

Для цитирования: Исмаилов Т.А., Ибрагимова А.М. Расчетная модель системы термостабилизации элементов радиоэлектронной аппаратуры. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (1): 42-52. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-42-52

For citation: Ismailov T.A., Ibragimova A.M. Calculation model of the system of thermal stabilization of the elements of radio electronic equipment. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (1): 42-52 (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-42-52

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 537.53.043

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-1-42-52

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Исмаилов Т.А.¹, Ибрагимова А.М.²

^{1,2} Дагестанский государственный технический университет,

^{1,2} 367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,

¹ e-mail: dstu@dstu.ru, ² e-mail: ibrasya@mail.ru

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка расчетной модели системы термостабилизации элементов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), основанной на совместном использовании рабочих веществ со стабильной температурой плавления и жидкостного метода теплоотвода, исследование теплофизических процессов происходящих при ее работе. **Метод.** Создана расчетная модель системы термостабилизации РЭА, основанной на использовании рабочих веществ со стабильной температурой плавления. Модель включает в себя описание процессов теплообмена при ламинарном движении жидкости в теплообменнике, определение продолжительности стабильной работы элементов РЭА в зависимости от скорости потока, холодопроизводительности термоэлектрической батареи (ТЭБ). **Результат.** Получены графики зависимости, отражающие основные характеристики разработанной системы, в частности, зависимости изменения продолжительности поддержания стабильной температуры элемента РЭА от его мощности, температуры холодных спаев ТЭБ, рассеяние при различных максимальных скоростях течения жидкости в теплообменнике. **Выводы.** Результаты расчетов определяют, что длительность полного проплавления рабочего вещества, соответствующая длительности стабильной работы элементов РЭА, может находиться в необходимых пределах только при выполнении определенных вполне конкретных условий: использовании в термостабилизирующей системе достаточного количества рабочего вещества, соответствующей температуры и скорости протекания жидкости в теплообменнике. Данные параметры системы термостабилизации необходимо подбирать исходя из количества тепла, выделяемого в единицу времени элементом РЭА, длительности его работы, а также характеристик ТЭБ, используемой для охлаждения жидкости.

Ключевые слова: элемент РЭА, термостабилизирующая система, ТЭБ, модель, жидкостной теплообменник, плавящееся вещество, расчет, теплообмен, температура

POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

CALCULATION MODEL OF THE SYSTEM OF THERMAL STABILIZATION OF THE ELEMENTS OF RADIO ELECTRONIC EQUIPMENT

Tagir A. Ismailov¹, Asiyat M. Ibragimova²

^{1,2}Daghestan State Technical University,

^{1,2}70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367026, Russia,

¹e-mail: dstu@dstu.ru, ²e-mail: ibrasya@mail.ru

Abstract Objectives The aim of the study is to develop a computational model of the system of thermal stabilization of elements of electronic equipment (REA), based on the joint use of working substances with a stable melting point and the liquid method of heat sink, the study of the thermophysical processes occurring during its operation. **Method** A computational model of the REA thermostabilization system based on the use of working substances with a stable melting point has been created. The model includes a description of the heat exchange processes during laminar fluid motion in a heat exchanger, determining the duration of stable operation of the REA elements, depending on the flow rate and cooling capacity of a thermoelectric battery (TEB). **Result** The graphs of dependences reflecting the main characteristics of the developed system were obtained, in particular, the dependence of the change in the duration of maintaining the stable temperature of the REA element on its power, the temperature of the cold junctions of the thermopile, scattering at different maximum flow rates of the heat exchanger. **Conclusions** The results of the calculations determine that the duration of complete penetration of the working substance, corresponding to the duration of stable operation of REA elements, can be within the required limits only if certain very specific conditions are met: using a sufficient amount of the working substance in the heat stabilizing system, corresponding to the temperature and flow rate of the liquid in the heat exchanger. These parameters of the thermal stabilization system must be selected based on the amount of heat emitted per unit of time by the REA element, the duration of its operation, and the characteristics of the thermopile used to cool the fluid.

Keywords: REA element, heat stabilizing system, TEB, model, liquid heat exchanger, melting substance, calculation, heat transfer, temperature

Введение. В настоящее время одним из распространенных методов отвода тепла от элементов РЭА с высокими тепловыделениями является принудительное жидкостное охлаждение [1-7]. При использовании этого метода отвод теплоты от элементов РЭА производится за счет прокачивания охлаждающей жидкости через каналы в узлах охлаждаемого прибора. При этом может использоваться как одноконтурное охлаждение, так и охлаждение с промежуточным однофазным теплоносителем [8].

Одним из главных недостатков данного метода отвода теплоты является невозможность поддержания температуры элемента РЭА на заданном уровне с высокой точностью вследствие большой ошибки термостатирования охлаждающей жидкости.

Постановка задачи. Для повышения точности термостабилизации элементов РЭА в [9] была предложена система термостабилизации проточного типа, основанная на использовании специальных рабочих веществ, имеющих стабильную температуру плавления [10-12].

Термостабилизирующая система (рис.1) включает в себя тонкостенный металлический контейнер 1 с рабочим веществом, имеющим стабильную температуру плавления, совпадающую с температурой статирования элемента РЭА 2, и размещенный в нем теплообменник 3, выполненный в виде металлической трубы, по которой протекает посредством нагнетателя 4 охлаждаемая ТЭБ 5 жидкость.

