

Для цитирования А.Б. Сулин, Д.В. Евдулов, А.М. Ибрагимова, А.И.Семиляк. Модель системы охлаждения электронной аппаратуры на основе совместного использования сильноточных термоэлектрических полупроводниковых батарей и теплового термосифона. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020;47 (4):81-91. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-81-91

For citation: A.B. Sulin, D.V. Evdulov, A.M. Ibragimova, A.I. Semilyak. Model of an electronic equipment cooling system based on the joint use of high-current thermoelectric semiconductor batteries and a thermal thermosiphon. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020;47(4):81-91.(In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-81-91

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

УДК 623.6

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-4-81-91

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ НА ОСНОВЕ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ БАТАРЕЙ И ТЕПЛООВОГО ТЕРМОСИФОНА

¹А.Б. Сулин, ²Д.В. Евдулов, ²А.М. Ибрагимова, ²А.И.Семиляк

¹Национальный исследовательский университет ИТМО,

¹197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А, Россия,

²Дагестанский государственный технический университет,

²367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, д. 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка расчетной модели системы охлаждения электронной аппаратуры, основанной на комбинированном использовании сильноточных термоэлектрических полупроводниковых батарей (ТЭБ) слоистого исполнения и испарительно-конденсационного теплового термосифона, а также исследование теплофизических процессов происходящих при ее работе. **Метод.** Приведена математическая модель системы охлаждения электронной аппаратуры, основанная на комбинированном использовании сильноточных ТЭБ слоистого исполнения и испарительно-конденсационного теплового термосифона. Расчетная модель включает в себя описание процессов теплообмена в термоэлементе (ТЭ) слоистого исполнения при различных токах питания, определение количества теплоты переносимое через сечение канала теплового термосифона за единицу времени и значения температуры в каждой точке канала. **Результат.** Решена двумерная нестационарная задача теплопроводности для сложной системы с прямоугольной геометрией фрагментов и источников теплоты. Исследовано распределение температуры термоэлемента вдоль его продольной оси при различной величине тока питания, изменение теплового потока по длине теплового потока в тепловом испарительно-конденсационном термосифоне. **Вывод.** Результаты исследований показали эффективность комбинированного использования сильноточных ТЭБ слоистого исполнения и теплового термосифона в электронной аппаратуре с плотной упаковкой элементов. Показано, что увеличить эффективность работы электронной аппаратуры и уменьшить тепловые потери, возникающие в теплопроводе при сопряжении тепловыделяющего элемента радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и термоэлектрических полупроводниковых батарей удаленных друг от друга на достаточно большое расстояние (свыше 0,6 м), целесообразным является использование в качестве теплопровода, испарительно-конденсационного теплового термосифона.

Ключевые слова: элемент радиоэлектронной аппаратуры, термоэлектрическая полупроводниковая батарея, тепловой термосифон, модель, расчет, тепловой поток, электронная аппаратура

MODEL OF AN ELECTRONIC EQUIPMENT COOLING SYSTEM BASED ON THE JOINT USE OF HIGH-CURRENT THERMOELECTRIC SEMICONDUCTOR BATTERIES AND A THERMAL THERMOSIPHON

¹A.B. Sulin, ²D.V. Evdulov, ²A.M. Ibragimova, ²A.I. Semilyak

¹ITMO National Research University,

¹49 Kronverksky Ave., bldg. A, Saint Petersburg 197101, Russia,

²Daghestan State Technical University,

²70 Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. The objective of the study is to develop a design model of the electronic equipment cooling system based on the combined use of high-current thermoelectric semiconductor batteries of layered design and an evaporative-condensing thermal thermosyphon, as well as to study the thermophysical processes occurring during its operation. **Methods.** A mathematical model of the electronic equipment cooling system based on the combined use of high-current layered thermoelectric batteries and an evaporative-condensing thermal thermosyphon is presented. The design model includes a description of heat exchange processes in a layered thermoelectric element at various supply currents, determination of the amount of heat transferred through the cross-section of the channel of a thermal thermosyphon per unit of time, and the temperature values at each channel point. **Result.** A 2D dynamic heat conduction problem is solved for a complex system with rectangular geometry of fragments and heat sources. The temperature distribution of a thermoelement along its longitudinal axis at different values of the supply current and the change in the heat flow along its length in a thermal evaporation-condensation thermosyphon are studied. **Conclusion.** The results of the research have shown the effectiveness of combined use of high-current layered thermoelectric batteries and a thermal thermosyphon in electronic equipment with dense element packaging. It is shown that to increase the efficiency of electronic equipment and reduce the heat losses that occur in the heat line when the heat-generating element of radio-electronic equipment and thermoelectric semiconductor batteries are separated by a sufficiently large distance (over 0.6 m), it is advisable to use an evaporative-condensing thermal thermosyphon as a heat line.

Keywords: element of radio-electronic equipment, thermoelectric semiconductor battery, thermosiphon, model, calculation, heat flow, electronic equipment

Введение. При проектировании электронной аппаратуры очень часто возникает вопрос о создании эффективных систем охлаждения, позволяющих организовать отвод тепла от элементов радиоэлектронной аппаратуры [1-6]. Вместе с тем, стоит задача, как отделить источник холода от его потребителя. Особенно эта задача актуальна для электронной аппаратуры с плотной упаковкой элементов и расположенных в труднодоступных местах. В этом случае необходимо предусмотреть сопряжение термоэлектрической полупроводниковой батареи и элемента радиоэлектронной аппаратуры посредством специальных теплопроводов с минимальными потерями теплоты по их длине [7-11]. Использование теплопроводов изготовленных из материалов с большой теплопроводностью (например, медь или алюминий) и, соответственно, обладающих малым тепловым сопротивлением в направлении теплового потока, позволит решить поставленную задачу. Однако в этом случае возникают дополнительные теплопритоки к теплопроводу из окружающей среды и резко возрастают вес и габариты самого устройства.

