

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Воронежский государственный технический университет»

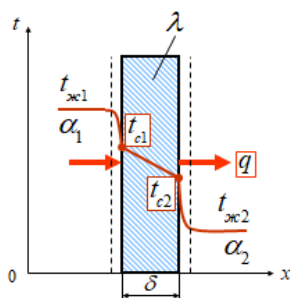
Кафедра конструирования и производства радиоаппаратуры

## РАСЧЁТ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА БЛОКА РЭС

### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

по курсовому проектированию

по дисциплинам «Теплофизические процессы в приборах»,  
«Теплофизические процессы в электронных средствах» для  
студентов направлений подготовки бакалавров 12.03.01  
«Приборостроение» профиль «Приборостроение», 11.03.03,  
«Конструирование и технология электронных средств» профиль  
«Проектирование и технология радиоэлектронных средств»  
очной и заочной форм обучения.



Воронеж 2022

Составитель: канд. техн. наук Н.В. Ципина  
УДК 621.3

Расчёт теплового режима блока РЭС: методические указания по курсовому проектированию по дисциплинам «Теплофизические процессы в приборах», «Теплофизические процессы в электронных средствах» для студентов направлений 12.03.01 «Приборостроение» профиль «Приборостроение», 11.03.03, «Конструирование и технология электронных средств» профиль «Проектирование и технология радиоэлектронных средств» очной и заочной форм обучения / ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический университет; сост., Н.В. Ципина. Воронеж, 2022. 46 с.

В методических указаниях приведена тематика курсовых проектов, указания по выполнению, требования к оформлению. Методические указания снабжены рекомендуемой литературой.

Методические указания подготовлены в электронном виде в текстовом редакторе MS Word 2007 и содержатся в файле ТПЛ\_курс.doc.

Табл. 12. Ил. 13. Библиогр.: 6 назв.

Рецензент д-р техн. наук, проф. О.Ю. Макаров

Ответственный за выпуск зав. кафедрой д-р техн. наук,  
проф. А.В. Башкиров

Издается по решению редакционно-издательского совета  
Воронежского государственного технического университета

## **ВВЕДЕНИЕ**

Настоящие методические указания предназначены для студентов направлений 12.03.01 «Приборостроение» профиль «Приборостроение», 11.03.03, «Конструирование и технология электронных средств» профиль «Проектирование и технология радиоэлектронных средств» очной и заочной форм обучения. Они служат указанием при выполнении курсовых проектов по дисциплинам «Теплофизические процессы в приборах», «Теплофизические процессы в электронных средствах».

В методических указаниях приведены тематика курсовых проектов, указания по выполнению, требования к оформлению.

### **1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Курсовой проект является завершающим этапом изучения дисциплин «Теплофизические процессы в приборах», «Теплофизические процессы в электронных средствах». Задачами курсовой работы являются:

- закрепление и расширение теоретических знаний студентов по процессам теплообмена в РЭС;
- развитие знаний и приобретение навыков в области решения задач по обеспечению нормальных тепловых режимов ЮС при ее конструировании;
- развитие навыков работы с научно-технической и справочной литературой;
- развитие навыков использования ЭВМ для автоматизации конструирования РЭС;
- подготовка к дипломному проектированию.

## 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Темы курсовых проектов соответствуют программе курса "Теплофизические процессы в устройствах РЭС", Также предусматривается выполнение работ исследовательского характера, ориентированных, например, на разработку вопросов автоматизации теплового проектирования РЭС с использованием ЭВМ.

Для курсовых проектов предусматриваются следующие темы:

- расчет тепловых характеристик блоков РЭС при различных условиях охлаждения;
- расчет тепловых характеристик блоков РЭС с различными видами охлаждения и температур отдельных элементов;
- тепловой расчет радиаторов различных типов;
- расчет термоэлектрической батареи охлаждения;
- выбор типа и расчет радиатора, обеспечивающего заданный тепловой режим при минимальных массе и габаритах;
- расчет теплового режима ГИС и микросборок.

### 2.1. Ориентировочный выбор способа охлаждения на ранней стадии проектирования

Применение на ранней стадии проектирования ориентировочного выбора способа охлаждения обусловлено тем, что модули, из которых состоит источник питания, представляют собой сложную систему тел с множеством внутренних источников теплоты. Точное аналитическое описание температурных полей внутри каждого модуля, и блока питания в целом, невозможно из-за громоздкости задачи и

неточности исходных данных: мощности источников теплоты, теплофизических свойств материалов, размеров границ.

