



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Мытищинский филиал  
Федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего образования  
«Московский государственный технический университет имени  
Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»  
(МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана)

---

ФАКУЛЬТЕТ космический

КАФЕДРА К-2

**ОТЧЕТ**  
**ПО ДОМАШНЕЙ РАБОТЕ**

**№ 3**  
**ПО КУРСУ**

**«КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ  
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ЭВМ»**  
**ВАРИАНТ № 21**

Студент КЗ-66Б

Доцент К2, к.т.н.

Чернов В.Д.

Удалов М.Е.

2025 г.

- 1) Расположение элементов на печатной плате – одностороннее;
- 2) Шаг установки компонентов по оси  $X_{rx} = 0.039$  м;
- 3) Шаг установки компонентов по оси  $Y_{ry} = 0.047$  м;
- 4) Расстояние от центра компонента до края печатной платы, м – такое, что  $k_{\text{комп-ПП}} = 1.14$ .
- 5) Коэффициент перфорации корпуса блока  $k_{\text{перф}} = 0.25$ ;
- 6) Мощность, рассеиваемая блоком (ячейкой),  $Q_{\text{бл}} = Q_{\text{яч}} = 45$  Вт;
- 7) Давление окружающей среды, Па,  $p_{\text{О.С.}} = 1.013 \cdot 10^5$  Па (нормальное);
- 8) Давление воздуха внутри блока, Па,  $p_{\text{вн.бл.}} = 1.013 \cdot 10^5$  Па (нормальное);
- 9) Приведенная степень черноты всей поверхности  $\text{прив.}i = 0.5$ ;
- 10) Мощность, рассеиваемая компонентом,  $Q_{\text{комп}} \leq 0.223$  Вт;
- 11) Площадь поверхности компонента,  $S_{\text{пов.комп}} = 0.00031$  м<sup>2</sup>;
- 12) Площадь основания компонента  $S_{\text{осн.комп}} = 0.0000864$  м<sup>2</sup> (корпус 2148);
- 13) Толщина зазора между основанием компонента и печатной платы  $\text{комп-ПП} = 0.001$  м;
- 14) Коэффициент теплопроводности материала, заполняющего зазор между основанием компонента и печатной платой  $\lambda_{\text{м.зак.комп.-ПП}} = 0.01$  Вт м<sup>2</sup>\*К (воздух);
- 15) Коэффициент теплопроводности материала печатной платы  $\lambda_{\text{м.ПП}} = 0.372$  Вт м<sup>2</sup>\*К (стеклотекстолит ВФТ-С);
- 16) Эквивалентный коэффициент теплопроводности модуля, в котором расположена микросхема,  $\lambda_{\text{экв}}$ , при отсутствии теплоотвода  $\lambda_{\text{экв}} = \lambda_{\text{п}} = \lambda_{\text{м.ПП}} = 0.372$  Вт м<sup>2</sup>\*К;
- 17) Допустимая температура корпуса компонента (интегральная микросхема серии 155)  $T_{\text{доп}} = 70^\circ\text{C}$ .

№ варианта	температура окружающей среды $t_{\text{О.С.}}, ^\circ\text{C}$	длина блока, $l_{\text{бл}}, \text{м}$	ширина блока, $b_{\text{бл}}, \text{м}$	высота блока, $h_{\text{бл}}, \text{м}$	длина нагретой зоны блока, $l_{\text{млм}}, \text{м}$	ширина нагретой зоны блока, $b_{\text{млм}}, \text{м}$	высота нагретой зоны блока, $h_{\text{млм}}, \text{м}$	толщина печатной платы $h_{\text{пп}}, \text{м}$	степень черноты корпуса блока $\varepsilon_{\text{корп.}i}$	Тепловая схема блока
21	20	0.19	0.11	0.3	0.183	0.082	0.186	0.0019	0.25	3

Таблица 1.

21 вариант ДЗ 3.

