

Министерство высшего и среднего специального образования СССР  
**Московское**  
ордена Ленина и ордена Трудовой Красной Знамени  
высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана

---

**Е. М. ПАРФЕНОВ, А. В. ФРОЛОВ**

**РАСЧЕТЫ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ  
БЛОКОВ РЭА И ЭВА  
НА МИКРОСХЕМАХ И ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ**

**Методические указания  
по дипломному проектированию**

Министерство высшего и среднего специального образования СССР  
Московское ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени  
высшее техническое училище им. Н.Э.Баумана

---

Е.М.Парфенов, А.В.Фролов

Утверждены  
редсоветом МВТУ

РАСЧЕТЫ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ  
БЛОКОВ РЭА И ЭВА  
НА МИКРОСХЕМАХ И ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Методические указания  
по дипломному проектированию

Данные методические указания по дипломному проектированию издаются в соответствии с учебным планом.

Рассмотрены и одобрены кафедрой П-8 23.05.79 г., Методической комиссией факультете П и Учебно-методическим управлением.

Рецензент.к.т.н. Ю.И.Кухарь

© Московское высшее техническое училище им. Н.Э.Баумана

## ВВЕДЕНИЕ

Настоящие методические указания предназначены для расчета тепловых режимов функциональных узлов, ТЭЗов и блоков электронно-вычислительной радиоаппаратуры при выполнении дипломного проекта на стадиях технического и рабочего проектирования. Методика предназначена для расчета стационарных тепловых режимов блоков электронной аппаратуры на интегральных микросхемах (ИС) и дискретных электрорадиоэлементах (ЭРЭ). Работа блока производится в широком диапазоне температур и давлений и ограничена допустимой мощностью рассеивания и конструктивными характеристиками блока, а также данными об условиях окружающей среды. Приведенная инженерная методика расчета основана на решении системы дифференциальных уравнений теплового баланса, которая характеризует связь между температурой нагретой зоны (тепловыделяющими элементами конструкции), температурой корпуса блока и заданными параметрами (мощностью рассеивания и температурой окружающей среды). Погрешность расчетов не превышает  $\pm 25\%$ .

Методические указания используются при выполнении курсового проекта и домашних заданий по конструированию РЭА и ЭВА.

Электронный блок - система с высокой плотностью монтажа одинаковых в конструктивном отношении ИС и ЭРЭ, повторяющихся во всех трех измерениях. В таком блоке наблюдается повышенное температурное влияние отдельных элементов друг на друга, которое необходимо учитывать при расчете.

При расчете задаются: суммарная мощность  $P$  всех источников энергии блока; мощность  $P_{\text{Э}}$ , выделяющаяся на КС или дискретном ЭРЭ; конструкция блока и его размеры; температура и давление окружающей среды. В результате расчета определяется перегрев ИС и ЭРЭ и температура среды около этих элементов.

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

1. Тепловая модель радиоэлектронного или электронно-вычислительного блока.
2. Суммарная мощность  $P$ , выделяющаяся в блоке, Вт.
3. Мощность  $P_{\text{Э}}$ , выделяющаяся в ИС или ЭРЭ, Вт.
4. Температура  $t_{\text{о}}$  окружающей среды,  $^{\circ}\text{C}$
5. Давление  $p_{\text{о}}$  окружающей среды, Па.

6. Давление воздуха  $p_{\delta}$  внутри корпуса блока, Па.

7. Геометрические характеристики блока:

длина  $L_1$ , ширина  $L_2$ , высота  $L_3$ , диаметр  $D$ , м;

размеры печатных плат в блоке - длина  $l_1$ , ширина  $l_2$ ,

толщина печатной платы  $\delta$ , м;

расстояние  $l$  между крайними платами в блоке, м;

коэффициент  $\kappa_n$  перфорации корпуса блока;

количество  $N$  печатных плат в блоке;

зазор  $\Delta$  между печатными платами, ТЭЗами;

общая площадь  $S_{\delta}$  внешней поверхности блока,  $m^2$ ;

суммарная площадь  $S_{\Sigma}$  поверхности ИС или ЭРЭ и радиатора,

площадь  $S_{\text{осн}}$  основания ИС, м<sup>2</sup>;

величина зазора  $\delta_3$  между основанием КС и печатной платой, м;

расстояние  $r_i$  между центром рассчитываемой ИС (или ЭРЭ) и центрами остальных элементов, м.

8. Характеристики вентилятора и блока, охлаждаемого принудительно:

производительность  $G_{\text{в}}$  вентилятора (при внутреннем перемешивании воздуха),  $kg \cdot s^{-1}$ ;

расход  $G$  охлаждающего воздуха,  $kg \cdot s^{-1}$ ;

коэффициент полезного действия  $\eta$  вентилятора;

расстояние  $\alpha$  от торца печатной платы до центра рассчитываемого элемента в направлении движения воздуха, м;

количество элементов  $n_{\alpha}$  в сечении канала на расстоянии  $\alpha$

9. Теплофизические характеристики элементов конструкции блока:

коэффициент теплопроводности  $\lambda_n$  диэлектрика печатной платы,  $Вт \cdot м^{-1} \cdot град^{-1}$ ;

коэффициент теплопроводности материала, заполняющего зазор между ИС и ЭРЭ и печатной платой  $\lambda_3$ ,  $Вт \cdot м^{-1} \cdot град^{-1}$ .

### СТАЦИОНАРНЫЙ ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ЭЛЕКТРОННОГО БЛОКА ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

На первом этапе расчета определяется перегрев корпуса блока относительно окружающей среды; для блока с герметичным корпусом

$$\Delta t = \rho / \beta_{\kappa},$$

для перфорированного корпуса блока

$$\Delta t = \kappa_{\pi} \rho / \sigma_{\kappa} \quad (1a)$$

где  $\sigma_{\kappa}$  - тепловая проводимость корпуса блока, Вт.град<sup>-1</sup>.

$\kappa_{\pi}$  определяется с помощью графика на рис. 1, на котором приведена зависимость  $\kappa_{\pi} = f(\kappa_{\pi})$ , здесь  $\kappa_{\pi}$  - отношение суммарной площади отверстий в основании блока к площади основания массива ячеек или ТЭЗов.

Тепловая проводимость корпуса блока

$$\sigma_{\kappa} = \alpha_{\delta} S_{\delta} + \alpha_{H} S_{H} + \alpha_{\delta} S_{\delta}, \quad (2)$$

где  $S_{\delta}, S_{H}, S_{\delta}$  - площади верхней, нижней граней и боковой поверхности корпуса, м<sup>2</sup>;

$\alpha_{\delta}, \alpha_{H}, \alpha_{\delta}$  - суммарные коэффициенты теплообмена верхней, нижней граней и боковой поверхности корпуса блока с окружающей средой, Вт.м<sup>-2</sup>.град<sup>-1</sup>.

Коэффициент теплообмена  $\alpha = \alpha_{\kappa} + \alpha_{\lambda}, \quad (3)$

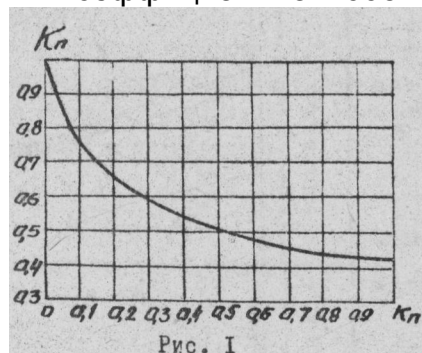


Рис. 1

где  $\alpha_{\kappa}$  - коэффициент конвективного теплообмена;

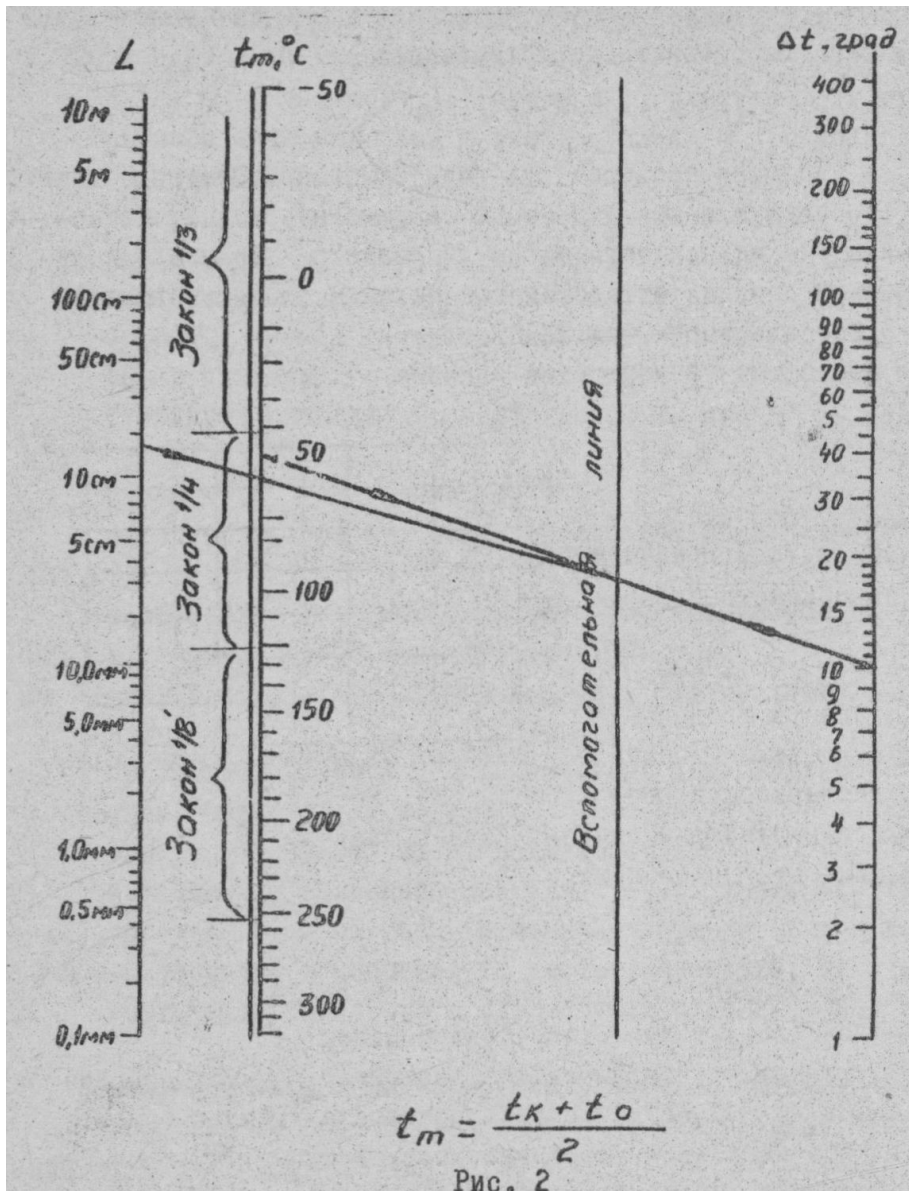
$\alpha_{\lambda}$  - коэффициент лучистого теплообмена.