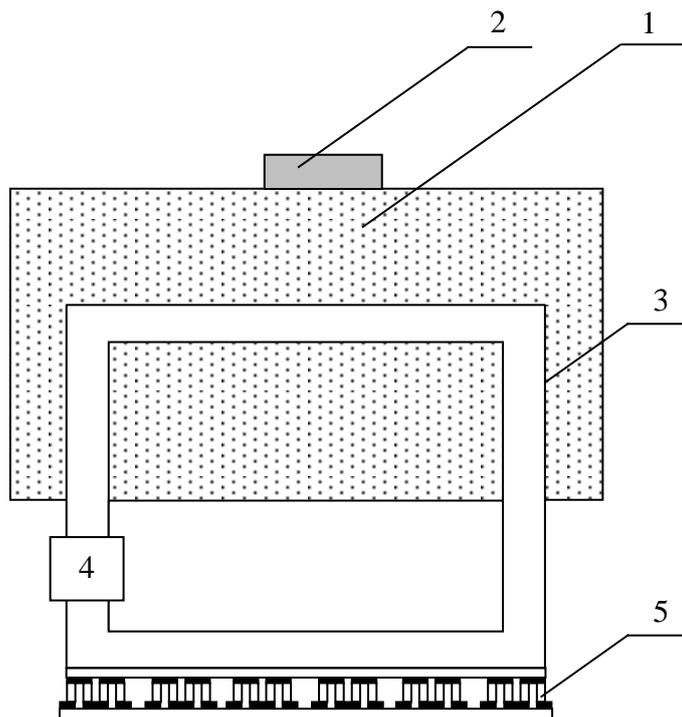


Рис.1. Структурная схема системы термостабилизации элементов РЭА

Fig.1. Structural diagram of the system of thermal stabilization of electronic equipment elements

Методы исследования. Задача расчета термостабилизирующей системы состоит в определении количества рабочего вещества, необходимого для поддержания рабочей температуры элемента РЭА на заданном уровне, параметров жидкостного теплообменника и ТЭБ.

Длительность поддержания стабильной температуры элемента РЭА в представленной на рис.1 термостабилизирующей системе определяется величиной рассеиваемой мощности, скрытой теплотой плавления использованного рабочего вещества, его количеством, параметрами жидкостного теплообменника, температурой и скоростью протекающей в теплообменнике жидкости.

Время поддержания стабильной температуры элемента РЭА с достаточной степенью точности оценивается формулой

$$t = \frac{q_{рв} \rho_{рв} V_{рв}}{W_{РЭА} - \alpha_{ж} S_{та\ell} (T_{ст\ell} - T_{ж\ell})}, \quad W_{РЭА} - \alpha_{ж} S_{та\ell} (T_{ст\ell} - T_{ж\ell}) > 0, \quad (1)$$

где $q_{рв}$, $\rho_{рв}$, $V_{рв}$ – скрытая теплота плавления, плотность и объем рабочего вещества; $W_{РЭА}$ – мощность, рассеиваемая элементом РЭА; $\alpha_{ж}$ – коэффициент теплоотдачи жидкости; $S_{та\ell}$ – площадь боковой поверхности теплообменника (металлической трубы), находящейся в контейнере с рабочим веществом; ℓ – длина части металлической трубы, находящейся в контейнере с рабочим веществом; r – радиус металлической трубы; $T_{ст\ell}$ – температура стенки теплообменника, находящейся в контейнере с рабочим веществом; $T_{ж\ell}$ – температура жидкости, протекающей в части теплообменника, находящейся в контейнере с рабочим веществом.

Значение $T_{ст\ell}$ принимается равным температуре плавления (кристаллизации) рабочего вещества $T_{кр}$, а $T_{ж\ell}$ определяется из решения задачи о протекании жидкости по полой трубе с заданной температурой внешней стенки.

Допущение о равенстве температуры внешней стенки трубы теплообменника температуре плавления (кристаллизации) рабочего вещества справедливо для случая оребрения внутренней поверхности металлического контейнера и наличия развитой естественной конвекции в жидкой фазе рабочего агента.

Для определения $T_{ж\ell}$ рассмотрим элементарный объем цилиндрической формы, имеющий длину dx , внутренний радиус r и наружный радиус $r + dr$ (рис.2), тепловой поток Q_r в котором направлен от боковой поверхности к центру по нормали.

В данном случае тепловой поток распространяется в радиальном направлении в результате теплопроводности, а конвективный перенос энергии имеет осевую направленность.

