

ТЕПЛОВЫЕ РАСЧЕТЫ

Температура нагретой зоны одиночного блока

Приведенный расчет справедлив для одиночных блоков в РЭС, имеющих геометрические размеры в пределах 600 мм по трем измерениям. Предполагается, что блок имеет форму прямоугольного параллелепипеда или цилиндра, ось которого может быть расположена горизонтально или вертикально.

Внутренняя архитектура блока может представлять собой различные конструктивные варианты: шасси с расположенными на нем крупными электрорадиоэлементами, кассеты или ячейки с микросхемами и отдельными дискретными элементами, имеющими геометрические размеры, соизмеримые с размерами микросхем.

Кассеты или ячейки могут располагаться горизонтально или вертикально. При вертикальном расположении кассет или ячеек расчет будет справедлив при условии, что расстояние между кассетами не превышает 3 мм, для горизонтального расположения кассет или ячеек такого ограничения нет.

Исходные данные

P – суммарная мощность тепловыделения в блоке, Вт;

L_1, L_2, L_3 – (D, H) – геометрические размеры блока прямоугольной формы (в виде цилиндра), м;

l_1, l_2, l_3 – размеры нагретой зоны, м;

t_c – температура окружающей среды, °С.

Последовательность расчета

1. Размеры нагретой зоны.

Для кассет или ячеек, объединенных в единый блок, размеры нагретой зоны определяются максимальными размерами этого блока. Если в качестве несущего элемента используется шасси с расположенными на нем крупногабаритными элементами, то размеры нагретой зоны будут: два измерения совпадают с размерами шасси, а третье определяется суммой высот шасси (h) и высотой средних размеров элементов, расположенных с одной и другой сторон шасси (h_1 и h_2).

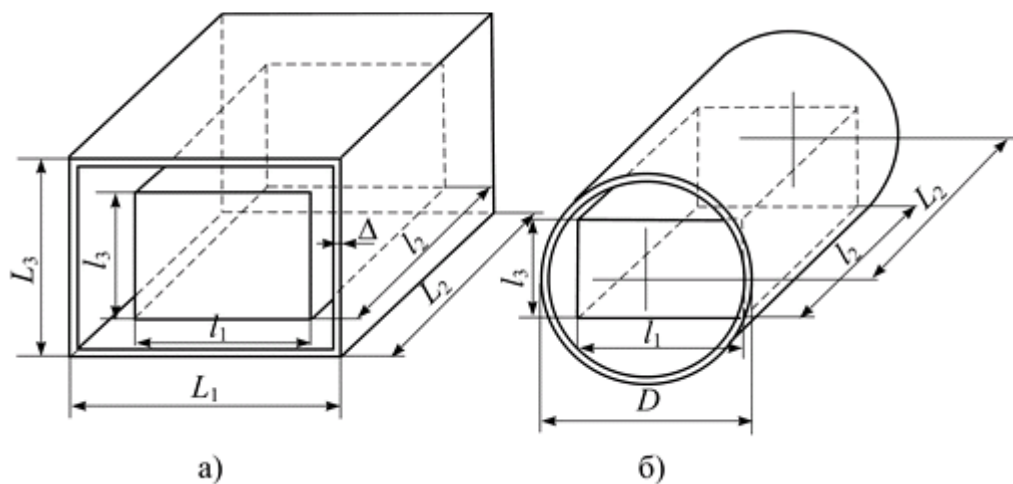


Рис. 2.1. Модели блоков:

a – прямоугольной; *b* – цилиндрической формы

Средняя высота элементов

$$h_{1,2} = \frac{\sum_{i=1}^n K_i}{l_1 l_2},$$

где K_i – высота *i*-го элемента на поверхности шасси;

l_1, l_2 – размеры шасси;

n – количество элементов с одной стороны шасси.

Высота нагретой зоны

$$l_3 = h + h_1 + h_2.$$

2. Площади боковой ($S_б$), верхней ($S_в$) и нижней ($S_н$) стенок блока

$$S_б = 2L_3(L_1 + L_2), S_в = S_н = L_1 L_2.$$

Область 1 расположена над нагретой зоной, область 2 под нагретой зоной, а область 4 между боковой поверхностью нагретой зоны и кожухом.

3. Площади нагретой зоны, обращенные в области 1, 2 и 4

$$S_{31} = S_{32} = l_1 l_2, S_{34} = 2l_3 (l_1 + l_2).$$

4. Приведенная степень черноты нагретой зоны в областях 1 и 2

$$\epsilon_{п} = \left[\frac{1}{\epsilon_3} + \left(\frac{1}{\epsilon_к} - 1 \right) \frac{S_3}{S_к} \right]^{-1},$$

где $\epsilon_3, \epsilon_к$ – степени черноты зоны и кожуха.

Приведенная степень черноты нагретой зоны в области 4

$$\epsilon_{п4} = \epsilon_3 \epsilon_к,$$

так поступают в силу того, что размеры нагретой зоны, обращенной в область 4, могут значительно отличаться от размеров шасси. Для блоков с заполнением в виде кассет или ячеек рекомендуется степень черноты боковой поверхности нагретой зоны определять по выражению для $\epsilon_{п}$.

5. Ориентировочное значение тепловой проводимости участка от нагретой зоны к кожуху

$$t_{\text{вых}}^1 = 2t_2^1 - t_{\text{вн}}^1,$$

где L_4 – толщина корпуса блока (если блок имеет тонкостенный кожух, то толщину L_4 можно не учитывать).

6. Задаются температурой перегрева кожуха (Δt_k). Для блоков, имеющих мощность тепловыделения 100...200 Вт при размерах 300...400 мм, температура перегрева кожуха лежит в пределах 10...15 °С. Температура кожуха $t_k = t_c + \Delta t_k$.

Определяющая температура $t_m = (t_k + t_c)/2$.

7. Для большинства одиночных блоков РЭС, имеющих небольшую мощность тепловыделения, конвективный теплообмен подчиняется закону 1/4 степени, исходя из этого предположения находят коэффициент теплоотдачи α_k для всех наружных поверхностей кожуха

$$\alpha_k = 0,54 \cdot (\beta g P_r)_m^{1/4} \frac{\lambda_m}{\nu_m^{1/2}} \left(\frac{t_i - t_c}{L} \right)^{1/4} N,$$

где β – коэффициент объемного расширения, K^{-1}

g – ускорение силы тяжести, м/с²;

$$P_r = \frac{\nu}{a} \quad \text{– критерий Прандтля}$$

ν – кинематическая вязкость, м²/с;

a – коэффициент температуропроводности, м²/с;

λ – теплопроводность, Вт/(м · К);

t_i – температура i -й грани кожуха;

L – определяющий размер, м:

для вертикально-ориентированной поверхности – высота,

для горизонтально-ориентированной поверхности – меньшая сторона;

N – коэффициент ориентации нагретой поверхности: для вертикальной стенки $N = 1$,

для нагретой поверхности, обращенной вниз, $N = 0,7$ и вверх $N = 1,3$.

Для воздуха

$$\alpha_k = A_1 \left(\frac{t_i - t_c}{L} \right)^{1/4} N,$$

где значения A_1 находят из следующих данных для воздуха (см. таблицу)

$t_m, ^\circ\text{C}$	10	20	30	40	60	80	100
A_1	1,4	1,38	1,36	1,34	1,31	1,29	1,27

Для большинства блоков РЭС кожух выполнен из материала с хорошей теплопроводностью, поэтому его можно считать изотермической поверхностью и, следовательно, температура кожуха в любой точке будет одинакова.

8. Коэффициент лучеиспускания

$$\alpha_{\text{л}} = \varepsilon_{\text{п}} \phi_{12} f(t_1, t_2);$$

$$f(t_1, t_2) = 5,67 \cdot \frac{\left(\frac{t_1 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_2 + 273}{100} \right)^4}{t_1 - t_2},$$

где t_1 – температура кожуха; t_2 – температура среды; ϕ_{12} – коэффициент взаимного облучения (для одиночного блока $\phi_{12} = 1$).

