

напряжений свыше  $7 \cdot 10^8$  Н/м<sup>2</sup>, что более чем в 2 раза превышает величину предела прочности меди, для термоэлектрического материала соотношение механических нагрузок и предела прочности в данном случае еще выше.

При этом, в соответствии с проведенными расчетами установлено, что для данной конструкции ТЭ наибольшим током питания без превышения допустимого значения механических нагрузок в системе является электрический ток, не превышающий величины 82 А, т.е. почти в 1,7 раза меньше, чем в случае использования слоистого ТЭ, для которого максимальная величина тока питания по расчетам составляет 140 А.

Таким образом, проведенные расчеты в полной мере подтверждают преимущества слоистой ТЭБ перед ТЭБ, выполненной из ТЭ П-образной формы. В первом случае можно получить более мощную ТЭБ без снижения ее термомеханических характеристик и надежности работы.

#### **Библиографический список:**

1. Патент РФ на изобретение № 2269183. Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Вердиев М.Г., Евдулов О.В., Меркухин Н.Е., опубл. 27.01.2006, БИ №3.
2. Патент РФ на изобретение № 2269184. Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Вердиев М.Г., Евдулов О.В., Меркухин Н.Е., опубл. 27.01.2006, БИ №3.
3. Патент РФ на изобретение № 2280919. Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Вердиев М.Г., Евдулов О.В., опубл. 27.07.2006, БИ №21.
4. Ши Д. Численные методы в задачах теплообмена. Перевод с англ. – М.: Мир, 1988. – 544с.

**УДК 681.382**

*Кобзаренко Д.Н., Рашидханов А.Т., Юсуфов Ш.А.*

#### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ЭЛЕКТРОННОГО БЛОКА С ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ОХЛАЖДЕНИЕМ В СОСТАВЕ ШКАФА ДЛЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

*Kobzarenko D.N., Rashidkhanov A.T., Yusufov Sh.A.*

#### **MODELING OF A TEMPERATURE FIELD OF THE ELECTRONIC BLOCK WITH THERMOELECTRIC COOLING AS A PART OF A CASE FOR THE TELECOMMUNICATION EQUIPMENT**

*В статье рассмотрена математическая модель электронного блока с термоэлектрическим охлаждением в составе шкафа для телекоммуникаци-*

онного оборудования. Описание процессов теплообмена в электронном блоке, с учетом допущений, приводится как в параллелепипеде с объемными источниками и стоками тепла, анализ температурного поля сводится к решению системы уравнений теплопроводности параллелепипеда с учетом объемной конвекции и теплообмена охлаждающего потока с параллелепипедом.

**Ключевые слова:** электронный блок, шкаф для телекоммуникационного оборудования, температурное поле, термоэлектрическое охлаждение.

*In the article the mathematical model of the electronic module with thermoelectric cooling in the composition of the enclosure for telecommunications equipment. Description of processes of heat exchange in the electronic unit, subject to the assumptions contained in the parallelepiped with volumetric sources and sinks of heat, the analysis of the temperature field is reduced to solving the system of equations of heat conductivity of a parallelepiped taking into account the bulk convection and heat transfer of the cooling flow with a parallelepiped.*

**Key words:** the electronic unit, a rack for telecommunications equipment, temperature field, thermoelectric cooling.

Электронные блоки в составе шкафа для телекоммуникационного оборудования рассматриваются как системы многих тел с сосредоточенными источниками тепловой энергии. Анализ температурных полей таких систем является сложной задачей, и, как правило, решение выполняется приближенными методами.

В настоящее время наиболее широкое распространение получили две группы тепловых моделей электронных блоков (ЭБ) [1]. Характерной особенностью моделей первой группы является разделение всех поверхностей модели ЭБ на отдельные условно изотермические участки. Во второй группе тепловых моделей нагретая зона ЭБ, представляющая собой неоднородную систему многих тел, идеализируется в виде однородного тела. Свойства этого тела характеризуются эффективными значениями коэффициентов теплопроводности  $\lambda$  и теплоемкости  $c$ . В тепловой модели принимается, что нагретая зона – однородное анизотропное тело с распределенным по объему источником энергии.

