

Значение функции $f(t_p, t_c)$

$t_c, ^\circ\text{C}$

$t_p, ^\circ\text{C}$	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100
10	5,03													
15	5,16	5,32												
20	5,31	5,45	5,59											
25	5,45	5,59	5,76	5,90										
30	5,59	5,76	5,90	6,05	6,20									
35	5,76	5,90	6,05	6,20	6,35	6,51								
40	5,90	6,06	6,20	6,35	6,51	6,60	6,82							
45	6,05	6,20	6,35	6,51	6,66	6,83	7,00	7,14						
50	6,20	6,35	6,51	6,67	6,83	7,00	7,17	7,35	7,50					
60	6,65	6,70	6,87	7,04	7,19	7,35	7,51	7,69	7,87	8,05				
70	6,90	7,06	7,21	7,39	7,55	7,72	7,86	8,05	8,24	8,42	8,80			
80	7,27	7,44	7,59	7,75	7,80	8,07	8,26	8,45	8,65	8,83	9,20	9,62		
90	7,63	7,82	7,98	8,13	8,31	8,49	8,67	8,86	9,04	9,25	9,65	10,03	10,46	
100	8,03	8,19	8,37	8,53	8,72	8,91	9,09	9,28	9,46	9,66	10,08	10,49	10,91	11,36
110	8,43	8,60	8,79	8,97	9,15	9,33	9,51	9,71	9,90	10,10	10,51	10,93	11,38	11,82
120	8,85	9,02	9,20	9,40	9,58	9,77	9,98	10,17	10,35	10,56	11,01	11,42	11,87	12,31

7. Определяется эффективный коэффициент теплоотдачи, d :

$$d = d_k + d_g \quad (5.17)$$

8. Определяется теплообменная поверхность, S , м^2 :

$$S = \frac{P}{d \cdot \Delta t} \quad (5.18)$$

9. Определяется длина пластины, l , м :

$$l = \frac{S - 2L\delta}{2(L+\delta)} \quad (5.19)$$

5.4.2. Методика расчёта ребристого радиатора при естественном воздушном охлаждении

1. Задаётся мощность, рассеиваемая ППП, P , Вт.
2. Задаётся температура окружающей среды, t_c , $^\circ\text{C}$.
3. Выбирается из справочника или табл. 5.1. максимальная температура перехода t_n , $^\circ\text{C}$.
4. Выбирается из справочника или табл. 5.1. тепловое сопротивление переход-корпус, $R_{пк}$, $^\circ\text{C}/\text{Вт}$.
5. Выбирается из [15-17] или вычисляется по (5.8) тепловое контактное сопротивление корпус-тепловод, $R_{кр}$, $^\circ\text{C}/\text{Вт}$.
6. Определяется тепловое сопротивление радиатора R_p , $^\circ\text{C}/\text{Вт}$:

$$R_p = 0,96 \frac{(t_n - t_c) - P(R_{кр} + R_{пк})}{P} \quad (5.20)$$

7. Определяется средняя поверхностная температура радиатора t_p , $^\circ\text{C}$:

$$t_p = PR_p + t_c$$

8. Определяется по графику (рис. 5.6.) минимальная протяжённость ребра, L_{min} , м.