9. Полные коэффициенты теплоотдачи с поверхности кожуха

$$\alpha_{\text{в}} = \alpha_{\text{кв}} + \alpha_{\text{л}}, \alpha_{\text{н}} = \alpha_{\text{кн}} + \alpha_{\text{л}}, \alpha_{\text{б}} = \alpha_{\text{кб}} + \alpha_{\text{л}}.$$

10. Тепловая проводимость кожуха в окружающую среду

$$\sigma_{\text{к}} = \alpha_{\text{в}} S_{\text{в}} + \alpha_{\text{н}} S_{\text{н}} + \alpha_{\text{б}} S_{\text{б}}.$$

11. Температура нагретой зоны в первом приближении

$$t_3^I = t_c + (t_k - t_c) \left(1 + \frac{\sigma_{\text{к}}}{\sigma_3} \right).$$

12. Расчетная мощность нагретой зоны в предположении, что кожух имеет перегрев $\Delta t_{\text{к}}$ (выбранный)

$$P^I = \sigma_k(t_k - t_c),$$

на этом расчет в первом приближении заканчивается.

Расчет во втором приближении предполагает определение тепловой проводимости от нагретой зоны к кожуху более точно.

13. Поскольку область 1, замкнутая, используют конвективно-кондуктивный коэффициент

$$k_i = Nf\left(\frac{h_i}{l}\right)A_2\sqrt[4]{\frac{t_3^I - t_k}{h_i}}$$

где k_i – конвективно-кондуктивные коэффициенты верхней и боковой воздушной прослойки между нагретой зоной и внутренней поверхностью кожуха;

h_i – толщина воздушной прослойки между нагретой зоной и кожухом в соответствующей области;

$$l = \sqrt{l_1 l_2} \quad \text{– для верхней области;}$$

$$l = \sqrt{l_3 l_2} \quad \text{и} \quad l = \sqrt{l_3 l_1} \quad \text{– для боковых областей нагретой зоны и кожуха.}$$

Если расстояние между нагретой зоной и кожухом меньше 3 мм, то конвекция отсутствует и в этой области передача тепла будет $k = \lambda_B/h$.

В области, расположенной под нагретой зоной и кожухом, конвекция всегда отсутствует, и теплопередача определяется теплопроводностью воздуха (среды).

Значения A_2 для воздуха находят их следующих данных.

$T_m, ^\circ\text{C}$	0	50	100	200
A_2	0,63	0,58	0,56	0,44

Величину $f(h_i/l)$ находят из графика (рис. 2.2).

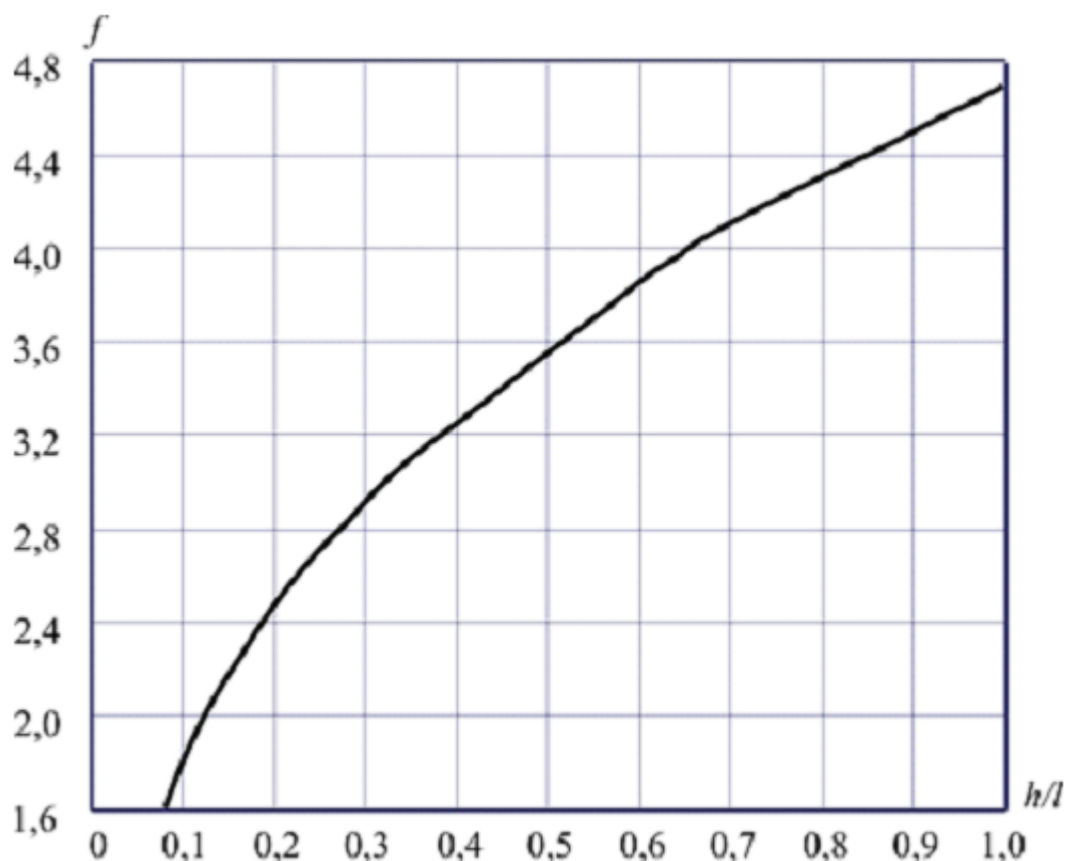


Рис. 2.2. К расчету конвективно-кондуктивного коэффициента

14. Определяют лучистую составляющую коэффициента теплопередачи областей 1, 2 и 4 для воздушного зазора между боковой поверхностью нагретой зоны и кожухом, при этом величина приведенной степени черноты полученная при расчете в первом приближении сохраняется, а коэффициент взаимной облученности принимается равным единице, температура нагретой зоны берется равной температуре, полученной при расчете в первом приближении.

Получают величины

$$\alpha_{л1}; \alpha_{л2}; \alpha_{к4}.$$

15. Полные коэффициенты теплопередачи всех областей для нагретой зоны, расположенной горизонтально

$$K_1 = k_1 + \alpha_{л1}; K_4 = k_4 + \alpha_{л4}; K_2 = \lambda_2/h_n + \alpha_{л2}.$$

Для нагретой зоны, ориентированной вертикально, коэффициенты теплопередачи

$$K_1 = k_1 + \alpha_{л1}; K_2 = k_2 + \alpha_{л2}; K_4 = (k_1 + k_2)/2 + \alpha_{л4}.$$

16. Температура нагретой зоны во втором приближении

$$t_3^{\text{II}} = t_c + P \left(\frac{1}{\sigma_3} + \frac{1}{\sigma_k} \right),$$

где P – мощность, полученная при расчете в первом приближении;

σ_3 – тепловая проводимость от нагретой зоны к кожуху, рассчитанная во втором приближении;

σ_k – тепловая проводимость от кожуха в окружающую среду полученная при расчете в первом приближении.

17. Сравнивают температуры нагретой зоны, полученные при расчетах в первом и во втором приближениях. Если разница составляет более 10 %, то проводят расчет в третьем приближении

$$t_p^{\text{III}} = (t_3^{\text{I}} + t_3^{\text{II}}) / 2.$$

Получают одну точку тепловой характеристики блока $\Delta t_3 = f(P)$ и $\Delta t_k = f(P)$ (рис. 2.3).

Второй точкой будет начало координат.

Для получения третьей точки задаются другим значением температуры перегрева кожуха и проводят расчет заново.

По трем полученным точкам строят характеристики $\Delta t_3 = f(P)$ и $\Delta t_k = f(P)$. Искомые температуры кожуха и зоны находят по этим характеристикам при мощности фактически рассеиваемой в блоке (P_n).

Если температура оказывается выше допустимой для элементов блока, то решают вопрос о применении другого вида охлаждения блока, например, введение жалюзи или перфорации.