Различные тепловые модели аппаратов, нагретая зона которых образована совокупностью ЭБ, делятся на три группы, учитывая при этом основной механизм переноса тепла в радиоэлектронном устройстве.

К первой группе можно отнести все радиоэлектронные устройства, нагретая зона которых образована совокупностью горизонтально ориентированных блоков.

Ко второй группе относят все радиоэлектронные устройства, нагретая зона которых образована системой вертикально ориентированных блоков, расположенных в герметичном корпусе. Средний поперечный разрез между поверхностями деталей и соседней кассетой превышает 2-3 мм и давление газа внутри устройства более 10 мм. рт. ст. В зазорах между блоками и герметичным корпусом шкафа теплообмен за счет конвекции.

В третьей группе устройств между нагретой зоной и корпусом отсутствует зазор и при этом роль корпуса могут выполнять поверхности, полностью или частично охватывающие каждый блок. Перенос тепла от центральной части нагретой зоны к поверхности осуществляется кондукцией по твердым частям системы и излучением через воздушные прослойки.

Развитие технологий в течение нескольких десятков лет привело к увеличению числа элементов и функциональных узлов в составе ЭБ при значительном уменьшении габаритных размеров и незначительном повышении энергетических показателей. Следствием этого является повышение удельных тепловых потоков, которые необходимо отвести в окружающую среду для обеспечения требуемого температурного режима, т.к. надежность приборов элементной базы и функциональных узлов обеспечивается в достаточно узком диапазоне рабочих температур.

Как правило, при анализе теплового поля ЭБ используется допущение, что тепловая мощность элементов и узлов блока распределена по объему равномерно [2].

Рассмотрим процессы переноса тепла, учитывая особенности ЭБ в герметичном корпусе.

На рисунке 1 изображена схема перехода от реальной тепловой схемы ЭБ в герметичном блоке к упрощенной, полученной в результате идеализации особенностей нагретой зоны и характера протекающих процессов.

При анализе температурного поля нагретой зоны принимаются следующие основные допущения и ограничения.

1. Нагретая зона состоит из плоских блоков с гладкими поверхностями. Между блоками имеются каналы, в которых протекают воздушные потоки.

2. Пластины имеют одинаковые размеры ( $L_x, L_z, \delta$ ) и разделены вертикальными каналами одинаковой ширины ( $b$ ). При этом толщина блока ( $\delta$ ) много меньше остальных ее размеров ( $\delta \ll L_x, L_z$ ); ширина канала ( $b$ ) много меньше высоты и ширины пластин ( $b \ll L_x, L_z$ ). Число блоков ( $n$ ) относительно велико, и соответственно,  $(b+\delta) \ll L_y$ , где  $L_y$  – размер нагретой зоны, показанный на рисунке 1.

3. Источники тепла распределены по всем блокам равномерно.

4. Между нагретой зоной и корпусом имеются периферийные зазоры, толщина которых не меньше ширины каналов между платами.

5. Характер потоков воздуха во всех каналах ламинарный и полностью стабилизирован по длине.

6. Кондуктивные связи блоков с корпусом через монтажные элементы конструкции, разъемы, проводники и т. д. незначительны и при анализе процессов переноса тепла их можно не учитывать.

Вышеуказанные допущения позволяют вести описание процессов теплообмена в радиоэлектронном блоке как в параллелепипеде с объемными источниками и стоками тепла [3].