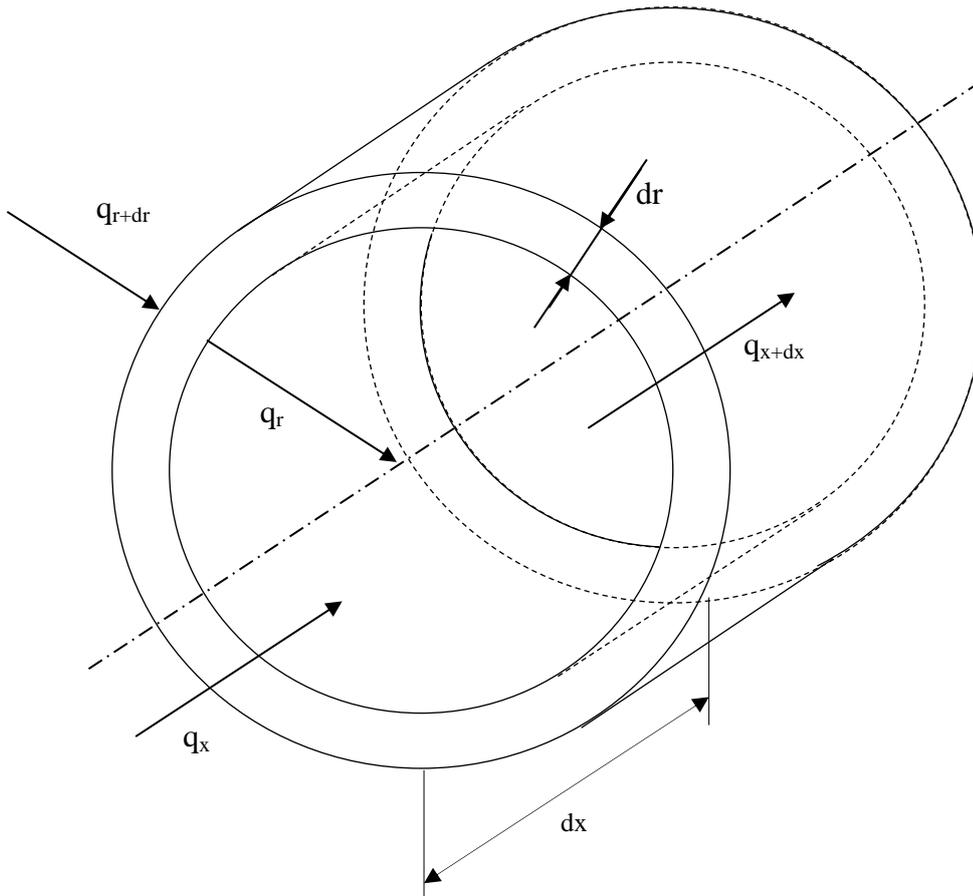


Рис.2. Элементарный объем участка жидкостного теплообменника
 Fig.2. Elementary volume of the liquid heat exchanger section

Если учесть, что изменение теплового потока в радиальном направлении равно изменению теплового потока в осевом направлении трубы и приравнять результирующие тепловые потоки, обусловленные теплопроводностью и конвекцией при установившихся условиях, можно получить следующую систему уравнений, описывающую теплообмен в трубе для полностью развитого ламинарного течения жидкости [13]:

$$\begin{cases} \frac{1}{ur} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_{ж\ell}}{\partial r} \right) = \frac{\rho_{ж} c_{ж}}{\kappa_{ж}} \frac{\partial T_{ж\ell}}{\partial x}, & 0 < r < a \\ \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_{ст\ell}}{\partial r} \right) = 0, & a < r < b \end{cases} \quad (2)$$

при граничных условиях:

$$T_{ст\ell}|_{r=b} = T_{кр} \quad (3)$$

$$\frac{\partial T_{ж\ell}}{\partial r}|_{r=0} = 0 \quad (4)$$

$$T_{ж\ell}|_{r=a} = T_{ст\ell}|_{r=a} \quad (5)$$

$$A_{a\ell} \kappa_{ж} \frac{\partial T_{ж\ell}}{\partial r}|_{r=a} = A_{b\ell} \kappa_{ст} \frac{\partial T_{ст\ell}}{\partial r}|_{r=b} \quad (6)$$

где $\rho_{ж}$ – плотность охлаждающей жидкости; $c_{ж}$ – удельная теплоемкость жидкости; u – скорость потока жидкости; $\kappa_{ж}$ – коэффициент теплопроводности жидкости; $\kappa_{ст}$ – коэффициент теплопроводности стенки трубы; a и b – внутренний и внешний радиусы трубы соответственно; $A_{a\ell} = 2\pi a\ell$ – площадь внутренней поверхности стенки трубы, находящейся в контейнере с рабочим веществом; $A_{b\ell} = 2\pi b\ell$ – площадь внешней поверхности стенки трубы, находящейся в контейнере с рабочим веществом ($A_{b\ell} = S_{та\ell}$).

При допущении о постоянстве $\partial T_{ж\ell} / \partial x$ первое дифференциальное уравнение в частных производных из системы (2) преобразуется в обыкновенное дифференциальное уравнение, в котором скорость на любом радиальном расстоянии r является функцией скорости на оси трубы u_{max} [14, 15].

При полностью развитом ламинарном течении распределение скоростей в трубе является параболическим и может быть записано в безразмерном виде в зависимости от радиального расстояния следующим образом:

$$\frac{u}{u_{max}} = 1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2, \quad (7)$$

Решение системы уравнений (2) с условиями (3)-(7) в соответствие с рекомендациями [16] и выражается следующей зависимостью:

$$T_{ж\ell}(r, x) = (\bar{T}_{ж.вх\ell} - T_{кр}) \exp\left[-\frac{x}{G}\right] + T_{кр}, \quad (8)$$

где $G = \frac{\rho_{ж} c_{ж}}{\kappa_{ж}} u_{max} \left[-\frac{r^2}{4} + \frac{r^4}{16a^2} + \frac{A_{a\ell} \kappa_{ж}}{A_{b\ell} \kappa_{ст}} \frac{a^2}{4} \ln\left(\frac{b}{a}\right) + \frac{3a^2}{16} \right]$; $\bar{T}_{ж.вх\ell}$ – средняя массовая температура жидкости на входе в ту часть теплообменника, которая находится в контейнере с рабочим веществом.

Средняя массовая температура жидкости

$$\bar{T}_{ж\ell} = \frac{\int_V \rho_{ж} u T_{ж\ell}(r, x) dV}{\int_V \rho_{ж} u dV} = \frac{\int_V \rho_{ж} u_{max} \left[1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2 \right] (\bar{T}_{ж.вх\ell} - T_{кр}) \exp\left[-\frac{x}{G}\right] + T_{кр} dV}{\int_V \rho_{ж} u_{max} \left[1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2 \right] dV}, \quad (9)$$

где V – объем части трубы, находящейся в контейнере с рабочим веществом.