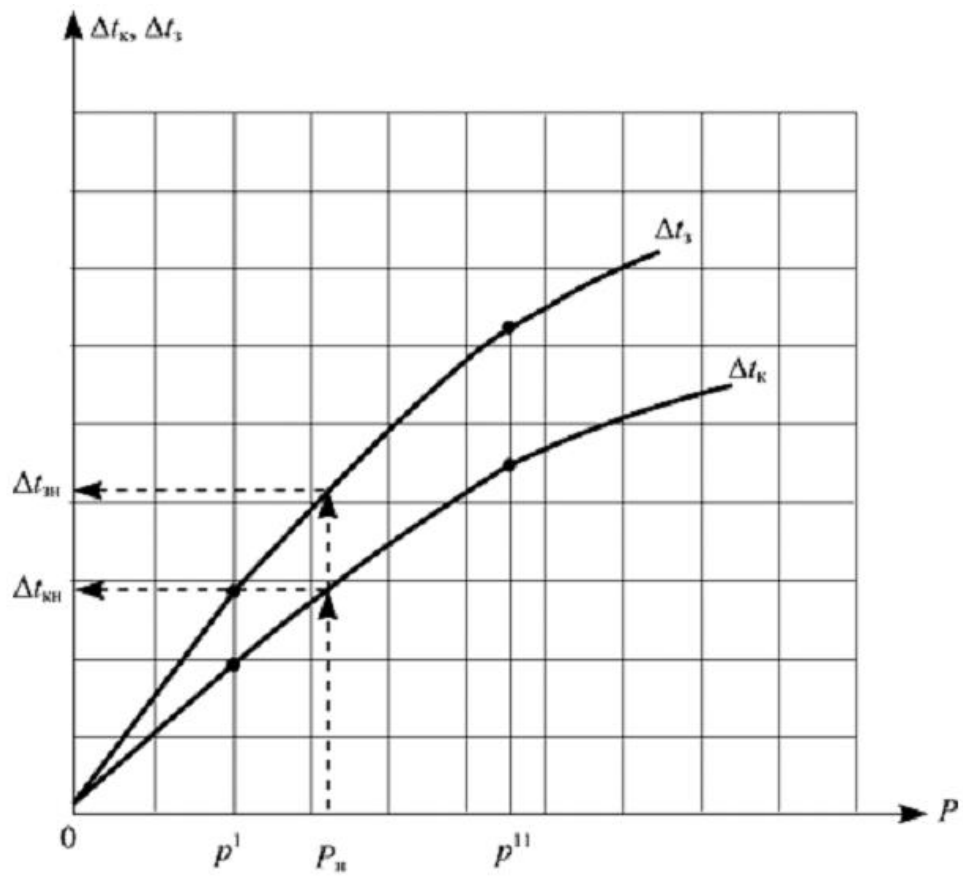


Рис. 2.3. Тепловые характеристики

Температура перегрева перфорированного блока

Для увеличения интенсивности теплоотвода кожух блока перфорируют либо в нем делают жалюзи. При равной площади перфорационных отверстий и жалюзи, последние пропускают несколько меньший поток воздуха. Необходимо иметь в виду, что при перфорированном кожухе внутренний объем блока скорее запыляется по сравнению с блоком, имеющим жалюзи. В зависимости от конструктивных особенностей внутреннего строения блока нагретую зону можно представить в нескольких вариантах.

Основной конструктив блока – горизонтальное шасси с расположенными на нем крупногабаритными теплоизлучающими элементами. Предполагается, что шасси имеет отверстия для прохода воздуха.

Блок состоит из ряда кассет или ячеек расположенных горизонтально или вертикально.

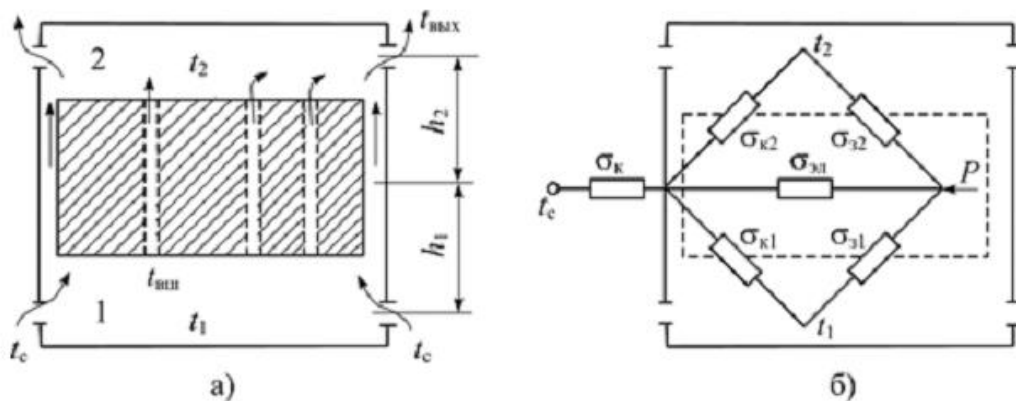


Рис. 2.4. Тепловые модели блока:
а – расчетная модель блока;
б – эквивалентная схема тепловых проводимостей

Для шасси с крупногабаритными элементами и кассет, расположенных вертикально или горизонтально, размеры нагретой зоны определяются как и в случае «герметичного» блока.

Исходные данные

P – суммарная мощность тепловыделения в блоке, Вт;

L_1, L_2, L_3 – геометрические размеры блока, м;

$s_1, s_2, s_{ш}$ – площади отверстий кожуха в областях 1, 2 и шасси; м²;

t_c – температура окружающей среды.

Последовательность расчета

1. Расчет начинают с предположения, что кожух не имеет вентиляционных отверстий, т.е. блок «герметичный». Строят тепловые характеристики по методике расчета температуры нагретой зоны одиночного блока (рис. 2.5).
2. Задаются перегревом нагретой зоны Δt_z и находят перегрев кожуха герметичного блока для этой температуры. Перегрев кожуха перфорированного блока

$$(\Delta t_k)_п = 0,75 \cdot (\Delta t_k)_г,$$

и по графику рис. 2.5 находят мощность P_k , соответствующую этому перегреву.

3. Задаются коэффициентом $\alpha_{зк}^I$ от зоны к кожуху (рекомендуется величину $\alpha_{зк}^I$ в первом приближении выбирать равной (5 ± 1) , Вт/м² · К).

