

## ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 681.382

*Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В., Рамазанова Д.К.*

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В СИСТЕМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ РЭА, ВЫПОЛНЕННОЙ НА ОСНОВЕ ПЛАВЯЩИХСЯ ТЕПЛОВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ЖИДКОСТНЫМ ТЕПЛООТВОДОМ**

*Ismailov T.A., Evdulov O.V., Evdulov D.V., Ramazanova D.K.*

### **RESEARCH OF PROCESSES OF HEAT TRANSFER IN THE COOLING SYSTEM ELEMENTS REA, MADE ON THE BASIS OF MELTING HEAT ACCUMULATORS WITH ADDITIONAL LIQUID HEAT SINK**

*В работе рассмотрена система охлаждения элементов РЭА с повторно-кратковременными тепловыделениями, выполненная на основе плавящихся тепловых аккумуляторов с дополнительным жидкостным теплоотводом. Приведены основные расчетные соотношения для ее теоретического исследования. Представлены зависимости продолжительности стабильной работы элемента РЭА при обеспечении его температурного режима работы исследуемой системой.*

***Ключевые слова:** система охлаждения, элемент РЭА, теплообмен, тепловой аккумулятор, плавление, жидкостной теплоотвод, расчетная модель.*

*The paper considers the system of cooling elements REA with intermittent by heat, made on the basis of melting heat accumulators with additional liquid heat sink. The basic computational relations for theoretical studies. Presents the dependence of the length of stable work of the REA element in ensuring its temperature conditions of the investigated system.*

***Key words:** cooling system, an item of electronic equipment, heat transfer, heat accumulator, melting, liquid heat sink, a calculation model.*

Существует целый ряд радиоэлектронных приборов, подвергающихся периодическим кратковременным тепловым нагрузкам. Для обеспечения их температурных режимов работы могут быть использованы системы

охлаждения, работающие как в непрерывном, так и в прерывном режиме, соответствующем функционированию элемента РЭА (охлаждающий прибор включается и выключается синхронно с объектом воздействия) [1].

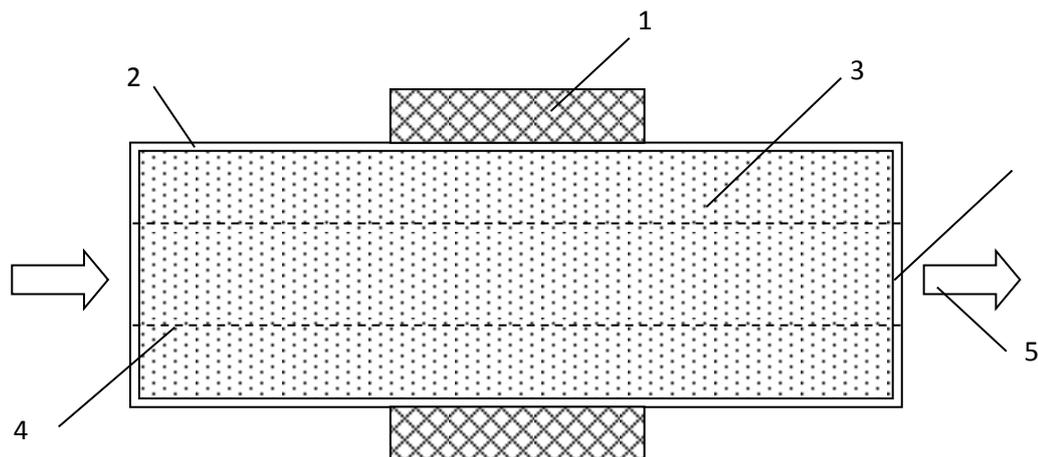
При этом, в первом случае очевидным является излишняя трата энергии на поддержание функционирования теплоотводящей системы во время паузы в работе радиоэлемента. Во втором случае может возникнуть ситуация, когда теплоотводящий прибор практически не сможет обеспечить необходимый тепловой режим радиоэлектронного аппарата вследствие теплопоступлений от его нагреваемых элементов к объекту охлаждения. В данных условиях целесообразным является размещение между элементом РЭА и системой охлаждения теплового аккумулятора, способного на какое-то время поддержать температуру радиоэлемента на необходимом уровне, несмотря на теплопритоки через ветви конструкции теплоотводящего прибора.

