

Государственный комитет СССР по народному образованию

Московский государственный технический университет  
имени Н.Э.Баумана

Э.Н.Коминин, В.В.Маркелов, В.П. Усачов

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА БЛОКА РЭС  
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ

Лабораторная работа

Учебное пособие по курсу "Конструирование РЭС"

Под редакцией Е.М.Парфенова

Москва 1991



Государственный комитет СССР по народному образованию

Московский государственный технический университет

имени Н. Э. Баумана

Э. Н. Камышная, В. В. Маркелов, В. П. Усачов

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА БЛОКА РЭС

ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ

Лабораторная работа

Учебное пособие по курсу "Конструирование РЭС"

Под редакцией Е. М. Парфенова

Москва 1991



Данное учебное пособие издается в соответствии с учебным планом. Учебное пособие рассмотрено и одобрено кафедрой ИУ-4 15.10.90, методической комиссией факультета ИУ и учебно-методическим управлением.

Рецензент доктор техн. наук, профессор В.А. Овчинников

Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Цель работы
2. Расчет стационарного теплового режима блока при естественном конвективном теплообмене
3. Программа расчета теплового режима блока РЭС
  - 3.1. Исходные данные для расчета температуры кожуха блока
  - 3.2. Исходные данные для расчета нагретой зоны блока
  - 3.3. Исходные данные для расчета температуры МС и ЭРЭ
4. Порядок выполнения лабораторной работы
  - 4.1. Порядок измерения температуры нагретой зоны и корпуса ЭРЭ
5. Содержание отчета
6. Контрольные вопросы

Литература

Приложение. Контрольный пример

Редактор *Ал-*

Корректор *Гера*

Заказ 128

Объем

Тираж 300 (50) экз.

Бесплатно

Типография ИИЭИИ

121471, Москва, ул. Варежская, 41

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью данной работы является ознакомление с методами расчета теплового режима блоков радиоэлектронных средств (РЭС) на стадиях технического и рабочего проектирования.

В данной работе студенты проводят расчет теплового режима блока РЭС при использовании программы, составленной на языке БЭЙСИК для ПЭЕМ типа IBM PC(AT/XT). Имеется возможность диалогового режима работы с программой, что позволяет в зависимости от полученных результатов принимать решения о конструктивных изменениях и о пересчете по программе при новых исходных данных и тем самым сократить время получения конечного результата.

Пример расчета приведен в приложении к настоящей работе.

Результаты расчета теплового режима блока сравниваются с результатами эксперимента.

### 2. РАСЧЕТ СТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА БЛОКА ПРИ ЕСТЕСТВЕННОМ КОНВЕКТИВНОМ ТЕПЛООБМЕНЕ

Модуль 2-го уровня (блок, прибор) представляет собой сложную систему тел с множеством внутренних источников теплоты. Точное аналитическое описание температурных полей внутри блока невозможно из-за громоздкости задачи и неточности исходных данных: мощности источников теплоты, теплофизических свойств материалов, размеров границ и т.д.. Поэтому при расчете теплового режима блоков РЭС используют приближенные методы анализа.

Целью расчета является определение температуры нагретой



той зоны и среды вблизи поверхности электрорадиоэлемента (ЭРЭ), необходимые для оценки надежности. Рекомендуется проводить расчет для наиболее критичного ЭРЭ, допустимая положительная температура которого имеет наименьшее значение среди всех ЭРЭ, входящих в состав устройства и образующих нагретую зону.

Конструкция РЭС заменяется ее физической тепловой моделью, в которой нагретая зона представляется в виде параллелепипеда, имеющего среднюю поверхностную температуру  $t_{нз}$  и рассеиваемую тепловую мощность  $P_{нз}$ . На рис. 1 представлены тепловые модели блоков РЭС. За размеры нагретой зоны принимаются размеры шасси

$l_1$  и  $l_2$  и высота  $l_3$ , которая определяется по формуле:

$$l_3 = \delta_{ш} + h_{31} + h_{32},$$

где  $\delta_{ш}$  — толщина шасси;

$h_{31}$  и  $h_{32}$  — части высоты нагретой зоны, расположенные со стороны шасси в 1-м и 2-м отсеках, на которые шасси делит блок РЭС.

Размеры  $h_{31}$  и  $h_{32}$  определяются по формуле

$$h_{3j} = \sum_{i=1}^n V_i / (l_1 \cdot l_2),$$

где  $j$  — номер отсека блока  $j = 1, 2$ ;

$V_i$  — объем  $i$ -й детали в  $j$ -м отсеке;

$n_j$  — количество деталей в  $j$ -м отсеке.

Большая часть РЭС имеет блоки разъемной, кассетной или книжной конструкции с плотной компоновкой. В зависимости от ориентации модулей 1-го уровня и величины воздушных зазоров между ними различают три группы конструкций по характеру теплообмена в них [2], отличительные особенности которых приведены в табл. 1.

Выбор той или иной группы осуществляется эмпирически исходя из опыта разработок и здравого смысла. Наиболее общим случаем является вторая группа конструкций

# Классификация конструкций в зависимости от характера теплообмена

Таблица 1.

Группа конструкций	Вид теплообмена между модулями 1-го уровня	Вид теплообмена между нагретой зоной и корпусом
1	излучение, теплопроводность	Конвекция, излучение, теплопроводность
2	Конвекция, излучение, теплопроводность	Излучение, конвекция, теплопроводность
3	Излучение, теплопроводность	Излучение, теплопроводность

Тепловая модель блока РЭС плотной компоновки приведена на рис. 2.

Расчет теплового режима блока можно условно разделить на три этапа:

1-й этап — определение температуры корпуса  $t_k$ ;

2-й этап — определение среднюю поверхностную температуру нагретой зоны  $t_{нз}$ ;

3-й этап — определение температуры поверхности электрорадиоэлемента (микросхемы, ЭРЭ).

Для выполнения первых двух этапов расчета теплового режима необходимы следующие исходные данные:

размеры корпуса — ширина  $l_1$ , глубина  $l_2$ , высота  $l_3$ ;

размеры нагретой зоны  $l_1 \times l_2 \times l_3$ ;

величины воздушных зазоров между нагретой зоной и нижней поверхностью корпуса  $h_n$ , нагретой зоной и верхней поверхностью корпуса  $h_s$ ;

площадь перфорационных отверстий  $S_H$ ;

мощность, рассеиваемая блоком в виде теплоты  $P_0$ ;