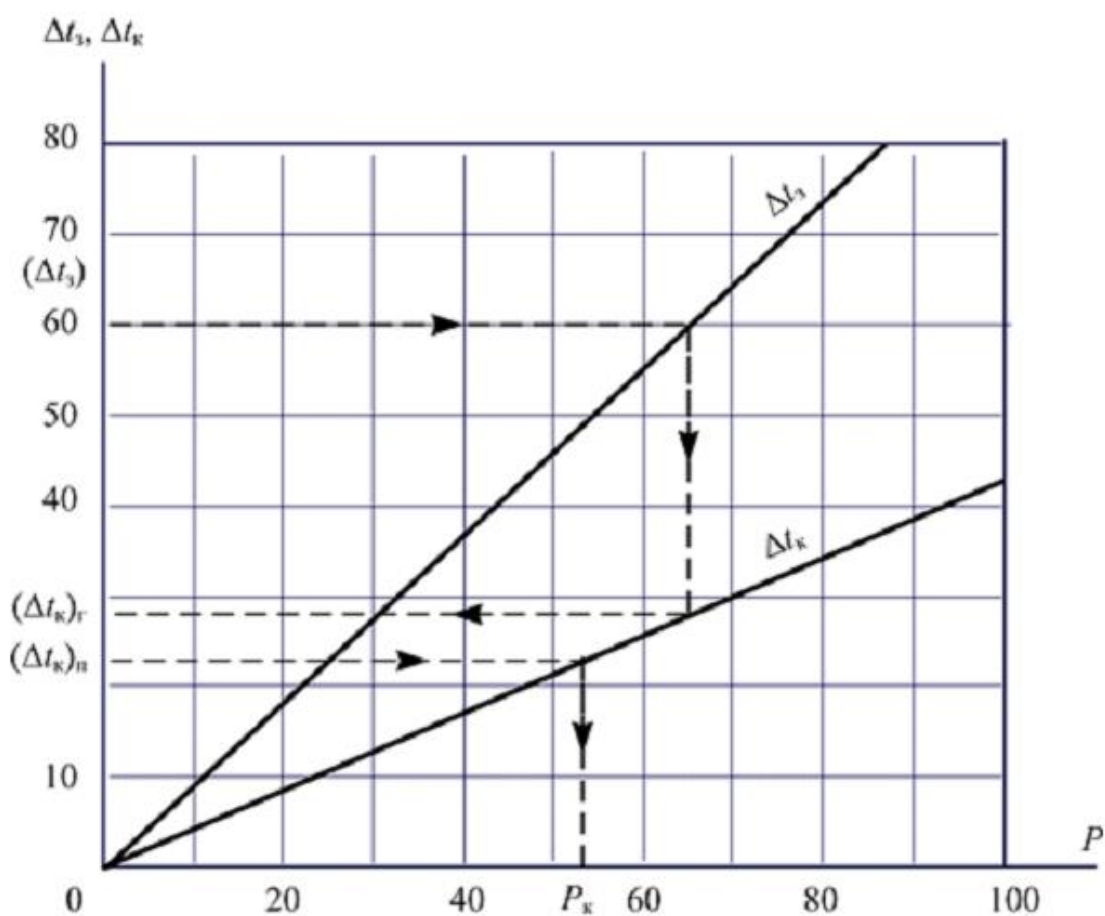


Рис. 2.5. К определению температуры перегрева

4. Мощность теплоотвода от зоны к кожуху за счет лучеиспускания

$$P_{3л} = \varepsilon_{п} f(t_3, t_k) (t_3 - t_k) \varphi_{3к} S_3,$$

где $\varepsilon_{п}$ – приведенная степень черноты нагретой зоны и внутренней поверхности кожуха (если ε_3 и ε_k имеют значения больше 0,75, то $\varepsilon_{п} = \varepsilon_3 \varepsilon_k$. Величину $\varepsilon_{п}$ можно взять из расчета блока при условии герметичности кожуха); $\varphi_{3к} = 1$ – кожух «обтягивает» нагретую зону; S_3 – поверхность нагретой зоны (определена ранее при расчете «герметичного» блока).

5. Температура t_1^I воздуха в первой (нижней) области

$$M_A = M_D = \frac{Ph}{2},$$

где

$$a = 2 \cdot (S_{3л} + S_{к1}) - \frac{S_{к1}}{S_{к2}} (S_{32} + S_{к2} - S_{3л} - S_{к1}); S_{3л}, S_{32}, S_{к1}, S_{к2}.$$

– поверхности нагретой зоны и кожуха в соответствующих областях;

$$b = \left(2 + \frac{S_{к1}}{S_{к2}} \right) A_1 + A_2 - D (S_{32} + S_{к2} - S_{3л} - S_{к1}) + \left(S_{3л} - S_{к1} \frac{S_{32}}{S_{к2}} \right) t_c;$$

$$A_1 = S_{3л} t_3 + S_{к1} t_k, \quad A_2 = S_{32} t_3 + S_{к2} t_k, \quad A = A_1 + A_2;$$

$$D = S_k \frac{t_k}{S_{к2}} - \frac{P_{3л} - P_k}{\alpha_{3к}^I S_{к2}};$$

$$c = DA_1 + [A - (S_{32} + S_{к2}) D] t_c.$$

Из двух значений температур выбирают наименьшее, чтобы выполнялось

условие, $t_1^I \leq t_2^I$, т.е. температура воздуха в первой области (нижней) всегда ниже, чем во второй (верхней).

6. Температура воздуха во второй области в первом приближении

$$t_2^I = D - \frac{S_{к1} t_1}{S_{к2}}.$$

7. Температура воздуха вблизи отверстий шасси или каналов между вертикальными кассетами

$$t_{вш}^I = 2t_1^I - t_c.$$

8. Температура воздуха на выходе из кожуха (из области 2)

$$t_{\text{ВЫХ}}^I = 2t_2^I - t_{\text{ВШ}}^I.$$

9. Количество протекающего воздуха через блок

$$G^I = s_1 \mu_1 T_c \rho_c \sqrt{2g} \sqrt{\frac{\frac{h_1 + h_2}{T_c} - \frac{h_1}{T_1} - \frac{h_2}{T_2}}{T_c + \left(\frac{s_1 \mu_1}{s_2 \mu_2}\right)^2 T_2 + \left(\frac{s_1 \mu_1}{s_{\text{ш}} \mu_{\text{ш}}}\right)^2 T_1}},$$

где $s_1, s_2, s_{\text{ш}}$ – площади перфораций в областях 1, 2 и шасси (нагретой зоне); h_1 и h_2 – средневзвешенные расстояния от середины нагретой зоны в областях 1 и 2 до центра группирования отверстий; $\mu_1, \mu_2, \mu_{\text{ш}}$ – коэффициенты расхода воздуха через жалюзи в соответствующих областях (если имеются перфорации, то $\mu = 0,65$).

Величина μ для жалюзи зависит от их формы и угла раскрытия (табл. 2.1); T_1, T_2, T_c – абсолютные температуры соответствующих областей.

10. По графику (рис. 2.6) уточняют коэффициент теплоотдачи α^{II} .
 Масса воздуха, заполняющего блок, при температуре 20 °С

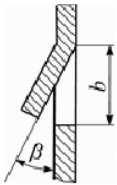
$$G_0 = V_{\text{бл}} K_3 \rho_{\text{в}},$$

где $V_{\text{бл}}$ – внутренний объем блока;

K_3 – коэффициент заполнения блока ($K_3 = V_{\text{дет}}/V_{\text{бл}}$);

$\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха при температуре 20 °С.

Таблица 2.1

β, град.	Значение μ при b/l			Эскиз жалюзи
	1 : 4	1 : 3	1 : 2	
15	0,30	0,27	0,23	
30	0,45	0,43	0,39	
45	0,56	0,54	0,50	
60	0,62	0,60	0,56	
90	0,65	0,64	0,62	

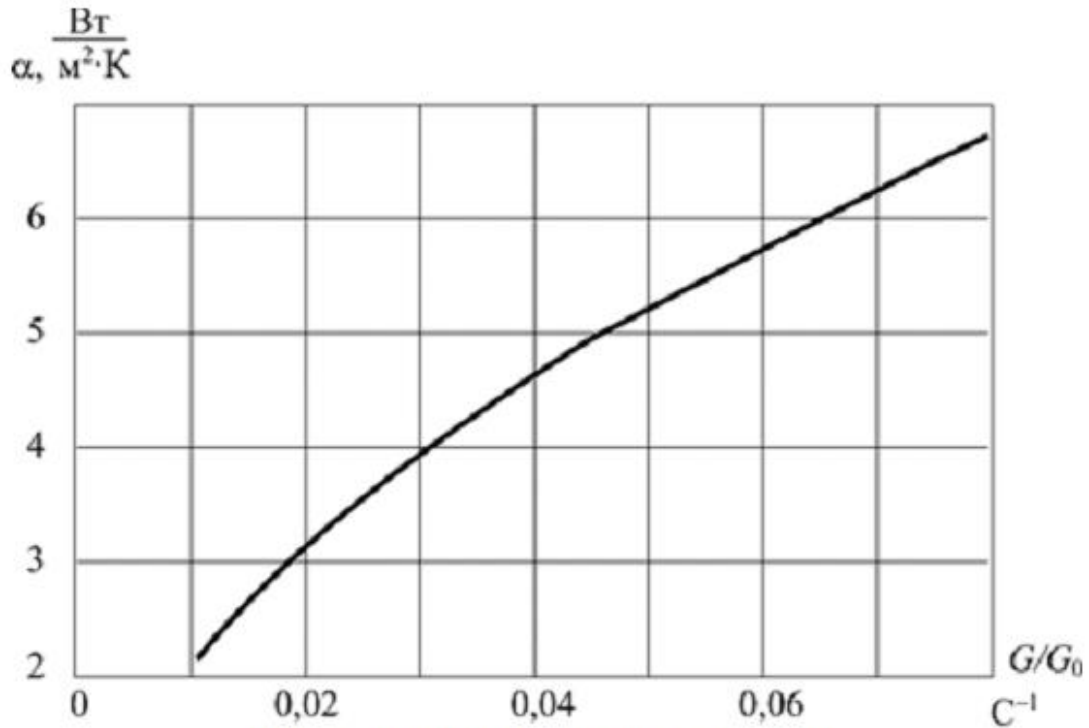


Рис. 2.6. Коэффициент теплопередачи

11. По уточненному значению α^{II} повторяют расчет во втором приближении, при этом принимают температуру зоны (t_3), температуру кожуха (t_k), мощность $P_{\text{зл}}$ (получена по п. 4) и P_k (получена из графика рис. 2.5 при перегреве кожуха на Δt_k) оставляют неизменными.