Конвективная составляющая коэффициента  $\alpha_{\kappa}$  теплообмена корпуса с окружающей средой определяется следующим образом: задаваясь значением перегрева корпуса блока  $\Delta t$ , вычислить температуру корпуса блока  $t_{\kappa} = t_c + \Delta t$  и среднюю (определяющую) температуру  $t_m = 0,5 \cdot (t_{\kappa} + t_c)$  найти закон теплообмена с окружающей средой по номограмме\* (рис. 2) или с помощью неравенства

$$\Delta t \leq \left( \frac{840}{L} \right)^3, \quad (4)$$

где  $L$  - определяющий размер плоской или цилиндрической поверхности, мм.

\*Здесь и на рис. 3,4,5 стрелками указана схема пользования номограммами.



Если неравенство удовлетворяется, то теплообмен подчиняется закону 1/4 степени, в противном случае - закону 1/3 степени.

Когда теплообмен подчиняется закону 1/4, для расчета конвективного коэффициента теплообмена  $\alpha_x$  используется формула

$$\alpha_x = \gamma \cdot A_1 \left( \frac{\Delta t}{L_i} \right)^{1/4}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (5)$$

где  $\gamma$  - коэффициент, учитывающий ориентацию поверхности,  
 $\gamma = 1; L_c = L_3$  - для вертикально ориентированной поверхности;

$\gamma = 1,3; L_c = L_2$  - для горизонтально ориентированной поверхности, обращенной нагретой стороной вверх;

$\gamma = 0,7; L_c = L_2$  - для горизонтально ориентированной поверхности, обращенной нагретой стороной вниз.

Для блока цилиндрической формы при горизонтально ориентированной оси блока  $L_c = D$  (случай вертикальной стенки) или  $L_c = L$  (случай горизонтальной стенки). Коэффициент  $A_1$  характеризует состояние среды, при заданной температуре:

$$A_1 = 0,54 (\beta \cdot g \cdot \rho_2)^{1/4} \cdot \frac{\lambda_m}{\sqrt{v_m}} \quad (6)$$

где  $\beta$  - коэффициент объемного расширения среды, град ;

$g$  - ускорение силы тяжести, м.с<sup>-2</sup> ;

$\rho_2$  - критерий Прандтля;

$\lambda_m$  - коэффициент теплопроводности среды, Вт.м<sup>-1</sup>.град<sup>-1</sup>;

$v_m$  - коэффициент кинематической вязкости среды, м<sup>2</sup>, с<sup>-1</sup>. Индекс  $m$  указывает, что значения (физических параметров среды следует выбирать для определяющей температуры  $t_m$ . Значения  $A_1$  для воздуха и воды, рассчитанные по формуле (6), приведены в табл. 1.

Таблица 1

Среда	tm, °C							
	10	20	30	ад	50	60	80	100
Воздух	1,40	↔ ∞	1,36	1,34	1,32	1,31	1,29	1,27
Вода	90	105	127	149	164	178	205	227

В случае теплообмена, подчиняющегося закону 1/3, для расчета конвективного коэффициента теплообмена  $\alpha_k$  используется

формула(7)  $\alpha_k = \gamma \cdot A_2 \cdot (\Delta t)^{1/3}$ ,

здесь(8)  $A_2 = 0,135 \cdot (\beta \cdot g \cdot \rho_2)^{1/3} \cdot \frac{\lambda_m}{\sqrt{v_m}}$



Значения  $A_2$  для воздуха и воды, рассчитанные по формуле (8), приведены в табл. 2.

Таблица 2

Среда	$t_m, ^\circ\text{C}$						
	0	20	40	60	80	100	150
Воздух	1,69	1,61	1,53	1,45	1,39	1,33	1,23
Вода	102	198	290	363	425	480	610

Значения коэффициентов  $A_1$  и  $A_2$  для другой среды (инертный газ, охлаждающая жидкость, герметизирующий компаунд) определяются по формулам (6) и (8).

Конвективную составляющую коэффициента теплообмена для всех граней корпуса можно определить по одной из трех номограмм, представленных на рис. 3 (закон 1/3), 4(закон 1/4), 5 (закон 1/8).

Закон 1/8 степени характеризует ламинарное течение, характерное для среды, омывающей тонкие проводники.

Коэффициент лучистого теплообмена

$$\alpha_1 = C_0 \cdot \varepsilon_k \left[ \frac{\left(\frac{T_k}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_0}{100}\right)^4}{\Delta t} \right], \quad (9)$$

где  $C_0 = 5,7$  Вт.м<sup>-2</sup> .град<sup>-1</sup> коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела;

$\varepsilon_k$  - степень черноты поверхности корпуса (табл. 4);

$T_k$  и  $T_0$  - абсолютные температуры корпуса и среды.

Коэффициент лучистого теплообмена может быть определен графоаналитическим способом по формуле

$$\alpha_1 = \varepsilon_k \cdot f \cdot (10)$$

Функция  $f$  определяется по графику на рис. 6.

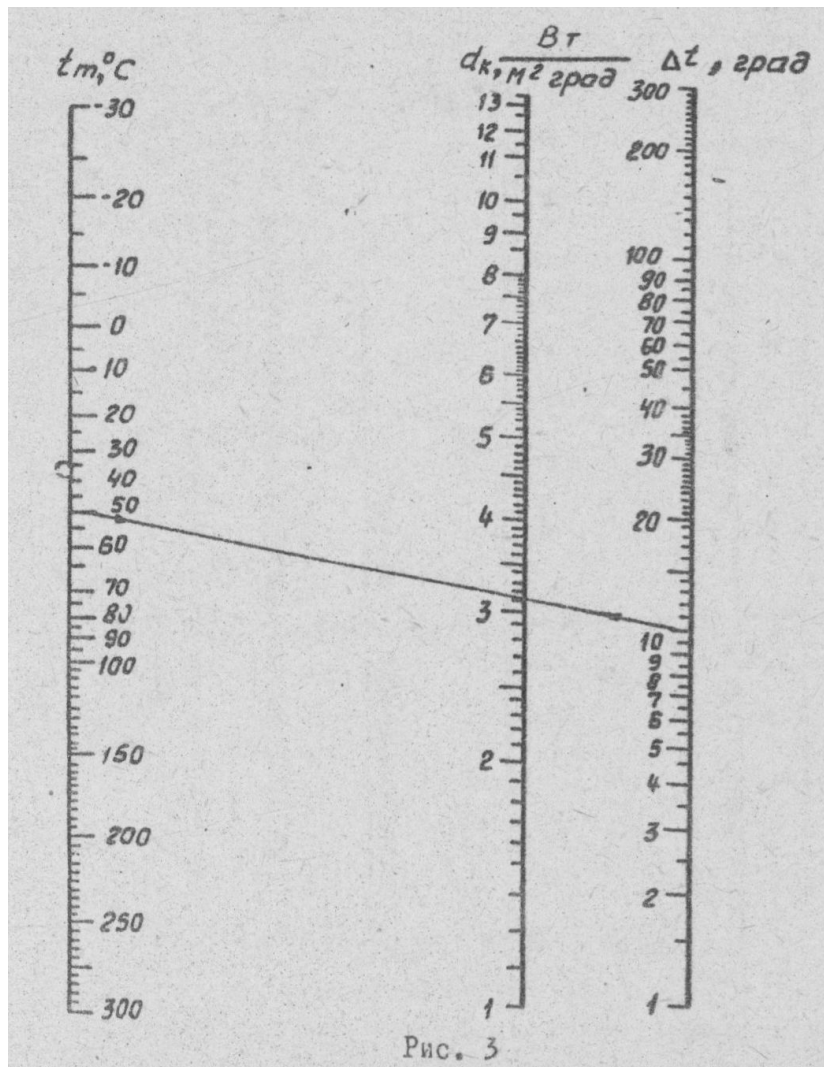
Рассчитанное по формуле (3) значение коэффициента теплообмена  $\alpha$  подставляется в формулу (2) и определяется перегрев корпуса блока  $\Delta t$ . Этот этап расчета повторяется до совпадения принятого для определения коэффициент теплообмена  $\alpha$  и рассчитанного по формуле (2) значения  $\Delta t$ .

Второй этап расчета - определение температуры перегрева зазора между поверхностью нагретой зоны (объема, занимаемого платами с ИС и ЭРЭ) и корпусом блока  $\Delta t_3 = t_{H3} - t_k$

$$\Delta t_3 = \kappa_n \kappa_w \rho / \kappa_0 \sigma_3, \quad (11)$$

где  $\kappa_6$  - коэффициент, учитывающий контактный теплоотвод от массива ячеек или ТЭЗов к корпусу.

$\kappa_w$  - коэффициент, учитывающий внутреннее перемешивание воздуха; определяется по графику на рис. 7.