Постановка задачи. Для устранения указанных недостатков авторами предлагается система охлаждения электронной аппаратуры, основанная на комбинированном использовании сильноточных ТЭБ с улучшенными термомеханическими характеристиками, и теплового термосифона, используемого в качестве теплопровода между удаленными источником холода и его потребителем – элементом радиоэлектронной аппаратуры [12-16]. При этом задача разбивается на две части решение тепловой задачи для слоистого термоэлемента и расчет температурного поля теплового термосифона. Расчётные схемы приведены на рис.1. и 3.

Методы исследования. Расчетная схема определения теплового поля в слоистом ТЭ приведена на рис.1. Области 1, 3 и 5 – коммутационные пластины. 2 и 4 – термоэлектрический материал.

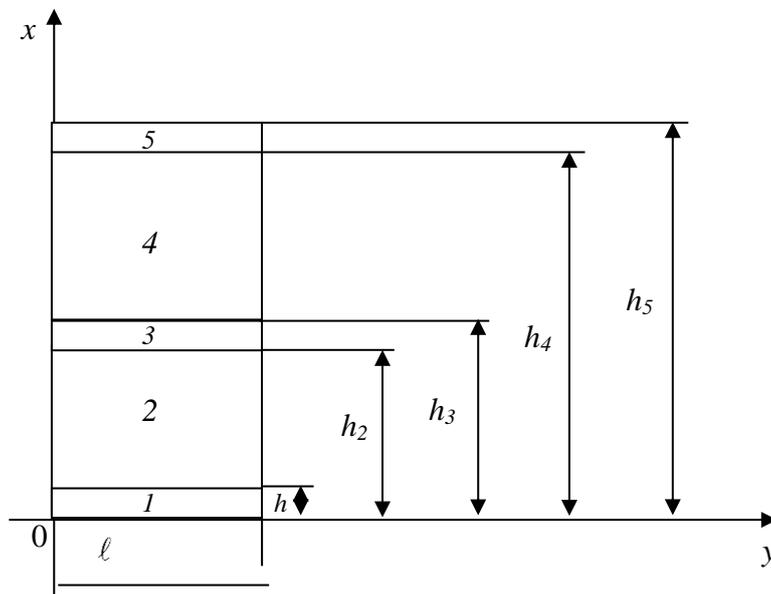


Рис.1. Расчетная схема слоистого термоэлемента
Fig. 1. Design scheme of a layered thermoelement

Система дифференциальных уравнений теплопереноса для этой схемы имеет вид:

$$\begin{aligned}
 \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} + j^2 \Omega_1 &= C_1 \frac{\partial T_1}{\partial t}, \\
 \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} + j^2 \Omega_2 &= C_2 \frac{\partial T_2}{\partial t}, \\
 \lambda_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + \lambda_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} + j^2 \Omega_3 &= C_3 \frac{\partial T_3}{\partial t}, \\
 \lambda_4 \frac{\partial^2 T_4}{\partial x^2} + \lambda_4 \frac{\partial^2 T_4}{\partial y^2} + j^2 \Omega_4 &= C_4 \frac{\partial T_4}{\partial t}, \\
 \lambda_5 \frac{\partial^2 T_5}{\partial x^2} + \lambda_5 \frac{\partial^2 T_5}{\partial y^2} + j^2 \Omega_5 &= C_5 \frac{\partial T_5}{\partial t},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где λ_i – коэффициент теплопроводности, Ω_i – удельное электрическое сопротивление, j_i – плотность электрического тока, C_i – объемная теплоемкость, T_i – температура, t – время, $i=1, \dots, 5$.

Начальные, граничные условия и условия сопряжения имеют вид:

$$\begin{aligned}
 T_{1, 2, 3, 4, 5} &= T_{\text{ср}} \text{ при } t=0, \\
 \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} &= \beta_{mc} (T_1 - T_{mc}) \text{ при } x=0, 0 < y < l, \\
 \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} &= \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} + \alpha_{12} j T_2 \text{ при } x=h_1, 0 < y < l, \\
 \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} - \alpha_{23} j T_2 &= \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \text{ при } x=h_2, 0 < y < l,
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} &= \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} - \alpha_{34} j T_4 \text{ при } x = h_3, 0 < y < \ell, \\
 \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} + \alpha_{45} j T_4 &= \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial x} \text{ при } x = h_4, 0 < y < \ell, \\
 \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial x} &= \beta_{mc} (T_5 - T_{mc}) \text{ при } x = h_5, 0 < y < \ell, \\
 \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} &= \beta (T_1 - T_{cp}) \text{ при } y = 0 \text{ и } \ell, 0 \leq x \leq h_1, \\
 \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} &= \beta (T_2 - T_{cp}) \text{ при } y = 0 \text{ и } \ell, h_1 < x \leq h_2, \\
 \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} &= \beta (T_3 - T_{cp}) \text{ при } y = 0 \text{ и } \ell, h_2 < x \leq h_3, \\
 \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial y} &= \beta (T_4 - T_{cp}) \text{ при } y = 0 \text{ и } \ell, h_3 < x \leq h_4, \\
 \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial y} &= \beta (T_5 - T_{cp}) \text{ при } y = 0 \text{ и } \ell, h_4 < x \leq h_5,
 \end{aligned} \tag{2}$$

Решение системы уравнений (1) с соответствующими граничными и начальными условиями выполнено с использованием метода конечных элементов. Общее решение данной задачи методом конечных элементов осуществляется в следующей последовательности. Введем конечно-элементное представление:

$$\tilde{\varphi}(x, y, t) = \tilde{\varphi}_0(x, y, t) + \sum_{k=1}^K N_k(x, y) \varphi_k(t), \tag{3}$$

$$k = 1, 2, \dots, K$$

где чертой сверху обозначено приближенное решение; K – суммарное число узловых точек; $\tilde{\varphi}_0(x, y, t)$ выбирается так, чтобы точно удовлетворялись начальные и граничные условия; функция $N_k(x, y)$ – пробная функция; коэффициенты $\varphi_k(t)$ – неизвестны и определяются из системы уравнений, получаемых из исходного уравнения.