## Расчет теплового режима блока ЭА при естественном охлаждении.

### Методика расчета 1-го этапа теплового режима блока ЭА.

Расчет проводится в три этапа. На первом этапе расчет осуществляется методом итераций, в соответствии с которым на первой итерации задается температура корпуса.

1. Определяю площадь поверхностей блока:

для верхней и нижней —  $S_{\text{бл.в}}=S_{\text{бл.н}}=l_{\text{бл}}b_{\text{бл}}=0,19 * 0,11= 0,0209 \text{ м}^2$ ;

для боковой -  $S_{\text{бл.б}}=2(l_{\text{бл}}+b_{\text{бл}})*h_{\text{бл}}=2*(0,19+0,11)*0,3=0,18 \text{ м}^2$ .

2. Задаю перепад температур между корпусом и окружающей средой

$$\Delta t_{\text{корп-о.с.}} = 10^\circ\text{C}.$$

3. Определяю температуру корпуса блока:

$$t_{\text{корп.бл}}=t_{\text{о.с}}+t_{\text{корп-о.с.}}=20+10=30^\circ\text{C},$$

где  $t_{\text{о.с}}$ -максимальная температура окружающей среды,  $^\circ\text{C}$ .

4. Нахожу среднюю температуру между корпусом и окружающей средой:

$$t_{\text{корп-о.с.}}=(t_{\text{корп.бл}}+t_{\text{о.с}})/2=(30+20)/2=25^\circ\text{C}.$$

5. Определяю закон теплообмена:

$$\Delta t_{\text{корп-о.с.}} \leq (0,84/l_{\text{опри}})^3,$$

где  $l_{\text{опри}}$ - определяющий размер поверхности, м. Для верхней и нижней поверхностей блока  $l_{\text{опри}}=\min(l_{\text{бл}}, b_{\text{бл}})$ . Для боковой поверхности блока  $l_{\text{опри}}=h_{\text{бл}}$ .

Если данное условие удовлетворяется, теплообмен проходит по закону 1/4, в противном случае - по закону 1/3.

Для верхней и нижней поверхности:

$$10^\circ\text{C} \leq (0,84/(\min(0,19, 0,11)))^3$$

$$10^\circ\text{C} \leq 445^\circ\text{C}$$

Следовательно берем закон 1/4.

Для боковой поверхности:

$$10^\circ\text{C} \leq (0,84/0,3)^3$$

$$10^\circ\text{C} \leq 22^\circ\text{C}$$

Следовательно берем закон 1/4.

6. Рассчитываю коэффициенты конвективного теплообмена для каждой поверхности блока:

$$a_{\text{конв.}i} = k_{\text{пов.бл.}i} A_2 (t_{\text{корп.бл.}} - t_{\text{о.с.опр.}i})^{1/4},$$

где  $k_{\text{пов.бл.}i}$  - коэффициент, учитывающий положение поверхностей корпуса блока (для нижней поверхности 0,7, для боковой - 1, для верхней - 1,3);

$A_2$  - коэффициент, зависящий от  $t_{\text{корп-о.с}}$  (таб. 2).

Среда	Значения $A_2$ при температуре $\bar{t}_{\text{корп-о.с}}$ , °C									
	10	20	30	40	60	80	100	120	140	150
Воздух	1,4	1,38	1,36	1,34	1,31	1,29	1,27	1,26	1,25	1,245
Вода	90	105	127	149	178	205	227	—	—	—

Таблица 2.