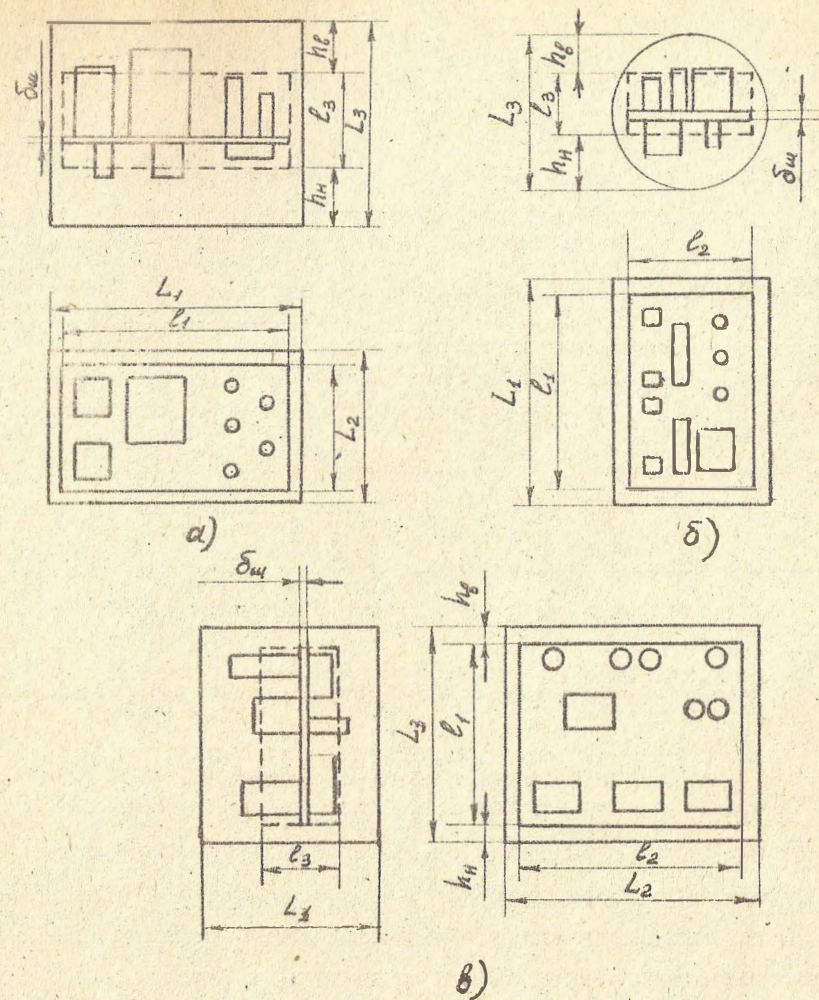


Рис.1. Тепловые модели блоков РЭА в виде параллелепипедов с горизонтально (а) и вертикально (в) ориентированным шасси и в виде цилиндра

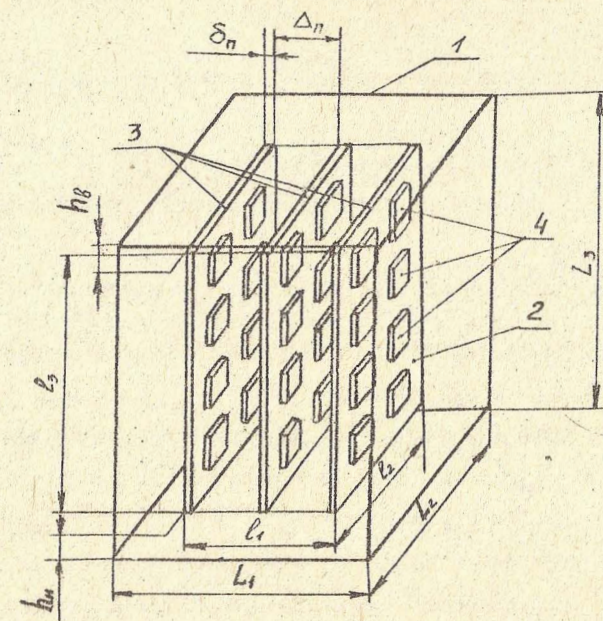


Рис.2. Тепловая модель блока РЭА плотной компоновки:  
1 - корпус; 2 - нагретая зона; 3 - модуль I-ого уровня; 4 - радиоэлемент (микросборка, микросхема, ЭРЭ)



мощность радиоэлементов, расположенных непосредственно на корпусе  $P_k$ ;

базовая температура  $t_0$ , т.е. температура окружающей среды;

теплофизические параметры воздуха и материалов конструкции блока.

Этап I. Определение температуры корпуса.

1. Рассчитывается удельная поверхностная мощность корпуса блока  $q_k$ :

$$q_k = P_0 / S_k, \quad (3)$$

где  $S_k$  — площадь внешней поверхности корпуса блока,

$$S_k = 2(L_1 L_2 + L_2 L_3 + L_1 L_3).$$

2. Из графика на рис. 3 задается значение перегрева корпуса блока в первом приближении  $\Delta t_k$ .

3. Определяется коэффициент лучеиспускания для верхней  $\epsilon_{\text{до}}$ , боковой  $\epsilon_{\text{бб}}$  и нижней  $\epsilon_{\text{ни}}$  поверхностей корпуса:

$$\epsilon_{\text{ни}} = \epsilon_i \cdot 5,67 \left[ \left( \frac{t_0 + \Delta t_k + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_0 + 273}{100} \right)^4 \right] / \Delta t_k, \quad (4)$$

где  $\epsilon_i$  — степень черноты  $i$ -й наружной поверхности корпуса, определяемая в зависимости от материала (см. табл. 2).

Таблица 2

Степень черноты различных поверхностей

Материал	$\epsilon$	Материал	$\epsilon$
I	2	3	4
Алюминий полированный	0,05	Платина	0,1
Алюминий окисленный	0,25	Резина твердая	0,95
Алюминий грубополированный	0,18	Резина мягкая	0,86
Алюминевая фольга	0,09	Серебро полированное	0,05
Асбестовый картон	0,96	Сталь никелированная	0,11

Продолжение таблицы 2

Бронза полированная	0,16	сталь окисленная	0,8
Бумага	0,92	Стальное литье	0,54
Вольфрам	0,05	Сажа	0,96
Графит	0,75	Стекло	0,92
Дюралюминий (Д16)	0,39	Силумин	0,25
Железо полированное	0,26	Титин	0,63
Золото	0,10	Фарфор	0,92
Ковар	0,82	Хром полированный	0,10
Краски эмаливые	0,92	Цинк	0,25
Лак	0,88	Шеллак черный матовый	0,91
Латунь полированная	0,03		
Латунь прокатная	0,20		
Медь полированная	0,02		
Медь окисленная	0,65		
Муар	0,9		
Масляные краски	0,92		
Никель полированный	0,08		
Олово (луженое кровельное железо)	0,08		

4 Для определяющей температуры  $t_m = t_0 + 0,5 \Delta t_k$  рассчитывается число Грасгофа  $Gr$  для каждой поверхности корпуса

$$Gr_{mi} = \beta_m g \frac{L_{\text{оп}i}^3}{\nu_m^2} \Delta t_k, \quad (5)$$

где  $L_{\text{оп}i}$  — определяющий размер  $i$ -й поверхности корпуса,

$\beta_m$  — коэффициент объемного расширения, для газов  $\beta_m = (t_m + 273)^{-1}$ ,

$g$  — ускорение свободного падения,  $g = 9,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ ;

$\nu_m$  — кинетическая вязкость газа, для воздуха определяется из табл. 3.



