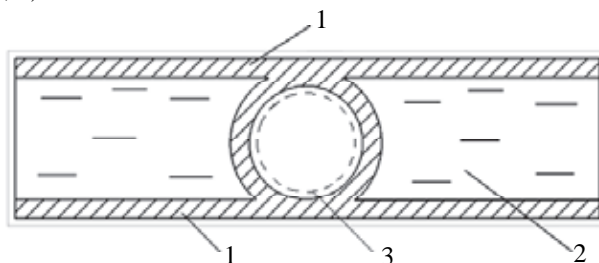


Рис. 4. Поперечное сечение тепловой трубы с аккумулятором теплоты: 1 – ребра тепловой трубы; 2 – тепловой аккумулятор; 3 – капиллярно-пористая структура тепловой трубы

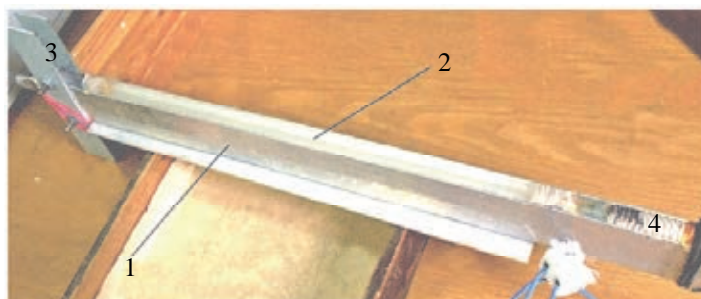


Рис. 5. Фотография тепловой трубы (со снятой тепловой изоляцией) с аккумулятором теплоты: 1 – ребро тепловой трубы; 2 – тепловой аккумулятор; 3 – радиатор; 4 – нагреватель

Свойства стеариновой кислоты [15, 16]:

1. температура плавления: $T_{пл} = 70^{\circ}\text{C}$;
2. плотность в жидком состоянии: $\rho = 838 \text{ кг/м}^3$;
3. теплопроводность в твердом состоянии: $\lambda = 0,4 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$;
4. теплоемкость в жидком состоянии: $c = 2,5 \times 10^3 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$;
5. скрытая теплота плавления: $200 \times 10^3 \text{ Дж/кг}$.

Основные результаты исследования

Тепловое сопротивление тепловой трубы рассчитывалось по следующей формуле [17]:

$$R_{\text{тт}} = \frac{T_1 - T_3}{U \cdot I} = \frac{T_1 - T_3}{\Phi},$$

где T_1 – температура основания электронного прибора (температура зоны испарения), $^{\circ}\text{C}$; T_3 – температура основания радиатора (температура зоны конденсации), $^{\circ}\text{C}$; U – напряжение, В; I – сила тока, А; Φ – мощность источника теплоты, Вт.

Тепловое сопротивление радиатора рассчитывалось по формуле

$$R_{\text{рад}} = \frac{T_3 - T_2}{U \cdot I} = \frac{T_3 - T_2}{\Phi},$$

где T_3 – температура радиатора (в зоне конденсации), $^{\circ}\text{C}$; T_2 – температура среды, $^{\circ}\text{C}$.

Опыты проводились в воздушной среде, имеющей температуру $t = 22^{\circ}\text{C}$.

По полученным результатам были построены графики зависимости теплового сопротивления тепловой трубы и радиатора от подводимой мощности. Графики приведены на рис. 6, 7.

На рис. 6 представлено изменение теплового сопротивления тепловой трубы с увеличением подводимой мощности. Тепловое сопротивление является одним из важнейших теплофизических параметров тепловой трубы. Величина теплового сопротивления тепловой трубы равна отношению разности среднесредних температур стенок зоны испарения и конденсации к переносимому тепловому потоку. На рис. 7 приведен график зависимости теплового сопротивления радиатора от мощности источника теплоты. Тепловое сопротивление радиатора равно отношению разности температур зоны конденсации и окружающей среды к рассеиваемой мощности.

