

Для цитирования: Передков С.А., Рамазанов Р.К., Юсуфов Ш.А. Термоэлектрическая система теплоотвода для стабилизации работы тепловых труб в системе обеспечения теплового режима радиоэлектронного оборудования. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017; 44 (3): 83-92. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-3-83-92

For citation: Peredkov S.A., Ramazanov R.K., Yusufov Sh.A. Thermoelectric heat removal system for the operational stabilisation of heat pipes in a system for providing the thermal regime of radio electronic equipment.

Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017; 44 (3): 83-92. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-3-83-92

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.317.2

DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-3-83-92

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ТЕПЛООТВОДА ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ РАБОТЫ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ В СИСТЕМЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Передков С.А.², Рамазанов Р.К.³, Юсуфов Ш.А.¹

¹⁻³ Дагестанский государственный технический университет,

¹⁻³ 367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия

¹e-mail: yshirali @yandex.ru, ²e-mail: peredkov @mail.ru, ³e-mail: ramazanov @mail.ru

Резюме: *Цель.* Целью исследования является проведение анализа теплофизических процессов в термоэлектрической системе в составе системы обеспечения теплового режима электронной аппаратуры, расположенной в шкафу. **Метод.** Трехмерность задачи и смешанные граничные условия приводят к необходимости разработки расчета теплопередачи в элементах конструкции термоэлектрической системы. Методика численного расчета строится на основе метода энергетических балансов. Анализ тепловых режимов промежуточного теплоотвода выполняется на основе математической модели для локально нагреваемой и охлаждаемой ограниченной пластины. **Результат.** Предложена конструкция шкафа и термоэлектрическая система для эффективного отвода теплоты с конденсационной части тепловой трубы. Отличительной особенностью конструктивной реализации является наличие промежуточного теплоотвода. Преимуществом предлагаемой конструкции также является отсутствие значительных дополнительных энергозатрат для регулирования температурного режима радиоэлектронной аппаратуры в шкафу. **Вывод.** На производительность промежуточного теплоотвода при заданных габаритах и температуре источника слабо сказывается его толщина (в конструктивно разумных пределах), а также температура и площадь поглощающей стороны термоэлектрического модуля. Общая тепловая мощность, отводимая от источника тепловыделений, определяется габаритами и условиями теплообмена на свободной поверхности промежуточного теплоотвода, а также температурой и габаритами теплопоглощающей стороны термоэлектрического модуля. Применение промежуточного теплоотвода позволяет существенно снизить тепловую нагрузку на термоэлектрический модуль при незначительном снижении температурного напора.

Ключевые слова: тепловое поле, система обеспечения теплового режима, тепловая труба, термоэлектрический модуль, термоэлектрическая система, температура

TECHNICAL SCIENCE
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

THERMOELECTRIC HEAT REMOVAL SYSTEM FOR THE OPERATIONAL STABILIZATION OF HEAT PIPES IN A SYSTEM FOR PROVIDING THE THERMAL REGIME OF RADIO ELECTRONIC EQUIPMENT

Sergey A. Peredkov², Rustam K. Ramazanov³, Shirali A. Yusufov¹

¹⁻³Daghestan State Technical University,

70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,

¹e-mail: yshirali @yandex.ru, ²e-mail: peredkov @mail.ru, ³e-mail: ramazanov @mail.ru

Abstract Objectives. The aim of the study is to conduct an analysis of thermophysical processes in a thermoelectric system used for providing the thermal regime of electronic equipment located in a cabinet. A cabinet design and thermoelectric system for efficient heat removal from the condensing part of the heat pipe are proposed. An additional advantage of the proposed design is the obviation of significant additional power consumption requirement for regulating the temperature of radio electronic equipment stored in the cabinet. A distinctive feature of the constructive realisation is the presence of an intermediate heat removal. **Methods.** The three-dimensionality of the problem and mixed boundary conditions lead to the need to develop a calculation of heat transfer in the elements of the construction of the thermoelectric system. The numerical calculation method is based on the method of energy balances. The analysis of the heat regimes of the intermediate heat removal is performed on the basis of a mathematical model for a locally-heated and -cooled restricted plate. **Results.** A cabinet design and a thermoelectric system for efficient heat removal from the condensing part of the heat pipe are proposed. A distinctive feature of the constructive realisation is the presence of an intermediate heat removal. **Conclusion.** The capacity of the intermediate heat removal for given dimensions and temperature of the source is weakly affected by its thickness (in constructively reasonable limits), as well as the temperature and area of the absorbing side of the thermoelectric module; the total heat output from the heat source is determined by the dimensions and heat exchange conditions on the free surface of the intermediate heat removal, as well as by the temperature and dimensions of the heat absorbing side of the thermoelectric module. The use of an intermediate heat removal can significantly reduce the thermal load on the thermoelectric module with a slight decrease in the temperature driving force.