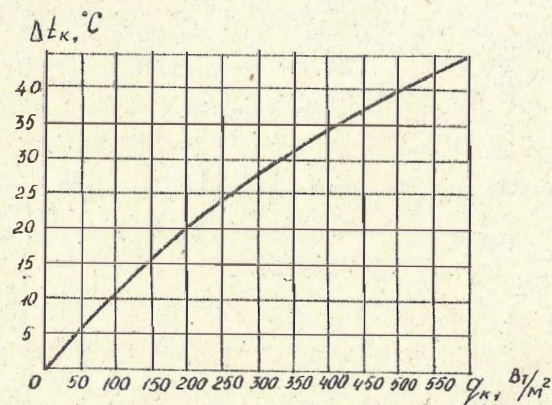


Рис.3. Зависимость перегрева корпуса блока от удельной поверхностной мощности

Индекс  $m$  означает, что все параметры соответствуют определяющей температуре  $t_m$ .

Таблица 3

Теплофизические параметры сухого воздуха при давлении  $101,3 \cdot 10^5$  Па

$t_m, ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^3, \text{Вт/мК}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$Pr$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t_m, ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^3, \text{Вт/мК}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$Pr$	$\rho, \text{кг/м}^3$
-50	2,04	9,23	0,728	1,584	50	2,83	17,95	0,698	1,093
-20	2,28	12,79	0,716	1,39	60	2,90	18,97	0,696	1,09
0	2,44	13,28	0,707	1,295	70	2,97	20,02	0,694	1,029
10	2,51	14,16	0,703	1,247	80	3,05	21,09	0,692	1,00
20	2,60	15,06	0,703	1,205	90	3,13	22,10	0,690	0,972
30	2,68	16,00	0,701	1,165	100	3,21	23,13	0,688	0,946
40	2,76	16,96	0,699	1,128	120	3,34	25,45	0,686	0,893

5. Определяется число Прандтля  $Pr$  из табл.3 для определяющей температуры  $t_m$ .

6. Определяется режим движения газа и жидкости, обтекающих каждую поверхность корпуса:

$(Gr \cdot Pr)_m \leq 5 \cdot 10^2$  - режим, переходный к ламинар-

$5 \cdot 10^2 < (Gr \cdot Pr)_m \leq 2 \cdot 10^7$  - ламинарный режим;

$(Gr \cdot Pr)_m > 2 \cdot 10^7$  - турбулентный режим.

Рассчитываются коэффициенты теплообмена конвекцией для каждой поверхности корпуса блока  $\alpha_{ki}$ :

для переходного режима

$$\alpha_{ki} = 1,18 \frac{\lambda_m}{L_{опr}} (Gr \cdot Pr)_m^{1/8} \cdot Nu_i; \quad (6)$$

для ламинарного режима

$$\alpha_{ki} = 0,54 \cdot \frac{\lambda_m}{L_{опr}} (Gr \cdot Pr)_m^{1/4} \cdot Nu_i; \quad (7)$$

для турбулентного режима

$$\alpha_{ki} = 0,135 \frac{\lambda_m}{L_{опr}} (Gr \cdot Pr)_m^{1/3} \cdot Nu_i; \quad (8)$$



где  $\lambda_m$  — теплопроводность газа; для воздуха значения  $\lambda_m$  приведены в табл. 3.

$N_i$  — коэффициент, учитывающий ориентацию поверхности корпуса;

$$N_i = \begin{cases} 0,7 & \text{для нижней поверхности,} \\ 1 & \text{для боковой поверхности,} \\ 1,3 & \text{для верхней поверхности.} \end{cases}$$

8. Определяется тепловая проводимость между поверхностью корпуса и окружающей средой  $\sigma_k$

$$\sigma_k = (\alpha_{kH} + \alpha_{mH}) \cdot S_H + (\alpha_{kB} + \alpha_{mB}) \cdot S_B + (\alpha_{kV} + \alpha_{mV}) \cdot S_V, \quad (9)$$

где  $S_H$ ,  $S_B$ ,  $S_V$  — площади нижней, боковой и верхней поверхности корпуса соответственно

$$S_H = S_B = L_1 L_2; \quad S_V = 2 L_3 (L_1 + L_2).$$

Встречаются блоки РЭС с ребристыми поверхностями. В этом случае необходимо определить эффективный коэффициент теплообмена ребристой  $i$ -й поверхности  $\alpha_{\text{эри}}$ , который зависит от конструкции ребер и перегрева корпуса относительно окружающей среды. Определение  $\alpha_{\text{эри}}$  производится точно так же, как при расчете радиатора, методика которого приведена в работе /5/.

Определив эффективный коэффициент теплообмена  $\alpha_{\text{эри}}$  перейдет к расчету тепловой проводимости всего корпуса  $\sigma_k$ , которая состоит из суммы проводимостей ребристой  $\sigma_{k0}$  и ребристой  $\sigma_{kr}$  поверхностей

$$\sigma_k = \sigma_{k0} + \sigma_{kr},$$

где  $\sigma_{kr}$  — рассчитывается по формуле (9), но без учета ребристой поверхности;

$$\sigma_{kr} = 0,77 \alpha_{\text{эри}} \cdot S_{pi} \cdot N_i;$$

$S_{pi}$  — площадь основания ребристой поверхности;

$N_i$  — коэффициент, учитывающий ориентацию этой поверхности

9. Рассчитывается перегрев корпуса блока РЭС во втором приближении  $\Delta t_{k0}$ :

$$\Delta t_{k0} = \frac{P_0}{\sigma_k} \cdot K_{kp} \cdot K_{HI}, \quad (10)$$

где  $K_{kp}$  — коэффициент, зависящий от коэффициента перфорации корпуса блока  $K_p$ ;

$K_{HI}$  — коэффициент, учитывающий атмосферное давление окружающей среды. Графики для определения коэффициентов  $K_{kp}$  и  $K_{HI}$  представлены на рис. 4 и рис. 5.

Коэффициент перфорации определяется как отношение площади перфорационных отверстий  $S_p$  к сумме площадей верхней и нижней поверхности корпуса

$$K_p = S_p / (S_H + S_B)$$

10. Определяется ошибка расчета

$$\delta = | \Delta t_{k0} - \Delta t_k | / \Delta t_{k0}. \quad (11)$$

Если  $\delta \leq 0,1$ , то расчет можно считать законченным. В противном случае следует повторить расчет температуры корпуса для другого значения  $\Delta t_k$ , скорректированного в сторону  $\Delta t_{k0}$ .

11. Рассчитывается температура корпуса блока

$$t_k = t_0 + \Delta t_{k0}. \quad (12)$$

На этом этап I расчета теплового режима блока РЭС заканчивается. Этап 2. Определение среднеповерхностной температуры нагретой зоны.

1. Рассчитывается условная удельная поверхностная мощность нагретой зоны блока  $q_3$

$$q_3 = \frac{P_3}{1,82 (l_1 l_2 + l_1 l_3 + l_2 l_3)}, \quad (13)$$

где  $P_3$  — мощность, рассеиваемая в нагретой зоне. В общем случае  $P_3 = P_0 - P_k$ ; здесь  $P_k$  — мощность, рассеиваемая в ЭРЭ установленных непосредственно на корпус блока. В этом случае последний играет роль радиатора.