Значения коэффициента  $A_2$  для воздуха и воды

$$a_{\text{конв.н}} = 0,7 * 1,36 (10/0,09)^{1/4} = 3,1;$$

$$a_{\text{конв.б}} = 1,3 * 1,36 (10/0,09)^{1/4} = 5,74;$$

$$a_{\text{конв.в}} = 1 * 1,36 (10/0,3)^{1/4} = 4,4;$$

7. Определяю коэффициент лучистого теплообмена для каждой поверхности блока:

$$a_{\text{л.}i} = \varepsilon_{\text{корп.}i} * 5,67 * (((t_{\text{корп.бл.}} + 273)/100)^4 - ((t_{\text{о.с.}} + 273)/100)^4) / (t_{\text{корп.бл.}} - t_{\text{о.с.}})^{1/4},$$

где  $\varepsilon_{\text{корп.}i}$  - коэффициент черноты корпуса блока.

$$a_{\text{л.в}} = a_{\text{л.н}} = 0,25 * 5,67 * (((3,03)^4 - (2,93)^4) / 10)^{1/4} = 1,4;$$

$$a_{\text{л.б}} = 0,25 * 5,67 * (((3,03)^4 - (2,93)^4) / 10)^{1/4} = 1,4;$$

8. Рассчитываю тепловую проводимость между поверхностью корпуса и окружающей средой:

$$\sigma_{\text{т.корп-о.с}} = (a_{\text{конв.н}} + a_{\text{л.н}}) S_{\text{бл.н}} + (a_{\text{конв.б}} + a_{\text{л.б}}) S_{\text{бл.б}} + (a_{\text{конв.в}} + a_{\text{л.в}}) S_{\text{бл.в}},$$

где  $a_{\text{конв.н}}, a_{\text{конв.б}}, a_{\text{конв.в}}$  - коэффициенты конвективного теплообмена для нижней, боковой и верхней поверхности корпуса блока соответственно;

$a_{\text{л.н}}, a_{\text{л.б}}, a_{\text{л.в}}$  - коэффициенты лучистого теплообмена для нижней, боковой и верхней поверхности блока соответственно.

$$\sigma_{\text{т.корп-о.с}} = (3,1+1,4) \cdot 0,0209 + (4,4+1,4) \cdot 0,18 + (5,74+1,4) \cdot 0,0209 = 1,3$$

9. Рассчитываю перепад температур между корпусом и окружающей средой во втором приближении:

$$\Delta t_{\text{корп-о.с}}^* = Q_{\text{бл}} / \sigma_{\text{т.корп-о.с}},$$

где  $Q_{\text{бл}}$  - мощность, рассеиваемая блоком, Вт.

$$t_{\text{корп-о.с}}^* = 45 / 1,3 = 34,6^\circ\text{C}.$$

10. Определяем ошибку (точность) расчета:

$$\Delta_p = |t_{\text{корп-о.с}}^* - t_{\text{корп-о.с}}| = |34,6 - 10| = 24,6^\circ\text{C}.$$

Если  $\Delta_p \leq 1$ , перехожу к следующему этапу расчета, если  $\Delta_p > 1$  - к пункту 3, считая, что  $\Delta t_{\text{корп-о.с}} = t_{\text{корп-о.с}}^*$ .

В моем случае, я провожу еще 4 итерации, чтоб  $p_1$ , при котором  $\Delta t_{\text{корп-о.с}}^* = 29,86^\circ\text{C}$ , и  $\Delta t_{\text{корп-о.с}} = 30,44^\circ\text{C}$ .

11. Определяю температуру корпуса с учетом перфорации и поправки на атмосферное давление окружающей среды:

$$\Delta t_{\text{корп-о.с}} = \Delta t_{\text{корп-о.с}}^* \cdot k_{\text{кперф}} \cdot k_{\text{ро.с}},$$

где  $k_{\text{кперф}}$  - коэффициент, зависящий от коэффициента перфорации блока  $k_{\text{ро.с}}$  (рис. 1);

$k_{\text{ро.с}}$  - коэффициент, зависящий от атмосферного давления окружающей среды  $p_{\text{о.с}}$  (рис. 2).