Keywords: thermal field, system of providing the thermal regime, heat pipe, thermoelectric module, thermoelectric system, temperature

Введение. Функционирование, надежность и управление рядом приборов и устройств существенно зависит от систем обеспечения температурных режимов (СОТР), их работы. Как правило, работа таких приборов и устройств связана с необходимостью отвода значительных плотностей потоков теплоты (микроэлектроника, радиоэлектроника, лазерная техника, оптика и др.).

Существующие в настоящее время устройства и системы для отвода теплоты и термостатирования не всегда отвечают указанному требованию и не для всех объектов могут быть использованы. Актуальность рассматриваемой в работе проблемы непосредственно связана с необходимостью разработки и всестороннего исследования полупроводниковых термоэлектрических систем охлаждения РЭС, применение которых в различных областях науки и техники позволит решить задачу температурной стабилизации и управления режимами приборов и устройств с высокими тепловыми нагрузками [1-4, 11].

Постановка задачи. В условиях реализации задач минимизации размеров и компактности при конструировании систем обеспечения температурных режимов не следует забывать, что надежность радиоэлектронной аппаратуры напрямую зависит от теплового режима. Поэтому большое внимание нужно уделять отводу избыточного тепла, выделяющегося в шкафу.

Известны устройства, которые в определенной мере решают поставленные задачи [6-7, 9-11, 12-19]. Ряд из них используют в своем составе тепловые трубы, но имеют такие недостатки как: тепловая труба выполнена в виде единого замкнутого контура, что не достаточно для стабильного режима работы системы охлаждения; в конструктивных решениях не используется тыльная сторона крепления тепловых труб (зона конденсации) с пластинами из высокотеплопроводного материала, которую можно использовать как пассивное охлаждение, что тоже играет немаловажную роль при интенсивном выделении тепла внутри шкафа.

Авторами предлагается конструктивный вариант с системой обеспечения теплового режима на основе использования тепловых труб и термоэлектрических охлаждающих батарей, позволяющей повысить эффективность отвода тепла из объема шкафа, за счет совершенствования зоны конденсации тепловых труб и обеспечение возможности автоматического регулирования отвода тепла без изменения системы конструкции шкафа [8].

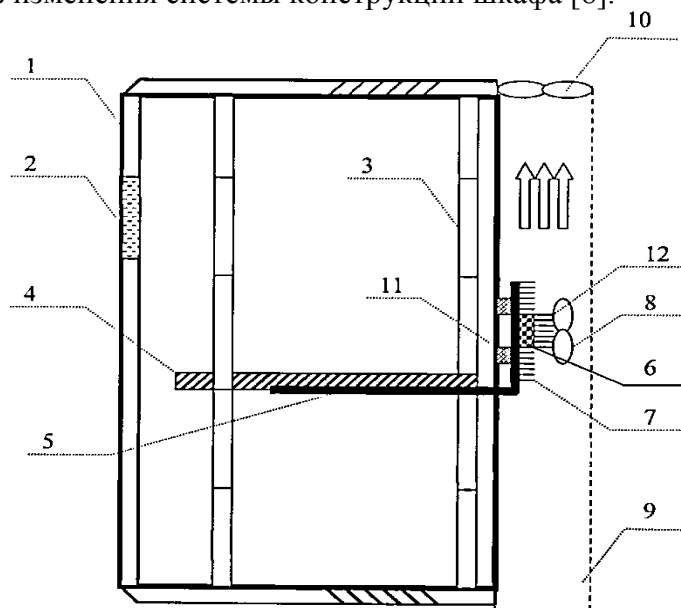


Рис.1 Общий вид шкафа
Fig.1 General view of the cabinet

Устройство состоит из плотно упакованного герметичного корпуса отображенного на рис.1; герметичной дверцы 1 с расположенным в ней индикатором 2; подвижных стоек, которые можно передвигать в горизонтальном направлении и регулировать по высоте для установки аппаратуры 3; теплопроводящей пластины, на которой устанавливается оборудование 4 (количество пластин зависит от количества полок установленных шкафу, в нашем случае рассмотрена одна полка); тепловых труб 5; термоэлектрических батарей 6; теплообменника для снятия тепла с ТЭБ 12 и вентилятора для обдува радиатора 8; заднего кожуха, служащего как для защиты, так и для создания канала обдува 9 и вентилятора для обдува задней полости 10, теплоизоляционных креплений 11 для жесткой фиксации радиатора 7 к задней стенке шкафа. На чертежах не изображены датчики температуры, блок питания, блок управления, соединенные электрически с вентилятором и индикатором.

Принцип действия. Установленная аппаратура в термоэлектрический шкаф при работе выделяет тепло, которое нам нужно выводить наружу для оптимальной его работы.

Конструкция шкафа выполнена таким образом, чтобы туда не попадали пыль и влага, т.е. агрессивная среда, пагубно влияющая на аппаратура и систему охлаждения. Датчик, установленный в полости шкафа, следит за перепадами температуры, цифровые значения мы можем наблюдать на индикаторе 2. При повышении температуры подается индикация на 2 и сигнал на блок управления вентилятором 10, который установлен в тыловой части шкафа за защитным кожухом 9. Выделяемое аппаратурой тепло через теплопроводящую пластину 4 попадает на зону испарения тепловых труб 5. Количество труб может быть различно, в нашем случае установлено три.