Подставив (16) в (1), получим:

$$t = \frac{q_{рв} \rho_{рв} V_{рв}}{W_{р\Delta A} - \alpha_{ж} A_{b\ell} \left(T_{кр} - \frac{\int_V \rho_{ж} u_{max} \left[1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2 \right] (\bar{T}_{ж.вх\ell} - T_{кр}) \exp\left[-\frac{x}{G}\right] + T_{кр} dV}{\int_V \rho_{ж} u_{max} \left[1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2 \right] dV} \right)}, \quad (10)$$

в котором, $\alpha_{ж}$ может быть найдено из соотношения:

$$\alpha_{ж} = \frac{\kappa_{ж} Nu}{2a} \xi, \quad (11)$$

где $Nu = 4,36$ - число Нуссельта; $\xi = 1 + 1,8 \frac{2a}{R}$ - коэффициент, учитывающий изгиб трубы [17]; R - радиус изгиба трубы.

Для стабильного функционирования системы необходимо использование ТЭБ с холодопроизводительностью, достаточной для снижения температуры протекающей жидкости с значения

$$\bar{T}_{ж.вых\ell} = \frac{\int_S \rho_{ж} u T_{ж\ell}(r, \ell) dS}{\int_S \rho_{ж} u dS} = \frac{\int_S \rho_{ж} u_{\max} \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right] (\bar{T}_{ж.вых\ell} - T_{кр}) \exp \left[-\frac{\ell}{G} \right] + T_{кр} dS}{\int_S \rho_{ж} u_{\max} \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right] dS},$$

представляющего собой среднюю массовую температуру жидкости при $x = \ell$, до заданной величины $\bar{T}_{ж.вых\ell}$ (естественный теплообмен жидкости с окружающей средой не учитывается).

При постоянной температуре на холодном спае ТЭБ $T_{ТЭБх}$ величина ее холодопроизводительности, необходимая для снижения температуры протекающей жидкости с $\bar{T}_{ж.вых\ell}$ до $\bar{T}_{жЛ}$ может быть определена из соотношения:

$$Q_x = \alpha_{ж} A_{aL} (T_{ТЭБх} - \bar{T}_{жЛ}), \quad (12)$$

где $A_{aL} = 2\pi aL$ - площадь внутренней поверхности стенки трубы теплообменника, находящейся вне контейнера с рабочим веществом; L - длина части трубы теплообменника, расположенной вне контейнера с рабочим веществом; $\bar{T}_{жЛ}$ - средняя массовая температура жидкости, протекающей по части теплообменника, находящейся вне контейнера с рабочим веществом.

Значение $\bar{T}_{жЛ}$ определяется из выражения

$$\bar{T}_{жЛ} = \frac{\int_{V_1} \rho_{ж} u T_{жЛ}(r, x) dV_1}{\int_{V_1} \rho_{ж} u dV_1} = \frac{\int_{V_1} \rho_{ж} u_{\max} \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right] (\bar{T}_{ж.вых\ell} - T_{ТЭБх}) \exp \left[-\frac{x}{G_1} \right] + T_{ТЭБх} dV_1}{\int_{V_1} \rho_{ж} u_{\max} \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right] dV_1},$$

где V_1 - объем части трубы, находящейся вне контейнера с веществом; $T_{жЛ}(r, x)$ - температура жидкости протекающей по части теплообменника, находящейся вне контейнера с рабочим веществом, $G_1 = \frac{\rho_{ж} c_{ж}}{\kappa_{ж}} u_{\max} \left[-\frac{r^2}{4} + \frac{r^4}{16a^2} + \frac{A_{aL} \kappa_{ж}}{A_{bL} \kappa_{ст}} \frac{a^2}{4} \ln \left(\frac{b}{a} \right) + \frac{3a^2}{16} \right]$, $A_{bL} = 2\pi bL$ - площадь внешней поверхности стенки трубы теплообменника, находящейся вне контейнера с рабочим веществом.

Дальнейшая последовательность расчета параметров ТЭБ (оптимальные геометрические размеры, электро- и теплофизические параметры ветвей, значения питающего тока, потребляемой электроэнергии и т. п.) известна и может быть определена из [18-22].

Обсуждение результатов. На основе рассмотренной расчетной модели термостабилизирующей системы проведен численный эксперимент, результаты которого представлены на рис.3-5.

Расчет производился при следующих исходных данных: в качестве рабочего вещества предполагалось использование азотнокислого никеля с $q_{рв} = 155 \cdot 10^3$ Дж/кг, $\rho_{рв} = 2050$ кг/м³, $V_{рв} = 0,21 \cdot 10^{-3}$ м³, $T_{кр} = 56,7$ °С; в качестве охлаждающей жидкости - воды с $\rho_{ж} = 1000$ кг/м³, $c_{ж} = 4180$ Дж/(кг·К), $\kappa_{ж} = 0,615$ Вт/(м·К); $\kappa_{ст} = 400$ Вт/(м·К); $a = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м; $b = 2,0 \cdot 10^{-3}$ м; $\ell = 0,2$ м; $L = 0,4$ м; для зависимостей, приведенных на рис.3 $\bar{T}_{ж.вх\ell} = 15$ °С.