Каждое из исходных уравнений можно записать в символьном виде

$$L(T) = 0, \tag{4}$$

Если подставить уравнение (4) в (3), то оно не будет тождественно удовлетворяться. Следовательно, можно записать $L(T) = R$, где величина R называется невязкой уравнения.

Для определения коэффициентов используется система уравнений Галеркина:

$$\int_D N_m(x, y) R(x, y, t) dx dy = 0, \quad m = 1, \dots, K$$

Для поиска решения стационарной задачи использованы изопараметрические элементы треугольной формы. Приближенное решение в этом случае может быть представлено в виде:

$$\begin{aligned}
 \tilde{\varphi}(x, y) &= \varphi_a N_a(\zeta, \eta) + \varphi_b N_b(\zeta, \eta) + \varphi_c N_c(\zeta, \eta), & \text{если } x, y \in e_{abc}, \\
 \tilde{\varphi}(x, y) &= \varphi_d N_d(\zeta, \eta) + \varphi_e N_e(\zeta, \eta) + \varphi_f N_f(\zeta, \eta), & \text{если } x, y \in e_{def},
 \end{aligned}$$

где базисные функции $N_j(\zeta, \eta)$ определяются как:

$$\begin{aligned}
 N_a(\zeta, \eta) &= 1 - \zeta, & N_b(\zeta, \eta) &= \zeta - \eta, & N_c(\zeta, \eta) &= \eta, \\
 N_d(\zeta, \eta) &= 1 - \eta, & N_f(\zeta, \eta) &= \eta - \zeta, & N_e(\zeta, \eta) &= \zeta.
 \end{aligned}$$

Выбирая для уменьшения невязки функцию $R(x, y)$ ортогональной ко всем базисным функциям $N_k(x, y)$, и учитывая, что они обладают локальным носителем только на элементах, расположенных вокруг точки сетки k , имеем:

где

$$(R, N_k) = K_A + K_B + K_C + K_D + K_E + K_F,$$

$$K_p = \iint_{e_p} \left(\frac{\partial \tilde{\varphi}}{\partial x} \frac{\partial N_k}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{\varphi}}{\partial y} \frac{\partial N_k}{\partial y} + 2N_k \right) dx dy, \quad p = A, B, C, D, E, F.$$

По данной методике осуществлен расчет температурного поля слоистого термоэлемента.

Обсуждение результатов. На рис.2. показано распределение температуры ТЭ вдоль его продольной оси при различной величине тока питания.

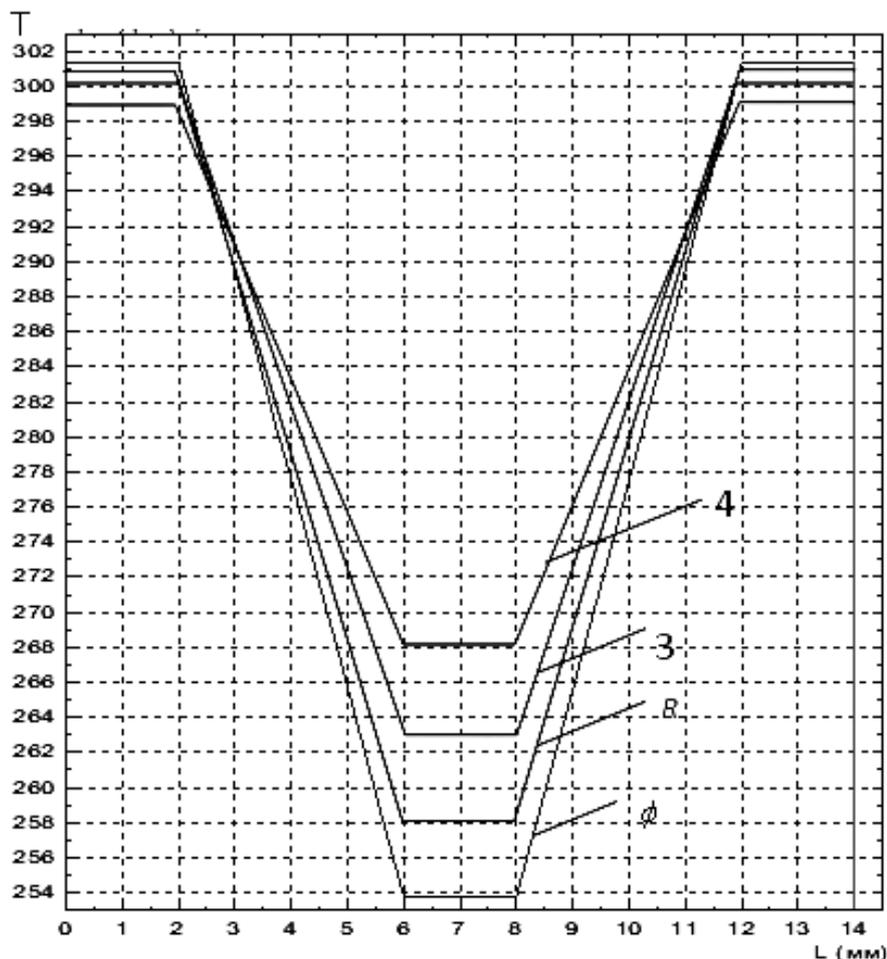


Рис.2. Распределение температуры термоэлемента вдоль его продольной оси при различной величине тока питания: 1-140 А, 2-120 А, 3-100 А, 4-80 А