Хладагент, используемый в тепловых трубах, в нашем случае вода (можно так же использовать спирт, ацетон и др.). Пары хладагента, попав в зону конденсации, переходят в жидкую фазу и стекают обратно в зону испарения, тем самым снимают тепло с теплопроводящих пластин. В зоне конденсации тепловых труб установлен радиатор 7, служащий для улучшения процесса конденсации, т.е. съема тепла. Если же тепловыделение усиливается, то блок управления подает сигнал на подачу питания на ТЭБ 6 и вентилятор 8. Тем самым увеличиваем процесс охлаждения зоны конденсации тепловых труб, процесс снятия тепла усиливается.

Отвод тепла с горячих слоев ТЭБ осуществляется при помощи установленного на него теплообменника 12 и вентилятора 8. Кожух 9 служит для защиты тыловой части шкафа, а установленный вентилятор 10 - для обдува тыловой полости, т.к. количество полок с аппаратурой может быть различно. Чтобы устранить обратные теплопритоки от радиатора 7 используются теплоизоляционные крепления 11, жестко связанные с корпусом шкафа.

Преимуществом предлагаемой конструкции также является отсутствие значительных дополнительных энергозатрат для регулирования температурного режима радиоэлектронной аппаратуры в шкафу.

Методы исследования. В зависимости от конструктивного исполнения термоэлектрической системы (ТЭС) отвод теплоты с источника тепловыделений можно осуществить различными тепловыми схемами, обязательно включающими в себя тепловыделяющий элемент, термоэлектрический модуль (ТЭМ) и радиатор, рассеивающий выделяемую ТЭМ мощность в окружающую среду. В нашем случае источником тепловыделения является конденсационная часть тепловой трубы.

Характер процесса теплопередачи в такого рода конструкциях является существенно неоднородным из-за различия габаритов входящих в них элементов. Например, в случае естественной конвекции площадь основания радиатора может превышать площадь ТЭМ в десять раз и более. В ТЭС, где между теплообменником и тепловыделяющим элементом устанавливается ТЭМ, интенсификация теплопередачи осуществляется за счет контакта «холодных» спаев с тепловыделяющим элементом, а теплообменник отводит теплоту от «горячих» спаев. Для элементов с большими тепловыделениями применяют конструкции, в которых с обеих сторон установлены ТЭМ. В случае использования в качестве радиатора корпусной конструкции при большом рассредоточении элементов теплоотвод представляет собой бесконечную пластину.

С другой стороны, теплорассеивающая способность пластины при ее локальном нагреве открывает возможность расширения области эффективного применения ТЭС за счет организации так называемого промежуточного теплоотвода между источником тепловыделений и теплопоглощающей стороной ТЭМ, что и реализовано в конструкции предлагаемого шкафа (рис. 2)

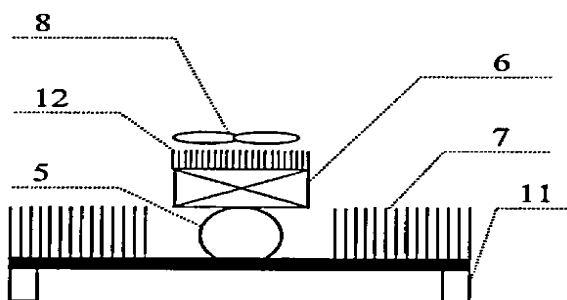


Рис. 2. Термоэлектрическая система теплоотвода с конденсационной частью тепловых труб

Fig.2. Thermoelectric heat sink system from condensing part of heat pipe

В зависимости от конструктивного исполнения устройства промежуточный теплоотвод может выполняться с различной ориентацией ребер, однако, в любом случае желательно, чтобы его габаритные размеры не превышали габаритные размеры радиатора на тепловыделяющей стороне ТЭМ.

Таким образом, посредством промежуточного теплоотвода часть тепловой нагрузки от источника тепловыделений рассеивается в окружающую среду под действием естественной разности температур, вследствие чего термоэлектробатарея работает в условиях меньшей тепловой нагрузки и меньшего температурного напора, что расширяет область эффективного применения ТЭС.

Математически задача определения температурного поля в промежуточном теплоотводе известна для различных случаев формализации граничных условий. Однако в специальной литературе отсутствуют данные по расчету температурных полей в ограниченной пластине при наличии локальных источников и стоков теплоты на ее поверхностях и при условиях, как адиабатной изоляции, так и конвективного теплообмена на свободных от источников поверхностях.

Таким образом, трехмерность задачи и смешанные граничные условия приводят к необходимости разработки расчета теплопередачи в элементах конструкции ТЭС.

Методика численного расчета строится на основе метода энергетических балансов [5].