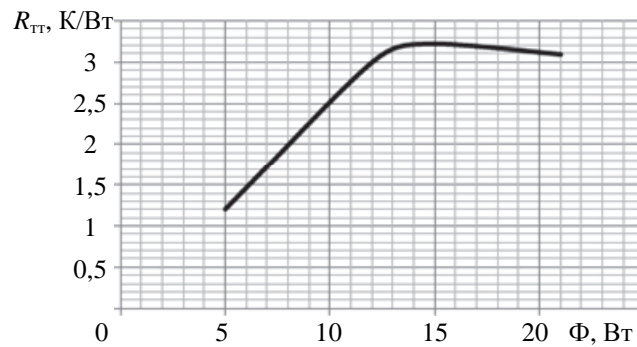


Рис. 6. График зависимости теплового сопротивления тепловой трубы от мощности: $R_{тт}(\Phi)$

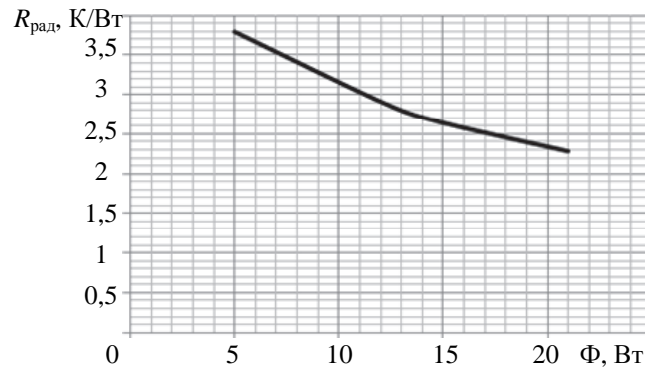


Рис. 7. График зависимости теплового сопротивления радиатора от мощности: $R_{рад}(\Phi)$

Таким образом, общее тепловое сопротивление тепловой трубы с радиатором составляет 5,4 К/Вт.

$$R_{\Sigma} = R_{тт} + R_{рад} = 3,1 + 2,3 = 5,4 \text{ (К/Вт)}.$$

Для охлаждения электронных приборов, выделяющих мощности более 15 Вт и работающих в режиме кратковременных тепловых нагрузок, применение данной системы охлаждения нецелесообразно. В таких случаях уместно применять тепловые аккумуляторы.

Проведено сравнение графиков зависимости температуры основания электронного прибора от времени в условиях, когда тепловая труба была оснащена тепловым аккумулятором, и без него (рис. 8, 9). Опыты проводились в воздушной среде, имеющей температуру $t = 22^{\circ}\text{C}$.

Подведенная мощность составляет 21 Вт и 30 Вт. Подведенная тепловая энергия расходуется на плавление теплоаккумулирующего вещества (стеариновой кислоты), затем отводится в окружающую среду. В результате снижается скорость разогрева электронного прибора и становится возможным подержание теплового режима прибора электроники в течение кратковременного промежутка времени.

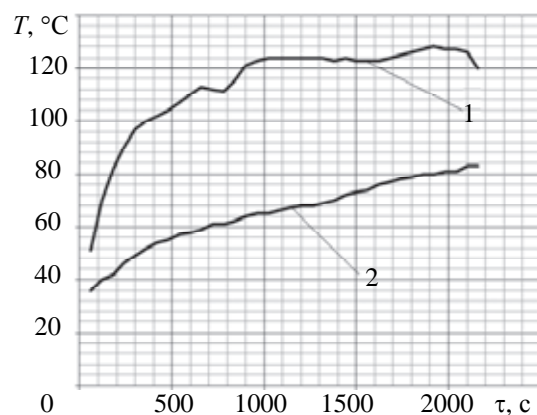


Рис. 8. Графики зависимости температуры основания электронного прибора T от времени τ :
 1 – тепловая труба без аккумулятора теплоты; 2 – тепловая труба с аккумулятором теплоты.
 Подведенная мощность $\Phi = 21$ Вт

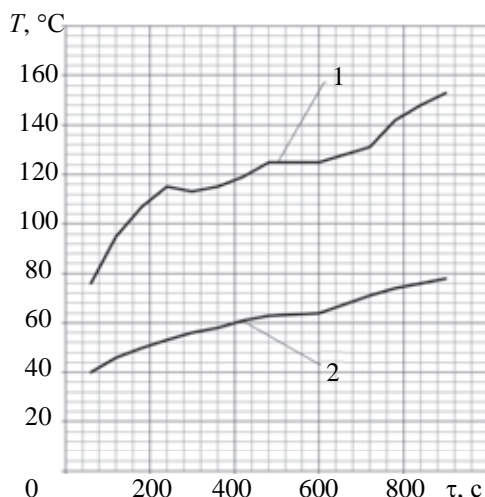


Рис. 9. Графики зависимости температуры основания электронного прибора T от времени τ : 1 – тепловая труба без аккумулятора теплоты; 2 – тепловая труба с аккумулятором теплоты. Подведенная мощность $\Phi = 30$ Вт

Таким образом, тепловой аккумулятор способен обеспечить тепловой режим электронного устройства в течение 30 минут. При этом температура прибора не превышает 80°C (температура, при которой прибор нормально функционирует), при подведенной мощности 21 Вт. При подведенной мощности в 30 Вт тепловой аккумулятор обеспечивает тепловой режим прибора электроники в течение 15 минут.