При охлаждении и термостабилизации РЭА, работающей в режиме повторно-кратковременных тепловыделений, пассивными методами, основанными на применении тепловых аккумуляторов, целесообразным является использование обратимых процессов плавления сопровождающихся поглощением теплоты на границе раздела твердой и жидкой фаз.

Для надежной работы элемента РЭА в этом случае необходимым является наличие достаточного количества плавящегося рабочего вещества для аккумуляции выделяемого количества теплоты, а также скважности перерыва между включениями аппаратуры, чтобы за это время рабочее вещество успело затвердеть до следующего цикла включения РЭА. При охлаждении радиоэлектронных приборов с небольшим промежутком между рабочими циклами в этом случае возникают некоторые трудности вследствие недостатка времени, необходимого для затвердевания рабочего агента.

В этой ситуации целесообразно применение некоторой системы, позволяющей интенсифицировать процесс затвердевания рабочего агента [2]. В качестве таковой эффективным будет использование средств, основанных на жидкостном методе теплоотвода.

На рис.1 приведен вариант, реализующий принцип совместного применения плавящихся тепловых аккумуляторов и воздушной системы теплоотвода. Здесь элементы РЭА 1 размещаются на двух противоположных торцевых поверхностях тонкостенного металлического контейнера 2, заполненного рабочим веществом 3. В направлении, перпендикулярном размещению элементов РЭА в металлической емкости имеется канал 4, по которому за счет теплообменной системы 5 осуществляется прокачка охлаждающей жидкости.



**Рисунок 1** - Конструкция устройства для охлаждения элементов РЭА, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловыделений, основанная на совместном использовании плавящихся рабочих веществ и жидкостной системы теплоотвода

Математическое моделирование рассмотренной системы охлаждения включает в себя исследование теплофизических процессов при плавлении и затвердевании рабочего агента, а также расчет соответствующего воздушного теплоотвода. Моделирование процессов, связанных с изменением агрегатного состояния рабочего вещества осуществлено путем решения задачи Стефана с использованием метода Л.С. Лейбензона. В результате получены следующие системы уравнений для исследования процессов плавления и затвердевания рабочего агента при наличии и отсутствии конвективных потоков в жидкой фазе вещества:

1. Для случая плавления рабочего вещества при отсутствии развитой конвекции в жидкой фазе теплового аккумулятора

$$\frac{dT_{об}}{d\tau} = \frac{1}{(c\rho\delta)_{об}} \left[ q_{РЭА} + k_{cp}(T_{cp} - T_{об}) + \frac{\lambda_1}{\xi}(T_{кр} - T_{об}) \right], \quad (1)$$

$$\frac{d\xi}{d\tau} = \frac{\frac{1}{2}c_1\rho_1\xi \frac{dT_{об}}{d\tau} + \frac{\lambda_1}{\xi}(T_{кр} - T_{об})}{c_1\rho_1\left(\frac{1}{2}T_{кр} - T_{об}\right) - c_2\rho_2(T_{кр} - T_{2R0})\frac{\xi - R}{\xi_0 - R} - \rho_2r}. \quad (2)$$

2. Для случая плавления рабочего вещества при наличии развитой конвекции в жидкой фазе теплового аккумулятора

$$(c\rho\delta)_{об} \frac{dT_{об}}{d\tau} = q_{РЭА} + \alpha_{cp}(T_{cp} - T_{об}) + \alpha_{кр}(T_1 - T_{об}), \quad (3)$$

$$c_1\rho_1\xi \frac{dT_1}{d\tau} = \alpha_{об}(T_1 - T_{об}) + \alpha_{кр}(T_{кр} - T_1), \quad (4)$$

$$\frac{d\xi}{d\tau} \left[ c_2 \rho_2 \left( \frac{-2 \cdot n(T_{кр} \cdot R - T_{2R0} \cdot R) + \xi(T_{2R0} - T_{кр})}{(n+1)(\xi_0 - R)} \right) + r \rho_2 \right] = \alpha_{кр} (T_1 - T_{кр}). \quad (5)$$