Применение метода энергетических балансов приводит к следующему уравнению для температуры в каждой расчетной точке:

$$T = \frac{\frac{\lambda}{hx}(F_1 T_1 + F_2 T_2) + \frac{\lambda}{hy}(F_3 T_3 + F_4 T_4) + \frac{\lambda}{hz}(F_5 T_5 + F_6 T_6) + \alpha_\omega(T_\omega - T_0)}{\frac{\lambda}{hx}(F_1 + F_2) + \frac{\lambda}{hy}(F_3 + F_4) + \frac{\lambda}{hz}(F_5 + F_6)} \quad (1)$$

$$\text{где,} \quad F_1 = C_1 \frac{hxhy}{4}; F_2 = C_2 \frac{hyhz}{4}; F_3 = C_3 \frac{hyhz}{4};$$

$$F_4 = C_4 \frac{hxhz}{4}; F_5 = C_5 \frac{hxhy}{4}; F_6 = C_6 \frac{hxhy}{4}; \quad (2)$$

где, F_i - площадь грани элементарного объема;

hx, y, z - шаг сетки по осям координат;

λ - коэффициент теплопроводности материала;

T_i - температура средней точки соседнего элементарного объема;

$C_i=1...4$ - коэффициенты площади грани элементарного объема;

α_ω - коэффициент теплоотдачи;

$i=1...6$ - номер, граничащего с расчетным, элементарного объема.

Коэффициенты C_i ($i = 1...6$) являются весовыми коэффициентами для расчета площади граней элементарного объема, они определяются в зависимости от координаты расчетной точки. Так, для средней области тела $C_i = 4$, в углах расчетной области $C_i = 1$, на границах расчетной области $C_i = 2$.

Численный расчет температурного поля сводится к решению системы уравнений вида:

$$T_{LT,MT,NT} = A_1 T_{LT-1,MT,NT} + A_2 T_{LT+1,MT,NT} + A_3 T_{LT,MT-1,NT} +$$

$$A_4 T_{LT,MT+1,NT} + A_5 T_{LT,MT,NT-1} + A_6 T_{LT,MT,NT+1} + B. \quad (3)$$

Коэффициенты A_i и свободный член B вычисляются на основании выражений (1) и (2).

Обсуждение результатов. За исключением некоторых случаев принудительного охлаждения, тепловыделяющая сторона ТЭМ находится в тепловом контакте с основанием теплообменника - радиатора (или корпусной конструкции), площадь которого превышает площадь теплового контакта. Таким образом, имеет место локальный нагрев поверхности ограниченной пластины при условии конвективного теплообмена на другой, от распределения которого зависит реальная теплопередающая способность радиатора.

Известные методики оценки эффективности ТЭС строятся без учета многомерности процесса теплопередачи в радиаторе, что по нашим расчетам, в ряде случаев приводит к существенным погрешностям. В тоже время, на основании численных расчетов температурного поля в локально прогреваемой пластине могут быть сформулированы рекомендации по оценке радиальной теплопередающей способности радиатора.

Расчеты для такой тепловой схемы выполнены в соответствии с разработанной методикой для следующих соотношений геометрических и теплофизических параметров: $\alpha / \lambda = 0,001 \dots 10 \text{ 1/м}$; $a/d = 2,5 \dots 10$; $A/a = 2,3,4$. Промежуточный теплоотвод (радиатор), установленный в тепловом контакте между тепловыделяющим элементом и тепловыделяющими спаями ТЭМ предназначен для рассеивания части тепловой нагрузки в окружающую среду под действием естественной разности температур. Анализ тепловых режимов промежуточного теплоотвода выполняется на основе математической модели для локально нагреваемой и охлаждаемой ограниченной пластины.

Режимом работы промежуточного теплоотвода, отвечающим назначению этого конструктивного элемента ТЭС, является вариант, при котором при снижении температуры теплопоглощающей стороны ТЭМ часть тепловой мощности источника рассеивается на промежуточном теплоотводе, а часть – поглощается ТЭМ.

Таким образом, совокупность температурных условий (t_n и t_6), геометрических параметров (общие габариты и толщина, габариты «тепловых пятен» на стороне подвода и отвода тепла) и теплофизических параметров (коэффициенты теплопроводности материала и теплоотдачи на поверхности) должна обеспечивать работу промежуточного теплоотвода в режиме как радиатора, отводящего часть тепловой нагрузки в окружающую среду, так и режиме «теплового мостика» между источником тепловыделений и теплопоглощающей стороной ТЭМ. На рис. 3 приведены обозначения геометрических характеристик, принятые при анализе.