Электронное устройство без теплового аккумулятора нагревается до 80°C за 3 минуты при мощности 21 Вт и за 1 минуту при мощности в 30 Вт.

Заключение

Исходя из исследований, можно сделать вывод о том, что применение теплового аккумулятора в системах охлаждения электронной аппаратуры позволяет снизить скорость разогрева ее элементов и осуществить стабилизацию температурного режима тепловыделяющих элементов, создать оптимальную по массе и габаритам систему охлаждения.

Предложенная система охлаждения на основе тепловой трубы с тепловым аккумулятором может использоваться для обеспечения теплового режима электронных приборов, работающих в режиме кратковременных тепловых нагрузок.

Литература

1. Reay D.A., Kew P.A. *Heat Pipes: Theory, Design and Application*. 6th ed. Elsevier, 2014. 374 p.
2. Fahgiri A. Heat pipes: review, opportunities and challenges // *Frontiers in Heat Pipes*. 2014. V. 5. P. 1–48. doi: 10.5098/fhp.5.1
3. Khairnasov S., Naumova A. Heat pipes application in electronics thermal control systems // *Frontiers in Heat Pipes*. 2015. V. 6. 14 p. doi: 10.5098/fhp.6.6
4. Алексеев В.А. Охлаждение радиоэлектронной аппаратуры с использованием плавящихся веществ. М.: Энергия, 1975. 88 с.
5. Васильев Е.Н., Деревянко В.А., Чеботарев В.Е. Тепловой аккумулятор для системы терморегулирования мощных блоков радиоэлектронной аппаратуры кратковременного действия // *Вестник СибГАУ*. 2016. Т. 17. № 4. С. 930–935.
6. Кукина Г.В., Пронин Ю.С., Мишин Г.С., Лелюшкин Н.В. Экспериментальные исследования системы терморегулирования приборов космического аппарата с тепловым аккумулятором // *Двойные технологии*. 2014. № 2 (67). С. 71–75.
7. Трифонов Г.И., Дюдин А.Е., Привалов А.С. Тепловой аккумулятор. Патент РФ №2011931. Заявл. 30.04.1994.
8. Лукс А.Л., Матвеев А.Г. Анализ основных расчетных и экспериментальных теплофизических характеристик аммиачных тепловых труб повышенной тепловой проводимости из алюминиевых сплавов // *Вестник Самарского университета. Естественнонаучная серия*. 2008. № 3. С. 331–357.
9. Хайрнасов С.М., Рассамакин Б.М., Рассамакин А.Б.

References

1. Reay D.A., Kew P.A. *Heat Pipes: Theory, Design and Application*. 6th ed. Elsevier, 2014, 374 p.
2. Fahgiri A. Heat pipes: review, opportunities and challenges. *Frontiers in Heat Pipes*, 2014, vol. 5, pp. 1–48. doi: 10.5098/fhp.5.1
3. Khairnasov S., Naumova A. Heat pipes application in electronics thermal control systems. *Frontiers in Heat Pipes*, 2015, vol. 6, 14 p. doi: 10.5098/fhp.6.6
4. Alekseev V.A. *Cooling of Radio-Electronic Equipment with Use of the Melting Substances*. Moscow, Energiya Publ., 1975, 88 p. (In Russian)
5. Vasil'ev E.N., Derevyanko V.A., Chebotarev V.E. Thermal storage to the temperature control system of powerful blocks of electronic equipment with a short action time. *Vestnik of SibGAU*, 2016, vol. 17, no. 4, pp. 930–935. (In Russian)
6. Kukina G.V., Pronin Yu.S., Mishin G.S., Lelushkin N.V. Experimental studies of the thermal control of the spacecraft with heat storage. *Dvoynye Tekhnologii*, 2014, no. 2, pp. 71–75. (In Russian)
7. Trifonov G.I., Dyudin A.E., Privalov A.S. Heat Accumulator. *Patent RU2011931*, 1994.
8. Luks A.L., Matveev A.G. Analysis of main calculated and experimental thermo-physical characteristics of advanced heat-transfer rate heat-pipes of aluminum alloy. *Vestnik of Samara University. Natural Science Series*, 2008, no. 3, pp. 331–357. (In Russian)
9. Khairnasov S.M., Rassamakin B.M., Rassamakin A.B. Aluminium heat pipes application to electronic cooling systems. *Sovremennye Informatsionnye i Elektronnyye*