2. Из графика на рис. 6 определяется в первом приближении нагрев нагретой зоны относительно температуры окружающей среды  $\Delta t_3$ .

3. Определяется коэффициент теплообмена излучением между нижними  $\alpha_{3H}$ , верхними  $\alpha_{3B}$  и боковыми  $\alpha_{3B}$  поверхностями нагретой зоны корпуса:



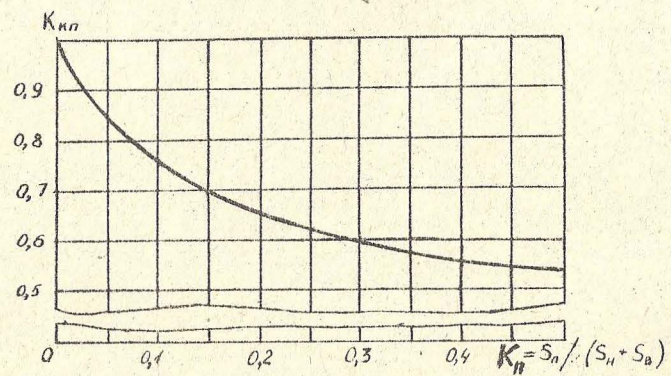


Рис.4. Зависимость коэффициента  $K_{кп}$  от коэффициента перфорации корпуса блока

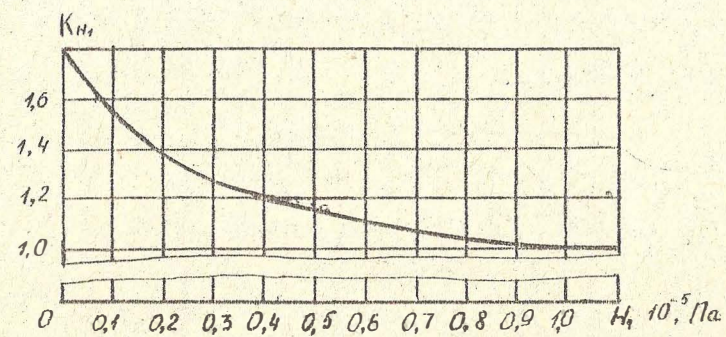


Рис.5. Зависимость коэффициента  $K_{н1}$  от атмосферного давления окружающей среды



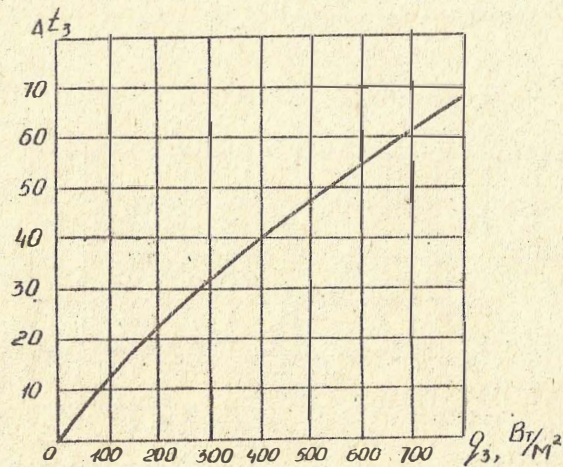


Рис. 6. Зависимость перегрева нагретой зоны от удельной поверхностной мощности

$$\alpha_{zi} = \epsilon_{pi} \cdot 5,67 \left[ \left( \frac{t_0 + \Delta t_z + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_k + 273}{100} \right)^4 \right] / (\Delta t_z - \Delta t_{k0}),$$

где  $\epsilon_{pi}$  — приведенная степень черноты  $i$ -й поверхности нагретой зоны и корпуса,

$$\epsilon_{pi} = \left[ \frac{F_i}{F_{zi}} + \left( \frac{1}{\epsilon_{ki}} - 1 \right) \frac{S_{zi}}{S_{ki}} \right]^{-1},$$

здесь  $\epsilon_{zi}$  и  $S_{zi}$  — степень черноты и площадь  $i$ -й поверхности нагретой зоны.

4. Для определяющей температуры  $t_m = (t_k + t_0 + \Delta t_z)/2$  и определяющего размера  $h_i$  находятся числа Грасгофа  $Gr_i$  и Прандтля  $Pr$  (см. (5) и табл. 3)

5. Рассчитываются коэффициенты конвективного теплообмена между нагретой зоной и корпусом для каждой поверхности:

для нижней поверхности

$$\alpha_{zkn} = \lambda_m / h_{ni}$$

для верхней поверхности

$$\alpha_{zkb} = \begin{cases} \lambda_m / h_b & \text{при } (Gr_{hb} Pr) \leq 10^3 \\ 0,234 [6,25 - 5,25(1 + h_b / \sqrt{Gr_{hb}})] \lambda_m (Gr_{hb} Pr)^{1/4} / h_b & \text{при } (Gr_{hb} Pr) > 10^3 \end{cases} \quad (15)$$

для боковой поверхности

$$\alpha_{zkb} = \begin{cases} \lambda_m / h_b & \text{при } (Gr_{hb} Pr) \leq 10^3 \\ 0,18 [6,25 - 5,25(1 + h_b / \sqrt{Gr_{hb}})] \lambda_m (Gr_{hb} Pr)^{1/4} / h_b & \text{при } (Gr_{hb} Pr) > 10^3 \end{cases}$$

6. Определяется тепловая проводимость между нагретой зоной и корпусом

$$\alpha_{zk} = K_2 \sum_{i=N, B, B} (\alpha_{zi} + \alpha_{zki}) \epsilon_{zi}, \quad (16)$$

где  $K_2$  — коэффициент, учитывающий кондуктивный теплообмен,

$$K_2 = \begin{cases} 1,63 - \frac{0,157}{Gr_{zk}} & \text{при } \frac{1}{Gr_{zk}} \leq 4, \\ 1 & \text{при } \frac{1}{Gr_{zk}} > 4, \end{cases} \quad (17)$$



где  $\delta$  — удельная тепловая проводимость от модулей к корпусу блока, зависящая от усилия прижима ячеек к корпусу (см. рис. 7) при отсутствии прижима  $\delta = 240 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;

$S_{\lambda}$  — площадь контакта рамки с корпусом блока.

7. Рассчитывается перегрев нагретой зоны  $\Delta t_{30}$  во втором приближении  $\Delta t_{30} = \Delta t_{k0} + \frac{P_3 K_{kn} \cdot K_w \cdot K_{n2}}{\delta_{3k}}, \quad (18)$

где  $K_w$  — коэффициент, учитывающий внутреннее перемешивание воздуха, зависящий от производительности вентилятора  $G_v$  (см. рис. 8)  $K_{n2}$  — коэффициент, учитывающий давление воздуха внутри блока (см. рис. 9).

8. Определяется ошибка расчета  $\delta = |\Delta t_{30} - \Delta t_3| / \Delta t_{30}$ . Если  $\delta < 0,1$ , то расчет закончен. При  $\delta > 0,1$  следует повторить расчет для скорректированного значения  $\Delta t_3$ .