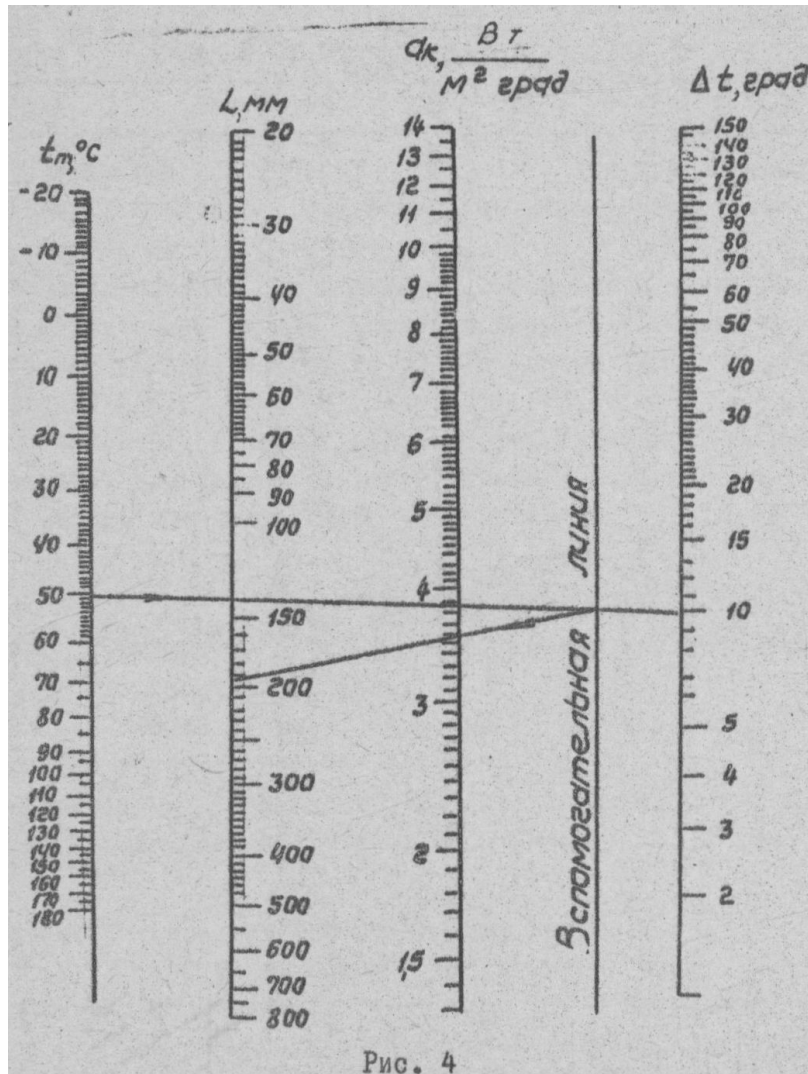
Если между корпусом и массивом ячеек имеется воздушный зазор или рамки ТЭЗов являются частью корпуса блока, то  $\kappa_6 = 1$ .

При установке ячеек в пазы корпуса блока

$$\kappa_5 = \begin{cases} 1,63 - \frac{0,157}{\kappa_3 S_{пк}} & \text{при } 0,2 \leq \frac{1}{\kappa_3 S_{пк}} \leq 3,4 \\ 1 & \text{при } \frac{1}{\kappa_3 S_{пк}} > 4 \end{cases} \quad (12)$$

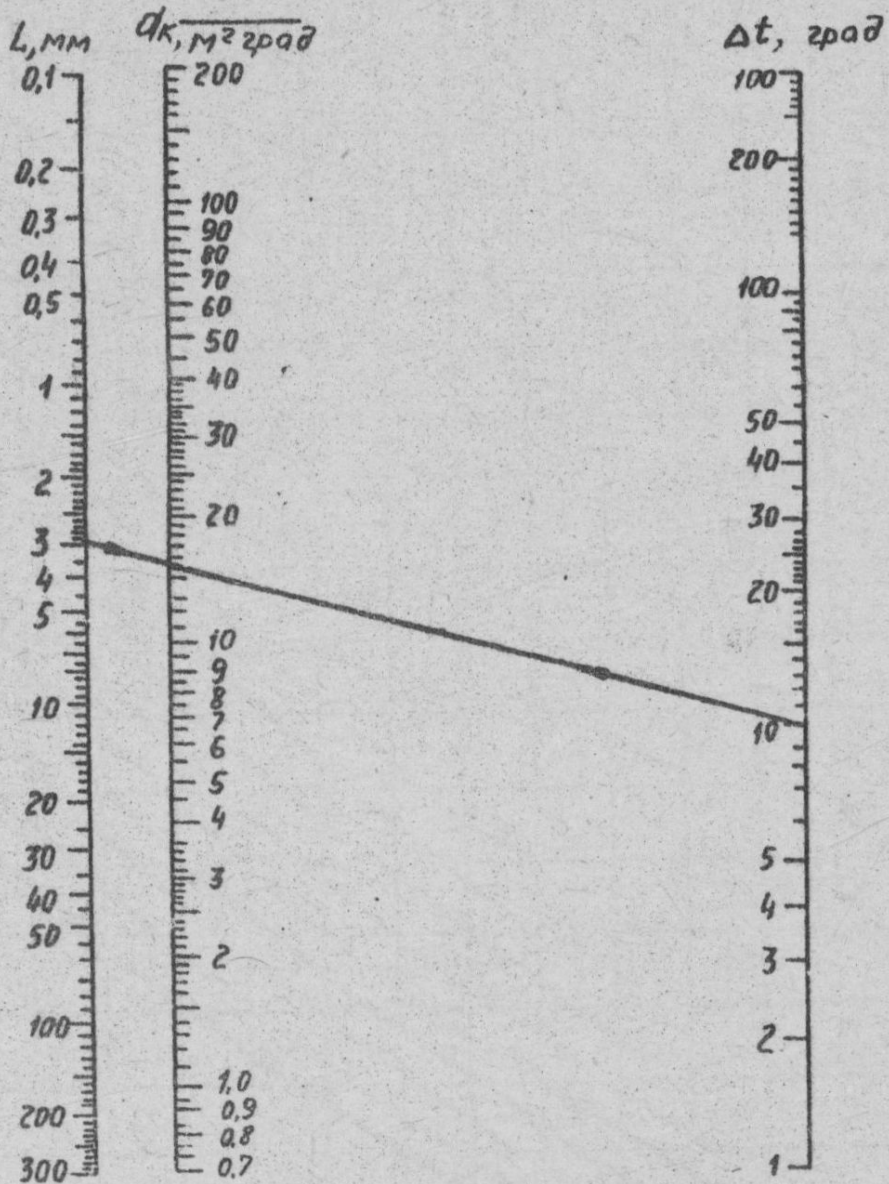
где  $\kappa_3$  - удельная теплопроводность зазора между ячейками и корпусом блока. Вт.м<sup>-2</sup>.град<sup>-1</sup>,

$\kappa_3 = 180$  Вт.м<sup>-2</sup>.град<sup>-1</sup>, если ячейки не прижимаются к корпусу. Когда ячейки прижимаются к корпусу блока с усилием  $F$ , то  $\kappa_3$  определяют по графику на рис. 8.



- - площадь контакта ячейки с корпусом блока при установке ее в пазы корпуса с прижимом;  $S_{пк} = 2abc$  при установке ячеек без прижима (здесь  $a, b, c$  - длина, ширина и глубина паза корпуса).
- Для герметичного блока, в котором зазор заполнен компаун-

дом,  $\kappa_w = 1, \kappa_{\Pi} = 1.$   
 Вт



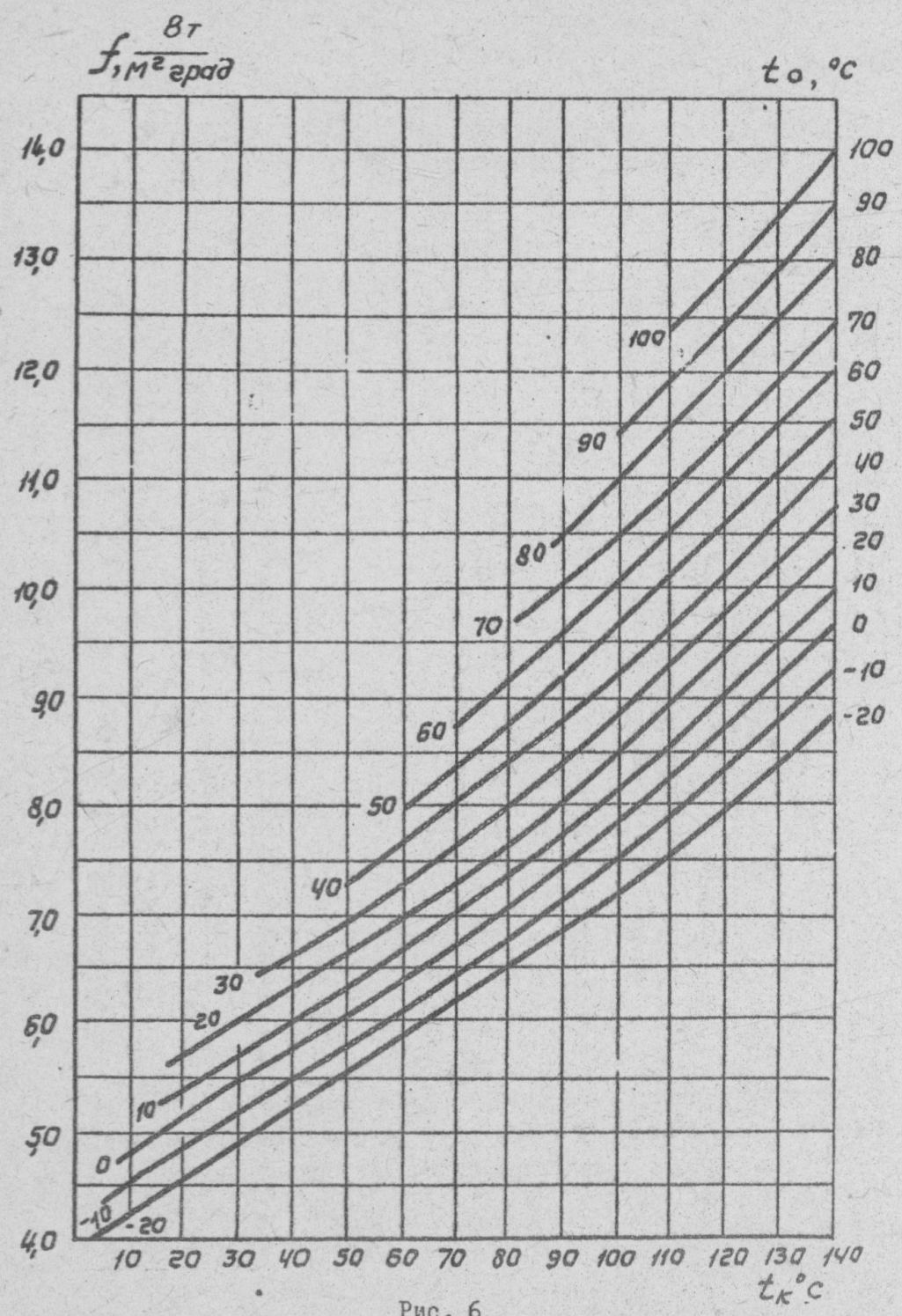
$L$  - наибольшее ребро кожуха

Рис. 5

В герметичном блоке процесс теплопередачи в зазоре от нагретой зоны к корпусу происходит за счет конвективно - кондуктивного переноса и излучения, если зазор заполнен газом, и за счет контактной теплопроводности (кондукции), если зазор заполнен компаундом. Для такого блока тепловая проводимость газовой прослойки

$$\sigma_3 = \kappa_3 (S'_k + S'_H + S'_B) + \kappa_B S'_B + \kappa_H S'_H + \kappa_B S'_B, \quad (13)$$

где  $S'_k = S'_L, S'_B$  - эффективные площади верхней, нижней и боковой поверхностей нагретой зоны.