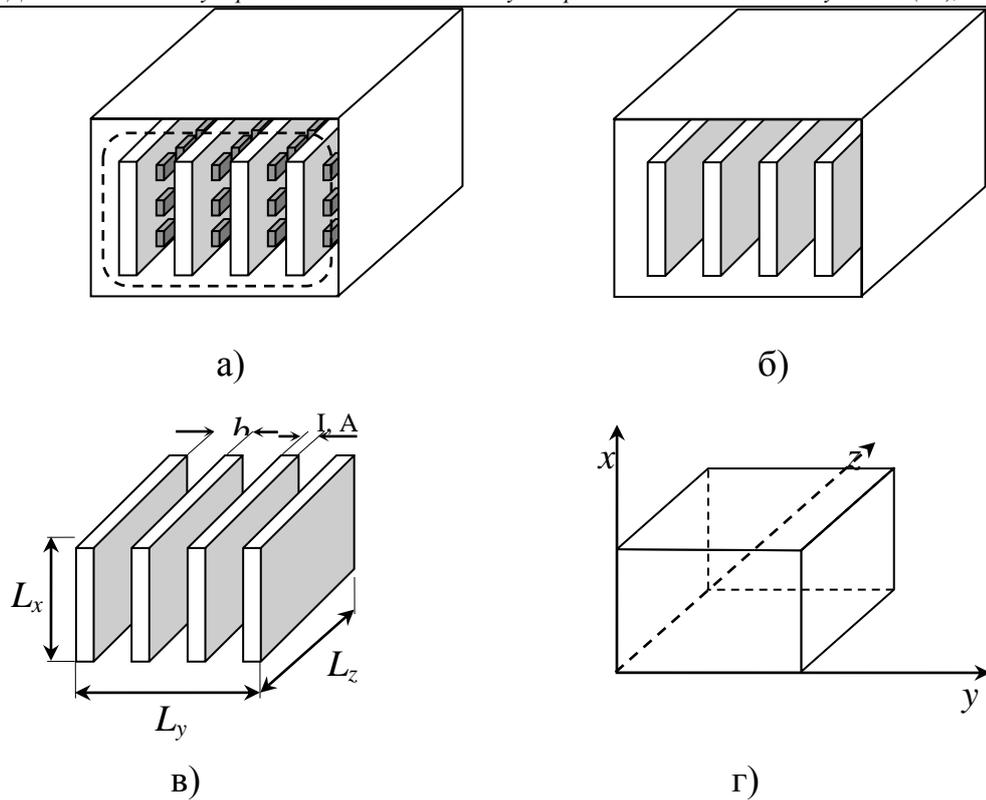


Рисунок 1 - Схема последовательного упрощения тепловой модели шкафа с ЭБ:

- а) исходная модель; б) переход к гладким блокам;  
 в) система блоков; г) квазиоднородный параллелепипед.

Тогда анализ температурного поля сводится к решению системы двух уравнений [4]: уравнения теплопроводности параллелепипеда с учетом объемной конвекции и уравнения теплообмена охлаждающего потока с параллелепипедом:

$$\frac{\lambda_x}{L_x^2} \frac{\partial^2 \vartheta_\omega}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\lambda_y}{L_y^2} \frac{\partial^2 \vartheta_\omega}{\partial \bar{y}^2} + \frac{\lambda_z}{L_z^2} \frac{\partial^2 \vartheta_\omega}{\partial \bar{z}^2} - \alpha_v (\vartheta_\omega - \vartheta_f) = -q; \quad (1)$$

$$\vartheta_\omega = \vartheta_f + \frac{1}{\Omega} \frac{\partial \vartheta_f}{\partial \bar{x}}; \quad (2)$$

$$\frac{1}{\Omega} = \frac{c_p \gamma v}{L_x \alpha_v}, \quad \vartheta_\omega = t_\omega - t_c, \quad \vartheta_f = t_f - t_c. \quad (3)$$

В дальнейших расчетах будем полагать, что  $v = const$  и  $q = const$ .