9. Рассчитывается температура нагретой зоны  $t_3 = t_0 + \Delta t_{30} \quad (19)$

На этом второй этап расчета теплового режима блока РЭС заканчивается.

Этап 3. Определение температуры корпуса микросхемы установленной в модуле I-го уровня.

1. Рассчитывается эквивалентный коэффициент теплопроводности модуля, в котором расположена микросхема для вариантов:

при отсутствии теплопроводных шин  $\lambda_{\text{мкв}} = \lambda_n$ , где  $\lambda_n$  — теплопроводность материала основания платы;

при наличии теплопроводных шин

$$\lambda_{\text{мкв}} = (1-A) \lambda_n \left[ 1 - \frac{V_w}{V_n} + \frac{1}{(V_w/V_n)(\lambda_w/\lambda_n) + 1 - V_w/V_n} \right] + A \frac{\lambda_n}{2} \left[ 1 + \frac{\lambda_n}{2} \left[ 1 + \frac{\lambda_w V_w}{\lambda_n V_n} + \frac{1}{1 - V_w/V_n} \right] \right], \quad (20)$$

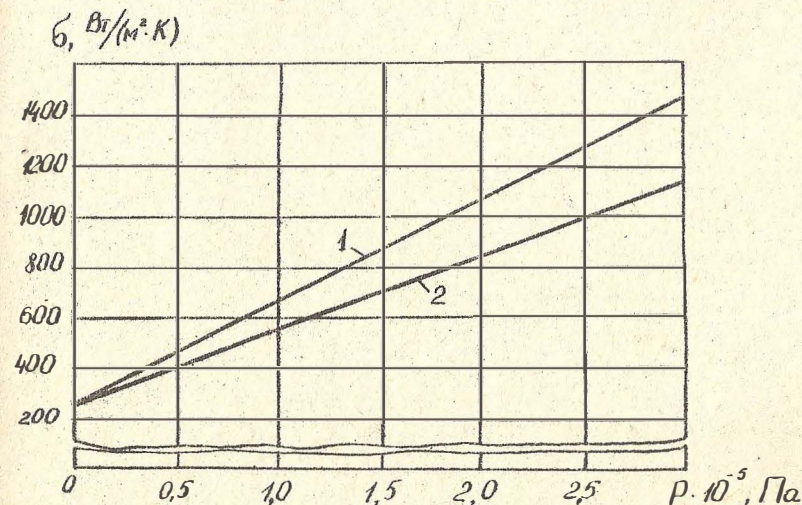


Рис. 7. Зависимость удельной тепловой проводимости от усилия прижима модулей к корпусу:

1 — контакт медной ячейки с алюминиевым корпусом,  
2 — контакт алюминий-алюминий



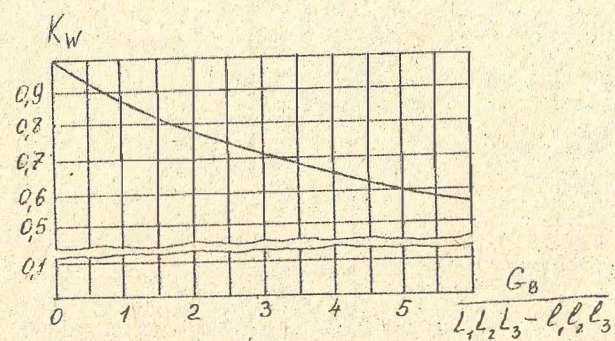


Рис. 8. Зависимость коэффициента  $K_w$  от кратности обмена воздуха в блоке

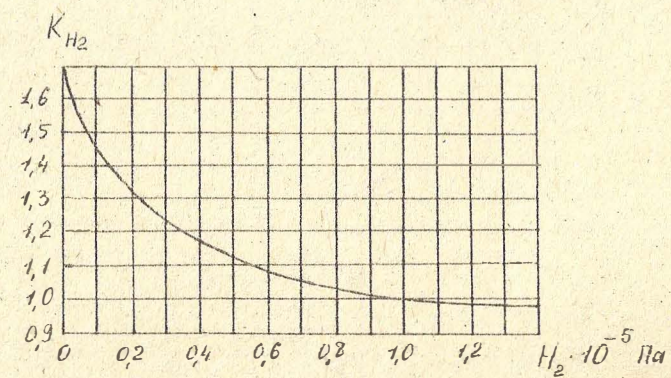


Рис. 9. Зависимость коэффициента  $K_{H2}$  от давления воздуха внутри блока



где  $\lambda_m$  - теплопроводность материала теплопроводной шины;  
 $V_n$  - объем печатной платы с учетом объема теплопроводных шин;

$V_{ш}$  - объем теплопроводных шин на печатной плате;  
 $A$  - поверхностный коэффициент заполнения платы модуля теплопроводными шинами,

$$A = S_{ш} / S_n;$$

$S_{ш}$  - суммарная площадь, занимаемая теплопроводными шинами на печатной плате.

В табл. 4 приведены теплофизические параметры некоторых материалов.

Таблица 4  
Теплофизические свойства материалов

Материал	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·К)	Материал	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·К)
Алюминий	208	Эбонит	0,163
Бронза	64	Стеклотек-столит	0,23...0,34
Латунь	85,8	Стекло	0,74
Медь	390	Фарфор	0,834
Сталь	45,5	Картон	0,231
Асбестовая ткань	0,169	АЛ-9	151
Асбест листовой	0,116	АЛ-2	175
Слюда	0,583	АМЦ	188
Пластмасса полихлорвиниловая	0,443	Пенопласт ПХВ-2	0,04
Фигоропласт-4	0,25	Пенополиуретан	0,06
Полистирол	0,09-0,14		

2. Определяется эквивалентный радиус корпуса микросхем

$$R = \sqrt{S_{омс} / \pi}, \quad (21)$$

где  $S_{омс}$  - площадь основания микросхемы.

3. Рассчитывается коэффициент распространения теплового потока

$$m = \sqrt{\frac{\lambda_1 + \lambda_2}{S_n \cdot \lambda_{экв}}}, \quad (22)$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  - коэффициенты теплообмена с 1-й и 2-й сторон печатной платы, для естественного теплообмена

$\lambda_1 + \lambda_2 = 17$  Вт/(м<sup>2</sup>·К),  $S_n$  - толщина печатной платы модуля.