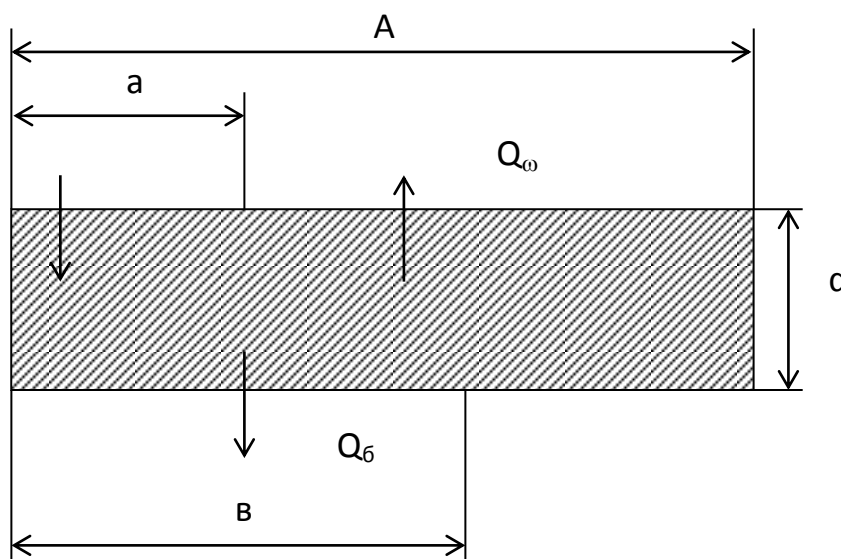


Рис. 3. Геометрические характеристики
Fig. 3. Geometrical characteristics

Расчеты выполнялись для различных соотношений температур источника и ТЭМ, различных соотношений теплофизических характеристик и геометрических размеров.

На рисунках 4-6 приведены данные, показывающие эффективность применения промежуточного теплоотвода, значения теплоты, отводимой от тепловыделяющего элемента и ТЭМ от геометрических характеристик радиатора, источника и ТЭМ.

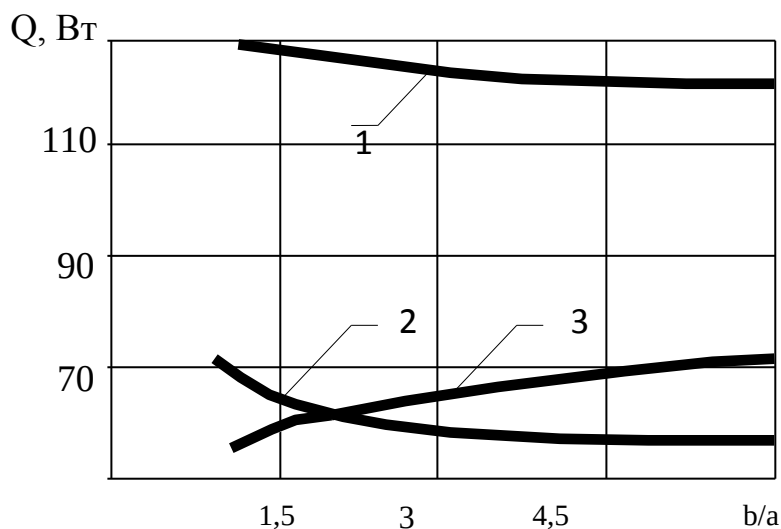


Рис. 4. Зависимости отводимой теплоты от отношения размеров контактирующих поверхностей источника и ТЭМ при $\lambda=320$ Вт/мК, $\alpha=100$ Вт/м²К, $\Delta T=2$ К

(1 - источник тепловыделений, 2-термобатарея, 3 - промежуточный теплообменник)

Fig. 4. Dependences of the heat removed from the ratio of the dimensions of the contacting source surfaces and TEM at $\lambda=320$ W/mK, $\alpha = 100$ W/ m²K, $\Delta T = 2$ K

(1 - source of heat release, 2-thermobattery, 3 - intermediate heat exchanger)

Из рис. 4 следует, что при $b/a > 2$ промежуточный теплоотвод преобладает над теплотой, отводимой термобатареей. Рассмотрение зависимостей, приведенных на рис. 5 свидетельствует, что преобладание теплоты Q_{ω} и Q_{δ} происходит при $A/a > 4,5$.

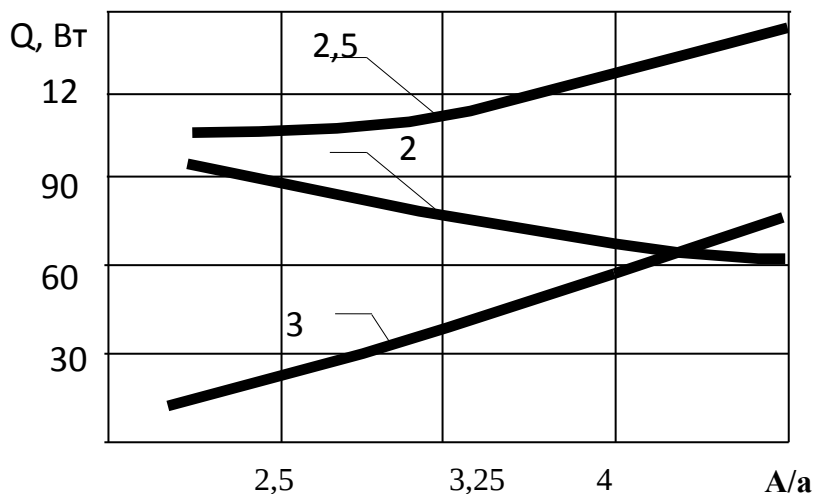


Рис.5. Зависимость отводимой теплоты от отношения размеров теплообменников и источника тепловыделений при $\lambda=320$ Вт/мК, $\alpha=100$ Вт/м²К, $\Delta T=2$ К