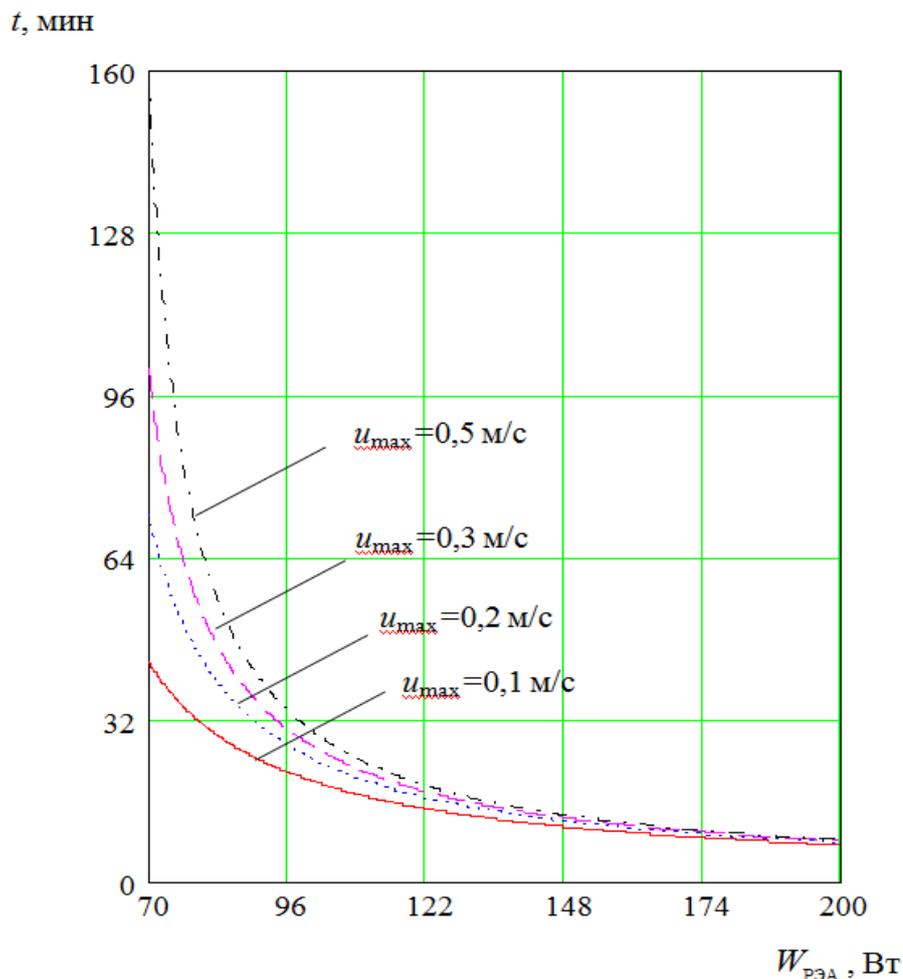


Рис.3. Изменение продолжительности поддержания стабильной температуры элемента РЭА от его мощности рассеяние при различных максимальных скоростях течения жидкости в теплообменнике
 Fig.3. The change in the duration of maintaining a stable temperature of the CEA element from its power dissipation at various maximum flow rates of the fluid in the heat exchanger

Расчетные зависимости (прежде всего графики, изображенные на рис.3) определяют, что длительность полного проплавления рабочего вещества, соответствующая длительности стабильной работы элемента РЭА, может находиться в необходимых пределах только при выполнении определенных вполне конкретных условий: использовании в термостабилизирующей системе достаточного количества рабочего вещества, соответствующей температуры и скорости протекания жидкости в теплообменнике.

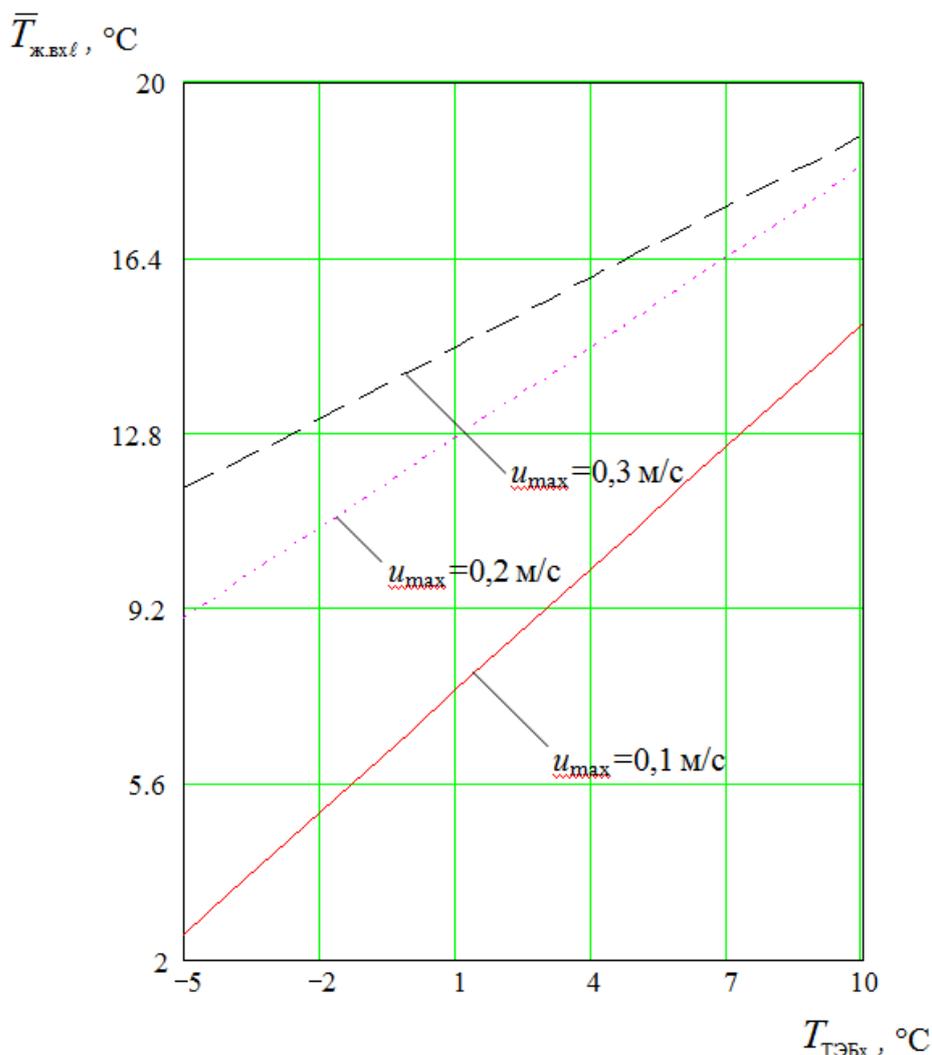


Рис.4. Изменение температуры жидкости на входе теплообменника от температуры холодных спаев ТЭБ при различных максимальных скоростях течения жидкости в теплообменнике
Fig.4. Temperature change of the fluid at the inlet of the heat exchanger from the temperature of the cold junctions of the thermopile at various maximum speeds of the fluid flow in the heat exchanger