12. В результате расчета во втором приближении находят температуры t_1^{II} , t_2^{II} , $t_{\text{вых}}^{\text{II}}$ и G^{II} . Находят величину отношения G^{II}/G_0 и по графику (рис. 2.6) уточняют значение α^{III} .

13. Мощность, рассеиваемая блоком, во втором приближении

$$P^{\text{II}} = P_k + 2G^{\text{II}}C_p (t_2^{\text{II}} - t_1^{\text{II}}).$$

14. Температура $t_k^{\text{II}*}$ во втором приближении

$$t_k^{\text{II}*} = \frac{1}{S_{\text{к1}}} \left[\frac{2C_p G^{\text{II}}}{\alpha^{\text{II}}} (t_1 - t_c) + (S_{\text{з1}} + S_{\text{к1}}) t_1^{\text{II}} - S_{\text{з1}} t_3^{\text{II}} \right].$$

15. Если величина разности температур t_k и t_k^{II} составляет более 5 %, то проводят расчет в третьем приближении

$$t_k^{\text{III}} = t_k^{\text{II}} - 0,1 \cdot (t_k - t_k^{\text{II}})$$

По найденной температуре t_k^{III} по графику (рис. 2.5) находят мощность, рассеиваемую кожухом блока, в третьем приближении P_k^{III} .

16. Находят значение функции температур $f(t_3, t_k^{III})$ и определяют $P_{3л}^{III}$. Уточняют величину D^{III} с учетом $(P_{3л}^{II} - P_k^{III})$. $P_{3л}^{III}$ получена из графика при температуре t_k^{III} . Рассчитывают $t_1^{III}, t_2^{III}, t_{\text{вых}}^{III}$ и находят G^{III} .

17. По полученным данным из графика (рис. 2.6) находят α^{III} .

Мощность, рассеиваемая блоком, в третьем приближении

$$P^{III} = P_k^{III} + 2G^{III}C_p(t_2^{III} - t_1^{III}).$$

18. Температура кожуха в третьем приближении

$$t_k^{III*} = \frac{1}{S_{к1}} \left[\frac{2G^{III}C_p}{\alpha^{III}}(t_1^{III} - t_2) + (S_{3л} + S_{к1})t_1^{III} - S_{3л}t_3 \right].$$

19. Окончательное значение температуры кожуха t_k и рассеиваемой мощности (P) в блоке:

$$\frac{t_k - t_k^{III}}{t_k - t_k^{III*}} = \frac{t_k - t_k^{III}}{t_{к1}^{III*} - t_{к1}^{III}}; \quad P = P^{III} + \frac{t_k - t_k^{III}}{t_k^{II} - t_k^{III}} (P^{II} - P^{III}).$$

Полученные в результате расчета мощность P и соответствующая ей температура t_k наносятся на график рис. 2.4.

По двум точкам строят характеристику $\Delta t_k = f(P)$ (начало координат и t_k).

Зная фактическую мощность, рассеиваемую в блоке, по этим двум характеристикам окончательно находят температуры перегрева зоны и кожуха.

В случае, если они оказываются больше допустимых, необходимо увеличить площадь перфорационных отверстий либо перейти на принудительное охлаждение (вентиляцию) блока.

Температура элементов блока с принудительным охлаждением

В блоках аппаратуры, построенных по кассетному принципу, удельная мощность тепловыделения оказывается весьма большой, что заставляет разработчиков использовать воздушное принудительное охлаждение (рис. 2.7).

Воздух под напором вентилятора нагнетается в блок через входное отверстие, омывает тепловыделяющие элементы и через выходное отверстие выбрасывается наружу.

Предполагают, что тепловыделение всех микросхем одинаково. Микросхемы располагаются на печатных платах, входящих в кассеты. Кассеты расположены вдоль воздушного потока и расстояние между ними не менее 3 мм. Для обеспечения равенства сечений воздушных каналов в блоке имеются выравнивающие заслонки.

Исходные данные

P_3 – мощность, выделяемая всеми элементами блока, Вт;

$N_{\text{п}}$ – число печатных плат в блоке;

n – число микросхем в блоке;

L_y и L_z – внутренние размеры кожуха по координатам Y и Z;

$h_{\text{п}}$ – толщина печатной платы;

l_y – ширина печатной платы;

l_{y1} и l_{z1} – размеры элемента (микросхемы).

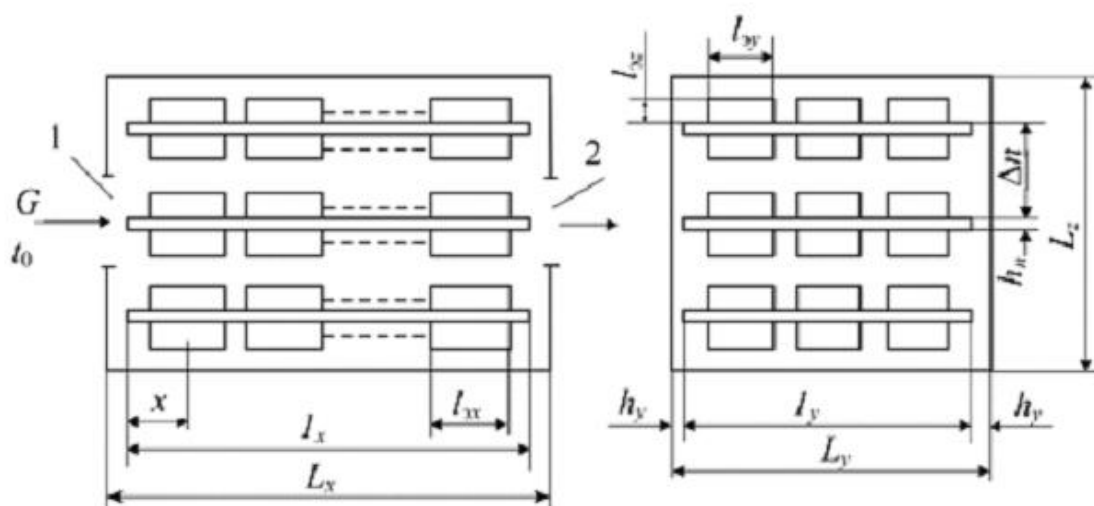


Рис. 2.7. Схема блока кассетной конструкции с принудительным воздушным охлаждением:

1 – входное; 2 – выходное отверстие

Последовательность расчета

1. Задаются объемным расходом воздуха G .
2. Площадь среднего поперечного сечения воздушного канала на расстоянии x от входного отверстия

$$S_x = L_y L_z - h_{\text{п}} l_{\text{п}} N_{\text{п}} - \sum_{i=1}^{2N_{\text{п}}} l_{\text{э}yi} l_{\text{э}zi} n_{yi} .$$

3. Число Рейнольдса

$$\text{Re}_3 = \frac{Gl'}{\nu S_x} .$$

где l' – определяющий размер микросхемы в направлении воздушного потока; ν – кинематическая вязкость воздуха.

4. Коэффициент теплоотдачи i -й микросхемы

$$\alpha_3 = 0,8 \frac{\lambda_{\text{в}}}{l'} \sqrt{\text{Re}_3} .$$

5. Перегрев воздуха, протекающего вблизи микросхемы, расположенной на расстоянии x от начала платы

$$\vartheta_{\text{вз}} = \frac{\sum_{i=1}^m P_{\text{э}i}}{1000G\rho} ,$$

где $P_{\text{э}i}$ – мощность тепловыделения i -го элемента, расположенного до сечения x ; ρ – плотность воздуха; G – объемный расход воздуха.

6. Перегрев воздуха за счет тепловыделения одного дискретного элемента

$$\vartheta_3 = \vartheta_{\text{вз}} + \frac{P_3}{\alpha_3 S_3} ,$$

где S_3 – площадь поверхности элемента, омываемая воздушным потоком.

Температура поверхности корпуса элемента

$$t_3 = t_0 + \vartheta_3 ,$$

где t_0 – температура воздушного потока на входе блока.