(1- источник тепловыделений, 2-термобатарея, 3 - промежуточный теплообменник)

Fig. 5. Dependence of heat removal on the ratio of the sizes of heat exchangers and the source of heat release at $\lambda = 320$ W / mK, $\alpha = 100$ W / m²K, $\Delta T = 2$ K

(1- heat source, 2-thermobattery, 3 - intermediate heat exchanger)

Из рис.6 следует, что толщина d оказывает незначительное влияние на величину промежуточного теплоотвода.

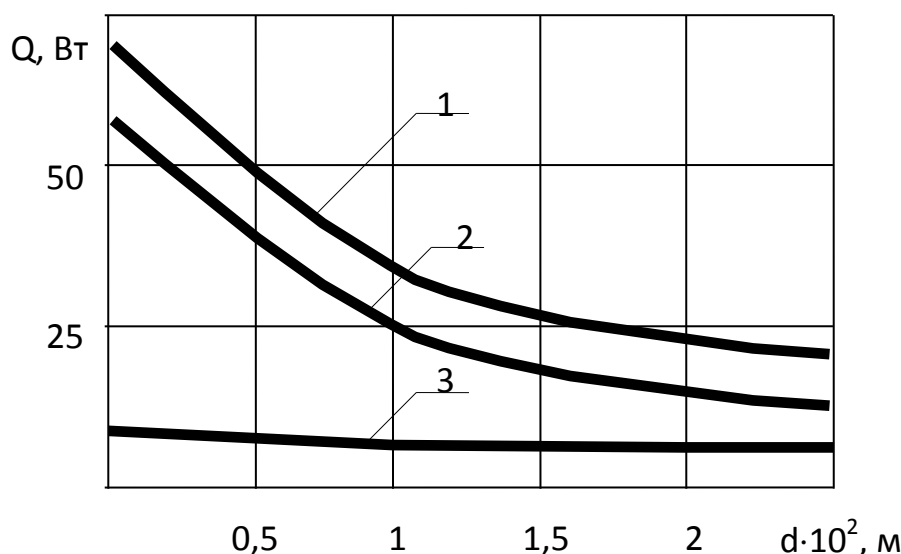


Рис. 6. Зависимости отводимой теплоты от толщины основания промежуточного теплообменника при $\lambda=50 \text{ Вт/мК}$, $\alpha=50 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, $\Delta T=2 \text{ К}$
 (1 - источник тепловыделений, 2-ТЭМ, 3 - промежуточный теплообменник)

Fig. 6. Dependences of the heat removed from the thickness of the base of the intermediate heat exchanger at $\lambda = 50 \text{ W / mK}$, $\alpha = 50 \text{ W / m}^2\text{K}$, $\Delta T = 2 \text{ K}$
 (1 - heat source, 2-TEM, 3 - intermediate heat exchanger)

Вывод. Предложена конструкция шкафа и термоэлектрическая система для эффективного отвода теплоты с конденсационной части тепловой трубы. Отличительной особенностью конструктивной реализации является наличие промежуточного теплоотвода.

Анализ величин тепловой мощности Q_{ω} , отводимой промежуточным теплоотводом в окружающую среду, позволяет сделать следующие выводы.

1. На производительность промежуточного теплоотвода при заданных габаритах и температуре источника слабо сказывается его толщина (в конструктивно разумных пределах), а также температура и площадь поглощающей стороны ТЭМ.

2. Общая тепловая мощность, отводимая от источника тепловыделений, определяется, во-первых, габаритами и условиями теплообмена на свободной поверхности промежуточного теплоотвода; во-вторых, температурой и габаритами теплопоглощающей стороны ТЭМ.

3. Применение промежуточного теплоотвода в ряде случаев позволяет существенно снизить тепловую нагрузку на ТЭМ при незначительном снижении располагаемого температурного напора.