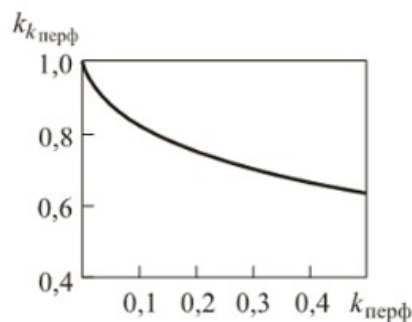


Рис. 1. Зависимость коэффициента  $k_{\text{кперф}}$  от коэффициента перфорации корпуса блока  $k_{\text{перф}}$

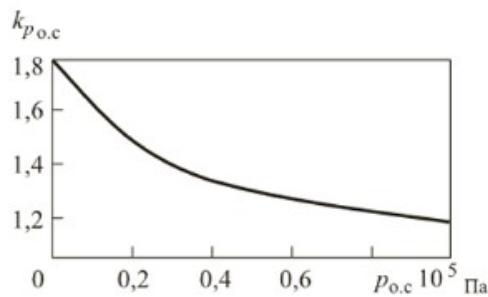


Рис. 2. Зависимость коэффициента  $k_{p_{o,c}}$  от атмосферного давления окружающей среды  $p_{o,c}$

По графикам видно, что при  $p_{o,c}=1.013 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ,  $k_{\text{кперф}}=0,7$ , при  $k_{\text{кперф}}=0,25$ , а  $k_{p_{o,c}}=1,2$ .

$$\Delta t_{\text{корп-о.с}} = 30,44 * 0,7 * 1,2 = 25,6 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

12. Определяю температуру корпуса блока:

$$t_{\text{корп.бл}} = t_{o,c} + \Delta t_{\text{корп-о.с}} = 20 + 25,6 = 45,6 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

## Методика расчета 2-го этапа теплового режима блока ЭА.

### 2-й этап для тепловых схем ТС 4.

Расчет проводится на основе законов Ньютона и Стефана-Больцмана.

1. Задаю перепад температур между корпусом и МММ  $t_{\text{заз.корп-МММ}} = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

2. Определяю площадь верхней, боковой и нижней поверхностей МММ:

$$S_{\text{МММ в}} = S_{\text{МММ н}} = l_{\text{МММ}} * b_{\text{МММ}} = 0,183 * 0,082 = 0,015 \text{ м}^2 ;$$

$$S_{\text{МММ б}} = 2(l_{\text{МММ}} + b_{\text{МММ}}) * h_{\text{МММ}} = 2 * (0,183 + 0,082) * 0,186 = 0,099 \text{ м}^2 ;$$

3. Рассчитываю площади поверхности параллелепипеда, находящегося между микромодульным массивом и внутренней поверхностью корпуса и отстоящего на расстоянии, которое соответствует золотому сечению 0,67 от МММ:

$$S'_{\text{пов.н}} = \sqrt{S_{\text{бл.н}}} * S_{\text{МММ н}} = \sqrt{0,0198} * 0,015 = 0,017 \text{ м}^2 ;$$

$$S'_{\text{пов.в}} = \sqrt{S_{\text{бл.в}}} * S_{\text{МММ в}} = \sqrt{0,0198} * 0,015 = 0,017 \text{ м}^2 ;$$

$$S'_{\text{пов.б}} = \sqrt{S_{\text{бл.б}}} * S_{\text{МММ б}} = \sqrt{0,186} * 0,099 = 0,135 \text{ м}^2 ;$$

4. Рассчитываю конвективные составляющие теплообмена в зазоре:

$$a_{\text{конв.в}} = 0,453 * \sqrt[4]{(\Delta t_{\text{заз.корп-МММ}} / \sigma_{\text{корп-МММ в}})} ;$$

$$a_{\text{конв.б}} = 0,453 * \sqrt[4]{(\Delta t_{\text{заз.корп-МММ}} / \sigma_{\text{корп-МММ б}})} ;$$

$$a_{\text{конв.н}} = \lambda_{\text{м.заз.корп-МММ}} / \delta_{\text{нкорп-МММ н}},$$

где  $\delta_{\text{корп-МММ в}}$ ,  $\delta_{\text{корп-МММ б}}$ ,  $\delta_{\text{корп-МММ н}}$  - зазоры между верхней, боковой и нижней поверхностями МММ и корпусом соответственно;