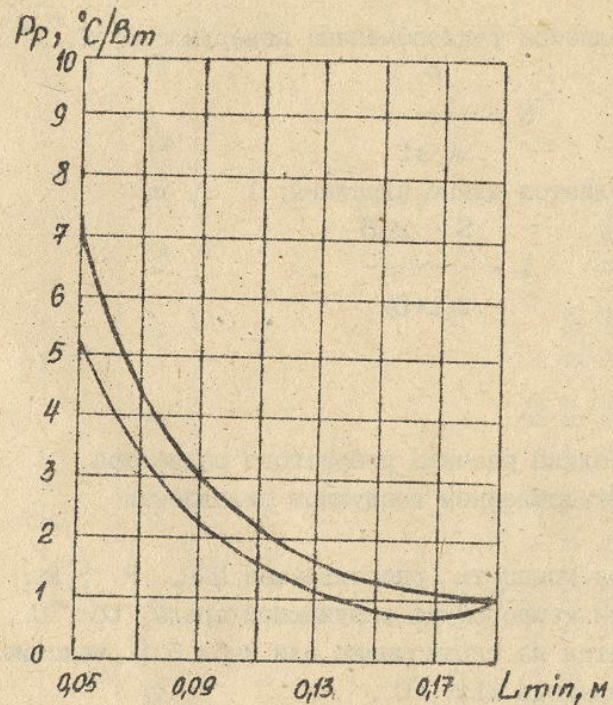


Рис. 5.6. График зависимости теплового сопротивления радиатора R_p от протяжённости ребра L_{min} .

9. Выбирается толщина ребра, d , м. Рекомендуется выбирать $d = (2...3) \cdot 10^{-3}$ м.

10. Выбирается толщина плиты теплоотвода, δ , м. Рекомендуется выбирать $\delta = (3...5) \cdot 10^{-3}$ м.

11. Выбирается расстояние между ребрами, β , м. Рекомендуется выбирать $\beta = (8...12) \cdot 10^{-3}$ м.

12. Выбирается высота ребра, h , м. Рекомендуется выбирать $h = (8...85) \cdot 10^{-3}$ м.

13. Выбирается протяжённость ребра, L , м. Рекомендуется

выбирать $L > L_{min}$.

14. Определяется число ребер, n , шт:

$$n = \frac{L + \beta}{\beta + d} \quad (5.21)$$

Рекомендуется выбирать на одно ребро больше расчётного.

15. Определяется длина плиты радиатора, l , м:

$$l = b(n-1) + 2d \quad (5.22)$$

16. Определяется площадь гладкой (неоребреной) поверхности радиатора, $S_{гл}$, m^2 :

$$S_{гл} = L \cdot l \quad (5.23)$$

17. Определяется площадь оребреной поверхности односторонне оребреного радиатора при креплении ППП с гладкой стороны, $S_{ор}$, m^2 :

$$S_{ор} = S_1 + S_2 + S_3 \quad (5.24)$$

где

$$S_1 = (n-1) \cdot L \cdot \beta ;$$

$$S_2 = (\delta + 2h) \cdot L \cdot n + 2l\delta ;$$

$$S_3 = 2n\delta \cdot h .$$

18. Определяется площадь полной поверхности двусторонне оребреного радиатора при креплении ППП с оребреной стороны:

$$S_{ор_2} = 2[Lhn_e + (l_1 + l_2)Ln_{e_1 + e_2} + l_1\delta hn_{e_1} + 2hn_{e_1 + e_2}] \quad (5.25)$$

где n_e - число неполных ребер;

$n_{e_1 + e_2}$ - число полных ребер.

19. Определяется коэффициент теплоотдачи конвекцией для гладкой поверхности радиатора, $\alpha_{к.г}$, $Вт/м^2 \cdot град$:

$$\alpha_{к.г} = A_1 \left(\frac{t_p - t_c}{2} \right)^{1/4} \quad (5.26)$$

где $A_1 = f(t_m)$ - определяется по графику (рис. 5.5) или по формулам (5.13), (5.14).

20. Определяется коэффициент теплоотдачи излучением для гладкой поверхности радиатора, $\alpha_{л,гн}$, Вт/м²·град:

$$\alpha_{л,гн} = \varepsilon \cdot \Psi \cdot f(t_p, t_c) \quad (5.27)$$

где ε - степень черноты тела (выбирается из табл. 5.4.);

Ψ - коэффициент облученности (для гладкой поверхности $\Psi = 1$);

$f(t_p, t_c)$ - определяется из табл. 5.5. или рассчитывается по формуле (5.16).