Библиографический список:

1. Быков В. С. Обеспечение тепловых режимов энергопреобразующей аппаратуры космических аппаратов / В. С. Быков // Вестник науки Сибири. — 2014. — № 3 (13). — С. 16-20.
2. Бобылкин И.С., Макаров О.Ю. Оптимизация тепловых характеристик при проектировании конструкций радиоэлектронных средств //Труды Международного симпозиума «Надежность и качество» - 2013. - №3 (13).
3. Рашидханов А.Т., Юсуфов Ш.А. Система обеспечения теплового режима шкафа телекоммуникационного оборудования. / Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44(2):87-96. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-87-96
4. Белова В.В. Моделирование надежности системы обеспечения теплового режима космического аппарата на этапе электрических испытаний // НиКСС. 2013. №3. С.31-40 КиберЛенинка:

<https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-nadezhnosti-sistemy-obespecheniya-teplovogo-rezhima-kosmicheskogo-apparata-na-etape-elektricheskikh-ispytaniy>

5. Исмаилов Т.А. Термоэлектрические полупроводниковые устройства и интенсификаторы теплопередачи. – СПб.: Политехника, 2005
6. Патент РФ № 2338345 Шкаф радиоэлектронной аппаратуры. Бюл. №31, 2007 г.
7. Патент РФ №2399173 Шкаф радиоэлектронной аппаратуры. Бюл. №25, 2010 г.
8. Патент РФ №2399174 Шкаф радиоэлектронной аппаратуры. Бюл. №25, 2010 г.
9. Патент РФ №2589744 Способ термостабилизации электронной аппаратуры. Бюл. №18, 2016 г.
10. Патент РФ № 2630948 Устройство термостабилизации и отвода тепла от электронных модулей радио-телевизионной аппаратуры Бюл. №19, 2016 г.
11. Саркис Э., Иосиф М. Проблемы разработки и выбора унифицированных узлов и блоков вторичного электропитания для РЭА морского флота//Силовая электроника, 2012, №3-С.15-25, №4 - С.40-46.
12. Arnaud L., Ludovic G., Mouad D., Hamid Z., & Vincent L. Comparison and Impact of Waste Heat Recovery Technologies on Passenger Car Fuel Consumption in a Normalized Driving Cycle. *Energies*.2014;7(8):5273–5290. doi:10.3390/en7085273.
13. Cleary M. Nanostructured High Temperature Bulk Thermoelectric Energy Conversion for Efficient Waste Heat Recovery. Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting. 2014.Washington DC.: DOE Vehicle Technologies Office. Retrieved from http://energy.gov/sites/prod/files/2014/07/f17/ace082_cleary_2014_o.pdf
14. Das R. The Rise of Thermoelectrics. 2013. Retrieved February 17, 2014, from Energy Harvesting Journal:<http://www.energyharvestingjournal.com/articles/the-rise-of-thermoelectrics-47100005925.as>
15. Haddad C., Périllon C., Danlos A., François M.-X., & Descombes G. Some Efficient Solutions to Recover Low and Medium Waste Heat: Competitiveness of the Thermoacoustic Technology. *Energy Procedia*, 2014; 50:1056–1069. doi:10.1016/j.egypro.2014.06.125.
16. Jovovic V. Thermoelectric Waste Heat Recovery Program for Passenger Vehicles. Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting. Washington DC: 2014. DOE Vehicle Technologies Office. Retrieved from http://energy.gov/sites/prod/files/2014/07/f17/ace080_barnhart_2014_o.pdf
17. Chen G., Dresselhaus M.S., Esfarjani K., Ren Z.F., Zebajadi M. Perspectives onthermoelectrics: From fundamentals to device applications. *Energy Environ. Sci.*2012.
18. Hadjistassou C., Kyriakides E., Georgiou J. Designing high efficiency segmented thermoelectric generators. *Energy Convers. Manag.*2013;66:165–172.
19. Apertet Y., Ouerdane H., Goupil C., Lecoer Ph. Efficiency at maximum power of thermally coupled heat engines. *Phys. Rev. E*.2012;85:041144.

References:

1. Bykov V.S. Obespechenie teplovykh rezhimov energopreobrazuyushchey apparatury kosmicheskikh apparatov. *Vestnik nauki Sibiri*. 2014; (13):16-20. [Bykov V. S. Providing thermal regimes for energy-conversion apparatus of space vehicles. *Siberian Journal of Science*. 2014; (13):16-20. (In Russ.)]
2. Bobylkin I.S., Makarov O.Yu. Optimizatsiya teplovykh kharakteristik pri proektirovanii konstruktsiy radioelektronnykh sredstv. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo»*. Voronezh. 2013;3(13). [Bobylkin I.S., Makarov O.Yu. Optimization of thermal characteristics in the design of radioelectronic devices. *Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"*. 2013;3(13). (In Russ.)]
3. Rashidkhanov A.T., Yusufov Sh.A. Sistema obespecheniya teplovogo rezhima shkafa telekommunikatsionnogo oborudovaniya. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2017; 44(2):87-96. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-87-96. [Rashidkhanov A.T., Yusufov Sh.A. The system of providing the thermal regime of the telecommunication equipment cabinet. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2017;44(2):87-96. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-87-96. (In Russ.)]
4. Belova V.V. Modelirovanie nadezhnosti sistemy obespecheniya teplovogo rezhima kosmicheskogo apparata na etape elektricheskikh ispytaniy. *NiKSS*. 2013;3:31-40. KiberLeninka: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-nadezhnosti-sistemy-obespecheniya-teplovogo-rezhima-kosmicheskogo-apparata-na-etape-elektricheskikh-ispytaniy>. [Belova V.V. Modeling the reliability of the system providing the thermal regime of the spacecraft at the stage of electrical tests. *NiKSS*. 2013;3:31-40. *CyberLeninka*: (In Russ.)]
5. Ismailov T.A. Termoelektricheskie poluprovodnikovye ustroystva i intensifikatory teploperedachi. SPb.: Politekhnik; 2005. [Ismailov T.A. Thermoelectric semiconductor devices and heat transfer intensifiers. SPb.: Politekhnik; 2005. (In Russ.)]
6. Patent RF № 2338345 Shkaf radioelektronnoy apparatury. Byul. №31, 2007. [Patent RF № 2338345 Radioelectronic equipment cabinet. *Bull.* №31, 2007. (In Russ.)]
7. Patent RF №2399173 Shkaf radioelektronnoy apparatury. Byul. №25, 2010.[Patent RF №2399173 Radioelectronic equipment cabinet. *Bull.* №25, 2010. (In Russ.)]
8. Patent RF №2399174 Shkaf radioelektronnoy apparatury. Byul.№25, 2010. [Patent RF №2399174 Radioelectronic equipment cabinet. *Bull.* №25, 2010.(In Russ.)]