$\lambda_{\text{м.заз.корп-МММ н}}$  - коэффициент теплопроводности между нижней поверхностью МММ и корпусом.

$$\delta_{\text{корп-МММ б}} = (b_{\text{бл}} - b_{\text{МММ}}) / 2 = (0,11 - 0,082) / 2 = 0,014 \text{ м};$$

$$\delta_{\text{корп-МММ в}} = \delta_{\text{корп-МММ н}} = (h_{\text{бл}} - h_{\text{МММ}}) / 2 = (0,3 - 0,186) / 2 = 0,057 \text{ м};$$

$$a_{\text{конв.в}} = 0,453 \cdot \sqrt[4]{10 / 0,057} = 1,65;$$

$$a_{\text{конв.б}} = 0,453 \cdot \sqrt[4]{10 / 0,014} = 2,34;$$

$$a_{\text{конв.н}} = 0,01 / 0,057 = 0,17;$$

5. Определяю коэффициент лучеиспускания поверхности МММ:

$$a_{\text{л.и}} = \varepsilon_{\text{корп.и}} \cdot 5,67 \cdot \left( \left( (t_{\text{корп.бл}} + 273) / 100 \right)^4 - \left( (t_{\text{о.с}} + 273) / 100 \right)^4 \right) / (t_{\text{корп.бл}} - t_{\text{о.с}}))^{1/4} = 0,92 \cdot 5,67 \cdot \left( \left( (3,186)^4 - (2,93)^4 \right) / (25,6) \right)^{1/4} = 5,39$$

6. Рассчитываю теплопроводность между поверхностью корпуса и микромодульным массивом:

$$\sigma_{\text{т.корп-МММ}} = (a_{\text{конв.в}} + a_{\text{л.в}}) S'_{\text{пов.в}} + (a_{\text{конв.б}} + a_{\text{л.б}}) S'_{\text{пов.б}} + (a_{\text{конв.н}} + a_{\text{л.н}}) S'_{\text{пов.н}} = \\ = (1,65 + 5,39) \cdot 0,017 + (2,34 + 5,39) \cdot 0,135 + (0,17 + 5,39) \cdot 0,017 = 1,25$$

7. Определяю перепад температур между корпусом и МММ во втором приближении:

$$t_{\text{заз.корп-МММ}}^* = (k_{\text{пер.возд}} Q_{\text{яч}}) / \sigma_{\text{т.корп-МММ}},$$

где  $k_{\text{пер.возд}}$  - коэффициент перемешивания воздуха. При естественном охлаждении  $k_{\text{пер.возд}} = 1$ .

$$t_{\text{заз.корп-МММ}}^* = 45 / 1,25 = 36^\circ\text{C}.$$

8. Определяю ошибку (точность) расчета:

$$\Delta_p = |t_{\text{заз.корп-МММ}}^* - \Delta t_{\text{заз.корп-МММ}}| = |36 - 10| = 26^\circ\text{C}.$$

Если  $\Delta_p \leq 1$ , расчет завершается, если  $\Delta_p > 1$ , перехожу к п. 4 2-го этапа, считая, что  $\Delta t_{\text{заз.корп-МММ}} = t_{\text{заз.корп-МММ}}^*$ .

В моем случае, надо провести еще 3 итерации, и тогда будет  $\Delta_p \leq 1$ , при  $\Delta t_{\text{заз.корп-МММ}}^* = 31,03^\circ\text{C}$ .

9. По окончании 2-го этапа определяю температуру поверхности НЗ МММ с учетом поправки на давление (для закрытых перфорированных блоков):

$$t_{\text{пов МММ}} = t_{\text{корп.бл}} + \Delta t_{\text{заз.корп-МММ}} k_{\text{рвн.бл}},$$

где  $k_{\text{рвн.бл}}$  - коэффициент, зависящий от давления внутри блока  $p_{\text{вн.бл}}$  (рис. 3).