21. Определяется эффективный коэффициент теплоотдачи гладкой поверхности радиатора, $\alpha_{гн}$, Вт/м²·град:

$$\alpha_{гн} = \alpha_{к,гн} + \alpha_{л,гн} \quad (5.28)$$

22. Определяется мощность, рассеиваемая гладкой поверхностью радиатора, $P_{гн}$, Вт:

$$P_{гн} = \alpha_{гн} S_{гн} (t_p - t_c) \quad (5.29)$$

23. Определяется тепловое сопротивление гладкой поверхности радиатора, $R_{п,гн}$, град/Вт:

$$R_{п,гн} = 1 / (\alpha_{гн} S_{гн}) \quad (5.30)$$

24. Определяются коэффициенты для нахождения относительного температурного напора:

$A_2 = f(t_m)$ - определяется по графику (рис. 5.7) или по формуле

$$A_2 = 0,18372152 - 0,00163976 \cdot t_m - 0,0000602 \cdot t_m^2 - 0,00000001 \cdot t_m^3 \quad (5.31)$$

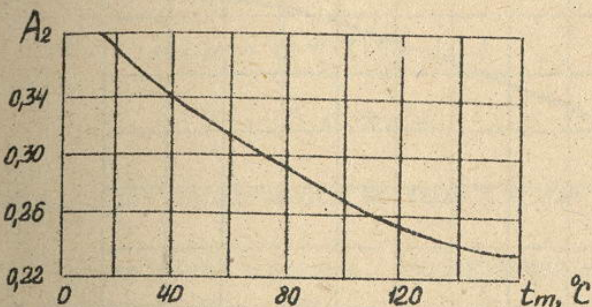


Рис. 5.7. График зависимости коэффициента A_2 от величины t_m

где $t_m = 0,5 (t_p + t_c)$ (5.32)

$K = (t_p - t_c)^{1/4}$ - определяется по графику (рис. 5.8). (5.33)

$M = L^{1/4}$ - определяется по графику (рис. 5.9).

$$C = K/M \quad ; \quad (5.34)$$

$$\eta = A_2 \cdot B \cdot C \quad (5.35)$$

25. Определяется относительный температурный напор H :
 $H = f(\eta)$ - определяется по графику (рис. 5.10).

26. Определяется температура окружающей среды между ребрами, t'_c , °C:

$$t'_c = t_p - H(t_p - t_c) \quad (5.36)$$

27. Определяются коэффициенты для нахождения конвективного коэффициента теплоотдачи ребренной поверхности радиатора:

$$t'_m = 0,5(t_p + t'_c) \quad (5.37)$$

$A'_1 = f(t'_m)$ - определяется по графику (рис. 5.5) или по формуле (5.13);

$K' = (t_p - t'_c)^{1/4}$ - определяется по графику (рис. 5.8);

$$C' = K' / M \quad (5.38)$$

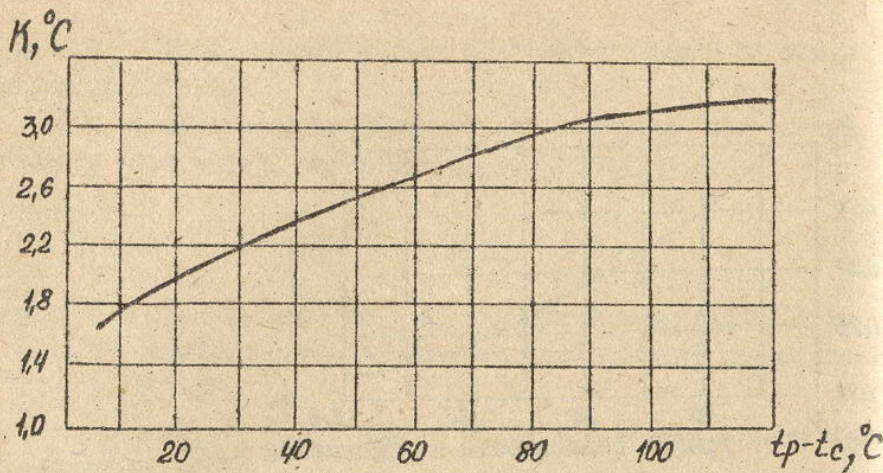


Рис. 8. График зависимости коэффициента K от разности температур $t_p - t_c$.