Уравнения (1) и (2) представляют собой замкнутую систему дифференциальных уравнений для определения  $\vartheta_\omega$  и  $\vartheta_f$ . Если теплообмен параллелепипеда с окружающей средой происходит по закону Ньютона, причем коэффициент теплообмена попарно одинаков на противоположных гранях, то граничные условия запишутся в виде:

$$\left[ \frac{\partial \mathcal{G}_\omega}{\partial \bar{j}} + 2Bi_j \mathcal{G}_\omega \right]_{\bar{j}=1} = 0, \quad \left[ \frac{\partial \mathcal{G}_\omega}{\partial \bar{j}} - 2Bi_j \mathcal{G}_\omega \right]_{\bar{j}=1} = 0, \quad (4)$$

$$Bi_j = \frac{\alpha_j L_j}{2\lambda_j}, \quad j = x, y, z;$$

$$[\mathcal{G}_f]_{\bar{x}=0} = 0 \quad (5)$$

Поставленная задача решается методом приведения к обыкновенным дифференциальным уравнениям [5].

Будем искать функции  $\mathcal{G}_\omega$  и  $\mathcal{G}_f$  в виде:

$$\mathcal{G}_\omega = \sum_{i=1}^n f_{xi} \varphi_{yi} \varphi_{zi}; \quad \mathcal{G}_f = \sum_{i=1}^n g_{xi} \varphi_{yi} \varphi_{zi}; \quad (6)$$

Здесь функции  $\varphi_{yi}(y)$  и  $\varphi_{zi}(z)$  подбираются так, что бы они удовлетворяли требованиям полноты и граничным условиям (4), функции  $f_{xi}(\bar{x})$ ,  $g_{xi}(\bar{x})$  находятся из условий ортогональности:

$$\int_0^1 \int_0^1 L(\mathcal{G}_\omega) \varphi_{yi} \varphi_{zi} d\bar{y} d\bar{z} = 0, \quad (7)$$

где

$$L(\mathcal{G}_\omega) = \frac{\lambda_x}{L_x^2} \frac{\partial^2 \mathcal{G}_\omega}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\lambda_y}{L_y^2} \frac{\partial^2 \mathcal{G}_\omega}{\partial \bar{y}^2} + \frac{\lambda_z}{L_z^2} \frac{\partial^2 \mathcal{G}_\omega}{\partial \bar{z}^2} - \alpha_v (\mathcal{G}_\omega - \mathcal{G}_f) + q \quad (8)$$

Если ограничиться первым приближением, то, опуская в дальнейшем индексы, характеризующие номер приближения, можно записать:

$$\mathcal{G}_\omega = f_x \varphi_y \varphi_z, \quad \mathcal{G}_f = g_x \varphi_y \varphi_z. \quad (9)$$

Задавая  $\varphi_j(j=y, z)$  в виде квадратичной параболы, то удовлетворяя условиям (4), получим:

$$\varphi_j = 1 + 2Bi_j(\bar{j} - \bar{j}^2), \quad \bar{j} = \bar{y}, \bar{z}, \quad (10)$$

и, следовательно,

$$L(\mathcal{G}_\omega) = f_x'' M_x \varphi_y \varphi_z - f_x (G_y \varphi_z + G_z \varphi_y) - R_x g_x' \varphi_y \varphi_z + q, \quad (11)$$

$$\text{где } M_x = \frac{\lambda_x}{L_x^2}, \quad R_x = \frac{\alpha_v}{\Omega}, \quad G_j = \frac{4Bi_j \lambda_j}{L_j^2}, \quad j = y, z$$

Используя условие (7) и обозначая

$$I_{1j} = \int_0^1 \varphi_j^2 d\bar{j} = 1 + \frac{2}{3} Bi_j + \frac{2}{15} Bi_j^2; \quad (12)$$

$$I_{2j} = \int_0^1 \varphi_j d\bar{j} = 1 + \frac{1}{3} Bi_j, \quad (13)$$

получим:

$$f_x'' - \frac{R_x}{M_x} g_x' - \frac{1}{M_x} \left( G_y \frac{I_{2y}}{I_{1y}} + G_z \frac{I_{2z}}{I_{1z}} \right) f_x = -\frac{q}{M_x} \frac{I_{2y} I_{2z}}{I_{1y} I_{1z}}. \quad (14)$$