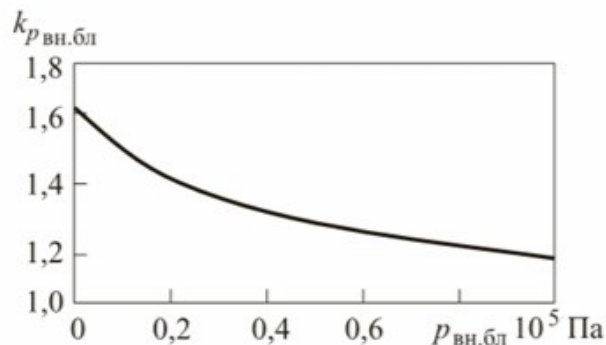


Рис. 3. Зависимость коэффициента  $k_{\text{рвн.бл}}$  от атмосферного давления внутри блока ЭА.

По графику видно, что при  $p_{\text{вн.бл}} = 1,013 \cdot 10^5$ ,  $k_{\text{рвн.бл}} = 1,2$ .

$$t_{\text{пов МММ}} = 45,6 + 31,03 \cdot 1,2 = 83^\circ\text{C}.$$

### Расчет передачи теплоты с учетом топологии.

#### Методика расчета 3-го этапа теплового режима блоков ЭА.

**Теплоотводящими компонентами являются интегральные микросхемы, транзисторы, резисторы, диоды.**

При расчете необходимо учитывать взаимное расположение компонентов на плате. Необходимо также учитывать положение компонента относительно края ПП и расположение компонентов относительно края ПП и расположение компонентов с одной или с двух ее сторон.

1. Рассчитываю эквивалентные радиусы компонентов:

$$r_{\text{компи}} = \sqrt{S_{\text{осн.компи}} / \pi} = \sqrt{(0,0000864 / 3,14)} = 0,00525 \text{ м},$$

где  $S_{\text{осн.компи}}$  - площадь основания  $i$ -го компонента,  $\text{м}^2$ .

2. Определяю приведенный коэффициент теплоотдачи:

$$k_{\text{т.прив}} = 17 / (h_{\text{пп}} \cdot \lambda_{\text{пп}}) = \sqrt{(17 / (0,0019 \cdot 0,372))} = 155.$$



3. Вычисляю переменные, зависящие от расстояния между рассчитываемым и остальными компонентами:

$$\chi_i = k_{\text{т.прив}} * l_{\text{ц.ан-компи}},$$

где  $l_{\text{ц.ан-компи}}$  - расстояние между центром анализируемого компонента и центрами  $i$ -х компонентов.

$$\text{По оси X: } l_{\text{ц.ан-компиX}} = r_x = 0,039 \text{ м;}$$

$$\text{По оси Y: } l_{\text{ц.ан-компиY}} = r_y = 0,047 \text{ м;}$$

$$\text{По оси диагонали Z: } l_{\text{ц.ан-компиZ}} = (\sqrt{r_x^2 + r_y^2}) + r_{\text{компи}} = 0,0663 \text{ м.}$$

Переменные по осям:

$$\text{По горизонтали } \chi_x = 155 * 0,039 = 6,05.$$

$\chi_x \leq 10$ , отсюда два компонента, расположенных по горизонтали оказывают тепловое влияние друг на друга.

$$\text{По вертикали } \chi_y = 155 * 0,047 = 7,29.$$

$\chi_y \leq 10$ , отсюда два компонента, расположенных по вертикали оказывают тепловое влияние друг на друга.

$$\text{По диагонали } \chi_z = 155 * 0,0663 = 10,28.$$

$\chi_z \geq 10$ , отсюда четыре компонента, расположенных по диагонали не оказывают тепловое влияние друг на центральный компонент.