Данные параметры системы термостабилизации необходимо подбирать исходя из количества тепла, выделяемого в единицу времени элементом РЭА, длительности его работы, а также характеристик ТЭБ, используемой для охлаждения жидкости.

Последнее ограничение определяет, прежде всего, диапазон скоростей течения жидкости и максимальное понижение ее температуры.

Ведь при значительном увеличении скорости течения жидкости и понижении ее температуры необходимо использование более мощной ТЭБ с улучшенными энергетическими характеристиками (рис.4-5). Или же применение более громоздкого теплообменника (увеличение длины той его части, которая находится вне контейнера с рабочим веществом), что в подавляющем числе случаев является неприемлемым, вследствие увеличения габаритных размеров системы термостабилизации.

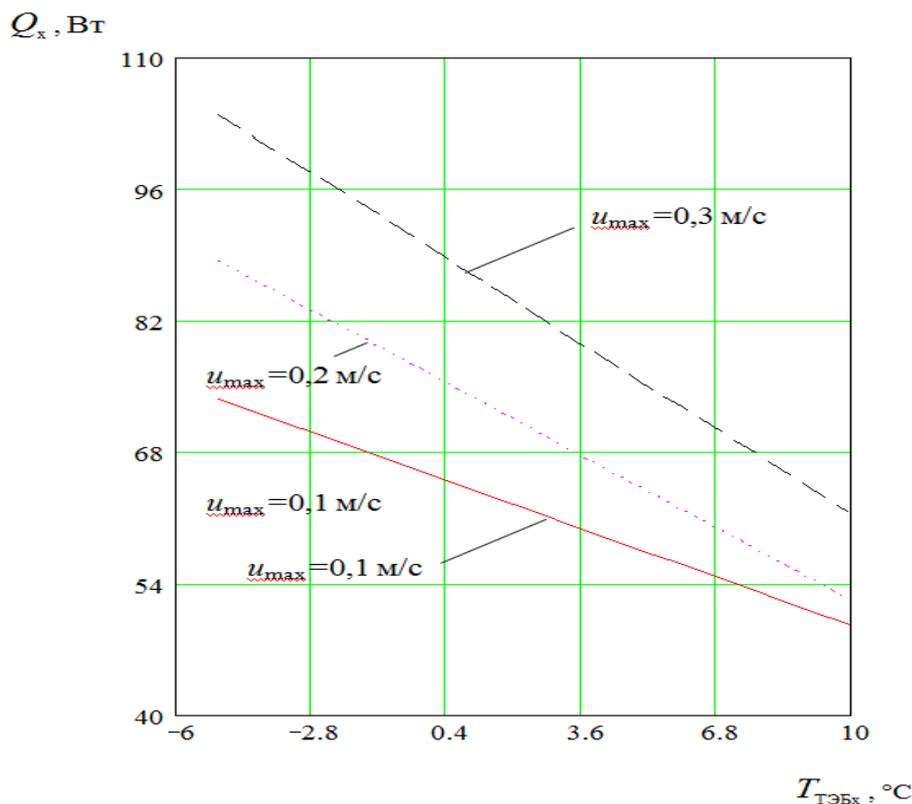


Рис.5. Изменение холодопроизводительности ТЭБ от температуры холодных спаев ТЭБ при различных максимальных скоростях течения жидкости в теплообменнике
 Fig.5. The change in the thermal performance of thermopile from the temperature of cold junctions of thermopile at various maximum flow rates in the heat exchanger

Выводы. Рассмотрена расчетная модель системы термостабилизации РЭА, основанная на использовании рабочих веществ со стабильной температурой плавления. Получены зависимости времени функционирования элемента РЭА при стабильной температуре от выделяемой им тепловой мощности для разных скоростей протекающей жидкости при использовании в качестве рабочего вещества азотнокислого никеля. Определена холодопроизводительность термоэлектрической батареи, обеспечивающей охлаждение протекающей жидкости.

Результаты расчетов показали, что длительность полного проплавления рабочего вещества, соответствующая длительности стабильной работы элемента РЭА, может находиться в необходимых пределах только при выполнении определенных вполне конкретных условий: использовании в термостабилизирующей системе достаточного количества рабочего вещества, соответствующей температуры и скорости протекания жидкости в теплообменнике.

Библиографический список:

1. Алексеев В.А. Основы проектирования тепловых аккумуляторов космических аппаратов. - Курск: Наукком, 2016. - 248 с.
2. Андреев П.Г., Наумова. И.Ю Защита радиоэлектронных средств от внешних воздействий. - Пенза: ПГУ, 2012. - 128 с.
3. Камышная Э. Н., Маркелов В. В., Соловьев В. А. Конструкторско-технологические расчеты электронной аппаратуры. - М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. - 22 с.
4. Кудрявцев Н.С. Основы проектирования эффективных систем терморегулирования космических аппаратов. - М.: МАИ, 2012. - 226 с.
5. Кузнецов Г.В., Шермет М.А. О возможности регулирования тепловых режимов типичного элемента радиоэлектронной аппаратуры или электронной техники с локальным источником тепла за счет естественной конвекции // Микроэлектроника. - 2010. - Т.39, №6. - С. 452-467.
6. Улитенко А.И., Прадед В.В., Пушкин В.А. Компактная система охлаждения мощных газовых лазеров // Холодильная техника. - 2003. - № 10. - С. 21-24.