3. Для случая затвердевания рабочего вещества при отсутствии развитой конвекции в жидкой фазе теплового аккумулятора

$$\frac{dT_{об}}{d\tau} = \frac{1}{(c\rho\delta)_{об}} \left[ \alpha_{ср} (T_{ср} - T_{об}) + \frac{\lambda_2 (T_{кр} - T_{об})}{\xi} \right], \quad (6)$$

$$\frac{d\xi}{d\tau} = \frac{\lambda_2 (T_{кр} - T_{об}) - q_{стж} (R - \xi)}{\rho_1 r - \frac{1}{2} c_2 \rho_2 (T_{об} - T_{кр}) - c_1 \rho_1 (T_{1R0} - T_{кр}) \frac{R - \xi}{\xi_0 - R}}. \quad (7)$$

4. Для случая затвердевания рабочего вещества при наличии развитой конвекции в жидкой фазе теплового аккумулятора

$$(c\rho\delta)_{об} \frac{dT_{об}}{d\tau} = \alpha_{ср} (T_{ср} - T_{об}) + \alpha_{кр} (T_1 - T_{об}), \quad (8)$$

$$c_1 \rho_1 \xi \frac{dT_1}{d\tau} = \alpha_{об} (T_1 - T_{об}) + \alpha_{кр} (T_{кр} - T_1), \quad (9)$$

$$\frac{d\xi}{d\tau} \left[ c_2 \rho_2 \left( \frac{-2 \cdot n(T_{кр} \cdot R - T_{2R0} \cdot R) + \xi(T_{2R0} - T_{кр})}{(n+1)(\xi_0 - R)} \right) + r \rho_1 \right] = \alpha_{кр} (T_1 - T_{кр}) - q_{стж}. \quad (10)$$

В соотношениях (1)-(10)  $c_i, \rho_i, \lambda_i$  - теплоемкость, плотность и теплопроводность жидкой и твердой фазы рабочего агента, где индекс 1 соответствует жидкой фазе, а индекс 2 – твердой фазе рабочего вещества;  $\tau$  - время;  $q_{РЭА}$  - количество теплоты, выделяемое элементом РЭА в единицу времени и приходящееся на единицу площади торцевой грани емкости с тепловым аккумулятором;  $\alpha_{ср}$  - коэффициент теплоотдачи в окружающую среду  $T_{об}$  - среднемассовая температура металлической оболочки устройства;  $T_{ср}$  - температура окружающей среды;  $r$  - теплота плавления рабочего вещества;  $R$  - толщина слоя рабочего вещества;  $\xi$  - граница раздела фаз;  $\alpha_{об}, \alpha_{кр}$  - соответственно коэффициенты теплоотдачи от оболочки к жидкости и от поверхности раздела фаз к жидкости;  $T_1$  - средняя температура жидкой фазы;  $\tau_0, \xi_0$  - время и толщина расплава, при которых начинается интенсивное движение конвективных токов и поле температур по жидкой фазе практически исчезает;  $T_{2R}, T_{2R0}$  - соответственно температуры при  $x=R$  в любой момент времени  $\tau$  и при  $\tau = \tau_0, \xi_0$  – толщина расплава при  $\tau = \tau_0$ ;  $\tau_0$  – время, при котором начинает наблюдаться линейное изменение температуры  $T_{2R}$  от времени;  $n$  - параметр, определяемые экспериментально;  $q_{стж}$  - количество теплоты, отводимое в единицу времени системой теплоотвода и приходящееся на единицу площади торцевой грани емкости с тепловым аккумулятором.

Расчетная величина  $q_{стж}$  в данном случае определяется из выражения:

$$q_{стж} = \alpha_{стж} (T_2|_{x=R} - T_{ж}), \quad (11)$$

где  $T_{ж}$  - среднемассовая температура протекающей в канале жидкости,  $\alpha_{стж}$  - коэффициент теплоотдачи к жидкости.

При вязкостном режиме в трубах ( $Re < 2300$ ) средние коэффициенты теплоотдачи к жидкости могут быть определены по уравнению [3]

$$Nu = 1,55 \left( \frac{1}{Re} \frac{\ell}{d} \right)^{-\frac{1}{3}} \left( \frac{\mu_c}{\mu_{ж}} \right)^{-0,14} \phi_{\ell}, \quad (12)$$

справедливому при  $\frac{1}{Re} \frac{\ell}{d} \leq 0,05$  и  $0,07 \leq \frac{\mu_c}{\mu_{ж}} \leq 1500$  ( $\mu_c, \mu_{ж}$  - вязкость среды и жидкости,  $\ell$  - длина трубы, по которой течет жидкость,  $d$  - определяющий параметр).