4. Определяется значение перегрева поверхности корпуса микросхемы

$$\Delta t_{mc} = \Delta t_a + K \left[ \frac{Q_{mc}}{K_L (S_{mc} - S_{омс}) + \frac{1}{\frac{\delta_3}{\lambda_3 R^2} + \frac{1}{B + M R \lambda_{экв} \delta_n m \frac{K_L(mR)}{K_0(mR)}}}} + \frac{Q_{mc} \cdot \frac{K_0(mR)}{K_0(mR_i)}}{\sum_{i=1}^N K_{Li} (S_{mc_i} - S_{омс_i}) \left\{ 1 + \left[ \frac{\delta_{3i}}{\lambda_{3i} R_i^2} + \frac{1}{K_{Li} (S_{mc_i} - S_{омс_i})} \right] (B_i + M R_i \lambda_{экв} \delta_n m \frac{K_{Li}(mR_i)}{K_0(mR_i)}) \right\}} \right] \quad (23)$$

где  $B$  и  $M$  - условные величины, введенные для упрощения формы записи: при одностороннем расположении корпусов микросхем на печатной плате  $B = 8,5 \sqrt{R^2} / \delta_n$ ,  $M = 2$ , при двухстороннем расположении корпусов  $B = 0$ ,  $M = 1$ ,

$K$  - эмпирический коэффициент: для корпусов микросхем, центр которых отстоит от торцов печатной платы на расстоянии менее  $3R$ ,  $K = 1,14$  для корпусов микросхем, центр которых отстоит от торцов печатной платы на расстоянии более  $3R$ ,  $K = 1$ ;



$K_1$  и  $R_0$  - модифицированные функции Бесселя;

$K_L$  - коэффициент теплоотдачи от корпусов микросхем, определяется по графику на рис. 10;

$N$  - число  $i$ -х корпусов микросхем, расположенных вокруг корпуса рассчитываемой микросхемы на расстоянии не более  $10/m$ , т.е.  $N \leq 10/m$ ;  $\Delta t_{\text{ср}}$  - среднееобъемный перегрев воздуха в блоке,  $\Delta t_{\text{ср}} = (\Delta t_{\text{кп}} + \Delta t_{\text{кдо}})/2$ ;  $Q_{\text{мс}}$  - мощность, рассеиваемая  $i$ -й микросхемой;

$S_{\text{мс}i}$  - суммарная площадь поверхности  $i$ -й микросхемы;

$\delta_{zi}$  и  $\lambda_{zi}$  - величина зазора между микросхемой и печатной платой и коэффициент теплопроводимости материала, заполняющего этот зазор.

5. Определяется температура поверхности корпуса микросхемы  $t_{\text{мс}} = t_0 + \Delta t_{\text{мс}}$ .

Температура поверхности дискретного ЭРЭ рассчитывается аналогично определению температуры микросхемы. Необходимо лишь ввести соответствующие значения геометрических параметров в формуле (21-24).

### 3. Программа расчета теплового режима блоков РЭС

#### 3.1. Общие указания.

Программа предназначена для расчета теплового режима блоков РЭС /4/. Для проведения расчета конструкция блоков РЭС <sup>заменяется</sup> тепловой моделью (см. рис. 2), в которой шасси с расположенными на нём ЭРЭ представляется областью, называемой нагретой зоной.

Программа состоит из трех этапов расчета:

1-й этап - расчет температуры корпуса блока  $t_k$ . Проводится промежуточный расчет перегрева корпуса блока  $\Delta t_k$ .

2-й этап - расчет температуры нагретой зоны  $t_z$ . Проводится промежуточный расчет температуры нагретой зоны  $\Delta t_z$ .

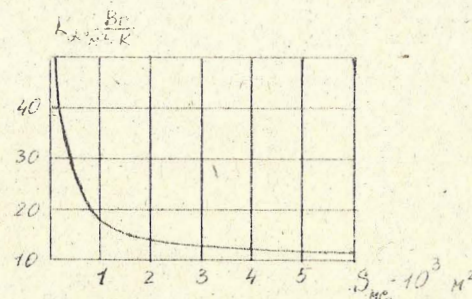


Рис. 10. зависимость коэффициента теплоотдачи  $K_L$  от площади поверхности корпуса микросхемы



3-й этап - расчет температуры корпуса рассматриваемого элемента МС или ЭРЭ ( $t_{кме}, t_{кэв}$ ).

После каждого этапа результаты расчета выносятся на печать.

Для проведения расчета необходимо подготовить следующие основные данные:

геометрические характеристики блока;

базовая температура (окружающая температура), °С;

мощность, выделяющаяся в блоке, Вт;

мощность, рассеиваемая ЭРЭ, Вт;

физические параметры воздуха и материалов конструкции блока.

Далее рассмотрим подробное описание исходных данных и ограничений по каждому из трех этапов расчета. Распечатка ввода исходных данных и вывода результатов расчета на ЭВМ по каждому из этапов приводится в приложении к настоящей работе.

3.2. Исходные данные для расчета температуры кожуха блока (I-й этап)

$t$  - максимальная температура окружающей среды (из ТЗ);

$H_1$  - давление окружающей среды (из ТЗ, при отсутствии данных в ТЗ берется нормальное атмосферное давление  $1,013 \cdot 10^5$  Па), Па;  $K_n$  - коэффициент перфорации кожуха блока,  $0 < K_n \leq 1$

$L_1, L_2, L_3$  - длина, ширина, высота блока (см. об. чертеж), м. Для блока без кожуха  $K_n$  рассчитывается как отношение площади, свободной для прохождения охлаждающего воздуха, к площади стороны условного параллелепипеда, перпендикулярно к которой осуществляется обдув. Для блока с кожухом (прибора)  $K_n$  рассчитывается на основании рабочего чертежа поддона или крышки как отношение суммарной площади вентиляционных отверстий к площади крышки или поддона.

$\varepsilon_i$  - степень черноты кожуха блока,  $0 < \varepsilon_i \leq 1$  (см. табл. 2),

$i$  - верхняя, нижняя, боковая поверхности кожуха. При отсут-

ствии кожуха охлаждение лучеиспусканием происходит с поверхностей печатных плат, направляющих, монтажной панели и т.д. В этом случае усредненно можно принять  $\varepsilon_i = 0,5$ ;

$P_0$  - мощность, рассеиваемая в блоке (сначала рассчитывают мощность для наиболее теплонегруженного модуля первого уровня; ориентировочно мощность модуля можно получить суммированием мощностей комплектующих модуль компонентов; мощность блока (прибора) получают перемножением числа модулей на мощность, рассеиваемую одним модулем), Вт.

Программа обеспечивает расчет теплового режима при естественной конвекции, если удельная мощность удовлетворяет отношению

$$\frac{P_0}{[L_1 \cdot L_2 + L_3 \cdot (L_1 + L_2)]} \leq 600 \text{ Вт/м}^2$$

3.3 Исходные данные для расчета температуры нагретой зоны блока (2 этап)

$L_1, L_2, L_3$  - длина, ширина, высота нагретой зоны, (см. рис. 2), м.

$K_n$  - воздушный зазор между нагретой зоной и нижней поверхностью кожуха (см. сборочный чертеж, при отсутствии кожуха  $K_n = 0$ ), м;

$H_2$  - давление внутри блока (из ТЗ, при отсутствии данных в ТЗ берется нормальное атмосферное давление  $1,013 \cdot 10^5$  Па), Па.

$\varepsilon_{пр_i}$  - приведенная степень черноты,  $0 < \varepsilon_{пр_i} \leq 1$  (для большинства конструкций  $\varepsilon_{пр_i} \approx 0,5$ ;  $i$  - верхняя, нижняя и боковая поверхности нагретой зоны).