4. Определяю перепад температур между компонентом и МММ, т.е НЗ:

$$\begin{aligned} \Delta t_{\text{компи-МММ}} = & \\ = k_{\text{компи-ПП}} & \left( \frac{Q_{\text{компи}}}{a_{\text{конв}} (S_{\text{пов.компи}} - S_{\text{осн.компи}}) + \frac{1}{\frac{\delta_{\text{компи-ПП}}}{\lambda_{\text{м.звз.компи-пп}} \pi r_{\text{компи}}^2} + \frac{1}{\frac{k_{\text{расп1}}}{k_{\text{расп2}} + \pi k_{\text{расп2}} r_{\text{компи}} \frac{\lambda}{\pi} \frac{\delta}{k_{\text{т.прив}}} \frac{K_1(k_{\text{т.прив}} r_{\text{компи}})}{K_0(k_{\text{т.прив}} r_{\text{компи}})}}}} \right) + \\ + \sum_{i=1}^{n_{\text{компи.т.вл}}} & \frac{Q_{\text{компи}}}{a_{\text{конв}i} (S_{\text{пов.компи}i} - S_{\text{осн.компи}i}) \left( 1 + \left( \frac{\delta_{\text{компи-ПП}i}}{\lambda_{\text{м.звз.компи-пп}i} \pi r_{\text{компи}i}^2} + \frac{1}{S_{\text{пов.компи}i} - S_{\text{осн.компи}i}} \right) \right)} \cdot \\ \cdot \frac{\frac{K_1(\chi_i)}{K_0(k_{\text{т.прив}i} r_{\text{компи}i})}}{k_{\text{расп1}i} + \pi k_{\text{расп2}i} r_{\text{компи}i} \frac{\lambda}{\pi} \frac{\delta}{k_{\text{т.прив}i}} \frac{K_1(\chi_i)}{K_0(k_{\text{т.прив}i} r_{\text{компи}i})}} = & \\ = 25,93 \text{ } ^\circ\text{C} & \end{aligned}$$

где  $a_{\text{конв}}$ ,  $a_{\text{конв}i}$  - коэффициенты конвективного теплообмена рассчитываемого и расположенного рядом компонентов соответственно (рис. 4);

$S_{\text{пов.комп}}$ ,  $S_{\text{пов.комп}i}$  - площади поверхности рассчитываемого и расположенного рядом компонентов соответственно,  $\text{м}^2$ ;

$S_{\text{осн.комп}}$ ,  $S_{\text{осн.комп}i}$  - площади основания рассчитываемого и расположенного рядом компонентов соответственно,  $\text{м}^2$ ;

$\delta_{\text{комп-ПП}}$ ,  $\delta_{\text{комп-ПП}i}$  - зазор между компонентом и ПП, м;

$\lambda_{\text{м.заз.комп-ПП}}$ ,  $\lambda_{\text{м.заз.комп-ПП}i}$  - коэффициент теплопроводности материала зазора между компонентом и ПП,  $\text{Вт/м}^2\cdot\text{К}$ ;

$k_{\text{комп-ПП}}$  - коэффициент, учитывающий расположение компонента относительно края ПП;

$k_{\text{расп1}}$  и  $k_{\text{расп2}}$  - коэффициенты, учитывающие одно- или двустороннее расположение компонентов ( $k_{\text{расп1}}=1$ ,  $k_{\text{расп2}}=0$  - для двустороннего расположения элементов;  $k_{\text{расп1}}=2$ ,  $k_{\text{расп2}}=2,5\pi r_{\text{комп}}^2$  - для одностороннее расположения элементов);

$n_{\text{комп.т.вл}}$  - число компонентов, оказывающих тепловое влияние на рассчитываемый компонент;

$K_0(i)$ ,  $K_1(i)$  - модифицированные функции Бесселя.