Fig.2. Temperature distribution of the thermoelement along its longitudinal axis at various supply currents: 1-140 А, 2-120 А, 3-100 А, 4-80 А

Как видно из полученных данных, при использовании ТЭ в слоистом исполнении можно получить значительный перепад температур между холодной и горячей коммутационной пластиной, чем в случае использования классической П-образной конструкции. Второй частью расчетной модели является определение теплового поля теплового термосифона. В этом случае задача разбивается на три части с соответствующими условиями сопряжения на границах зон (испарения, конденсации и транспортная зоны) [17-20].

Расчетная модель различных зон испарительного теплового термосифона при условии соприкосновения зоны испарения с элементом электронной аппаратуры и зоны конденсации с холодными саями ТЭ имеет следующий вид (рис.3.). При этом предполагается, что тепловой сифон имеет цилиндрическую форму и решается осесимметричная задача.

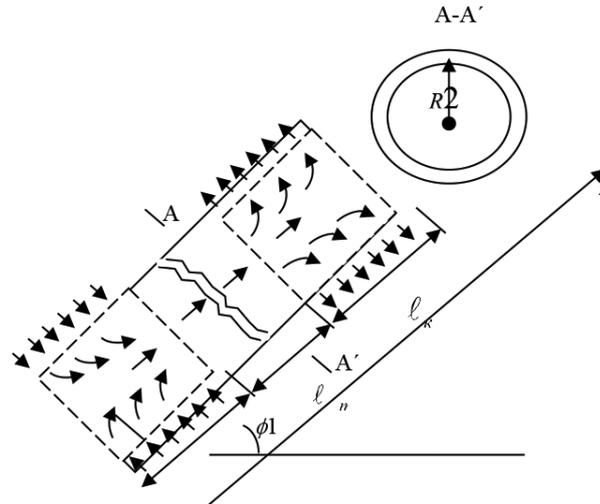


Рис.3. Расчетная схема теплового термосифона
 Fig.3. Calculation diagram of a thermal thermosiphon

Зона испарения. Уравнение движения жидкой фазы теплоносителя имеет вид:

$$\frac{1}{2\rho} \frac{d}{dz} [G(z)]^2 + \frac{\varepsilon_\kappa \ell \mu}{K\rho} G(z) + \frac{d\rho'}{dz} + \frac{2}{(R_n^2 - R_k^2)} \frac{d}{dz} \left[\sigma_n R_n \left(We - \frac{1}{\varepsilon_\kappa} \right) \right] - \rho g \cos \phi - \rho \frac{d\vartheta}{dt} = 0. \quad (5)$$

Уравнение неразрывности:

$$\frac{d}{dz} [G(z)] + \frac{2R_n}{\varepsilon_\kappa (R_n^2 - R_k^2)} G'(z) = 0. \quad (6)$$

Уравнение баланса энергии:

$$i \frac{d}{dz} [G(z)] - \frac{q}{\varepsilon_\kappa \pi (R_n^2 - R_k^2) z_n} + \frac{2R_n}{\varepsilon_\kappa (R_n^2 - R_k^2)} i' G'(z) = 0. \quad (7)$$

Здесь $G'(z) = \rho' \bar{g}(z)$; $i = \int_0^T C_p dT$; $i' = \int_0^T C_p' dT$ $G(z) = \rho \bar{g}(z)$,

$$K = \frac{4R_{\text{нмткн}}^2 (1 - \varepsilon_\kappa)^2}{66,6 \varepsilon_\kappa^2} \quad We = \frac{\rho' g'^2 R_\kappa}{2\pi \sigma_n} \leq 1,$$

$$0,02 \cdot 10^{-3} \leq R_\kappa \leq 0,15 \cdot 10^{-3} [\text{м}]; \quad 0,1 \leq \varepsilon_\kappa \leq 0,5; \quad 0,01 \cdot 10^{-3} \leq R_{\text{нмткн}} \leq 0,09 \cdot 10^{-3} [\text{м}];$$

$$0,05 \cdot 10^{-3} \leq R_n - R_k \leq 3 \cdot 10^{-3} [\text{м}].$$

q определяется из соотношения: $G_0(z) \cdot r$, где r – скрытая теплота парообразования. Здесь $G_0(z)$ – массовый расход паровой или жидкой фазы теплоносителя.

Граничные условия при $z=0$; $\vartheta = \vartheta' = 0, G(0) = G'(0) = 0$ при $z = z_u$ $\vartheta' \ll \sqrt{\frac{2\pi\sigma_n}{\rho'R_\kappa}}$.