$S_{\lambda}$  - площадь контакта рамки модуля платы (при отсутствии рамки теплоотком может служить каркас),  $S_{\lambda} \geq 0$  (см. сборочный чертеж), м<sup>2</sup>.

$P$  - усилие прижима модуля к несущей конструкции, Па;  $P \geq 0$ . Если  $P \neq 0$ , то вводится признак материала рамки модуля



(1 - сплав алюминия, 2 - сплав меди),

$P_{ок}$  - мощность, рассеиваемая элементами, установленными на несущей конструкции. При отсутствии таких элементов  $P_{ок} = 0$ , Вт

$G_{в}$  - производительность вентилятора при внутреннем перемешивании воздуха, кг/с. Если вентилятора нету то  $G_{в} = 0$ .

$N_2$  - тип конструктивного исполнения блока (1, 2 или 3 см. табл. I).

3.4. Исходные данные для расчета температуры ИС или ЭРЭ (3 этап).

$Q_э$  - мощность компонента / 4 /, Вт;

$S_э$  - суммарная площадь поверхности компонента и радиатора (см. рабочий чертеж, при отсутствии радиатора учитывается площадь компонента),  $m^2$ ;

$S_{э0}$  - площадь основания компонента / 3 /,  $m^2$ ;

$\delta_3$  - зазор между основанием компонента и печатной платой (см. сборочный чертеж), м;

$\lambda_3$  - коэффициент теплопроводности материала, заполняющего зазор между основанием компонента и печатной платой (см. табл. 4), Вт/(м·К);

$r_{кп}$  - расстояние от центра анализируемого компонента до ближайшего края печатной платы (см. рис. 2), м;

$\delta_n$  - толщина печатной платы (см. рис. 2 и рабочий чертеж платы), м;

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности платы (см. табл. 4), Вт/(м·К);

$t_x, t_y$  - шаг установки компонентов (см. рис. II и сборочный чертеж), м;

$N$  - число компонентов, влияющих на тепловой режим анализируемого компонента (при расчете учитываются только соседние компоненты, т.е. расположенные не далее  $r_{кп}$  от рассчитываемого;

$r_{кп}$  берется из рис. II и сборочного чертежа). Для каждого  $i$ -го компонента

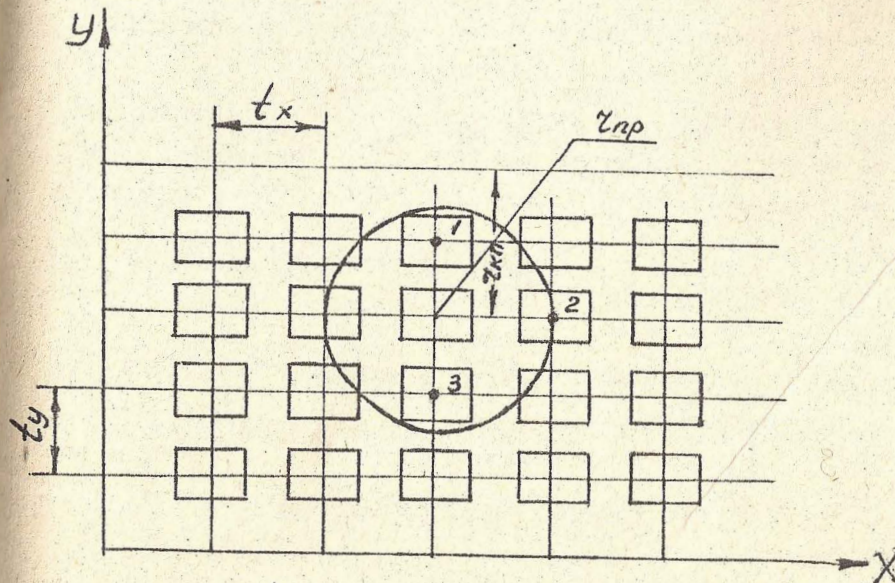


Рис. II. Размещение ЭРЭ на печатной плате



( $i = 1, N$ ), влияющего на тепловой режим анализируемого компонента ( $i = 0$ ), вводятся следующие данные:

$z_i$  — расстояние между геометрическими центрами анализируемого и  $i$ -го компонентов ( $z_i < z_{np}$ ), м;

$Q_{zi}$  — мощность, рассеиваемая  $i$ -м компонентом, Вт;

$z_{kpi}$  — расстояние от центра  $i$ -го компонента до ближайшего края печатной платы (см. рабочий чертеж), м;

Если способ установки или размеры  $i$ -го компонента отличаются от способа или размеров  $(i-1)$ -го компонента, то вводятся дополнительно переменные  $S_{zi}$ ;  $S_{zoi}$ ;  $\delta_{zi}$ ;  $\lambda_{zi}$  /3/; где  $S_{zi}$  — площадь всей поверхности  $i$ -го компонента и радиатора (см. рабочий чертеж),  $m^2$ ;

$S_{zoi}$  — площадь основания  $i$ -го компонента,  $m^2$ ;

$\delta_{zi}$  — зазор между основанием  $i$ -го компонента и печатной платой (из об. чертежа), м;

$\lambda_{zi}$  — коэффициент теплопроводности материала, заполняющего зазор между основанием  $i$ -го компонента и печатной платой (см. приложение), Вт/(м·К).

Исходные значения параметров для расчета теплового режима вводятся с клавиатуры дисплея в диалоговом режиме и для данного конструктивного исполнения блока указаны в распечатке результатов работы программы на ЭВМ (см. приложение).

#### 4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

##### 4.1. Выбор, обоснование тепловой модели исследуемого блока РЭС

Подробно ознакомиться с описанием к лабораторной работе.

Ознакомиться с реальным блоком РЭС, предназначенным для исследования. Практическая реализация блока РЭС предусматривает использование резисторов в качестве источников тепла. Провести расчет теплового режима блока РЭС с закрытым корпусом. Провести расчет теплового режима блока РЭС с перфорированным корпусом.

Провести экспериментальную проверку тепловых режимов блоков РЭС:

измерить температуру нагретой зоны блока с закрытым корпусом;

измерить температуру нагретой зоны блока с перфорированным корпусом;

измерить температуру корпуса ЭРЭ.

##### 4.2. Порядок измерения температуры нагретой зоны и корпуса ЭРЭ

Измерение температуры осуществляется с помощью термопары, установленной внутри исследуемого блока РЭС.

Численное значение температуры определяется с помощью измерительного блока.

#### 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Выбор и обоснование тепловой модели исследуемого блока РЭС.

2. Основные теоретические положения.

3. Алгоритм расчета тепловых режимов для блоков с разными корпусами с приведением результатов расчетов.

4. Результаты расчетов.

5. Результаты эксперимента.

6. Сравнительная оценка расчетных и экспериментальных данных.

7. Выводы и рекомендации.

#### 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите законы охлаждения, их физическую сущность.

2. Какие законы охлаждения наиболее эффективны при охлаждении блоков с закрытым корпусом?

3. Какие законы охлаждения наиболее эффективны при охлаждении блоков РЭС с перфорированным корпусом?