- Применение алюминиевых тепловых труб в системах охлаждения радиоэлектронной аппаратуры // Современные информационные и электронные технологии. 2014. Т. 2. № 15. С. 8–11.
10. Бабаев Б.Д. Разработка и исследование энергосистем на основе возобновляемых источников с фазопереходным аккумулярованием тепла: дис. ... докт. техн. наук. Махачкала, 2016. 345 с.
 11. Алексеев В.А., Карабин А.Е. Новый тип тепловых аккумуляторов для охлаждения радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов // Труды МАИ. 2011. № 49. С. 36.
 12. Рассолов О.Г., Гончаров К.А., Антонов В.А., Алексеев В.А. Сотовая панель с тепловыми трубами и теплоаккумулирующим материалом // Решетневские чтения. 2009. Т. 1. № 13. С. 70–71.
 13. Зыков А.П. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях: конспект лекций. М.: МИИТ, 2011. 114 с.
 14. Алексеев В.А., Чукин В.Ф. Теплоаккумулирующее устройство. Патент РФ №2306494. Опубл. 20.09.2007.
 15. Россихин Н.А. Методические указания по проектированию аккумуляторов теплоты на фазовых переходах (капсульного типа). М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 35 с.
 16. Доценко С.П., Данилин В.Н., Марцинковский А.В. Теплоаккумулирующие свойства n-парафинов, жирных кислот и многокомпонентных систем на их основе // Физико-химический анализ свойств многокомпонентных систем. 2003. № 1. С. 12.
 17. Дульнев Г.Н., Беляков А.П. Тепловые трубы в электронных системах стабилизации температуры. М.: Радио и связь, 1985. 96 с.
 - Tekhnologii*, 2014, vol. 2, no. 15, pp. 8–11. (In Russian)
 10. Babaev B.D. *Development and Research of Power Systems Based on Renewable Sources with Phase Change Accumulation of Heat*. Diss. Dr. Eng. Sci. Makhachkala, 2016, 345 p. (In Russian)
 11. Alekseev V.A., Karabin A.E. The new type of thermal device for cooling the electronic equipment of spacecrafts. *Trudy MAI*, 2011, no. 49, p. 36. (In Russian)
 12. Rassolov O.G., Goncharov K.A., Antonov V.A., Alekseev V.A. Honeycomb panel with heat pipes and heat storage material. *Reshetnev Readings*, 2009, vol. 1, no. 13, pp. 70–71. (In Russian)
 13. Zikov A.P. *Energy Saving in Heat Power Engineering and Heat Technologies: Lecture Notes*. Moscow, MIIT Publ., 2011, 114 p. (In Russian)
 14. Alekseev V.A., Chukin V.F. Heat Accumulating Device. *Patent RU2306494*, 2007.
 15. Rossihin N.A. *Guidelines for Design of Heat Accumulators on Phase Transitions (Capsule Type)*. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2010, 35 p. (In Russian)
 16. Dotsenko S.P., Danilin V.N., Martsynkovskyy V.A. Heat storage properties of n-paraffins, fatty acids and multicomponent systems based on them. *Fiziko-Khimicheskii Analiz Svoistv Mnogokomponentnykh Sistem*, 2003, no. 1, p. 12. (In Russian)
 17. Dul'nev G.N., Belyakov A.P. *Heat Pipes in Electronic Systems of Temperature Stabilization*. Moscow, Radio i Svyaz' Publ., 1985, 96 p.

Авторы

Шарков Александр Васильевич – доктор технических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 16442754200, ORCID ID: 0000-0001-7826-4864, sharkov@grv.ifmo.ru

Кораблев Владимир Антонович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент, тьютор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-6691-7140, kvant1953@gmail.com

Герасютенко Виктория Викторовна – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0003-2186-8565, VictoryWiktorina@yandex.ru

Authors

Alexander V. Sharkov – D.Sc., Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 16442754200, ORCID ID: 0000-0001-7826-4864, sharkov@grv.ifmo.ru

Vladimir A. Korablev – PhD, Senior scientific researcher, Associate Professor, tutor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-6691-7140, kvant1953@gmail.com

Victoria V. Gerasyutenko – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0003-2186-8565, VictoryWiktorina@yandex.ru