28. Определяется конвективный коэффициент теплоотдачи для оребренной поверхности радиатора, $\alpha_{к.ор}$, Вт/м²·град:

$$\alpha_{к.ор} = A'_1 \cdot C' \quad (5.39)$$

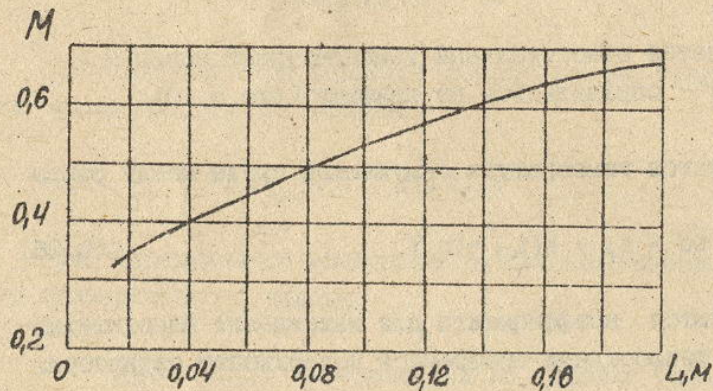


Рис. 9. График зависимости коэффициента M от протяженности ребра L .

29. Определяется коэффициент теплоотдачи излучением для оребренной поверхности радиатора, $\alpha_{л.ор}$, Вт/м²·град:

$$\alpha_{л.ор} = \epsilon \cdot \psi \cdot f(t_p, t_c) \quad (5.40)$$

где $\psi = \beta / (2h + \beta)$; (5.41)

$f(t_p, t_c)$ - определяется из табл. 5.5 или по формуле (5.46).

30. Определяется мощность, рассеиваемая оребренной поверхностью радиатора, $P_{ор}$, Вт:

$$P_{ор} = (\alpha_{к.ор} + \alpha_{л.ор}) \cdot S_{ор} \cdot (t_p - t_c) \quad (5.42)$$

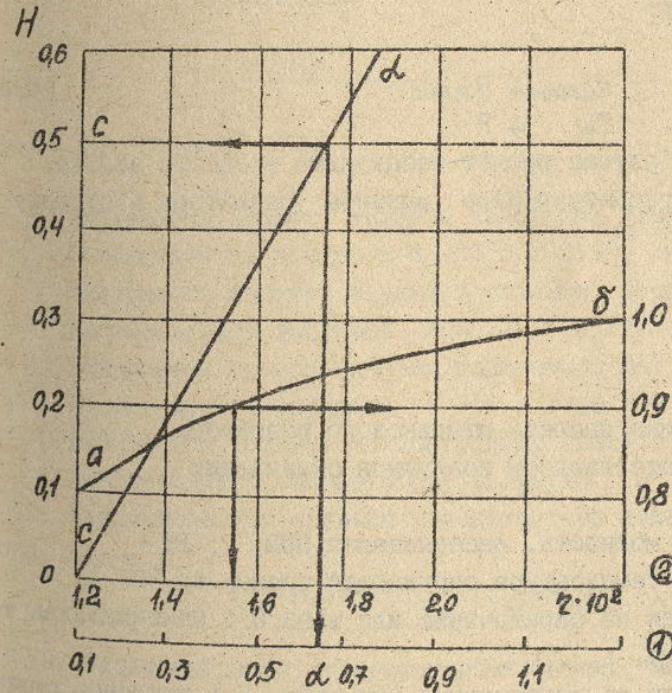


Рис. 5.10. График зависимости относительного температурного перепада H от коэффициента ζ .