4. Что такое коэффициент заполнения и как он определяется?



5. Что такое нагретая зона?
6. Существующие методы тепловых расчетов.
7. Какой метод положен в основу тепловых расчетов?
8. Какие основные конструкторские параметры используются при тепловых расчетах блоков ЭЭС с закрытым корпусом, с перфорированным корпусом?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. - М.: Высшая школа, 1964. - 247 с.
2. Парфенов Е.М., Фролов А.В. Расчеты тепловых режимов блоков ЭЭА и ЭВА на микросхемах и дискретных элементах. - М.: МВТУ, 1980. - 32 с.
3. Камышная Э.Н., Парфенов Е.М., Шерстнев В.В. Программное обеспечение конструкторских расчетов. 4. I. Методические указания для курсового и дипломного проектирования. - М.: МВТУ 1986. - 34 с.
4. Справочник по интегральным микросхемам /Табарин В.В., Якубовский С.В., Барканов Н.А. и др.; Под ред. В.В. Тарабрина. М.: Энергия, 1981. - 816 с.
5. Парфенов Е.М., Камышная Э.Н., Усачов В.П. Проектирование конструкций радиоэлектронной аппаратуры. - М.: Радио и связь, 1989. - 272 с.

## КОНТРОЛЬНЫЙ ПРИМЕР

```
>>>> РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА <<<<<
ВВЕДИТЕ БАЗОВУЮ ТЕМПЕРАТУРУ [ ГРАД.С ] : 35.00
ДАВЛЕНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ [ПА] (ОТ 0.1 ПА ДО 1.013Е5 ПА): 100000.00
ДЛИНУ, ШИРИНУ, ВЫСОТУ БЛОКА [М] : 0.0900 0.0550 0.0400
ВВЕДИТЕ КОЭФФИЦИЕНТ ПЕРФОРАЦИИ КОРПУСА БЛОКА: 0.30
ЕСЛИ СТЕПЕНЬ ЧЕРНОТЫ КОРПУСА БЛОКА ОДИНАКОВА У ВСЕХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ КОРПУСА, ТО ВВЕДИТЕ ЕЕ, А ЕСЛИ ОНА РАЗЛИЧНА,
ТО ВВЕДИТЕ НОЛЬ: 0.25
ЗАДАЙТЕ МОЩНОСТЬ, ВЫДЕЛЯЮЩУЮСЯ В БЛОКЕ [Вт]: 2.10
```

```
***** РАСЧЕТ ПЕРЕГРЕВА КОРПУСА БЛОКА *****
```

```
РЕЖИМ ТЕПЛООБМЕНА ДЛЯ ВЕРХНЕЙ И НИЖНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ БЛОКА -
- ЛАМИНАРНЫЙ (1/4 СТЕПЕНИ)
РЕЖИМ ТЕПЛООБМЕНА ДЛЯ БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ БЛОКА -
- ЛАМИНАРНЫЙ (1/4 СТЕПЕНИ)
ПЕРЕГРЕВ КОРПУСА БЛОКА [ ГРАД.С ]: 7.79
ТЕМПЕРАТУРА КОРПУСА БЛОКА [ ГРАД.С ]: 42.79
```

```
ВВЕДИТЕ ДЛИНУ, ШИРИНУ И ВЫСОТУ НАГРЕТОЙ ЗОНЫ БЛОКА [М]: 0.0780 0.0400 0.0140
ВВЕДИТЕ ВЕЛИЧИНУ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА МЕЖДУ НАГРЕТОЙ ЗОНОЙ И
НИЖНЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ КОРПУСА [М]: 0.0050
ВВЕДИТЕ ДАВЛЕНИЕ ВНУТРИ БЛОКА [ПА] (ОТ 0.1 ПА ДО 1.013Е5 ПА): 100000.00
ЕСЛИ ПРИВЕДЕННАЯ СТЕПЕНЬ ЧЕРНОТЫ ОДИНАКОВА У ВСЕХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ, ТО ВВЕДИТЕ ЕЕ, А ЕСЛИ ОНА РАЗЛИЧНА,
ТО ВВЕДИТЕ НОЛЬ: 0.25
ВВЕДИТЕ ПЛОЩАДЬ КОНТАКТА РАМКИ МОДУЛЯ С КОРПУСОМ [М*М]: 0.00010
ВВЕДИТЕ УСИЛИЕ ПРИЖИМА ЯЧЕЙКИ К КОРПУСУ [ПА]: 2000.00
ВВЕДИТЕ 1 - ЕСЛИ МАТЕРИАЛ РАМКИ ЯЧЕЙКИ - АЛЮМИНИЙ
2 - МЕДЬ: 1
ВВЕДИТЕ МОЩНОСТЬ РАССЕИВАЕМУЮ ЭЛЕМЕНТАМИ, УСТАНОВЛЕННЫМИ
НЕПОСРЕДСТВЕННО НА КОРПУС [Вт], ЕСЛИ ТАКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НЕТ,
ТО ВВЕДИТЕ НОЛЬ: 0.00
ВВЕДИТЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ВЕНТИЛЯТОРА ПРИ ВНУТРЕННЕМ
ПЕРЕМЕШИВАНИИ ВОЗДУХА [КГ/С], ЕСЛИ ВЕНТИЛЯТОРА НЕТ,
ТО ВВЕДИТЕ НОЛЬ: 0.00
ВВЕДИТЕ НОМЕР КОНСТРУКЦИИ БЛОКА (1,2 ИЛИ 3): 2
***** РАСЧЕТ ПЕРЕГРЕВА НАГРЕТОЙ ЗОНЫ БЛОКА *****
ПЕРЕГРЕВ НАГРЕТОЙ ЗОНЫ БЛОКА [ ГРАД.С ]: 22.79
ТЕМПЕРАТУРА НАГРЕТОЙ ЗОНЫ [ ГРАД.С ]: 57.79
СРЕДНЕОБЪЕМНЫЙ ПЕРЕГРЕВ ВОЗДУХА [ ГРАД.С ]: 15.29
```

```
ВВЕДИТЕ МОЩНОСТЬ ЭЛЕМЕНТА [Вт]: 0.05
ВВЕДИТЕ СУММАРНУЮ ПЛОЩАДЬ ПОВЕРХНОСТИ ЭРЭ И
ЕГО РАДИАТОРА [М*М]: 0.00050
ВВЕДИТЕ СТЕПЕНЬ ЧЕРНОТЫ ПОВЕРХНОСТИ КОРПУСА ЭРЭ: 0.92
ОПРЕДЕЛЯЮЩИЙ РАЗМЕР ДИСКРЕТНОГО ЭРЭ [М]: 0.0070
***** РАСЧЕТ ПЕРЕГРЕВА ДИСКРЕТНОГО ЭРЭ *****
ПЕРЕГРЕВ КОРПУСА ДИСКРЕТНОГО ЭРЭ [ ГРАД.С ]: 64.78
ТЕМПЕРАТУРА КОРПУСА ДИСКРЕТНОГО ЭРЭ [ ГРАД.С ]: 99.78
```