Транспортная зона. Пренебрегаем теплообменом с окружающей средой:

$$\left(\frac{\partial q}{\partial R_{R=R_n}} = 0 \right).$$

Для первого случая, когда жидкая фаза движется по внутреннему каналу, а паровая фаза перемещается по межтрубному пространству система уравнений записывается в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} G(z) = \frac{\rho^2}{8\mu} \left[-\frac{1}{\rho} \frac{d\rho'}{dz} - \frac{d}{dz} \left(\frac{\bar{g}^2}{2} + g \cos \phi \right) + \frac{d\bar{g}}{dt} \right] R_n^2 \\ g(z) = \frac{\rho}{4\mu} \left[-\frac{1}{\rho} \frac{d\rho'}{dz} - \frac{d}{dz} \left(\frac{\bar{g}^2}{2} \right) + g \cos \phi + \frac{d\bar{g}}{dt} \right] (R_n^2 - R^2) \\ G'(z) = \frac{\rho'^2}{8\mu'} \left[\frac{1}{\rho'} \frac{d\rho'}{dz} - \frac{d}{dz} \left(\frac{\bar{g}'^2}{2} \right) g \cos \phi - \frac{d\bar{g}'}{dt} \right] \left[R_n'^2 + R_6'^2 + \frac{R_n'^2 + R_6'^2}{\ln(R_n' / R_6')} \right] \\ g'(z) = \frac{\rho'}{4\mu'} \left[\frac{1}{\rho'} \frac{d\rho'}{dz} - \frac{d}{dz} \left(\frac{\bar{g}'^2}{2} \right) - g \cos \phi - \frac{d\bar{g}'}{dt} \right] \left[R_n'^2 - R'^2 + \frac{R_n'^2 - R_6'^2}{\ln(R_n' / R_6')} \cdot \ln \frac{R'}{R_n'} \right] \end{array} \right. \quad (8)$$

Во втором случае, когда жидкая фаза перемещается по межтрубному пространству, а паровая фаза по внутреннему каналу транспортной зоны, система уравнений записывается в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} G(z) = \frac{\rho^2}{8\mu} \left[-\frac{1}{\rho} \frac{d\rho'}{dz} - \frac{d}{dz} \left(\frac{\bar{g}^2}{2} + g \cos \phi \right) + \frac{d\bar{g}}{dt} \right] \left[R_n^2 + R_6^2 + \frac{R_n^2 + R_6^2}{\ln(R_n / R_6)} \right] \\ g(z) = \frac{\rho}{4\mu} \left[-\frac{1}{\rho} \frac{d\rho'}{dz} - \frac{d}{dz} \left(\frac{\bar{g}^2}{2} \right) + g \cos \phi + \frac{d\bar{g}}{dt} \right] \left[R_n^2 - R + \frac{R_n^2 - R_6^2}{\ln(R_n / R_6)} \ln \frac{R}{R_n} \right] \\ G'(z) = \frac{\rho'^2}{8\mu'} \left[\frac{1}{\rho'} \frac{d\rho'}{dz} - \frac{d}{dz} \left(\frac{\bar{g}'^2}{2} \right) - g \cos \phi - \frac{d\bar{g}'}{dt} \right] R_n'^2 \\ g'(z) = \frac{\rho'}{4\mu'} \left[\frac{1}{\rho'} \frac{d\rho'}{dz} - \frac{d}{dz} \left(\frac{\bar{g}'^2}{2} \right) - g \cos \phi - \frac{d\bar{g}'}{dt} \right] (R_n'^2 - R'^2) \end{array} \right. \quad (9)$$

Уравнение неразрывности записываем в виде:

$$\frac{d[G(z)]}{dz} = \frac{d[G'(z)]}{dz} = 0. \quad (10)$$

В случае наличия теплообмена с окружающей средой эта система уравнений видоизменяется. Уравнение баланса энергии в адиабатном случае исключается.

Условия сопряжения зон на границах транспортной зоны имеют вид:

$$\begin{aligned} G(z) = G'(z) &= 0 \\ g(z) = g'(z) &= 0 \text{ при } R = R_n, R = R_6, R = R_n' \text{ и } R = R_6'; \\ G(z_{z_m=0}) &= G(z_u) = G(z_u); \text{ при } z = z_u + z_{m_{z_m=0}}. \end{aligned}$$

При этом на скорость движения паровой фазы накладываются следующие ограничения:

$$\bar{g}' \leq M \sqrt{\Theta K T};$$

$$\text{тоже } \bar{g}' = \frac{2(a_0^2 - a_{kp}^2)}{\Theta - 1}; \quad \frac{\rho'_{kp}}{\rho'_0} = \left[\frac{2}{\Theta + 1} \right]^{\frac{\Theta}{\Theta - 1}}; \quad \frac{T'_{kp}}{T_0} = \frac{2}{\Theta + 1}; \quad \bar{g}' = \bar{g}'_{\max} \text{ при } M = 1;$$

$$\text{при } M < 1 \quad \bar{g}' \text{ — растет на испарителе } \quad \frac{\rho'_{kp}}{\rho'_0} = \left(\frac{2}{\Theta + 1} \right).$$

Зона конденсации. Уравнение движения жидкой фазы имеет вид:

$$\frac{1}{2\rho} \frac{d}{dz} [G(z)]^2 + \frac{\varepsilon_\kappa \mu}{\rho K} G(z) + \frac{d\rho'}{dz} + \frac{2}{(R_n^2 - R_n^2)} \frac{d}{dz} \left[\sigma_n R_\kappa \left(We - \frac{1}{\varepsilon_\kappa} \right) \right] - \rho g \cos \phi - \rho \frac{dv}{dt} = 0. \quad (11)$$

Уравнение неразрывности:

$$\frac{d}{dt} [G(z)] - \frac{2R_n}{\varepsilon_\kappa (R_n^2 - R_n^2)} [G'(z)] = 0. \quad (12)$$

Уравнение баланса энергии:

$$i \frac{d}{dt} [G(z)] + \frac{q}{\varepsilon_\kappa \pi (R_n^2 - R_n^2) z_\kappa} - \frac{2R_n}{\varepsilon_\kappa (R_n^2 - R_n^2)} i' G'(z) = 0. \quad (13)$$