7. Hamouche A., Bessaih R. Mixed convection air cooling of protruding heat source mounted in horizontal channels // *International communication in heat and mass transfer*. - 2009. - v.36. - P. 44-51.
8. Дульнев Г.И. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Высшая школа, 1984. 247 с.
9. Патент РФ на изобретение №2180161 Устройство для термостабилизации элементов радиоэлектронной аппаратуры с высокими тепловыделениями // О.В. Евдулов, Т.А. Исмаилов, Ш.А. Юсуфов, Г.И. Аминов (РФ), опубл. 27.02.2002, Бюл. №6.
10. Исмаилов Т.А., Евдулов Д.В., Евдулов О.В. Системы отвода теплоты от элементов РЭА на базе плавящихся тепловых аккумуляторов // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2015. №1 (36). С. 38-44.
11. 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 высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*. 2008. №5. С. 52-59.
12. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В. Результаты теоретических исследований системы охлаждения элементов РЭА, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловыделений // *Термоэлектричество*. 2015. № 6. С. 74-87.
13. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Аминов Г.И., Юсуфов Ш.А. Приближенный расчет системы термостабилизации проточного типа для элементов радиоэлектронной аппаратуры, основанной на применении рабочих веществ со стабильной температурой плавления // *Известия вузов России. Радиоэлектроника*. – СПб, 2003. - №1. - С. 65-71.
14. Дульнев Г.Н. Теория тепло- и массообмена. - СПб.: СПбНИУИТМО, 2012. - 195 с.
15. Bergman T.L., Lavine A.S., Incropera F.P. Dewitt D.P. Fundamentals of heat and mass transfer. New York: John Wiley & Sons, 2011. - 304 p.
16. Кондратьев Г.М., Дульнев Г.Н., Платунов Е.С., Ярышев Н.А. Теплообмен в приборостроении. - СПб.: ГУИТМО, 2004. - 560 с.
17. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. - М.: Высшая школа, 2001. - 550 с.
18. K. Nagase, A. Yamamoto Development of durability testing for thermoelectric power generation module // *Journal of Kinzoku materials science and technology*. - 2016.- №3. - P. 32-38.
19. Lobunets Y.M. Criteria for performance evaluation of thermoelectric energy converter // *Journal of thermoelectricity*. - 2014. - P.41-47.
20. Rowe D.M. Thermoelectrics and its energy harvesting, materials, preparation and characterization. BocaRaton: CRC Press. - 2012. - 264 p.
21. Ssennoga Twaha, Jie Zhu, Yuying An, Bo Li A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modeling and performance improvement // *Renewable and sustainable energy reviews*. - 2016. - №65. - P. 26-32.
22. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Справочник. - Киев: Наукова Думка, 1979. - 385 с.

References:

1. Alekseyev V.A. Osnovy proyektirovaniya teplovykh akkumulyatorov kosmicheskikh apparatov. - Kursk: Naukom, 2016. - 248 s. [Alekseev V.A. Basics of designing spacecraft thermal accumulators. - Kursk: Science, 2016. - 248 p. (In Russ.)]
2. Andreyev P.G., Naumova. I.YU Zashchita radioelektronnykh sredstv ot vneshnikh vozdeystviy. - Penza: PGU, 2012. - 128 s. [Andreev PG, Naumov. I.Yu. Protection of radio-electronic means from external influences. - Penza: PGU, 2012. - 128 p. (In Russ.)]
3. Kamyshnaya E. N., Markelov V. V., Solov'yev V. A. Konstruktorsko-tehnologicheskiye raschety elektronnoy apparatury. - М.: MGTU im. N. E. Baumana, 2014. - 22 s. [Kamyshnaya E.N., Markelov V.V., Soloviev V.A. Design and technological calculations of electronic equipment. - М.: MSTU. N.E. Bauman, 2014. - 22 p. (In Russ.)]
4. Kudryavtsev N.S. Osnovy proyektirovaniya effektivnykh sistem termoregulirovaniya kosmicheskikh apparatov. - М.: MAI, 2012. - 226 s. [Kudryavtsev N.S. Fundamentals of designing effective spacecraft thermal control systems. - М.: MAI, 2012. - 226 p. (In Russ.)]
5. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. O vozmozhnosti regulirovaniya teplovykh rezhimov tipichnogo elementa radioelektronnoy apparatury ili elektronnoy tekhniki s lokal'nym istochnikom tepla za schet yeste-stvennoy konveksii // *Mikroelektronika*. - 2010. - T.39, №6. - S. 452-467. [Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. On the possibility of regulating the thermal conditions of a typical element of electronic equipment or electronic equipment with a local heat source due to natural convection // *Microelectronics*. - 2010. - T.39, №6. - p. 452-467. (In Russ.)]
6. Ulitenko A.I., Praded V.V., Pushkin V.A. Kompaktnaya sistema okhlazhdeniya moshchnykh gazovykh lazerov // *Kholodil'naya tekhnika*. 2003. № 10. S. 21-24. [Ulitenko A.I., Great-grandfather V.V., Pushkin V.A. Compact cooling system of high-power gas lasers // *Refrigeration*. 2003. № 10. p. 21-24. (In Russ.)]
7. Hamouche A., Bessaih R. - 2009. - v.36. - P. 44-51.