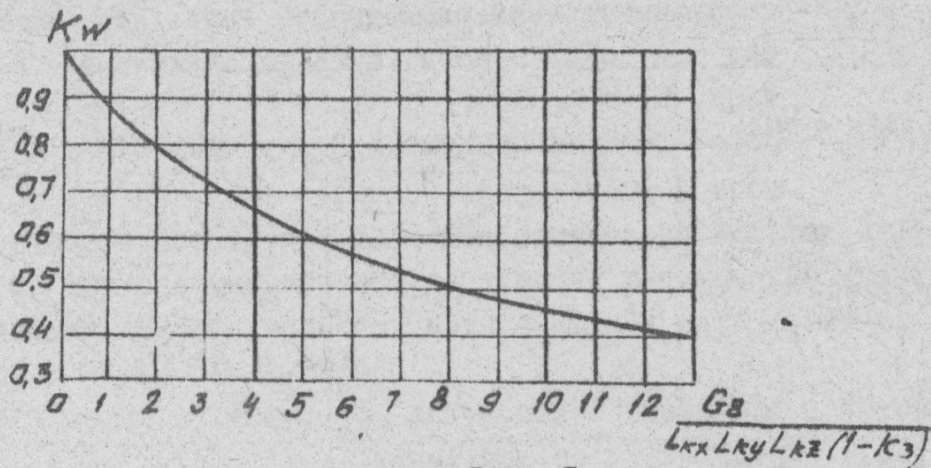


Рис. 7

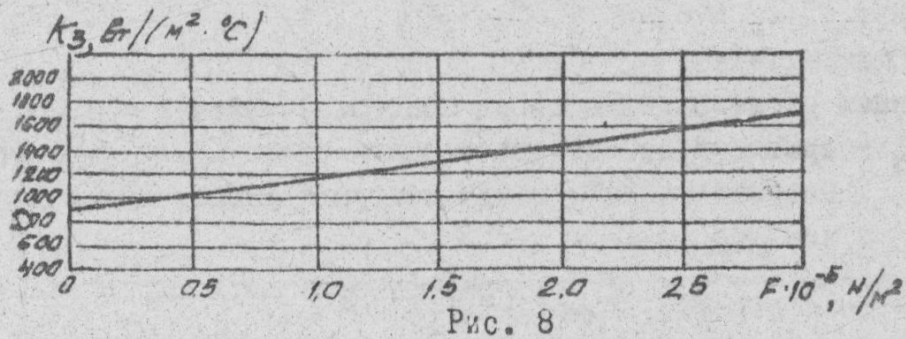


Рис. 8

Здесь

$$S'_i = \sqrt{S_i S_{K_i}}, \quad i = B, H, \delta \quad (I4)$$

$S_K$  — соответствующая поверхность корпуса.

В формуле (I3) конвективно-кондуктивные коэффициенты теплопередачи для верхнего, бокового и нижнего зазоров равны соответственно

$$K_B = 0,453 \sqrt[4]{\Delta t_3 / h_B}; \quad (I5)$$

$$K_\delta = 0,453 \sqrt[4]{\Delta t_3 / h_\delta}; \quad (I5a)$$

$$K_H = \lambda_r / h_H; \quad (I6)$$

где  $h_B = \frac{\sum_{j=1}^m h_j S_j}{\sum_{j=1}^m S_j}$  — средневзвешенная толщина зазора в верхней части блока;  
 $h_j$  и  $S_j$  — высота зазора и площадь поверхности  $j$ -й ИС или ЭРЭ;  
 $h_\delta$  — боковой зазор между корпусом и нагретой зоной;

$\lambda_r$  - коэффициент теплопроводности газе. Его значения для воздуха могут быть определены по табл. 5;

$h_n$  - расстояние между нижней поверхностью нагретой зоны и дном корпуса блока.

По формуле (16) рассчитывается коэффициент теплопередачи для прослоек, заполненных герметизирующим компаундом.  $\lambda_r$  в этом случае заменяется коэффициентом теплопроводности компаунда.

Лучистый коэффициент теплообмена  $\alpha_l$ , который входит в формулу (13), определяется из выражения

$$\alpha_l = \epsilon_n \cdot f, \quad (17)$$

Где  $f$  (функция  $f$ ), определяется по номограмме рис. 6;

$\epsilon_n$  - приведенная степень черноты системы тел "корпус- нагретая зона", между

$$\epsilon_n = \left( \frac{1}{\epsilon_k} + \frac{1}{\epsilon_{n3}} - 1 \right)^{-1}, \quad (18)$$

которыми происходит теплообмен.

здесь  $\epsilon_k$  и  $\epsilon_{n3}$  степени черноты внутренней поверхности корпуса и нагретой зоны.

Внутри негерметизированного блока воздух нагревается только за счет конвективного переноса тепла, так как для теплового излучения он прозрачен. Для негерметичного корпуса блока тепловая проводимость воздушного зазора

$$\sigma_3 = \alpha_3 \cdot S_{n3}, \quad (13a)$$

где  $\alpha_3$  - конвективный коэффициент теплообмена в зазоре; определяется по номограмме на рис. 9;

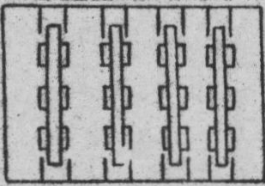
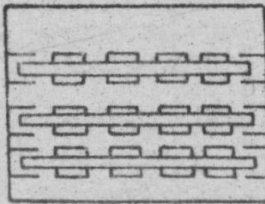
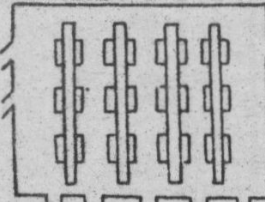
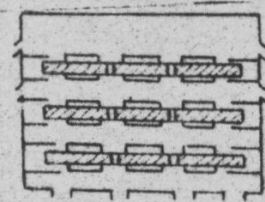
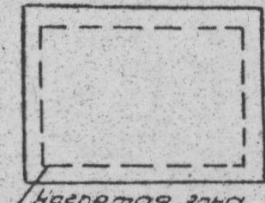
$S_{n3}$  - площадь поверхности нагретой зоны.

Тепловая проводимость зазора  $\sigma_3$  зависит от температуры, поэтому ее расчет целесообразно проводить методом последовательных приближений (аналогично расчетам первого этапа) до совпадения значений  $\sigma_3$ , вычисленного по формуле (11) и принятого для расчета тепловой проводимости зазора.

В первом приближении температура поверхности нагретой зоны  $t'_{n3} = t_k + 2,5 \Delta t$  ( $t_k$  и  $\Delta t$  определяются на первом этапе расчета).

В табл. 3 схематически изображены характерные конструкции электронных блоков и их тепловые модели. В ней же определяется

Таблица 3

Вид блока и его тепловая схема	Номера расчетных формул	Примечание
<p>Герметичный</p> 	<p>II - I2 I4 - I8</p>	<p>Давление внутри блока учитывается с помощью коэффициента <math>K_{H2}</math> (рис. IO)</p> $\Delta t_3 = K_{H2} \cdot \Delta t_{30}$
<p>Герметичный</p> 	<p>II - I4</p>	<p>В формуле (I3) <math>K_B = K_G = 0</math>, так как конвективная теплопередача отсутствует. Аналогично предыдущему</p> $\Delta t_3 = K_{H2} \cdot \Delta t_{30}$
<p>Перфорированный</p> 	<p>II, I2, I3a</p>	<p>Отсутствует теплообмен излучением. Изменение давления учитывается с помощью коэффициента <math>K_{H1}</math> (рис. II)</p>
<p>Перфорированный</p> 	<p>II, I2, I3a</p>	$\Delta t = K_{H1} \cdot \Delta t_0$
<p>Негерметичный без перфорации</p> 	<p>Порядок расчета зависит от положения плат в нагретой зоне. Аналогичен герметич. блоку</p>	<p>Изменение давления в блоке и окружающей среде учитывается с помощью коэффициентов <math>K_{H1}</math> и <math>K_{H2}</math> (рис. IO и II)</p> $\Delta t_3 = K_{H1} \cdot \Delta t_0 + K_{H2} \cdot \Delta t_{30}$



порядок расчета температуры нагретой зоны.