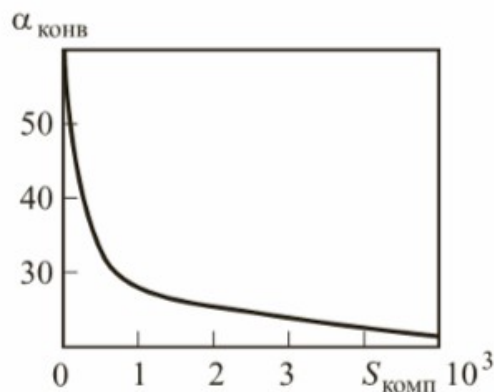


Рис. 4. Определение коэффициента конвективного теплообмена

По графику видно, что при  $S = 0.00031$ ,  $a_{\text{конв}} = a_{\text{конв}i} = 40$ .

Используя wolfram

$K_1(k_{\text{т.прив}} r_{\text{комп}}) = 0,8396$  (рис. 5);

$K_0(k_{\text{т.прив}} r_{\text{комп}}) = 0,5537$  (рис. 6);

$K_1(\chi_x)=0,0013$  (рис. 7);

$K_1(\chi_y)=0,00033$  (рис. 8);

The screenshot shows a web interface for calculating the modified Bessel function  $K_1$ . The 'Computational Inputs' section contains three fields: 'type of Bessel function' set to 'BesselK', 'n' set to '1', and 'z' set to '155\*0.00525'. A red 'Compute' button is located below these fields. The 'Input' section displays the expression  $K_1(155 \times 0.00525)$ . The 'Result' section shows the value '0.839592...'. The interface has a light blue header and a light gray background for the input and result sections.

Computational Inputs:	
» type of Bessel function:	BesselK
» n:	1
» z:	155*0.00525
<b>Compute</b>	

Input
$K_1(155 \times 0.00525)$

Result
0.839592...

Рис. 5. Значение модифицированной функции Бесселя для  $K_1(k_{т.прив}r_{комп})$

The screenshot shows a web interface for calculating the modified Bessel function  $K_0$ . The 'Computational Inputs' section contains three fields: 'type of Bessel function' set to 'BesselK', 'n' set to '0', and 'z' set to '155\*0.00525'. A red 'Compute' button is located below these fields. The 'Input' section displays the expression  $K_0(155 \times 0.00525)$ . The 'Result' section shows the value '0.553651...'. The interface has a light blue header and a light gray background for the input and result sections.

Computational Inputs:	
» type of Bessel function:	BesselK
» n:	0
» z:	155*0.00525
<b>Compute</b>	

Input
$K_0(155 \times 0.00525)$

Result
0.553651...

Рис. 6. Значение модифицированной функции Бесселя для  $K_0(k_{т.прив}r_{комп})$

Computational Inputs:	
» type of Bessel function:	BesselK ▾
» n:	1
» z:	6.05
<b>Compute</b>	

Input
$K_1(6.05)$

Result
0.00127252...

Рис. 7. Значение модифицированной функции Бесселя для  $K_1(\chi_x)$

Computational Inputs:	
» type of Bessel function:	BesselK ▾
» n:	1
» z:	7.29
<b>Compute</b>	

Input
$K_1(7.29)$

Result
0.000332395...

Рис. 8. Значение модифицированной функции Бесселя для  $K_1(\chi_y)$

5. Вычисляю температуру элемента:

$$t_{\text{комп}} = t_{\text{о.с}} + t_{\text{корп-о.с}} + t_{\text{заз.корп-МММ}} + t_{\text{корп-МММ}} = 20 + 45,6 + 31,03 + 25,93 = 122,56^\circ\text{C}.$$

### Результаты

Температура элемента  $t_{\text{комп}} = 122,56^\circ\text{C}$ , что превышает допустимую температуру  $70^\circ\text{C}$ .

**Вывод:** температура элемента превышает допустимую, следовательно необходимо использовать систему принудительного охлаждения для того, чтобы предотвратить перегрев и поломку элемента.

### Список источников

1. Конструкторско-технологические расчеты электронной аппаратуры [Текст]: учебное пособие / Э. Н. Камышная, В. В. Маркелов, В. А. Соловьев. - Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э Баумана, 2014. - 165 с.: ил., табл.; 21 см.; ISBN 978-5 7038-3943-0