8. Dul'nev G.I. Teplo- i massoobmen v radioelektronnoy apparature. M.: Vysshaya shkola, 1984. - 247 s. [Dulnev G.I. Heat and mass transfer in electronic equipment. M.: Higher School, 1984. - 247 p. (In Russ.)]
9. Patent RF na izobreteniyе №2180161 Ustroystvo dlya termostabilizatsii elementov radioelektronnoy apparatury s vysokimi teplovydeleniyami // O.V. Yevdulov, T.A. Ismailov, SH.A. Yusufov, G.I. Aminov (RF), opubl. 27.02.2002, Byul. №6. [RF patent for invention №2180161 Device for thermal stabilization of elements of electronic equipment with high heat release // O.V. Yevdulov, T.A. Ismailov, Sh.A. Yusufov, G.I. Aminov (RF), publ. 27.02.2002, Byul. №6. (In Russ.)]
10. Ismailov T.A., Yevdulov D.V., Yevdulov O.V. Sistemy otvoda teploty ot elementov REA na baze plavya-shchikhysya teplovykh akkumulyatorov // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki. 2015. №1 (36). S. 38-44. [Ismailov T.A., Yevdulov D.V., Yevdulov O.V. Heat removal systems from electronic components on the basis of melting heat accumulators // Herald of Dagestan State Technical University. Technical science. 2015. №1 (36). Pp. 38-44. (In Russ.)]
11. Ismailov T.A., Yevdulov O.V., Makhmudova M.M., Yevdulov D.V. Issledovaniye sistemy okhlazhdeniya elementov radioelektronnoy apparatury, rabotayushchikh v rezhime povtorno-kratkovremennykh teplovydeleniy // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika. 2008. №5. S. 52-59. [Ismailov T.A., Yevdulov O.V., Makhmudova M.M., Yevdulov D.V. Investigation of the cooling system of elements of electronic equipment operating in the mode of intermittent heat generation // News of higher educational institutions of Russia. Radio electronics. 2008. №5. pp. 52-59. (In Russ.)]
12. Ismailov T.A., Yevdulov O.V., Yevdulov D.V. Results of theoretical studies of the cooling system of electronic equipment elements operating in the mode of intermittent heat generation // Thermoelectric. 2015. № 6. pp. 74-87.
13. Ismailov T.A., Yevdulov O.V., Aminov G.I., Yusufov SH.A. Priblizhennyi raschet sistemy termostabilizatsii protochnogo tipa dlya elementov radioelektronnoy apparatury, osnovannoy na primenenii ra-bochikh veshchestv so stabil'noy temperaturoy plavleniya // Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika. – SPb, 2003. - №1. - S. 65-71. [Ismailov T.A., Yevdulov O.V., Aminov G.I., Yusufov Sh.A. Approximate calculation of a flow-type thermostabilization system for elements of electronic equipment based on the use of working substances with a stable melting point // Izvestiya Vuzov Rossii. Radio electronics. - SPb, 2003. №1. pp. 65-71. (In Russ.)]
14. Dul'nev G.N. Teoriya teplo- i massoobmena. - SPb.: SPbNIUITMO, 2012. - 195 s. [Dulnev G.N. Theory of heat and mass transfer. - SPb.: SPbNIUITMO, 2012. 195 p. (In Russ.)]
15. Bergman T.L., Lavine A.S., Incropera F.P. Dewitt D.P. Fundamentals of heat and mass transfer. New York: John Wiley & Sons, 2011. 304 p.
16. Kondrat'yev G.M., Dul'nev G.N., Platunov Ye.S., Yaryshev N.A. Teploobmen v priborostroyenii. - SPb.: GUITMO, 2004. - 560 s. [Kondrat'yev G.M., Dul'nev G.N., Platunov E.S., Yaryshev N.A. Heat transfer in instrument making. - SPb.: GUITMO, 2004. - 560 p. (In Russ.)]
17. Kartashov E.M. Analiticheskiye metody v teorii teploprovodnosti tverdykh tel. - M.: Vysshaya shkola, 2001. - 550 s. [Kartashov E.M. Analytical methods in the theory of thermal conductivity of solids. - M.: Higher School, 2001. - 550 p. (In Russ.)]
18. K. Nagase, A. Yamamoto. Development of durability testing for thermoelectric power generation module // Journal of Kinzoku materials science and technology. 2016. №3. pp. 32-38.
19. Lobunets Y.M. Criteria for performance evaluation of thermoelectric energy converter // Journal of thermoelectricity. 2014. pp.41-47.
20. Rowe D.M. Thermoelectrics and its energy harvesting, materials, preparation and characterization. BocaRaton: CRC Press. 2012. 264 p.
21. Sennoga Twaha, Jie Zhu, Yu Li An Bo Review of the Thermoelectric Technology: Renewable and sustainable energy reviews. 2016. - №65. pp.26-32.
22. Anatyshchuk L.I. Thermocouples and thermoelectric devices. Directory. Kiev: Naukova Dumka, 1979. 385 p.

Сведения об авторах.

Исмаилов Тагир Абдурашидович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и общей электротехники, заслуженный деятель науки РФ, президент ДГТУ.

Ибрагимова Асият Магомедовна – соискатель кафедры теоретической и общей электротехники.

Information about the authors.

Tagir A.Ismailov – Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Theoretical and General electrical engineering. Honored Worker of Science of the Russian Federation, President DSTU.

Asiyat M. Ibragimova - Applicant, Department of Theoretical and General Electrical Engineering.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 30.01.2019.

Принята в печать 26.02.2019.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 30.01.2019.

Accepted for publication 26.02.2019.