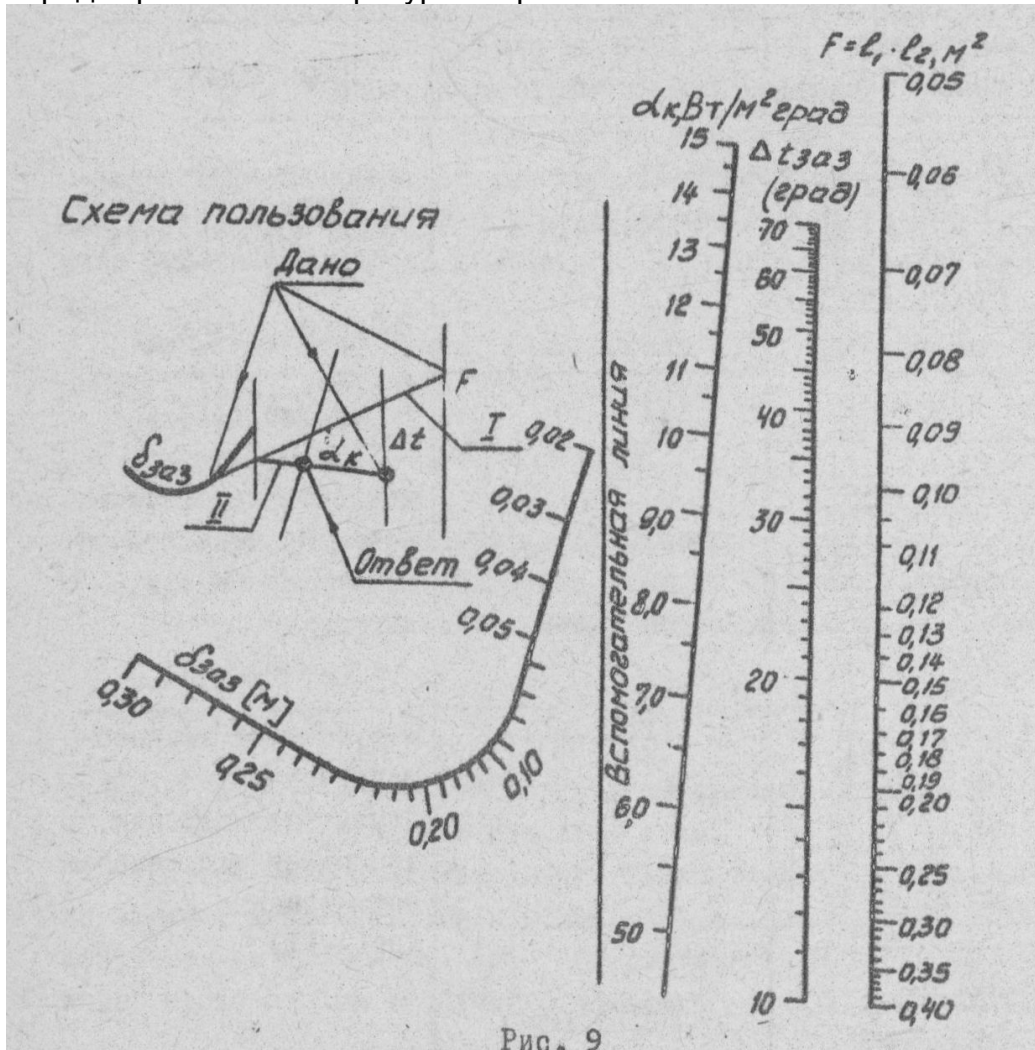


Рис. 9

На третьем этапе расчета определяется перепад температур между поверхностью нагретой зоны и КС или ЭРЭ.

Чтобы определить перепад температуры для ИС, нужно вычислить эквивалентный радиус  $R$  ИС:

$$R = \sqrt{\frac{S_{ИС}}{\pi}} ; \quad (19)$$

приведенный коэффициент теплоотдачи  $m$  :

$$m = \sqrt{\frac{17}{S \cdot \lambda_{II}}} ; \quad (20)$$

перегрев  $\Delta t_{uc}$  поверхности ИС:

$$\Delta t_{uc} = \Delta t_3 + K \left[ \frac{Q_3}{\kappa_{\alpha}(S_3 - S_{uc}) + \frac{1}{\frac{\delta_3}{\lambda_3 \pi R^2} + \frac{1}{B + \pi M R \lambda_{II} \cdot \delta \cdot m K_1(mR) / K_0(mR)}}}} \right] +$$

$$\sum_{i=1}^{N_{ис}} \frac{\rho_{эi}}{\alpha_i (S_{эi} - S_{исi}) \left\{ 1 + \left[ \frac{3z_i}{\lambda_p R_i^2} + \frac{1}{\alpha_i (S_{эi} - S_{исi})} \right] \left( B_i + \pi M R_i \lambda_n \delta m \frac{K_1(m R_i)}{K_0(m R_i)} \right) \right\}} \times \frac{K_0(m z_i)}{K_0(m R_i)}, \quad (21)$$

где  $K$  - эмпирический коэффициент  $K = 1,14$  для микросхем, центр которых отстоит от торцов печатной платы на расстоянии меньше  $3R$ , и  $K = 1$  для микросхем, центр которых отстоит от торцов печатной платы на расстоянии больше  $3R$ ;

$K_\alpha$  - коэффициент, учитывающий теплоотдачу от корпусов ИС. Определяют по рис. 12;

$K_0$  и  $K_1$  - модифицированные функции Бесселя. Определяются по табл.

- число  $L$  -х ИС, расположенных вокруг рассчитываемой ИС,  $N_{ис}$  для которых  $m z_i \leq 10$ .

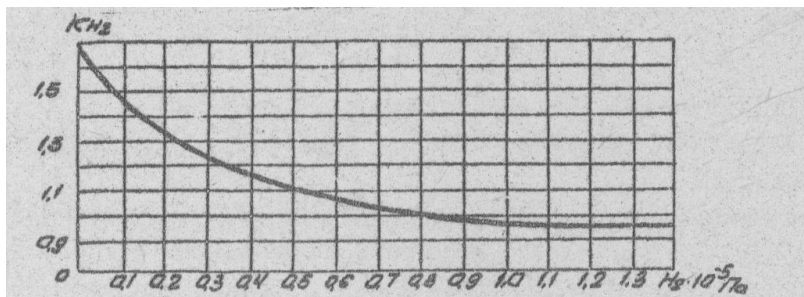


Рис. 10

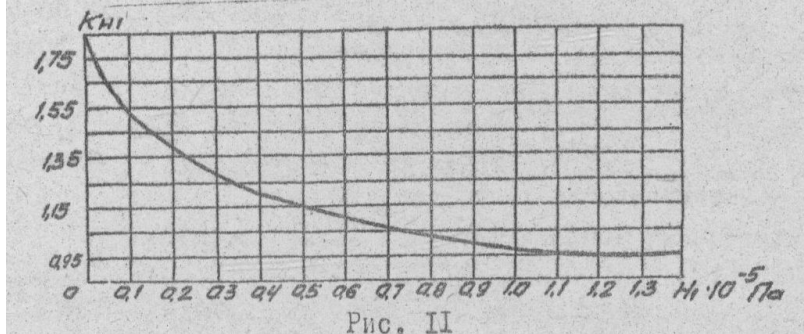


Рис. 11

Значения коэффициента теплопроводности материала  $\lambda_3$ , заполняющего зазор, и коэффициента теплопроводности платы  $\lambda_n$  определяются по табл. 6.

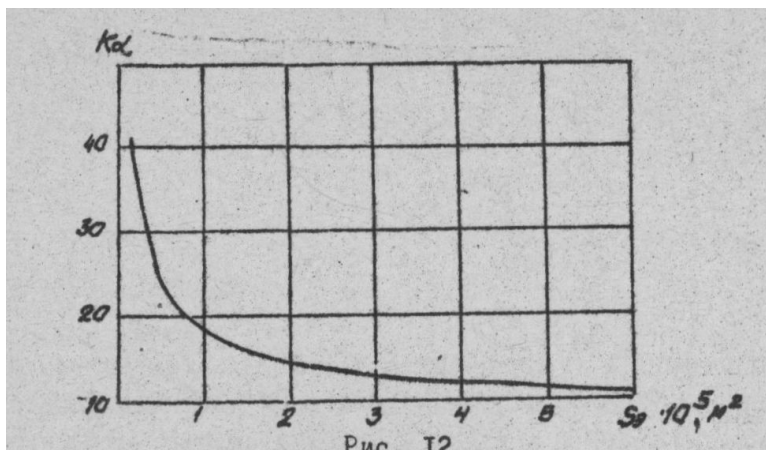


Рис. 12

При одностороннем расположении ИС в ячейке или  $\beta = 8,5 \sqrt{R^2}, M = 2$ ; при двухстороннем расположении ПС в ячейке  $\beta = 0, M = 1$ , Температура ИС

$$t_{uc} = t_0 + \Delta t_{uc} \quad (22)$$

Перегрев воздуха для данной ИС

$$\Delta t_B = \Delta t_{uc} \frac{\rho_3}{\kappa_\alpha (S_3 - S_{uc}) + \frac{1}{\delta_3 / \lambda_3 \sqrt{R^2 + 1} \{ \beta + \sqrt{M R} \lambda_n \cdot \delta m \kappa_1 (mR) / \kappa_0 (mR) \}}} \quad (23)$$

Температура воздуха для микросхемы  $t_B = t_0 + \Delta t_B$ . В случае определения перепада температуры для дискретного ЭРЭ вычисляют:

плотность теплового потока с единицы поверхности ЭРЭ

$$q_3 = P_3 / S_3; \quad (24)$$

лучистый коэффициент теплообмена для элемента

$$\alpha_1 = 0,2 \left[ \frac{0,5(\Delta t_3^2 - \Delta t_{H3}) + \Delta t_B + 273}{100} \right]^3, \quad (25)$$

где  $\Delta t_3$  - перепад температур между поверхностью ЭРЭ и средой в зазоре в первом приближении,  $t_0$ ; определяется по рис. 13;  $\Delta t_B$  - перегрев воздуха в зазоре.

Конвективный коэффициент теплоотдачи от ЭРЭ

$$\alpha_k = 1,32 \sqrt[4]{\Delta t_3^2 / M_3}, \quad (26)$$

где  $M_3$  - определяющий размер ЭРЭ. Для горизонтально ориентированных цилиндров  $M_3$  равен максимальному диаметру элемента; для ЭРЭ, имеющих форму параллелепипеда 18 и вертикально ориентированных цилиндров,  $M_3$  равен

размеру ЭРЭ в направлении движения воздуха.