Граничные условия при этом записываются:

$$G(z) = G'(z) = 0 \text{ при } z = z_u + z_m + z_\kappa$$

$$G'(z) = 0; \text{ при } R = R_n;$$

$$G(z) = G(z = z_u + z_m) = G(z_\kappa = 0);$$

$$G'(z) = G'(z = z_u + z_m) = G'(z_\kappa = 0).$$

В описанной модели приняты следующие обозначения:

$G(z)$, $G'(z)$ – соответственно массовый расход жидкой и паровой фазы теплоносителя по сечению;

C_p , C'_p – соответственно теплоемкость жидкой и паровой фазы теплоносителя при постоянном давлении;

K – проницаемость капиллярной структуры зоны;

M – число Маха;

R_κ – радиус внутреннего канала транспортной зоны;

R_n – наружный радиус зоны;

R – текущий радиус канала;

k – отношение универсальной газовой постоянной к молярной массе пара теплоносителя;

i – энтальпия жидкой фазы теплоносителя;

i' – энтальпия паровой фазы теплоносителя;

ρ и ρ' – соответственно плотность жидкой и паровой фазы;

R_n – радиус канала паровой фазы;

R_κ – радиус канала зоны конденсации;

g – ускорение свободного падения;

ϕ – угол наклона теплового термосифона к горизонту;

\bar{v} и \bar{v}' – средние значения скорости движения жидкой и паровой фазы;

ε_κ – пористость капиллярной структуры;

μ – коэффициент динамической вязкости жидкой фазы теплоносителя;

ℓ – длина испарительно-конденсационного теплового термосифона;

σ_n – коэффициент поверхностного натяжения теплоносителя;

$R_{нити}$ – радиус нитки капиллярной структуры;

z_u – координата зоны испарения;

z_m – координата транспортной зоны;

z_κ – координата зоны конденсации;

q – количество теплоты, переносимое через сечение канала теплового термосифона за единицу времени;

Θ – показатель адиабаты, величина которого равна 1,67; 1,4; 1,33 соответственно для одноатомного, двухатомного и многоатомного теплоносителя;

a_0 – скорость звука в паровой фазе теплоносителя;

$a_{кр}$ – скорость звука в паровой фазе теплоносителя в критическом состоянии;

$\rho'_{кр}$ – плотность теплоносителя в критическом состоянии;

$T_{кр}$ – критическая температура теплоносителя.

Искомой величиной в расчетной модели теплового термосифона является количество теплоты, переносимое через сечение канала теплового термосифона за единицу времени и связанное с ним значение температуры в каждой точке канала.

На рис.4. приведена двумерная картина распределения теплового потока по теплопроводу, выполненному в виде теплового термосифона, а на рис.5. рассмотрено изменение теплового потока вдоль продольной оси теплопровода.

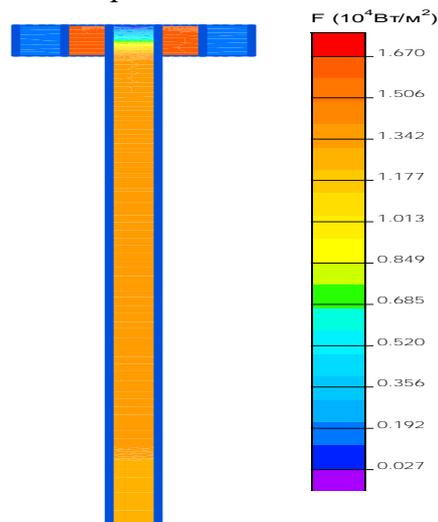


Рис.4. Картина распределения тепловых потоков в слоистом термоэлементе с тепловым термосифоном

Fig. 4. Distribution pattern of heat fluxes in a layered thermoelement with a thermal thermosiphon

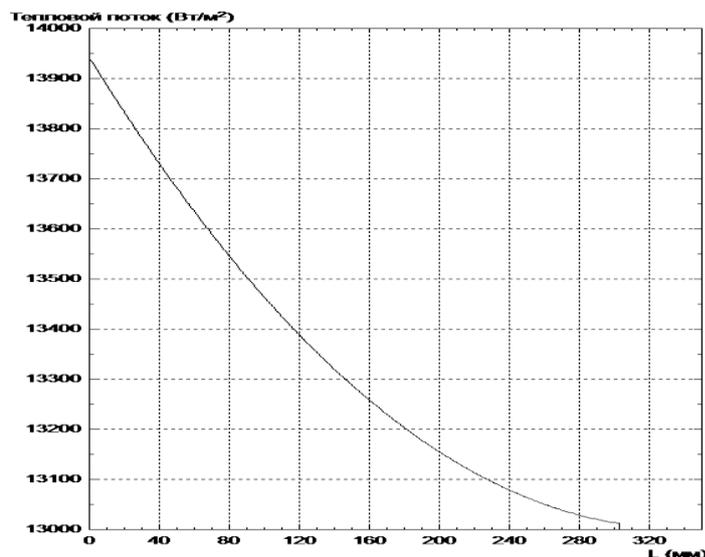


Рис.5. Изменение теплового потока по длине теплового термосифона

Fig. 5. Change in heat flux along the length of the thermal thermosiphon

В качестве теплоносителя использовался хладагент R 124 b ($C_2H_3ClF_2$) с температурой кипения 263,2 К. Как следует из полученных данных, поле распределения теплового потока в тепловом сифоне практически равномерное. При этом максимальное отличие в величине теплового потока между его концами равно 900 Вт/м². Для сравнения это значение в случае ис-

пользования медного теплопровода составляло 5800 кВт/м². Таким образом, следует, что при сопряжении тепловыделяющего элемента радиоэлектронной аппаратуры и ТЭБ, удаленных друг от друга на достаточно большое расстояние (свыше 0,6 м), целесообразным является применение не цельнометаллического теплопровода, а теплопровода, изготовленного в виде теплового термосифона.