31. Определяется тепловое сопротивление оребренной поверх-

ности радиатора, $R_{P,OP}$, град/Вт:

$$R_{P,OP} = (t_p - t_c) / P_{OP} \quad (5.43)$$

32. Определяется общее расчётное тепловое сопротивление радиатора, $R_{P,расч}$, град/Вт:

$$R_{P,расч} = (R_{P,гл} \cdot R_{P,OP}) / (R_{P,гл} + R_{P,OP}) \quad (5.44)$$

33. Определяется мощность, рассеиваемая радиатором, P_p , Вт:

$$P_p = P_{P,гл} + P_{P,OP} \quad (5.45)$$

34. Выполняется проверка правильности расчёта. Должны соблюдаться условия:

$$\begin{aligned} R_{P,расч} &\leq R_{P,исх.} \\ P_p &\geq P \end{aligned} \quad (5.46)$$

В противном случае расчёт необходимо провести заново, выбрав другие геометрические размеры радиатора в сторону их увеличения.

5.4.3. Методика расчёта штырькового радиатора при естественном воздушном охлаждении

1. Задаётся мощность, рассеиваемая ППП, P , Вт.
2. Задаётся температура окружающей среды, t_c , °С.
3. Выбирается из справочника или табл. 5.1 максимальная температура перехода, t_n , °С.
4. Выбирается из справочника или табл. 5.1 тепловое сопротивление переход-корпус, $R_{пк}$, °С/Вт.
5. Выбирается из справочника [15-17] или рассчитывается по (5.8) контактное сопротивление корпус-теплоотвод, $R_{кр}$, °С/Вт.
6. Выбирается высота штыря, h , м. Рекомендуется выбирать

$$h = (15 \dots 30) \cdot 10^{-3} \text{ м (см. рис. 5.11).}$$

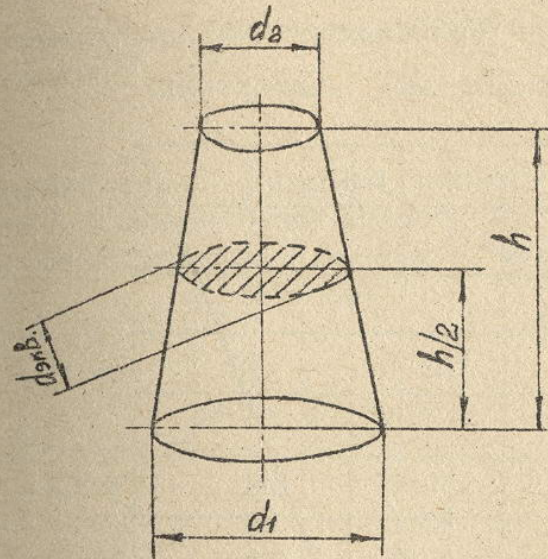


Рис. 5.11. Профиль штыря.

7. Выбирается диаметр нижнего основания штыря, d_1 , м. Рекомендуется выбирать $d_1 = (2,5 \dots 3) \cdot 10^{-3}$ м.
8. Выбирается диаметр верхнего основания штыря, d_2 , м. Рекомендуется выбирать $d_2 = (1 \dots 1,5) \cdot 10^{-3}$ м.
9. Выбирается продольный или поперечный шаг, S , м. Рекомендуется выбирать $S = (5 \dots 7) \cdot 10^{-3}$ м.
10. Выбирается толщина теплоотводной пластины, δ , м. Рекомендуется выбирать $\delta = (4 \dots 5) \cdot 10^{-3}$ м.
11. Рассчитывается средняя поверхностная температура радиатора, t_p , °С:

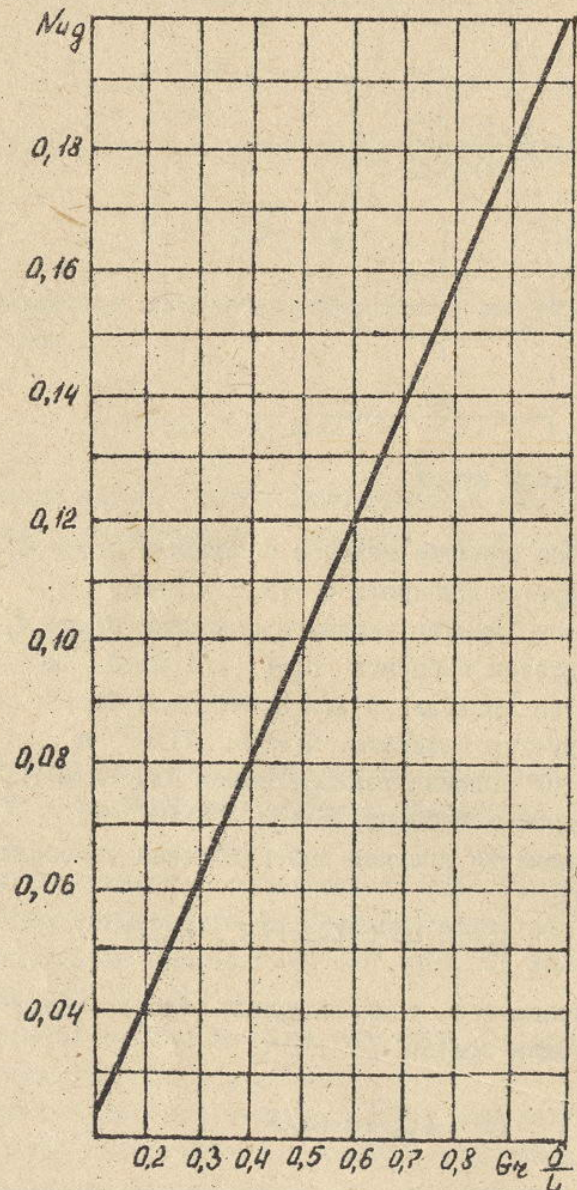
$$t_p = 0,96 [t_n - P(R_{кр} + R_{пк})] \quad (5.47)$$

12. Рассчитывается температурный напор между основанием штыря и окружающей средой, θ , °С:

$$\theta = (t_p - t_c - 3) / 2 \quad (5.48)$$

13. Рассчитывается диаметр среднего сечения штыря, $d_{ср}$, м:

Критерий Нуссельта для внутренних поверхностей радиатора



$$d_{\text{эке}} = (d_1 + d_2) / 2 \quad (5.49)$$

14. Из табл. 5.6 выбирается коэффициент кинематической вязкости воздуха, ν , $\text{м}^2/\text{с}$.

Таблица 5.6

Значения плотности ρ , удельной теплоёмкости c_p , теплопроводности λ , кинематической вязкости ν и числа Прандтля (Pr) сухого воздуха при давлении 10^5 Па при различных температурах

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$c_p, \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
-50	1,584	1010	2,04	9,23	0,728
-20	1,395	1010	2,28	12,79	0,716
0	1,293	1000	2,44	13,28	0,707
10	1,247	1000	2,51	14,16	0,705
20	1,205	1000	2,60	15,06	0,703
30	1,165	1000	2,68	16,00	0,701
40	1,128	1000	2,76	16,96	0,699
50	1,093	1000	2,83	17,95	0,698
60	1,060	1000	2,90	18,97	0,696
70	1,029	1000	2,97	20,02	0,694
80	1,000	1000	3,05	21,09	0,692
90	0,972	1000	3,13	22,10	0,690
100	0,946	1000	3,21	23,13	0,688
120	0,898	1000	3,34	25,45	0,686

15. Рассчитывается перепад между средней поверхностной температурой теплопровода и окружающей средой, $\Delta t, ^\circ\text{C}$:

$$\Delta t = t_p - t_c \quad (5.50)$$

16. Из табл. 5.6 выбирается коэффициент теплопроводности

воздуха, λ_g , Вт/м·град.

17. Рассчитывается критерий Грасгофа:

$$Gr'_z = (g \cdot d_{экв}^3) / \nu^2 \cdot \beta \Delta t \quad (5.52)$$

где $\beta = 1/(t_0 + 273)$ - коэффициент объемного расширения воздуха

g - ускорение свободного падения тела.