7. Средний перегрев воздуха на выходе блока

$$\vartheta_{\text{в}} = \frac{\sum P_{\text{э}}}{1000G\rho}.$$

Приведенный расчет справедлив для одиночного блока. Если в набегающем воздушном потоке располагается вентилятор, то к суммарной мощности тепловыделения микросхем необходимо добавить мощность тепловыделения вентилятора.

Расчет радиатора полупроводникового прибора

Исходные данные

$t_{п.макс}$ – максимальная температура перехода;

$R_{вн}$ – внутреннее тепловое сопротивление прибора;

$P_{рас}$ – мощность рассеиваемая прибором;

t_c – температура окружающей среды;

$R_{кт}$ – контактное сопротивление прибор – теплосток (величина $R_{кт}$ лежит в пределах $0,1 \dots 1,0$ град/Вт)

Последовательность расчета

1. Мощность рассеяния прибора при заданных условиях

$$t_{вых}^1 = 2t_2^1 - t_{вн}^1,$$

где $R_{тс}$ – тепловое сопротивление теплосток (радиатор) – среда. Необходимо выполнить условие $P_{макс} \leq P_{рас}$.

2. Тепловое сопротивление теплосток – среда

$$R_{тс} = \frac{(t_{п.макс} - t_c) - P_{рас}(R_{вн} + R_{кт})}{qP_{рас}},$$

где q – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения температуры по радиатору ($q \approx 0,9$).

3. Среднеповерхностная температура перегрева радиатора (рис. 2.8)

$$t_T - t_c = P_{рас}R_{тс}.$$

4. По Δt (рис. 2.9) находят минимальную высоту радиатора L_{min} .

5. Задаются габаритами радиатора: l – ширина радиатора; b – расстояние между ребрами; h – высота ребра; d – толщина основания.

Рекомендуется придерживаться следующих соотношений: при основании радиатора 90×90 мм; $\delta = 3$ мм; $d = 5$ мм; $h = 20$ мм; $b = 12$ мм (естественная конвекция) и $b = 6$ мм (принудительное движение воздуха).

6. Расстояние между ребрами

$$b = \frac{L_{\min} - \delta n}{n - 1},$$

где n и δ – число и толщина ребра.

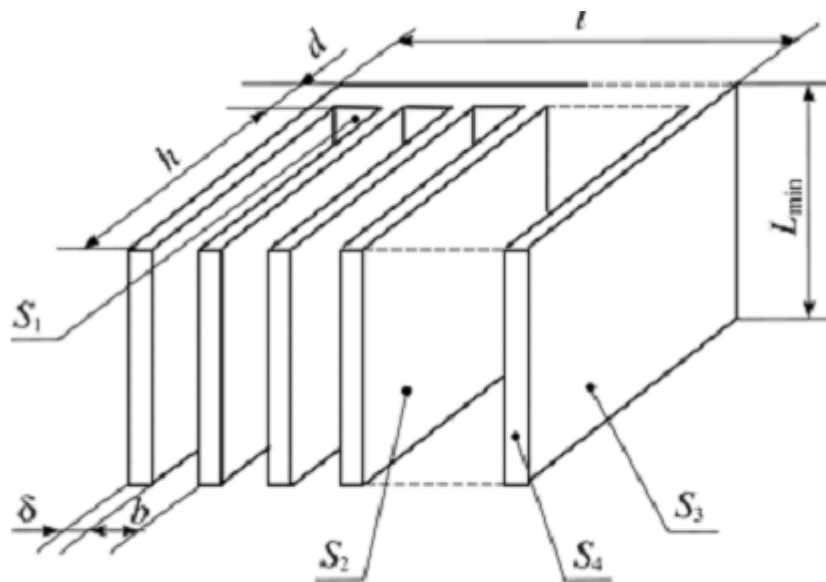


Рис. 2.8. Односторонний ребристый радиатор

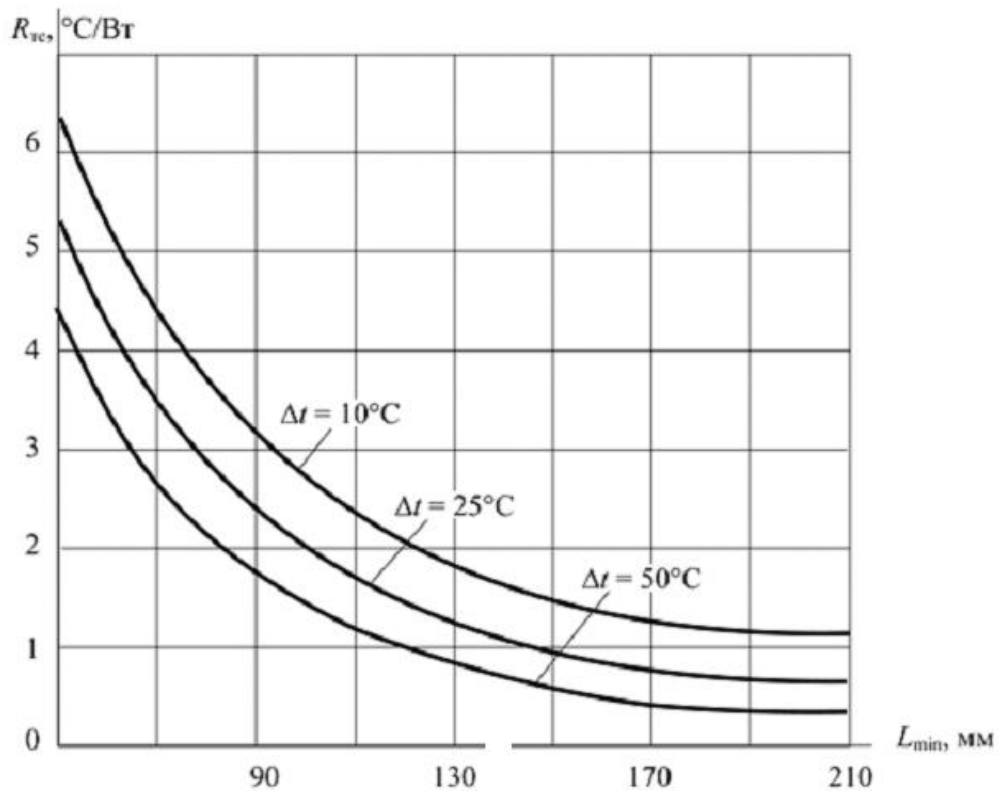


Рис. 2.9. Изменение сопротивления R_{rc} от размера ребра радиатора и $\Delta t_c = 50^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 0,9$; $\delta = 0,2$ см; $h = 30$ мм

Расстояние между ребрами определяют из условия $b \geq A$, где A толщина пограничного слоя (при естественной конвекции $A = 8 \dots 10$ мм, вынужденной – $A \approx 2,5$ мм).

Толщина и высота ребра выбирают из условия

$$\frac{\delta}{h^2} > \frac{\alpha}{\lambda},$$

где h – высота ребра; α – суммарный коэффициент теплоотвода;

λ – теплопроводность материала радиатора.

Ширину радиатора l определяют из конструктивных соображений, считая $l \approx 0,9L_{\min}$:

$$l = n(b + \delta) - b.$$

Материалы для радиаторов

Материалы	γ , кг/м ³	λ , Вт/(м·°C)
Медь	8960	370
Сплавы алюминия	2660	160
Сплавы магния	1760	170
Сталь	7840	55
Нержавеющая сталь	7840	14

Алюминиевый сплав с шероховатой поверхностью	0,06...0,07
Алюминиевый сплав окисленный	0,20...0,30
Алюминиевый сплав анодированный (черный)	0,80...0,85
Медь окисленная	0,80...0,88

7. Целесообразность оребрения радиатора определяется по критерию Био

$$Bi = 0,5\alpha\delta/\lambda,$$

где $Bi < 1$ (ребро охлаждается), $Bi > 1$ (ребро изолятор), $Bi = 1$ (ребро не влияет).

8. Вся поверхность радиатора разбивают на части:

- S_1 – поверхность между ребрами;
- S_2 – поверхность ребер, обращенная друг к другу;
- S_3 – поверхность крайних ребер;
- S_4 – поверхность торцов ребер;
- S_5 – неоребренная поверхность.