Вывод. Результаты исследований показали эффективность комбинированного использования сильноточных ТЭБ и теплового термосифона в электронной аппаратуре с плотной упаковкой элементов. Для увеличения эффективности работы электронной аппаратуры и уменьшения тепловых потерь, возникающих в теплопроводе при сопряжении тепловыделяющего элемента радиоэлектронной аппаратуры и ТЭБ, удаленных друг от друга на достаточно большое расстояние (свыше 0,6м), целесообразным является использование в качестве теплопровода тепловой термосифон.

Библиографический список:

1. Анатычук Л.И. Термоэлектричество. Термоэлектрические преобразователи энергии. Киев, Черновцы: Институт термоэлектричества, 2003.
2. Анатычук Л.И. Элементная база термоэлектричества // Доклады IX Межгосударственного семинара «Термоэлектрики и их применение». Санкт-Петербург, 2004.
3. Анатычук Л.И. О физических моделях термоэлементов // Термоэлектричество. 2003, №1.
4. Булат Л.П. Прикладные исследования и разработки в области термоэлектрического охлаждения в России // Холодильная техника, 2009. № 7.
5. Ssenoga Twaha, Jie Zhu, Yuying An, Bo Li A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modelling and performance improvement // Renewable and sustainable energy reviews, 2016. No. 65.
6. Патент РФ № 2380787. Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В., 2010.
7. Патент РФ № 2379790. Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В., 2010.
8. Патент РФ № 2417484. Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В., 2011.
9. Патент РФ № 2338298. Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Вердиев М.Г., 2007.
10. Патент РФ № 2236098 Устройство для термостабилизации элементов РЭА с высоким уровнем тепловыделений / Исмаилов Т.А., Аминов Г.И., Евдулов О.В., Юсуфов Ш.А. // Б.И. № 25, 2004.
11. Евдулов О.В., Евдулов Д.В. Теоретические исследования термоэлектрического элемента слоистой конструкции // Термоэлектричество. 2015. № 2.
12. Патент РФ № 2314663. Устройство для охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловыделений / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Вердиев М.Г., Менафов А.М., 2005.
13. Патент РФ № 2180161. Устройство для термостабилизации элементов радиоэлектронной аппаратуры с высокими тепловыделениями/ Евдулов О.В., Исмаилов Т.А., Юсуфов Ш.А., Аминов Г.И., 2000.
14. Korzhuev M. A., Avilov E. S., Nichezina I. Yu. Non-standard Harman response at the separate measurement of stages of multicascade thermoelectric modules // JEMS. 2011. Vol. 40, №5.
15. Yagov V.V. Possible mechanisms of high-intensity heat transfer in cooling of high temperature surfaces // Materials IX International seminar «Heat pipes, heat pumps, refrigeration, power sources». Minsk. 2015.
16. Дульнев Г.Н. Теория тепло- и массообмена. СПб.: СПбНИУИТМО. 2012.
17. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В. Математическая модель холодильной установки на базе слоистых ТЭБ с тепловыми термосифонами. // Ползуновский вестник. №2, 2010.
18. Исмаилов Т.А. Термоэлектрические полупроводниковые устройства и интенсификаторы теплопередачи. СПб.: Политехника, 2005.
19. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Юсуфов Ш.А., Аминов Г.И., Термостабилизирующие устройства для радиоэлектронной аппаратуры // Вестник Международной академии холода, № 3, 2002.
20. 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.

References:

1. Anatyshuk L. I. Thermoelectricity. Thermoelectric energy converters. Kiev, Chernivtsi: Institute of thermoelectricity, 2003.
2. Anatyshuk L.I. The element base of thermoelectricity // Reports of the IX Interstate Seminar "Thermoelectrics and Their Application". St. Petersburg, 2004. [Anatyshuk L. I. Element base of thermoelectricity // Reports of the IX Interstate seminar "Thermoelectrics and their application". Saint Petersburg, 2004. (In Russ)]
3. Anatyshuk L. I. on physical models of thermoelements // Thermoelectricity. 2003, No. 1.
4. Bulat L.P. Applied research and development in the field of thermoelectric cooling in Russia // Refrigeration technology, 2009. No. 7. [Bulat L. P. Applied research and development in the field of thermoelectric cooling in Russia/Refrigerating equipment, 2009. № 7. (In Russ)]
5. Ssenoga Twaha, Jie Zhu, Yuying An, Bo Li A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modelling and performance improvement // Renewable and sustainable energy reviews, 2016. - №65.