Подставляя выражения (9) в уравнение (2), находим

$$f_x = g_x + \frac{g_x'}{\Omega} \quad (15)$$

Исключая в уравнениях (14 и 15) функцию  $f_x$ , получаем окончательно дифференциальное уравнение для  $g_x$ :

$$g_x''' + g_x'' C_2 + g_x' C_1 - g_x C_0 = -D; \quad (16)$$

$$\left. \begin{aligned} C_2 = \Omega; \quad C_1 = \frac{1}{M_x} \left( \alpha_V + \frac{G_y I_{2y}}{I_{1y}} + \frac{G_z I_{2z}}{I_{1z}} \right) \\ C_1 = \frac{\Omega}{M_x} \left( \frac{G_y I_{2y}}{I_{1y}} + \frac{G_z I_{2z}}{I_{1z}} \right); \quad D = q\Omega \frac{I_{2y} I_{2z}}{I_{1y} I_{1z}}. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Общий интеграл линейного дифференциального уравнения (16) имеет вид

$$g_x = M_1 \exp(k_1 \bar{x}) + M_2 \exp(k_2 \bar{x}) + M_3 \exp(k_3 \bar{x}) + \frac{D}{C_0} \quad (18)$$

где  $M_1, M_2, M_3$  – произвольные постоянные, определяемые из граничных условий;

$k_1, k_2, k_3$  – корни характеристического уравнения (19)

$$k^3 + C_2 k^2 - C_1 k - C_0 = 0 \quad (19)$$

Если ввести новую переменную

$$\xi = k + \frac{C_2}{3} \quad (20)$$

то уравнение (10) можно переписать в виде

$$\xi^3 + 3\beta\xi + 2\varepsilon = 0 \quad (21)$$

$$\varepsilon = \frac{C_2^3}{27} + \frac{C_2 C_1}{6} - \frac{C_0}{2}; \quad \beta = -\frac{C_1}{3} - \frac{C_2^2}{9}. \quad (22)$$

Расчетные формулы для  $k$  существенно зависят от знаков  $\varepsilon, \beta$  и дискриминанта  $d = \beta^2 + \varepsilon^2$ . Из (22) видно, что всегда выполняется соотношение  $\beta \leq 0$ .

После подстановки выражений (17) в (22) и преобразований получаем

$$\varepsilon = \frac{\Omega^3}{27} + \frac{\Omega}{3}(Bi_v - A);$$

$$d = \frac{C_0^2}{4} - \left( \frac{C_1^3}{27} + \frac{C_1^2 C_2^2}{108} + \frac{C_2^3 C_0}{27} + \frac{C_0 C_1 C_2}{6} \right) =$$

$$= \frac{\Omega^2 A^2}{4} - \left[ \frac{(Bi_v + A)^3}{27} + \frac{(Bi_v + A)^2 \Omega^2}{108} + \frac{\Omega^2 A}{27} + \frac{\Omega^2 A (Bi_v + A)}{6} \right], \quad (23)$$

$$A = 4 \left( \frac{\lambda_y L_x^2}{\lambda_x L_y^2} Bi_y \frac{I_{2y}}{I_{1y}} + \frac{\lambda_z L_x^2}{\lambda_x L_z^2} Bi_z \frac{I_{2z}}{I_{1z}} \right); \quad (24)$$

$$Bi_v = \frac{\alpha_v L_x^2}{\lambda_x}. \quad (25)$$

Согласно [2]

$$\left. \begin{aligned} k_i &= \xi_i - \frac{\Omega}{3} \quad (i=1,2,3); r = \sqrt{|\beta|}; \varphi = \arccos \frac{\varepsilon}{r^3}; \\ \xi_1 &= -2r \cos \frac{\varphi}{3}; \xi_2 = 2r \cos \left( \frac{\pi}{3} - \frac{\varphi}{3} \right); \xi_3 = 2r \cos \left( \frac{\pi}{3} + \frac{\varphi}{3} \right). \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Для упрощения введем обозначения:

$$h = g \frac{C_0}{D}; P_{1,2,3} = M_{1,2,3} \frac{C_0}{D}; F = f_x \frac{C_0}{D}. \quad (27)$$