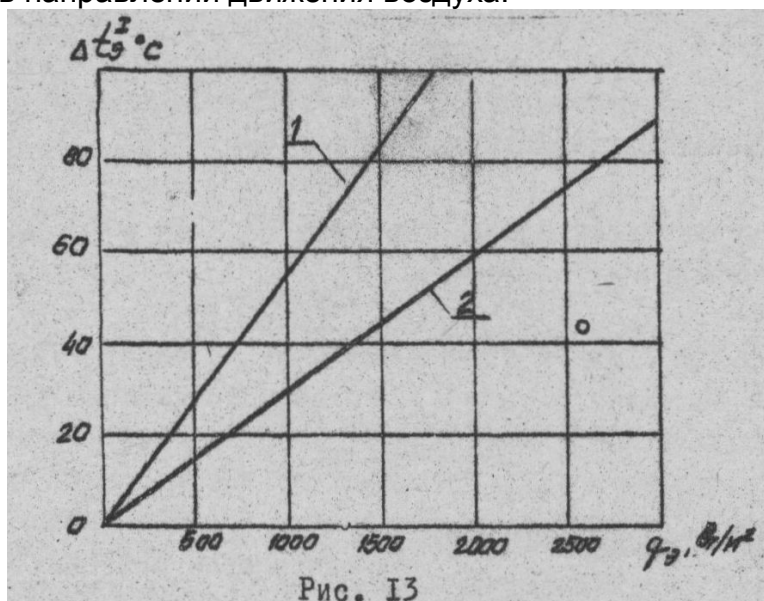


Рис. 13

Перепад температур между поверхностями ЭРЭ и нагретой зоны

$$\Delta t_3 = \begin{cases} \Delta t_8 + \frac{P_3}{(\alpha_1 + \alpha_k) S_3} & \text{при } \Delta t_9^I > \Delta t_3, \\ \Delta t_8 + \frac{P_3 + \alpha_1 (\Delta t_3 - \Delta t_9^I) S_3}{\alpha_k S_3} & \text{при } \Delta t_9^I < \Delta t_3. \end{cases} \quad (27)$$

Температура поверхности ЭРЭ  $t_3 = t_0 + \Delta t_3$

Перегрев воздуха для данного элемента  $\Delta t_{83} = 0,67 \Delta t_3$ . (28)

Температура воздуха для ЭРЭ  $t_8 = t_0 + \Delta t_{83}$

Если  $t_{ис}$  или  $t_3$  превышает допустимую температуру для данного типа ИС или ЭРЭ, то естественное охлаждение не обеспечивает нормальный тепловой режим блока и необходимо увеличить зазор между платами или использовать принудительное охлаждение блока.

### СТАЦИОНАРНЫЙ ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ЭЛЕКТРОННОГО БЛОКА ПРИ ПРИНУДИТЕЛЬНОМ ВОЗДУШНОМ ОХЛАЖДЕНИИ

На расстоянии  $x$  площадь сечения свободного канала

$$f_k = l_n \cdot \Delta - \sum_{i=1}^n x^0 l_{эиi} l_{эви} \quad (29)$$

Эквивалентный диаметр канала

$$d_э = \frac{cf}{l_n + \Delta + \sum_{j=1}^n x_{эj}} \quad (30)$$

$l_n$  и  $l_{эj}$  в формулах (29), (30) - размеры платы и ИС, перпендикулярные направлению движения воздуха, м;  $l_{эc}$  - высота ИС, м.

При притяжной вентиляции перегрев воздуха в сечении канала с рассчитываемым элементом

$$\Delta t_{вэ} = \frac{(N_{uc} + i) \left( \sum_{j=1}^n P_{эj} + 2P_в \right)}{1000 G}, \quad (31)$$

при вытяжной вентиляции

$$\Delta t_{вэ} = \frac{(N_{uc} + 1) \sum_{j=1}^n P_{эj}}{1000 G} \quad (31a)$$

При суммировании учитывают мощность  $P_{эj}$  элементов, расположенных перед рассчитываемым элементом по направлению воздушного потока в том же канале.

Температура воздуха в сечении канала с рассчитываемым элементом

$$t_{вэ} = t_0 + \Delta t_{вэ} \quad (32)$$

Под каналом здесь понимается часть блока, ограниченная поверхностями соседних ячеек или ТЭЗов и свободная для циркуляции воздуха.

Критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{G \cdot d_э}{\mu \cdot f(N+1)}, \quad (33)$$

где  $\mu$  - коэффициент динамической вязкости воздуха при температуре  $t_{вэ}$ , кг.м<sup>-1</sup>.с<sup>-1</sup>, определяется по табл. 5;

$\rho$  - плотность воздуха при температуре  $t_{вэ}$ , кг.м<sup>-3</sup>.

Для каналов с элементами в прямоугольных корпусах со штыревыми выводами при  $Re \leq 944$  коэффициент теплообмена в канале с рассчитываемым элементом

$$\alpha_T = 0,29 \lambda_B Re^{0,5} d_э^{-1}, \quad (34)$$

$$\text{при } 944 < Re \leq 10^4 \quad \alpha_T = 0,037 \lambda_B \cdot Re^{0,8} d_э^{-1} \quad (35)$$

Для каналов с ИС и ЭРЭ в цилиндрических корпусах

$$\text{при } Re \leq 944 \quad \alpha_T = 0,39 \cdot \lambda_B \cdot Re^{0,5} \cdot d_э^{-1} \quad (36)$$

$$\text{при } 944 < Re \leq 10^4 \quad \alpha_T = 0,051 \cdot \lambda_B \cdot Re^{0,8} \cdot d_э^{-1} \quad (37)$$

Для каналов с элементами в плоских корпусах с планарными выводам

$$\text{при } Re \leq 2000 \quad \alpha_1 = 0,25 \cdot \lambda_B \cdot Re^{0,5} \cdot d^{-1}; \quad (38)$$

$$\text{при } 2000 < Re \leq 10^4 \quad \alpha_1 = 0,026 \cdot \lambda_B \cdot Re^{0,8} \cdot d^{-1}; \quad (39)$$

Для гладких каналов из печатных плат без навесных элементов

$$\text{при } 10 < Re < 10^4 \quad \alpha_1 = 1,4 \cdot \lambda_B \cdot d^{-1} \left( Re \frac{d^3}{l_1} \right)^{0,4}; \quad (40)$$

$$\text{при } 10^4 \leq Re < 5 \cdot 10^6 \quad \alpha_1 = 0,021 \cdot \lambda_B \cdot Re^{0,8} \cdot d^{-1}; \quad (41)$$

где  $\lambda_B$  - коэффициент теплопроводности воздуха при температуре  $t_{B3}$ , определяется по табл. 5.

Затем, повторяя расчеты первого этапа [формулы (29)-(41)], определяют коэффициент теплоотдачи  $\alpha_2$  в соседнем канале, одной из стенок которого служит обратная сторона печатной платы с рассчитываемым элементом.

На втором этапе расчета определяется температура ИС и ЭРЭ в ячейке или ТЭЭе.

При расчете температуры ИС определяются:

- 1) эквивалентный радиус  $R$  ИС - по формуле (19);
- 2) приведенный коэффициент теплоотдачи  $m$  ; при одностороннем расположении ИС в ячейке

$$m = \sqrt{\frac{\alpha_1 \alpha_2}{\lambda_n \delta}}, \quad (42)$$

при двухстороннем расположении ИС в ячейке

$$m = \sqrt{\frac{2\alpha_1}{\lambda_n \delta}}; \quad (43)$$

3) перегрев поверхности ИС:

$$\Delta t_{uc} = \frac{P_{33}}{\alpha_1 (S_3 - S_{ouc}) + \frac{\delta_3}{\lambda_3 \pi R^2} + \frac{1}{B + \pi M R \lambda_n \delta \cdot m K_1(mR) / K_0(mR)}} + \sum_{i=1}^{Nuc} \frac{K_0 m z_i}{K_0 m z_i} \times \frac{P_{33i}}{\alpha_1 (S_{3i} + S_{33i}) \left\{ 1 + \left[ \frac{\delta_{3i}}{\lambda_3 \pi R^2} + \frac{1}{\alpha_1 (S_{3i} - S_{33i})} \right] (B + \pi M R \lambda_n \delta \cdot m K_1(mR) / K_0(mR)) \right\}}, \quad (44)$$

где величины  $B, M, K_1, K_0$  имеют то же значение, что и в формуле (21):

$C = \alpha_2 \pi R^2$  при одностороннем расположении ПС в ячейке;

$C = 0$  при двухстороннем расположении ИС в ячейке;

$N_{uc}$  - число  $i-x$  КС, расположенных вокруг рассчитываемой ИС, для которых  $m_{z, \leq 8}$ .

Температура поверхности ИС

$$t_{uc} = t_{B3} + \Delta t_{uc} \quad (45)$$

При расчете температуры ЭРЭ определяются;

1) критерий Рейнольдса для ЭРЭ

$$Re_3 = \frac{\rho G}{(N+1)\mu_f} \quad (46)$$

где  $\rho$  - половина периметра ЭРЭ по направлению движения воздуха, м;

2) коэффициент теплоотдачи для ЭРЭ

$$\alpha_3 = 0,8 \frac{\lambda_B}{\rho} \sqrt{Re_3} \quad (47)$$

3) перегрев поверхности ЭРЭ

$$\Delta t_3 = \Delta t_{B3} + \frac{P_3}{\alpha_3 S_3} \quad (48)$$

4) температура поверхности ЭРЭ

$$t_3 = t_0 + \Delta t_3 \quad (49)$$

5) максимальный перегрев воздуха в блоке при протяжной вентиляции

$$\Delta t_{Bmax} = \frac{P + 2P_B}{1000G} \quad (50)$$

при вытяжной вентиляции

$$\Delta t_{Bmax} = P/1000G \quad (51)$$

#### ПРИМЕР РАСЧЕТА ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ЭЛЕКТРОННОГО БЛОКА

Электронный блок в интегральном исполнении имеет форму параллелепипеда. Перфорированный корпус блока выполнен из листового дюралюминия толщиной 1 мм и покрашен эмалевой краской. Нагретая зона представляет собой четыре многослойные печатные платы с ИС, вставляемые в пазы корпуса блока с прижимом.