6. RF Patent No. 2380787. Thermoelectric battery / Ismailov T.A., Evdulov O.V., Evdulov D.V., 2010. [Russian Patent No. 2380787. Thermoelectric battery / Ismailov T. A., Evdulov O. V., Evdulov D. V., 2010. (In Russ)]
7. RF patent No. 2379790. Thermoelectric battery / Ismailov T.A., Evdulov O.V., Evdulov D.V., 2010. [Russian Patent no. 2379790. Thermoelectric battery / Ismailov T. A., Evdulov O. V., Evdulov D. V., 2010. (In Russ)]
8. RF patent No. 2417484. Thermoelectric battery / Ismailov T.A., Evdulov O.V., Evdulov D.V., 2011. [Russian Patent No. 2417484. Thermoelectric battery / Ismailov T. A., Evdulov O. V., Evdulov D. V., 2011. (In Russ)]
9. RF patent No. 2338298. Thermoelectric battery / Ismailov T.A., Evdulov O.V., Verdiev M.G., 2007. [Russian Patent no. 2338298. Thermoelectric battery / Ismailov T. A., Evdulov O. V., Verdiev M. G., 2007. (In Russ)]
10. RF patent No. 2236098 Device for thermal stabilization of electronic equipment elements with a high level of heat release / Ismailov TA, Aminov GI, Evdulov OV, Yusufov Sh.A. // B.I. No. 25, 2004. [Russian Patent no. 2236098 Device for thermal stabilization of REA elements with a high level of heat release / Ismailov T. A., Aminov G. I., Evdulov O. V., Yusufov sh. a. / B. I. no. 25, 2004. (In Russ)]
11. Evdulov OV, Evdulov D.V. Theoretical studies of a thermoelectric element of a layered structure // Thermoelectricity. 2015. No. 2. [Evdulov O. V., Evdulov D. V. Theoretical studies of the thermoelectric element of a layered structure // thermoelectricity. 2015. № 2..(In Russ)]
12. RF patent No. 2314663. A device for cooling elements of radio electronic equipment operating in the mode of intermittent heat release / Ismailov T.A., Evdulov O.V., Verdiev M.G., Menafov A.M., 2005 [Russian Patent no. 2314663. Device for cooling elements of radio-electronic equipment operating in the mode of repeated short-term heat release / Ismailov T. A., Evdulov O. V., Verdiev M. G., Menafov a.m., 2005. (In Russ)]
13. RF patent No. 2180161. A device for thermal stabilization of elements of radio electronic equipment with high heat release / Evdulov O.V., Ismailov T.A., Yusufov Sh.A., Aminov G.I., 2000. [Russian Patent No. 2180161. Device for thermal stabilization of radio electronic equipment elements with high heat emissions/ Evdulov O. V., Ismailov T. A., Yusufov Sh. A., Aminov G. I., 2000. (In Russ)]
14. Korzhuev M. A., Avilov E. S., Nichezina I. Yu. Non-standard Harman response at the separate measurement of stages of multicasade thermoelectric modules // JEMS. 2011. V. 40, No. 5.
15. Yagov V.V. Possible mechanisms of high-intensity heat transfer in cooling of high temperature surfaces // Materials IX International seminar «Heat pipes, heat pumps, refrigeration, power sources». Minsk. 2015.
16. Dulnev G.N. Theory of heat and mass transfer. SPb.: SpbNIUITMO. 2012. [Dulnev G. N. Theory of heat and mass transfer. Saint Petersburg: Spbniuitmo, 2012. (In Russ)]
17. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Evdulov D.V. Mathematical model of a refrigeration unit based on laminated thermopile with thermal thermosyphons. // Polzunovsky Bulletin. No. 2, 2010. [Ismailov T. A., Evdulov O. V., Evdulov D. V. Mathematical model of a refrigeration unit based on layered TEB with thermal thermosiphons. // Polzunovskii journal No. 2, 2010. (In Russ)]
18. Ismailov T.A. Thermoelectric semiconductor devices and heat transfer intensifiers. Saint Petersburg: Polytechnic, 2005. [Ismailov T. A. Thermoelectric semiconductor devices and heat transfer intensifiers. Saint Petersburg: Politechnika, 2005. (In Russ)]
19. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Yusufov Sh.A., Aminov G.I., Thermal stabilizing devices for electronic equipment // Bulletin of the International Academy of Cold, No. 3, 2002. [Ismailov T. A., Evdulov O. V., Yusufov S. A., Aminov, I., Thermostabilizers devices for electronic equipment // Vestnik of International Academy of refrigeration, No. 3, 2002. (In Russ)]
20. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Makhmudova M.M., Evdulov D.V. Investigation of the cooling system of the elements of radio-electronic equipment operating in the mode of intermittent heat release. Izvestiya of higher educational institutions of Russia. Radio electronics. 2008. No. 5. [Ismailov T. A., Evdulov O. V., Makhmudov M. M., Evdulov D. V. system Study of cooling elements of electronic equipment working in a mode of intermittent heat//News of higher educational institutions of Russia. Radionics. 2008. №5. (In Russ)]

Сведения об авторах:

Сулин Александр Борисович, доктор технических наук, профессор факультета низкотемпературной энергетики, e-mail: miconta@rambler.ru

Евдулов Денис Викторович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры теоретической и общей электротехники, e-mail: +79634051239@yandex.ru

Ибрагимова Асият Магомедовна, соискатель кафедры теоретической и общей электротехники, e-mail: ibrasya@mail.ru

Семиляк Александр Иванович, старший преподаватель кафедры теоретической и общей электротехники, e-mail: asemilyak@mail.ru

Information about the authors:

Alexander B. Sulin, Dr. Sci.(Technical), Prof., Faculty of Low-Temperature Energy, e-mail: miconta@rambler.ru

Denis V. Evdulov, Cand. Sci. (Technical), Senior Lecturer, Department of Theoretical and General Electrical Engineering, e-mail: +79634051239@yandex.ru

Asiyat M. Ibragimova, Applicant, Department of Theoretical and General Electrical Engineering E-mail: ibrasya@mail.ru

Alexander I. Semilyak, Senior Lecturer, Department of Theoretical and General Electrical Engineering, e-mail: asemilyak@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 30.10.2020.

Принята в печать 19.11.2020.

Conflict of interests.

The authors declare no conflict of interest.

Received 30.10.2020.

Accepted for publication 19.11.2020.