Тогда уравнения (18) и (15) можно переписать в виде:

$$h = P_1 \exp(k_1 \bar{x}) + P_2 \exp(k_2 \bar{x}) + P_3 \exp(k_3 \bar{x}) + 1, \quad (28)$$

$$F = P_1 \exp(k_1 \bar{x}) \left( 1 + \frac{k_1}{\Omega} \right) + P_2 \exp(k_2 \bar{x}) \left( 1 + \frac{k_2}{\Omega} \right) + P_3 \exp(k_3 \bar{x}) \left( 1 + \frac{k_3}{\Omega} \right) + 1. \quad (29)$$

Для определения постоянных  $P_{1,2,3}$  используем граничные условия. Из условия (5) с учетом (9) и (27) получим:  $h(\bar{x}=0) = 0$ , откуда

$$P_1 + P_2 + P_3 = -1 \quad (40)$$

Далее с учетом соотношений (9), (27) и (29) получим:

$$P_1 \left[ \exp(k_1) \left( 1 + \frac{k_1}{\Omega} \right) (k_1 + 2Bi_x) \right] + P_2 \left[ \exp(k_2) \left( 1 + \frac{k_2}{\Omega} \right) (k_2 + 2Bi_x) \right] +$$

$$+ P_3 \left[ \exp(k_3) \left( 1 + \frac{k_3}{\Omega} \right) (k_3 + 2Bi_x) \right] = -2Bi_x \quad (41)$$

Уравнения (40, 41) позволяют определить константы  $P_{1,2,3}$ .

Поскольку температура в той или иной точке параллелепипеда сильно зависит от координаты местоположения, то в случаях, когда происходит равномерное охлаждение воздушного потока не в отдельном канале, а по всему объему, то для расчета параметров термоэлектрического охладителя необходимо знание средней температуры в рассматриваемом объеме.

В случаях, когда необходимо задаться средними температурами, их можно рассчитать по следующим формулам:

$$\bar{F} = \int_0^1 F d\bar{x} = \frac{P_1}{k_1} \left(1 + \frac{k_1}{\Omega}\right) [\exp(k_1) - 1] + \frac{P_2}{k_2} \left(1 + \frac{k_2}{\Omega}\right) [\exp(k_2) - 1] + \frac{P_3}{k_3} \left(1 + \frac{k_3}{\Omega}\right) [\exp(k_3) - 1] + 1; \quad (42)$$

$$\bar{h} = \int_0^1 h d\bar{x} = \frac{P_1}{k_1} [\exp(k_1) - 1] + \frac{P_2}{k_2} [\exp(k_2) - 1] + \frac{P_3}{k_3} [\exp(k_3) - 1]. \quad (43)$$

Окончательно температурное поле параллелепипеда с тепловыми источниками и стоками тепла:

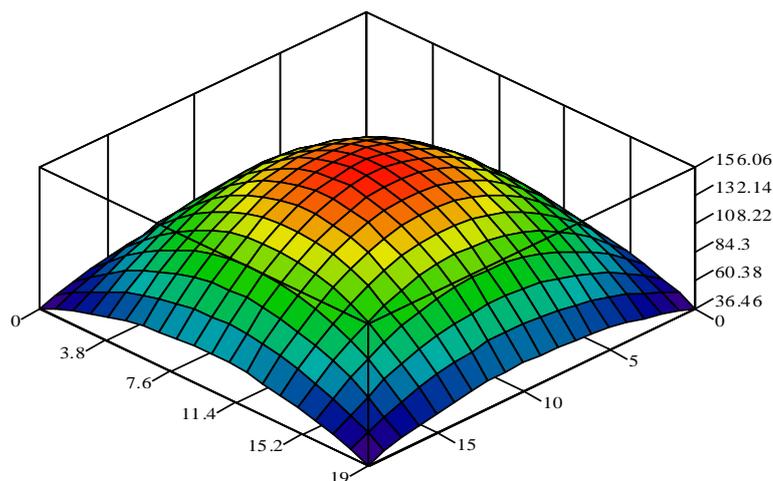
$$\vartheta_{\omega} = \frac{D}{C_0} \varphi_y \varphi_z F, \vartheta_f = \frac{D}{C_0} \varphi_y \varphi_z h; \quad (44)$$