исходные данные:

$$P = 15 \text{ Вт}; \quad L_f = 0,176 \text{ м}; \quad L_r = 0,156 \text{ м}; \quad S_{uc} = 0,04 \cdot 10^{-4}$$

$$\begin{aligned}
 \rho_3 &= 1,25 \text{ Вт}; & L_2 &= 0,095 \text{ м}; & \ell_2 &= 0,075 \text{ м}; & S_3 &= 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \\
 t_0 &= 22^\circ\text{С}; & L_3 &= 0,072 \text{ м}; & \delta &= 0,003 \text{ м}; & \delta_3 &= 0 \\
 \rho_0 = \rho_\delta &= & \kappa_n &= 0,25; & \ell &= 0,052 \text{ м}; \\
 = 9,8 \cdot 10^4 \text{ Па}; & & \Delta &= 0,01 \text{ м}; \\
 & & \lambda_n &= 0,372 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{град}^{-1}.
 \end{aligned}$$

Первый этап расчета. Найдем площади поверхностей корпуса блока и нагретой зоны;

$$\begin{aligned}
 S_B = S_H &= L_1 L_2 = 0,176 \cdot 0,095 = 1,68 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2; \\
 S_\delta &= 2(L_1 + L_2)L_3 = 2(0,176 + 0,095) \cdot 0,072 = 3,91 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2; \\
 S_K &= 2S_B + S_\delta = 5,59 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2; \text{аналогично} \\
 S_{B_{H3}} = S_{H_{H3}} &= 0,156 \cdot 0,075 = 1,17 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2; & S_{\delta_{H3}} &= 2,26 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2 \\
 \text{Эквивалентные площади, определяемые по формуле (14):} \\
 S'_B = S'_H &= 1,42 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2; & S'_\delta &= 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2. & S_{H3} &= 5,56 \cdot 10^{-2}.
 \end{aligned}$$

Задаемся величиной перегрева корпуса блока относительно окружающей среды  $\Delta t^I = 8^\circ\text{С}$ , тогда  $t_K = 30^\circ\text{С}$ , а определяющая температура  $t_m = 26^\circ\text{С}$ . На основании формулы (4) устанавливаем, что температура поверхностей блока подчиняется закону 1/4 степени. Тот же результат дает номограмма на рис. 2.

По формуле (5) определяем конвективные коэффициенты теплообмена верхней, нижней и боковой поверхностей корпуса. Определяющим размером верхней и нижней граней корпуса является  $L_2 = 0,095 \text{ м}$

По табл. I для температуры  $t_m = 26^\circ\text{С}$  находим коэффициент

$$A_{\text{г}}^I = 1,37 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{7/4} \cdot \text{град}^{5/4}.$$

Конвективные коэффициенты теплообмена верхней, нижней и боковой поверхности:

$$\begin{aligned}
 \alpha_{KB} &= 1,37 \cdot 1,37 \cdot (8/0,095)^{1/4} = 5,4 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{град}^{-1}; \\
 \alpha_{KH} &= 0,7 \cdot 1,37 \cdot (8/0,095)^{1/4} = 2,9 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{град}^{-1}; \\
 \alpha_{K\delta} &= 1,37 \cdot (8/0,072)^{1/4} = 4,45 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{град}^{-1}.
 \end{aligned}$$

По формуле (10) определяем лучистый коэффициент теплообмена корпуса. По номограмме на рис. 6 находим значение функции  $f' = 6,1 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{град}^{-1}$ . Степень черноты корпуса определяется по табл. 4.  $\epsilon = 0,92$ .

$$\alpha_n = 0,92 \cdot 6,1 = 5,61 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{град}^{-1}.$$

Полные коэффициенты теплообмена на основании формулы (3) равны:

$$\begin{aligned}
 \alpha_B &= 5,4 + 5,61 = 11,01 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{град}^{-1}; \\
 \alpha_H &= 2,9 + 5,61 = 8,51 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{град}^{-1}; \\
 \alpha_\delta &= 4,45 + 5,61 = 10,06 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{град}^{-1}.
 \end{aligned}$$

По формуле (2) найдем тепловую проводимость корпуса в пер-



вом приближении:

$$b_{\kappa}^I = (11,01 \cdot 1,68 + 8,51 \cdot 1,68 + 10,06 \cdot 3,91) \cdot 10^{-2} = 0,72 \text{ Вт.град}^{-1}.$$

С помощью графика на рис. 1 определяем  $\kappa_{\eta} = 0,615$ . По формуле (1а)

$$\Delta t = \frac{15 \cdot 0,615}{0,72} = 12,8^{\circ}\text{C}.$$

Расчетный перегрев значительно превышает принятый, поэтому необходимо провести расчет во втором приближении.

Зададимся  $\Delta t^{\eta} = 12^{\circ}\text{C}$ . Тогда  $t_{\kappa}^{\eta} = 34^{\circ}\text{C}$ ,  $t_m^{\eta} = 28^{\circ}\text{C}$ .

$$A_{\eta}^I = 1,35; \alpha_{\kappa B} = 6,0; \alpha_{\kappa H} = 3,2; \alpha_{\kappa D} = 4,9 \text{ Вт.м}^{-2} \cdot \text{град}^{-1}.$$

$$f_{\eta}^I = 6,40; \alpha_{\lambda} = 0,92 \cdot 6,40 = 5,88 \text{ Вт.м}^{-2} \cdot \text{град}^{-1}$$

$$\alpha_B = 6,0 + 5,88 = 11,88 \text{ Вт.м}^{-2} \cdot \text{град}^{-1};$$

$$\alpha_H = 3,2 + 5,88 = 9,08 \text{ Вт.м}^{-2} \cdot \text{град}^{-1};$$

$$\alpha_D = 4,9 + 5,88 = 10,78 \text{ Вт.м}^{-2} \cdot \text{град}^{-1}.$$

$$b_{\kappa}^{\eta} = (11,88 \cdot 1,68 + 9,08 \cdot 1,68 + 10,78 \cdot 3,91) \cdot 10^{-2} = 0,77 \text{ Вт.м}^{-2} \cdot \text{град}^{-1}$$

$$\Delta t = 15 \cdot 0,615 / 0,77 = 12^{\circ}\text{C}.$$

Второй этап расчета. Температура нагретой зоны, в первом приближении

$$t_{\text{нз}}^I = t_{\kappa} + 2,5 \Delta t = 34 + 2,5 \cdot 12 = 64^{\circ}\text{C}, \kappa_w = 1.$$

Считая, что рамка ТЭЗа выполнена из алюминия и прижимается к корпусу с усилием  $F = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ Н.м}^{-2}$ , по рис. 8 найдем

$$\kappa_3 = 1320 \text{ Вт.м}^{-2} \cdot \text{град}^{-1}; S_{\text{ПК}} = 0,08 \cdot 0,01 \cdot 0,01 = 8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3;$$

$$1/\kappa_3 S_{\text{ПК}} = 1/1320 \cdot 8 \cdot 10^{-6} = 94,75 > 4, \text{ тогда } \kappa_5 = 1.$$

$$\Delta t_{\text{нз}}^I = 64 - 34 = 30^{\circ}\text{C}.$$

По номограмме рис. 9 определяем,  $\alpha_3 = 9,4 \text{ Вт.м}^{-2} \cdot \text{град}^{-1}$ .

$$S_{\text{нз}} = 5,56 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2. \text{ Расчетное } \Delta t_3 = (0,615 \cdot 15) / (9,4 \cdot 5,56 \cdot 10^{-2}) = 17,8^{\circ}\text{C}.$$

Разность между принятой температурой перегрева  $\Delta t_3$  и рассчитанной велика. Во втором приближении примем  $\Delta t_3^{\eta} = 20^{\circ}\text{C}$ . Тогда  $\alpha_3 = 8,3 \text{ Вт.м}^{-2} \cdot \text{град}^{-1}$ . Расчетное  $\Delta t_3 = 19,6^{\circ}\text{C}$ .

Третий этап расчета. Расстояние между центром рассчитываемой ИС и центрами остальных ИС на плате определяется по чертежу ячейки или ТЭЗа (рис. 14). В данном примере количество ИС вокруг

рассчитываемой ИС, для которых  $m \tau_c \leq 10$ ,  $\lambda_{\text{ис}} = 9$ ,

$$\lambda_{\eta} = 0,372 \text{ Вт.м}^{-2} \cdot \text{град}^{-1}.$$

$\tau_7 = 0,05 \text{ м}$	$\tau_4 = 0,13 \text{ м}$	$\tau_7 = 0,105 \text{ м}$
$\tau_2 = 0,09 \text{ м}$	$\tau_5 = 0,105 \text{ м}$	$\tau_8 = 0,06 \text{ м}$
$\tau_3 = 0,1 \text{ м}$	$\tau_6 = 0,095 \text{ м}$	$\tau_9 = 0,04 \text{ м}$

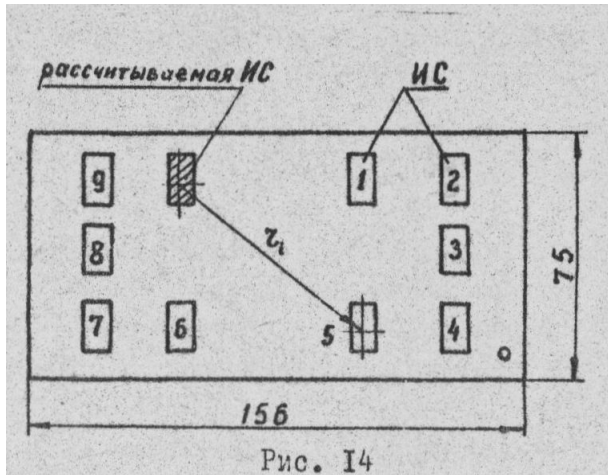


Рис. 14

По формуле (19) эквивалентный радиус ИС

$$R = \sqrt{\frac{8,64 \cdot 10^{-4}}{\pi}} = 1,66 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

По формуле (20)

$$m = \sqrt{\frac{17}{3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,372}} = 39.$$

Определим значения функций Бесселя:

$mR = 0,654$	$K_0(mR) = 0,7190$	$K_1(mR) = 1,1763$
$mz_1 = 1,95$	$K_0(mz_1) = 0,1214$	$K_1(mz_1) = 0,1458$
$mz_2 = 3,5$	$K_0(mz_2) = 0,0196$	$K_1(mz_2) = 0,0222$
$mz_3 = 3,9$	$K_0(mz_3) = 0,0125$	$K_1(mz_3) = 0,0140$
$mz_4 = 5,06$	$K_0(mz_4) = 0,0033$	$K_1(mz_4) = 0,0036$
$mz_5 = 4,1$	$K_0(mz_5) = 0,0099$	$K_1(mz_5) = 0,0111$
$mz_6 = 3,7$	$K_0(mz_6) = 0,0156$	$K_1(mz_6) = 0,0176$
$mz_7 = 4,1$	$K_0(mz_7) = 0,0099$	$K_1(mz_7) = 0,0111$
$mz_8 = 2,34$	$K_0(mz_8) = 0,0791$	$K_1(mz_8) = 0,0949$
$mz_9 = 1,56$	$K_0(mz_9) = 0,1880$	$K_1(mz_9) = 0,2406$

определяем по рис. 12 коэффициент, учитывающий теплоотдачу от корпуса ИС:  $K_\alpha = 14,2$ , Коэффициент  $K$ , учитывающий расстояние между рассчитываемой ИС и торцами печатной платы, равен 1,14.