Неоребренная поверхность $S_5 = lL$.

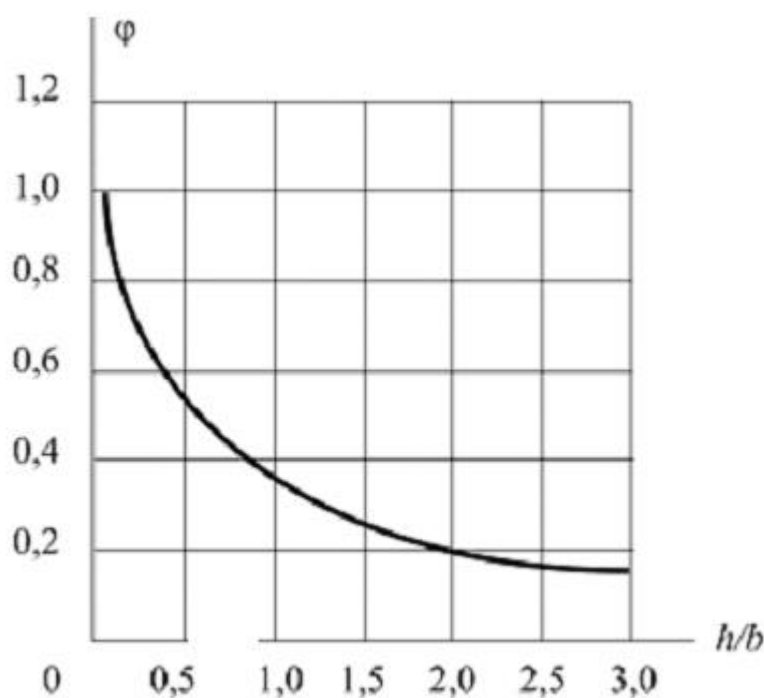


Рис. 2.10. Коэффициент взаимной облученности

Оребренная поверхность

$$S_{орреб} = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 = (n - 1) (bL_{min}) + 2hl(n - 1) + 2(h + d)L_{min} + n[2h\delta + \delta L_{min}].$$

9. Полные коэффициенты теплоотдачи оребренной и неоребренной поверхностей

$$\alpha_{гл} = \alpha_{л.гл} + \alpha_{к.гл}; \alpha_{орреб} = \alpha_{л.орреб} + \alpha_{к.орреб}; \alpha_{л} = \epsilon_n \varphi_{ij} f(t_t, t_c).$$

Для поверхностей S_1 и S_2 коэффициенты взаимной облученности определяются из графика (рис. 2.10) или рассчитываются

$$f(t_T, t_C) = 5,67 \cdot [(t_T + 273)^4 - (t_C + 273)^4] \cdot 10^{-8} \cdot (t_T - t_C)^{-1}.$$

Конвективный коэффициент теплоотдачи, Вт/(см² · °С)

$$\alpha_K = 5,62 A(t_M) B;$$

$$B = \left(\frac{t_T - t_C}{L_{\min}} \right)^{1/4},$$

$$t_M = 0,5 \cdot (t_T + t_C).$$

где

Величина $A(t_M)$ учитывает свойства среды и находится по графику (рис. 2.11). Влияние атмосферного давления на величину $A(t_M)$ находят из графика рис. 2.12.

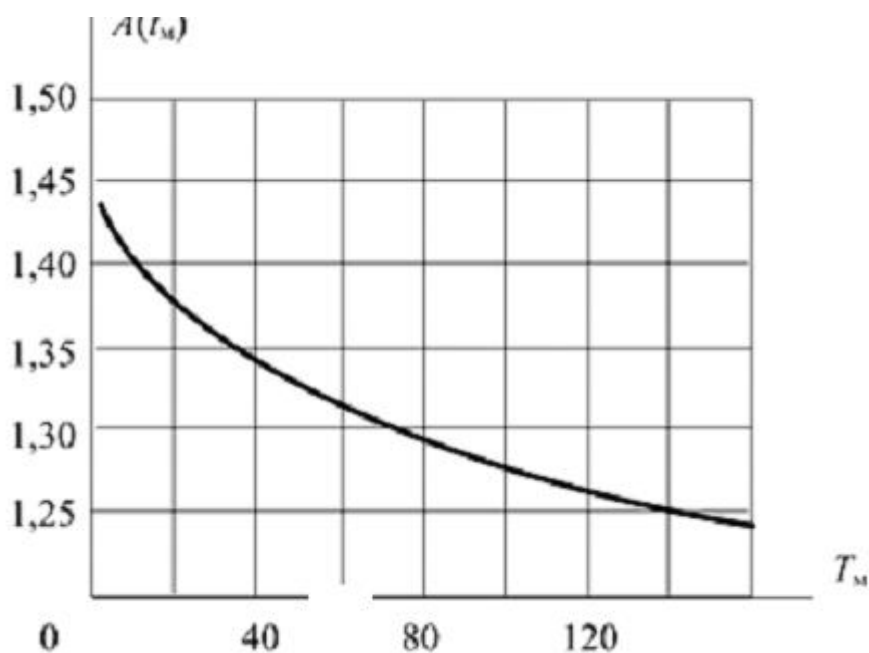


Рис. 2.11. Зависимость $A = f(T_M)$

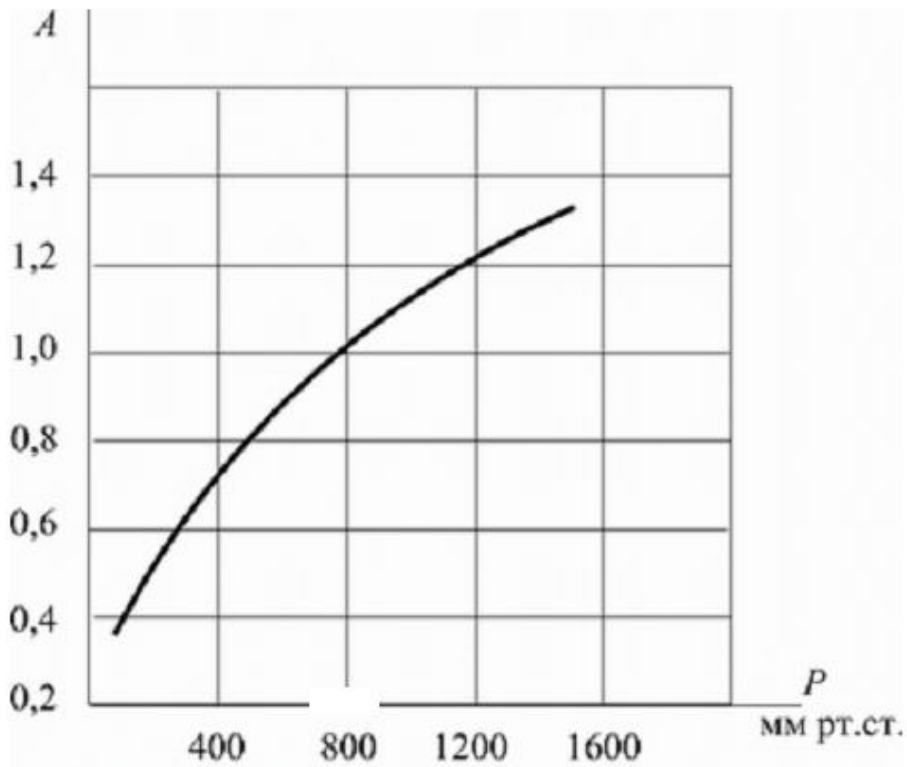


Рис. 2.12. Зависимость A от атмосферного давления

10. Мощность, рассеиваемая гладкой поверхностью радиатора, Вт,

$$P_{\text{гл}} = \alpha_{\text{гл}} S_{\text{гл}} (t_{\text{T}} - t_{\text{с}}).$$

11. Величина теплового сопротивления гладкой поверхности, °C/Вт,

$$R_{\text{тс}}^{\text{II}} = \frac{1}{\alpha_{\text{гл}} S_{\text{гл}}}.$$

12. Мощность, рассеиваемая оребренной поверхностью

$$P_0 = \sum P_i = \sum S_i [\alpha_{i\text{к}} (t_{i\text{T}} - t_{i\text{с}}) + \alpha_{i\text{н}} (t_{i\text{T}} - t_{\text{с}})],$$

где P_i – мощность, рассеиваемая i -й поверхностью; $t_{i\text{с}}$ – температура среды между ребрами.