$$\bar{\vartheta}_{\omega} = \frac{D}{C_0} \int_0^1 \varphi_y dy \int_0^1 \varphi_z dz \bar{F} = \frac{D}{C_0} I_{2y} I_{2z} \bar{F}; \quad (45)$$

$$\bar{\vartheta}_f = \frac{D}{C_0} I_{2y} I_{2z} \bar{h}; \quad (46)$$

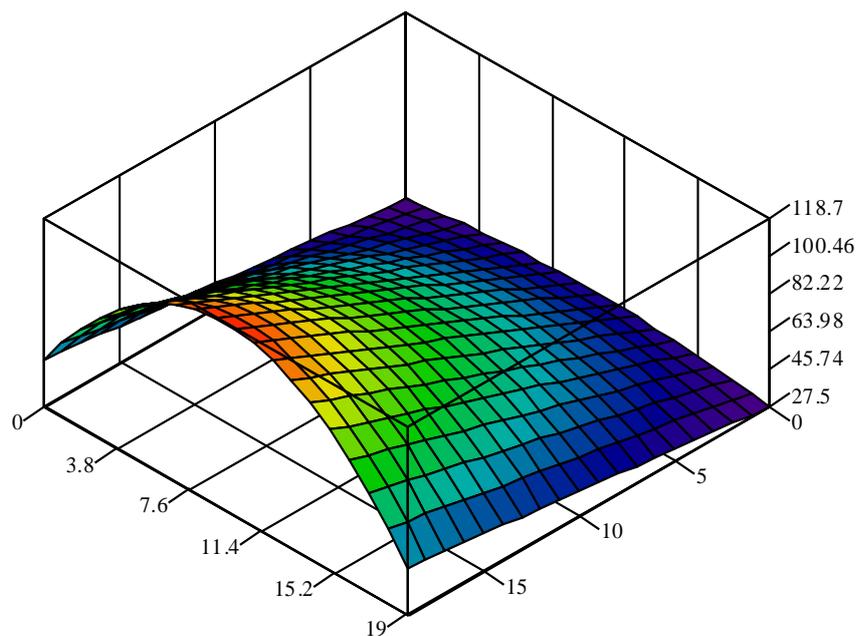
Ошибка, получаемая при использовании первого приближения соизмерима с точностью определения теплофизических параметров и ошибкой, связанной с переходом от реальной конструкции к эквивалентному однородному параллелепипеду.

На рисунках 2 – 5 приведены результаты моделирования температурного поля электронного блока в среде Mathcad Pro.