Перегрев поверхности ИС определяется по формуле (21):

$$\Delta t_{\text{ис}} = 20 + 1,14 \left[ \frac{1,25}{14,2(2,2 \cdot 10^{-3} - 0,864 \cdot 10^{-3})} + \left[ \frac{1}{8,5\pi \cdot 1,66^2 \cdot 10^{-4} + 2\pi \cdot 0,0166 \cdot 0,372 \cdot 0,03} \right] \times \frac{1}{39 \cdot \frac{1,1763}{0,7190}} \right]$$

$$+18,03 \left( \frac{0,1214}{0,7190} + \frac{0,0196}{0,7190} + \frac{0,01248}{0,7190} + \frac{0,0033}{0,7190} + \frac{0,0099}{0,7190} + \frac{0,0156}{0,7190} + \frac{0,0099}{0,7190} + \frac{0,0791}{0,0790} + \frac{0,1880}{0,7190} \right) = 20 + 2,5 + 10,5 = 33^{\circ}\text{C}.$$

Здесь сомножитель под знаком суммы, учитывающий влияние соседних ИС (без суммы отношений функций Бесселя), для сокращения записи представлен числом 18,03. Для определения  $\Delta t_{\text{ис}}$  рекомендуется составлять таблицу вычислений отдельных составляющих выражения (21).

Температура поверхности ИС  $t_{\text{ис}} = 22 + 33 = 55^{\circ}\text{C}$ .

Полученную температуру необходимо сравнить с допустимой по ТУ для данного типа ИС. Если  $t_{\text{ис}} \geq t_{\text{доп}}$  следует применить принудительное охлаждение блока.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г.Н.Дульнев, Н.Н.Тарновский. Тепловые режимы электронной аппаратуры. Л., "Энергия", 1971.
2. Л.Л.Роткоп, Ю.Е.Спокойный. Обеспечение тепловых режимов при конструировании РЭА. М., "Сов.радио", 1976.
3. ОСТ4 ГО.012.032 ред. 1-73.

Таблица 4

## Степени черноты различных поверхностей

Материал	Степень черноты
Алюминиевая краска	0,28
Алюминиевая фольга	0,09
Алюминий грубополированный	0,18
Алюминий полированный	0,04 - 0,06
Бронза полированная	о 0,16
Бронзовая краска	0,51.
Дюралюминий Д-16	0,37 - 0,41
Железо	0,14 - 0,38
Ковар	0,80 - 0,85
Краски эмалевые	0,92
Лак белый	0,80 - 0,98
Лак черный	0,80 - 0,96 0, 06
Латунь листовая прокатанная	0,06
Латунь матовая тусклая	0,22
Медь окисленная	0,60 - 0,70
Медь полированная .	0,02
Муар черный	0,90
Олово (луженое железо)	0,07 - 0,09
Резина	0,86 - 0,95
Симуминовое литье	0,16 - 0,22
Стальное литье полированное	0,52 - 0,56
Сталь окисленная	0,80
Стекло	0,90 - 0,94
Титан	0,63
Фарфор глазурованный	0,92
Цинк	0,23 - 0,27
Цинк полированный	0,04 - 0,05
Шеллак черно-матовый	0,91
Окиси металлов	0,40-0,80

Таблица 5

Физические свойства сухого воздуха при давлении  $101,3 \cdot 10^3$  Па

$t, ^\circ\text{C}$	$C_p \cdot 10^{-3}, \text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{град}^{-1}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{град}^{-1}$	$\mu \cdot 10^5, \text{кг/мс}$
-50	1,013	2,035	1,462
-40	1,013	2,118	1,515
-30	1,013	2,198	1,570
-20	1,009	2,280	1,620
-10	1,009	2,361	1,669
0	1,005	2,442	1,718
5	1,005	2,471	1,741
10	1,005	2,514	1,767
15	1,005	2,546	1,791
20	1,005	2,566	1,815
25	1,005	2,627	1,841
30	1,005	2,674	1,865
35	1,005	2,715	1,885
40	1,005	2,756	1,910
45	1,005	2,784	1,935
50	1,005	2,819	1,963
55	1,006	2,854	1,985
60	1,007	2,888	2,015
65	1,008	2,923	2,032
70	1,009	2,958	2,061
75	1,009	2,998	2,085
80	1,009	3,039	2,109
85	1,009	3,080	2,128
90	1,009	3,120	2,150
95	1,009	3,161	2,166
100	1,009	3,202	2,189

Соотношения между единицами давления:

1 мм рт.ст. = 133,3 Па; 1 бар =  $10^5$  Па;1 кгс.см<sup>-2</sup> = 98070 Па

Таблица 6

## Теплофизические свойства материалов

Материал	$\rho, \text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$	$\lambda, \text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{град}^{-1}$	$c \cdot 10^{-3}, \frac{\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1}}{\text{град}}$
Алюминий	2700	210	0,900
Дюралюминий	2750	160-180	0,920
Железо (листовое)	7880	74,0	0,450
Керамика КПА-2 (Б-17)	2850	2,5-1,9	1,100
Керамика УША-2 (УФ-61)	3450	22,0-13,0	1,00
Компаунд Д-38	1200-2000	0,65	-
Компаунд ЭК-16	1350	0,3-0,35	1200-1400
Лак бакелитовый	1400	0,29	-
Латунь	8600	86,5	0,376
Магний	1700	172,1	1,06
Медь	8930	390-380	0,380
Резина пористая.	250	0,060	2,05
Резина твердая	1200	0,160	1,380
Пенопласт	100-230	0,05-0,06	-
Сталь	7900	45,0	0,470
Стеклотекстолит	1800.	0,372	0,420

Таблица 7

## Бесселевы (цилиндрические) функции

$x$	$K_0(x)$	$K_1(x)$	$x$	$K_0(x)$	$K_1(x)$
0,1	2,4271	9,8538	1,2	0,3185	0,4346
0,2	1,7527	4,7760	1,3	0,2782	0,3725
0,3	1,3725	3,0560	1,4	0,2437	0,3208
0,4	1,1145	2,1844	1,5	0,2138	0,2774
0,5	0,9244	1,6564	1,6	0,1880	0,2406
0,6	0,7775	1,3028	1,7	0,1655	0,2094
0,7	0,6605	1,0503	1,8	0,1459	0,1826
0,8	0,5553	0,8618	1,9	0,1288	0,1597
0,9	0,4867	0,7165	2,0	0,1139	0,1399
1,0	0,4210	0,6019	2,1	0,1009	0,1227
1,1	0,3655	0,5098	2,2	0,08927	0,1079

X	$\kappa_0(X)$	$\kappa_1(X)$	X	$\kappa_0(X)$	$\kappa_1(X)$
2,3	0,07914	0,09498	6,2	0,001003	0,001081
2,4	0,07022	0,08372	6,3	0,0009001	0,000969
2,5	0,06235	0,07389	6,4	0,0008083	0,000869
2,6	0,05540	0,06528	6,5	0,0007259	0,000779
2,7	0,04926	0,05774	6,6	0,0006520	0,0006998
2,8	0,04382	0,05111	6,7	0,0005857	0,0006280
2,9	0,03901	0,04529	6,8	0,0005262	0,0005636
3,0	0,03474	0,04016	6,9	0,0004728	0,0005059
3,1	0,03095	0,03563	7,0	0,0004248	0,0004542
3,2	0,02759	0,03164	7,1	0,0003817	0,0004078
3,3	0,02461	0,02812	7,2	0,0003431	0,0003662
3,4	0,02196	0,02500	7,3	0,0003084	0,0003288
3,5	0,01960	0,02224	7,4	0,0002772	0,0002953
3,6	0,01750	0,01979	7,5	0,0002492	0,0002653
3,7	0,01563	0,01763	7,6	0,0002240	0,0002383
3,8	0,01397	0,01571	7,7	0,0002014	0,0002141
3,9	0,01248	0,01400	7,8	0,0001811	0,0001924
4,0	0,01116	0,01248	7,9	0,0001629	0,0001729
4,1	0,00998	0,01114	8,0	0,0001465	0,0001554
4,2	0,008927	0,009938	8,1	0,0001317	0,0001396
4,3	0,007988	0,008872	8,2	0,0001185	0,0001255
4,4	0,007149	0,007923	8,3	0,0001066	0,0001128
4,5	0,006400	0,007078	8,4	0,0000958	0,0001014
4,6	0,005730	0,006325	8,5	0,0000863	0,0000912
4,7	0,005132	0,005654	8,6	0,0000776	0,0000820
4,8	0,004597	0,005055	8,7	0,0000698	0,0000737
4,9	0,004119	0,004521	8,8	0,0000628	0,0000663
5,0	0,003691	0,004045	8,9	0,0000565	0,0000596
5,1	0,003308	0,003619	9,0	0,0000509	0,0000536
5,2	0,002966	0,003239	9,1	0,0000458	0,0000482
5,3	0,002659	0,002900	9,2	0,0000412	0,0000434
5,4	0,002385	0,002597	9,3	0,0000371	0,0000390
5,5	0,002139	0,002326	9,4	0,0000334	0,0000351
5,6	0,001918	0,002083	9,5	0,0000300	0,0000316
5,7	0,001721	0,001866	9,6	0,0000271	0,0000284
5,8	0,001544	0,001673	9,7	0,0000244	0,0000256
5,9	0,001386	0,001499	9,8	0,0000219	0,0000230
6,0	0,001244	0,001344	9,9	0,0000197	0,0000207
6,1	0,001117	0,001205	10,0	0,0000178	0,0000186

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	3
Исходные данные .....	3
Стационарный тепловой режим электронного блока при естественной конвекции .....	4
Стационарный тепловой режим электронного блока при принудительном воздушном охлаждении .....	19
Пример расчета теплового режима электронного блока .....	22
Литература .....	26



Редактор Л.Н.Толстой

Корректор Л.И.Малютина

Заказ 218

Объем **2 п.л(1,75усл.- п.Тираж 400 экз.**

Бесплатно Подписано к печати 13.02.80.План 1980, письмо

Минвуза t№96-07-566/26

. от 07.12.79 г.

Ротапринт МВТУ. 107005, Москва, Б-5, 2-я Бауманская, 5.

**Бесплатно.**