Здесь  $\phi_{\ell}$  - поправка на гидродинамический начальный участок,  $Re$  – число Пекле. Если в начале трубы имеется необогреваемый успокоительный участок, обеспечивающий на входе обогреваемой части развитый параболический профиль скорости, то  $\phi_{\ell} = 1$ . При однородном распределении скорости на входе и  $\frac{1}{Re} \frac{\ell}{d} \leq 0,1$

$$\phi_{\ell} = 0,6 \left( \frac{1}{Re} \frac{\ell}{d} \right)^{\frac{1}{7}} \left( 1 + 2,5 \frac{1}{Re} \frac{\ell}{d} \right). \quad (13)$$

В уравнениях (12) и (13) определяющим размером, вводимым в числа  $Re$ ,  $Pe$  и  $Nu$ , является внутренний диаметр трубы.

При вязкостно-гравитационном режиме течения жидкости при расчете теплоотдачи применяется уравнение подобия, имеющее вид:

$$Nu = 0,35 \left( Pe \frac{\ell}{d} \right)^{0,3} \left( Gr Pr \frac{\ell}{d} \right)^{0,18}. \quad (14)$$

При турбулентном режиме ( $Re > 10^4$ ) для расчета теплоотдачи в прямых гладких трубах с  $\frac{\ell}{d} \geq 50$  используется уравнение:

$$Nu = 0,023 Re_{ж}^{0,8} Pr_{ж}^{0,43} \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25}. \quad (15)$$

Здесь за определяющую температуру принята средняя температура жидкости, а за определяющий размер - внутренний диаметр трубы. Число  $Pr_c$  выбирается при средней температуре поверхности стенки.

При переходном течении ( $2,3 \cdot 10^3 < Re < 10^4$ ) теплоотдача зависит от очень большого количества факторов, трудно поддающихся учету. Расчет теплоотдачи производится непосредственно по опытным данным, полученным в условиях, близких к расчетным. При выборе расчетного соотно-

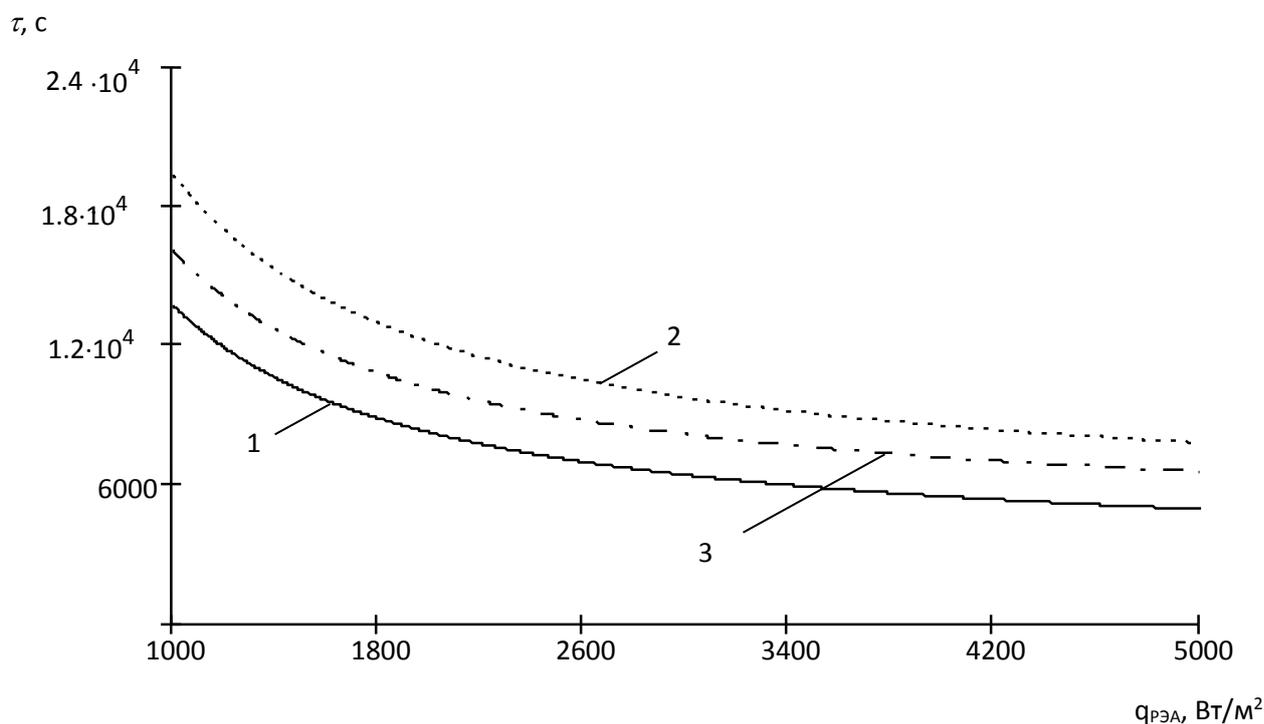
шения для среднего коэффициента теплоотдачи можно воспользоваться следующим уравнением:

$$Nu = 0,116 \left( Re^{\frac{2}{3}} - 125 \right) Pr^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\mu_c}{\mu_{жс}} \right)^{-0,14} \left[ 1 + \left( \frac{d}{\ell} \right)^{\frac{2}{3}} \right]. \quad (16)$$

Уравнение (16) учитывает влияние длины канала, без изломов переходит в зависимость для турбулентного течения при  $Re > 10^4$  и, наконец, правильно отражает характер кривой  $Nu = f(Re)$  при переходном течении, для которого по мере роста  $Re$  влияние этого числа ослабевает.

В качестве результатов расчетов по рассмотренным соотношениям получены значения продолжительности полного плавления и затвердевания наполнителей, соответствующие длительности стабильной работы элемента РЭА.

На рис.2 представлены графики зависимости продолжительности полного плавления различных наполнителей от величины мощности рассеяния элемента РЭА. Здесь наибольшую продолжительность плавления в диапазоне мощностей от 1000 до 5000 Вт/м<sup>2</sup> имеет азотнокислый никель, что объясняется его более высокой температурой и теплотой плавления, а также величиной коэффициента теплопроводности.



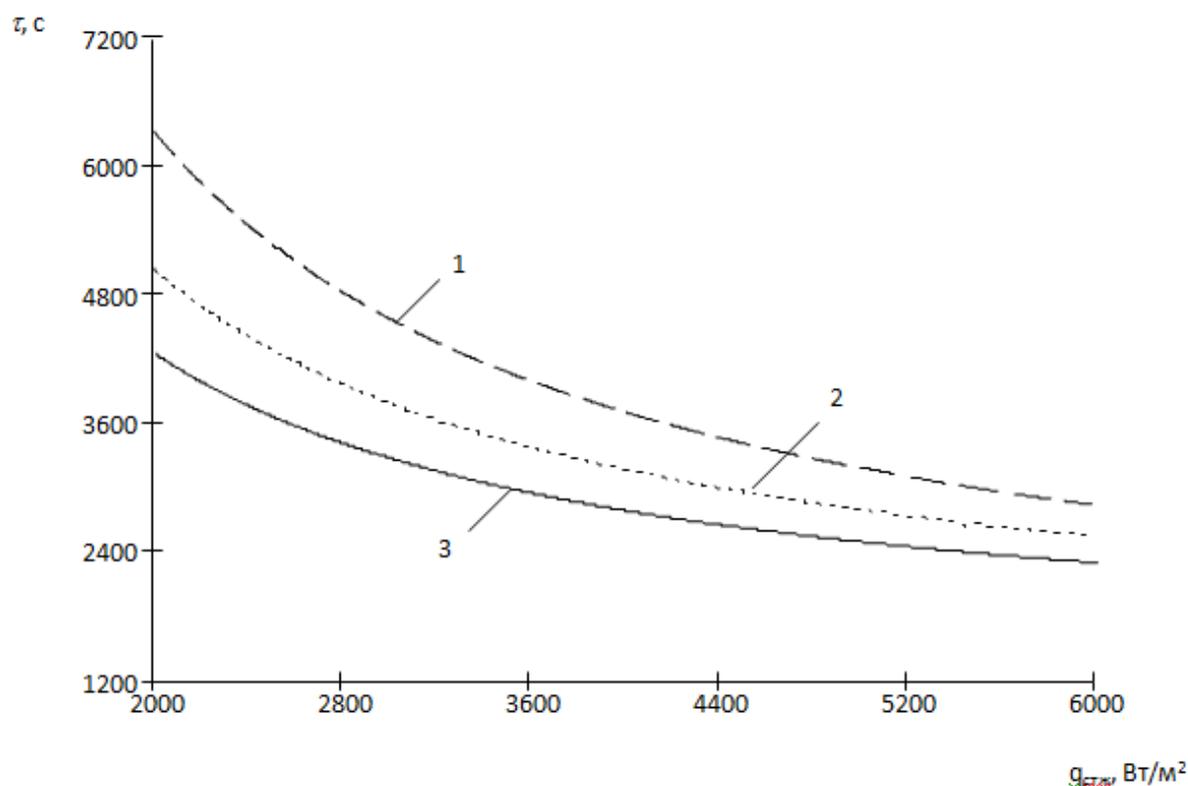
**Рисунок 2** - Зависимость времени полного плавления различных тепловых аккумуляторов от мощности тепловыделений элемента РЭА, приходящихся на единицу площади без конвекции в жидкой фазе,  $(ср\delta)_{ог} = 2,5 \cdot 10^3$  Дж/(м<sup>2</sup>·К); R = 0,03 м.