18. Рассчитывается критерий Нуссельта:

$$Nu = 0,47 (Gr'_z)^{1/4} \quad (5.53)$$

19. Рассчитывается коэффициент теплоотдачи, α , Вт/м²·град

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_{\lambda} \quad (5.54)$$

где

$$\alpha_k = (Nu \cdot \lambda_g) / d_{экв} \quad (5.55)$$

$$\alpha_{\lambda} = \varepsilon \cdot \psi \cdot f(t_p, t_0)$$

α_{λ} - коэффициент теплоотдачи излучением, входит в формулу (5.53) для α только с учётом размещения полупроводникового прибора с теплопроводом в блоке РЭС.

В лабораторной работе $\alpha = \alpha_k$.

20. Рассчитывается периметр поперечного сечения штыря (среднего по высоте), U , м:

$$U = \pi \cdot d_{экв} \quad (5.56)$$

21. Рассчитывается площадь поперечного сечения штыря, f , м²

$$f = (\pi \cdot d_{экв}^2) / 4 \quad (5.57)$$

22. Выбирается из табл. 5.7 коэффициент теплопроводности материала, λ_m , Вт/м·град.

Таблица 5.7

Теплопроводность λ , плотность ρ и удельная теплоёмкость C_p различных твёрдых материалов

Наименование материала	Температура, °С	λ , Вт/(м·К)	ρ , кг/м ³	C_p , Дж/(кг·К)
Металлы и сплавы				
Алюминий	0-100	210	2700	900
Германий	20	14,7-29,3	5320	314
Дюралюминий	0-100	160-180	2750	920
Железо	0	74,4	7880	440
Кремний	20	23,3	2300	733
Латунь	0-100	90-100	8600	376
Серебро	0-100	390-420	10500	234
Свинец	0-100	35	11250	125
Сталь -12	0-100	45	7900	470
Сталь 20	0-100	50	7850	460
Сталь легированная конструкционная	0-100	38	7780	480
Медь	0-100	390	8930	380
Золото		297		
Неметаллические материалы				
Асбест листовой	30	0,11	770	816
Асбест (волокно)	50	0,11	470	816
Бакелитовый лак	20	0,29	1400	-
Бумага	20	0,10-0,14	300-730	1507
Дерево (фанера)	20	0,15	600	1256
Картон обыкновенный	20	0,17	700	1510
Плексиглаз (оргстекло)	20	0,19	1180	1423-1550
Пробковая пластина	30	0,042	190	1884
Резина	20	0,15	250-1300	2050
Слюда	20	0,45-0,06	2600-3200	879
Стекло кварцевое	100-200	1,4-1,5	2500-2800	892
Стекланная вата	0	0,037	200	670
Текстолит	20	0,23-0,34	1300-1400	1460-1500

	100	2-2,5	2500-2600	1088
Ретинакс	20	0,15-0,18	1215	-
Компаунд ЭК-16А	50-100	0,30-0,35	1350	1200-1400
Воздух	0-100	0,023	-	-

23. Рассчитывается безразмерный коэффициент χ :

$$\chi = \sqrt{4 \alpha_k / \lambda_M \cdot d_{\text{экв}}} \quad (5.57)$$

24. Рассчитывается теплоотдача единичного штыва, $P_{\text{шт}}$, Вт:

$$P_{\text{шт}} = 1,14 \theta \cdot \text{th}(\chi h) \cdot \sqrt{\alpha_k U F \lambda_M} \quad (5.59)$$

25. Определяется общее количество штывей радиатора:

$$n = 0,6(P/P_{\text{шт}}) \quad (5.60)$$

26. Рассчитывается площадь основания радиатора, S , м²:

$$S_p = S^2 n + S_n \quad (5.61)$$

где S_n - площадь, занимаемая полупроводниковым прибором, рассчитывается или выбирается из табл. 5.1.

27. Рассчитывается площадь радиатора:

для одностороннего теплоотвода при расположении полупроводникового прибора на свободной от штывей стороне:

$$S_p' = S^2 n \quad ; \quad (5.62)$$

для двустороннего теплоотвода:

$$S_p'' = S_p / 2 \quad (5.63)$$