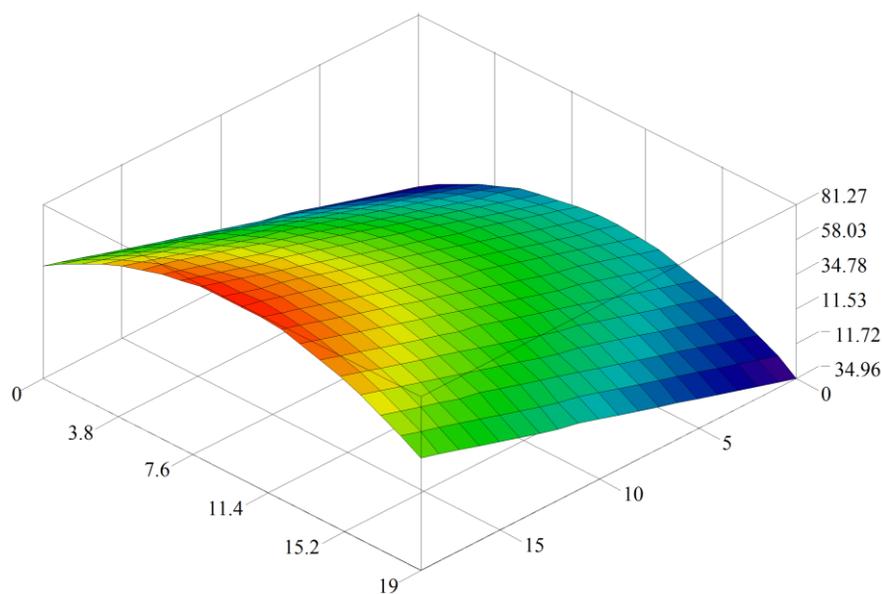


М

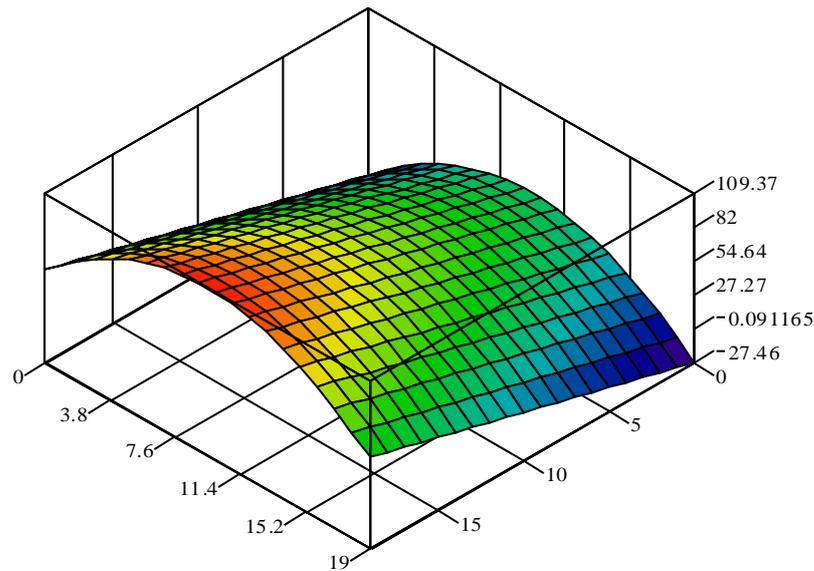
**Рисунок 2** - Температурное поле радиоэлектронного блока при суммарной мощности источников 700 Вт, температура на входе в блок 25 °С,  $x=0,5L_x$ ,  $\alpha=95$  Вт/м<sup>2</sup>К.



**Рисунок 3** - Зависимость температуры в блоке от координаты  $y$  и мощности тепловыделений от 100 до 1000 Вт, температура на входе  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $x=L_x$ ,  $\alpha=95$  Вт/м<sup>2</sup>К



**Рисунок 4** - Температурное поле радиоэлектронного блока в зависимости от температуры воздушного потока на входе при мощности источников 500 Вт и скорости 0.5 м/с.



**Рисунок 5** - Температурное поле радиоэлектронного блока в зависимости от температуры воздушного потока на входе при мощности источников 500 Вт и скорости 0,05 м/с

**Библиографический список:**

1. Роткоп Л.Л., Гидалевич В.Б., Гунн Л.А., Максименко В.Д. Оценка влияния тепловых режимов в РЭА на ее надежность. – «Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО», 1972, вып.1.
2. Дульнев Г.Н., Кайданов А.И. Температурное поле параллелепипеда с объемными источниками энергии и внутренней конвекцией.// ИФЖ, том XVII, №3, 1969
3. Дульнев Г.И. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Высшая школа, 1984.
4. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Методы расчета теплового режима приборов. М.: Радио и связь, 1990.
5. Акаев А.К., Дульнев Г.Н. Обобщение метода Л.В. Канторовича применительно к краевым задачам теплопроводности. – Инженерно-физический журнал, 1971, т.21, №3.