Температура воздуха вблизи поверхностей S_3 ; S_4 и S_5 равна $t_{\text{с}}$.

Температура воздуха вблизи поверхностей S_1 и S_2 (между ребрами) равна

$$t_{i\text{с}} = t_{\text{T}} - (t_{\text{T}} - t_{\text{с}}) H,$$

где H – относительный температурный напор; t_m – среднеповерхностная температура теплостока.

Если ребра располагаются вертикально, то

$$H = f(\eta),$$

где $\eta = A_4(t_m) b C$, $t_m = 0,5 \cdot (t_T + t_C)$, $C = (t_T - t_C)^{1/4} / (L)^{1/4}$ (рис. 2.13 и 2.14). $t_{ci} = t_c$ для S_3, S_4, S_5 . $t_{ci} = t_{ic}$ для S_1 и S_2 (конвективный коэффициент торцевых поверхностей ребер принимается равным крайним ребрам).

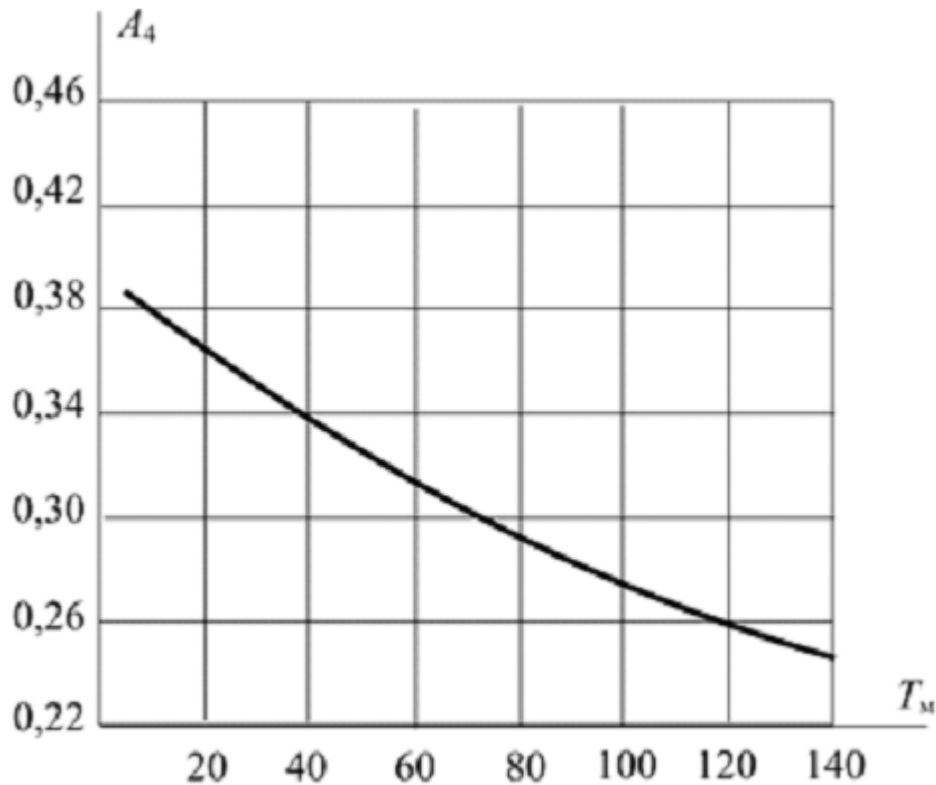


Рис. 2.13. Зависимость $A_4 = f(T_m)$ от средней температуры

Тепловое сопротивление оребренной поверхности, °C/Вт

$$R_{тс}^I = \frac{t_T - t_C}{P_{орѐб}}.$$

Общее тепловое сопротивление

$$R_{тс}^{расч} = \frac{R_{тс}^I R_{тс}^{II}}{R_{тс}^I + R_{тс}^{II}}.$$

Мощность, рассеиваемая радиатором, Вт

$$P_{общ.расч} = P_{гл} + P_{орѐб}.$$

Необходимо выполнить условие $P_{общ.расч} \geq P_{исх расч}$.

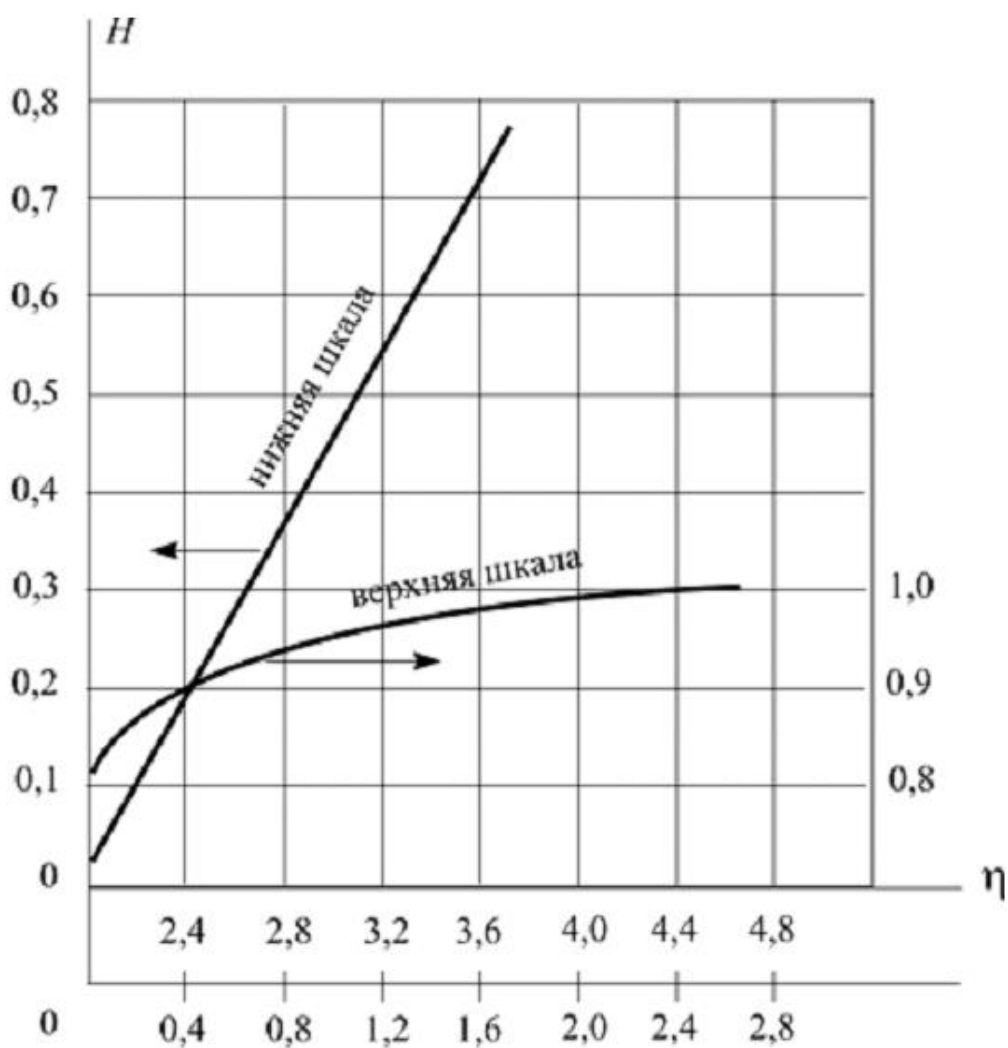


Рис. 2.14. Зависимость $H = f(\eta)$

Радиатор с двухсторонним оребрением

Расчет двустороннего оребренного радиатора производится по тем же формулам, что и расчет односторонне оребренного радиатора. При этом неоребренную поверхность основания радиатора S_5 замещают соответствующими поверхностями ребер. Для установки полупроводникового прибора на радиаторе, часть ребер должны быть удалены. Это учитывается соответствующим уменьшением площади оребренной поверхности.

Радиатор типа пластины

При расчете пластинчатого радиатора используют расчетные выражения для плоской поверхности (пластина может быть гладкой или изогнутой в виде буквы П).