1 – парафин, 2 – азотнокислый никель, 3 – элаидиновая кислота

Для случая применения в качестве рабочего вещества азотнокислого никеля, температура оболочки устройства наиболее стабильная, а скорость плавления наименьшая. Это связано, прежде всего, с его более высокой теплопроводностью, которая почти в 2 раза больше, чем у парафина и в 3 раза больше, чем у элаидиновой кислоты.

Таким образом, снижение скорости роста температуры (т. е. ее стабилизации) можно достичь за счет увеличения эффективной теплопроводности вещества. Одним из методов увеличения эффективной теплопроводности вещества является применение различных наполнителей. Так, например, могут быть использованы металлическая крошка, различного рода оребрение, сотовые конструкции, либо пористые структуры.

Данное обстоятельство также справедливо и для случая затвердевания рабочего вещества, что иллюстрируется рис.3.



**Рисунок 3** - Зависимость времени полного затвердевания рабочего вещества при использовании дополнительного жидкостного теплосъема,  $(ср\delta)_{об} = 2,5 \cdot 10^3$  Дж/(м<sup>2</sup>·К),  $R = 0,025$  м

1 – парафин, 2 – элаидиновая кислота, 3 – азотнокислый никель

Время остывания рабочего вещества и оболочки устройства при использовании дополнительного теплосъема значительно меньше их времени остывания при естественном теплообмене с окружающей средой (для парафина это отношение при жидкостном теплосъеме с  $q_{стж} = 3150$  Вт/м<sup>2</sup>, что

соответствует  $\alpha_{\text{стж}}=61 \text{ Вт/К}\cdot\text{м}^2$  и  $\alpha_{\text{ср}}=1,5 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$  составило 4 раза). Отсюда следует, что существующие ограничения в отношении времени цикла работы элемента РЭА и времени перерыва между его включениями, при использовании дополнительной теплоотводящей системы снижаются.

Таким образом, если в случае естественного теплообмена оболочки охлаждающего устройства с окружающей средой период работы элемента РЭА должен был бы быть значительно меньше «паузы», то при использовании дополнительного теплосъема, время между двумя последовательными циклами работы РЭА может быть в значительной мере уменьшено.

#### **Библиографический список:**

1. Алексеев В.А., Чукин В.Ф., Шишанов А.В. Прогнозирование теплового режима бортовой радиоэлектронной аппаратуры // Схемотехника, 2004. - №2.
2. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Махмудова М.М., Евдулов Д.В. Исследование системы охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловыделений // Известия вузов России. Радиоэлектроника, 2008. - №4.
3. Роткоп Л.Л., Спокойный Ю.Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры. М.: Советское радио, 1976.

**УДК 681.382**

*Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Магоматов Р.А.-М.*

### **НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА УРОВНЕ СРЕДНЕЙ ТРЕТИ ПЛЕЧА ЧЕЛОВЕКА**

*Ismailov T.A., Evdulov O.V., Magomadov R.A.-M*

### **FIELD TESTS OF THE PROTOTYPE OF THERMOELECTRIC SYSTEM FOR THERMAL INFLUENCE ON THE LEVEL OF THE MIDDLE THIRD OF THE SHOULDER OF THE MAN**

*В работе рассмотрены результаты натурных испытаний опытного образца термоэлектрической системы для теплового воздействия на уровне средней трети плеча человека, дающей возможность лечения и*