9. Patent RF№2589744 Sposob termostabilizatsii elektronnoy apparatury. Byul. №18, 2016. [PatentRF №2589744 Method of heat stabilisation of electronic equipment. Bull. №18, 2016. (In Russ.)]
10. Patent RF№ 2630948 Ustroystvo termostabilizatsii i otvoda tepla ot elektronnykh moduley radiotelevizionnoy apparatury. Byul. №19, 2016. [PatentRF № 2630948 The device for heat stabilization and heat removal from electronic modules of radio and television equipment. Bull. №19, 2016. (In Russ.)]
11. Sarkis E., Iosif M. Problemy razrabotki i vybora unifikirovannykh uzlov i blokov vtorichnogo elektropitaniya dlya REA morskogo flota. Silovaya elektronika. 2012;3:15-25, 4:40-46. [Sarkis E., Iosif M. Problems of development and selection of unified units and secondary power supply units for REA of the marine fleet. Power electronics. 2012;3:15-25, 4:40-46. (In Russ.)]
12. Arnaud L., Ludovic G., Mouad D., Hamid Z., & Vincent L. Comparison and Impact of Waste Heat Recovery Technologies on Passenger Car Fuel Consumption in a Normalized Driving Cycle. Energies. 2014;7(8):5273–5290. doi:10.3390/en7085273.
13. Cleary M. Nanostructured High Temperature Bulk Thermoelectric Energy Conversion for Efficient Waste Heat Recovery. Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting. 2014. Washington DC.: DOE Vehicle Technologies Office. Retrieved from http://energy.gov/sites/prod/files/2014/07/f17/ace082_cleary_2014_o.pdf
14. Das R. The Rise of Thermoelectrics. 2013. Retrieved February 17, 2014, from Energy Harvesting Journal: <http://www.energyharvestingjournal.com/articles/the-rise-of-thermoelectrics-47100005925.as>
15. Haddad C., Périlhon C., Danlos A., François M.-X., & Descombes G. Some Efficient Solutions to Recover Low and Medium Waste Heat: Competitiveness of the Thermoacoustic Technology. Energy Procedia, 2014; 50:1056–1069. doi:10.1016/j.egypro.2014.06.125.
16. Jovovic V. Thermoelectric Waste Heat Recovery Program for Passenger Vehicles. Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting. Washington DC: 2014. DOE Vehicle Technologies Office. Retrieved from http://energy.gov/sites/prod/files/2014/07/f17/ace080_barnhart_2014_o.pdf
17. Chen G., Dresselhaus M.S., Esfarjani K., Ren Z.F., Zebajadi M. Perspectives on thermoelectrics: From fundamentals to device applications. Energy Environ. Sci. 2012.
18. Hadjistassou C., Kyriakides E., Georgiou J. Designing high efficiency segmented thermoelectric generators. Energy Convers. Manag. 2013;66:165–172.
19. Apertet Y., Ouerdane H., Goupil C., Lecoq Ph. Efficiency at maximum power of thermally coupled heat engines. Phys. Rev. E. 2012;85:041144.

Сведения об авторах:

Передков Сергей Алексеевич – аспирант, кафедра теоретической и общей электротехники.

Рамазанов Рустам Казиахмедович – аспирант, кафедра теоретической и общей электротехники.

Юсуфов Ширали Абдулкадиевич – кандидат технических наук, доцент, кафедра теоретической и общей электротехники.

Information about the authors:

Sergey A. Peredkov - Post-graduate student, Department of Theoretical and General electrical engineering.

Rustam K. Ramazanov - Post-graduate student, Department of Theoretical and General electrical engineering.

Shirali A. Yusufov - Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Theoretical and General electrical engineering.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 10.07.2017.

Принята в печать 22.08.2017.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 10.07.2017.

Accepted for publication 22.08.2017.