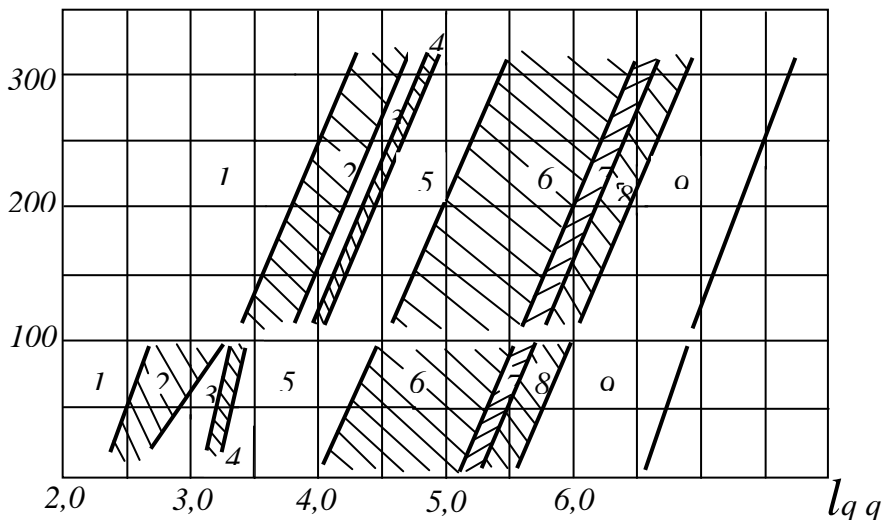


Рис. 1

Выбор способа охлаждения источника вторичного электропитания на ранней стадии проектирования можно производить с помощью графиков, представленных на рисунке рис.1, где показаны области целесообразного применения различных способов охлаждения [1,2].

За основной показатель, определяющий области целесообразного применения способа охлаждения, принимается значение плотности теплового потока, проходящего через поверхность теплообмена:

$$q = P \frac{K P}{S_n}, \quad (1)$$

где  $P$  – суммарная мощность, рассеиваемая источником вторичного электропитания с поверхности теплообмена;  $Kp$  – коэффициент, учитывающий давление воздуха (при атмосферном давлении  $Kp = 1$ );

$$S_n = 2[L_1 L_2 + (L_1 + L_2)L_3]K_3; \quad (2)$$

$S_n$  – поверхность теплообмена,

$K_3$  – коэффициент заполнения,

$V_i$  – объем  $i$ -го компонента;

$n$  – число компонентов;  $V$  – объем, занимаемый корпусом;

$L_1, L_2, L_3$  – размеры корпуса.

$$K_3 = \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{V}.$$

Вторым показателем служит минимально допустимый перегрев компонентов в блоке:

$$\Delta T_c = T_{i \min} - T_c, \quad (3)$$

где  $T_{i \min}$  – допустимая температура поверхности наименее теплостойкого компонента;  $T_c$  – температура окружающей среды.

Для естественного охлаждения  $T_c = T_{c \max}$ , то есть соответствует максимальной температуре окружающей среды. Для принудительного охлаждения  $T_c = T_{вх}$ , то есть соответствует температуре охлаждающего воздуха (или охлаждающей жидкости) на входе в корпус.

На рис. 1 приведены области целесообразного применения различных способов охлаждения в координатах

$\Delta T_c$ ,  $lq$   $q$ . Различают два типа областей: области, в которых можно рекомендовать применение определенного способа охлаждения, и области, в которых с примерно одинаковым успехом можно применять два или три способа охлаждения. Области первого типа не заштрихованы и относятся к следующим способам охлаждения: 1 – естественное воздушное; 3 – принудительное воздушное; 5 – принудительное жидкостное; 9 – принудительное испарительное.

Области второго типа заштрихованы: 2 – возможно применение естественного и принудительного воздушного охлаждения; 4 – возможно применение принудительного воздушного и жидкостного охлаждения; 6 – возможно применение принудительного жидкостного и естественного испарительного охлаждения; 7 – возможно применение принудительного жидкостного, принудительного и естественного испарительного охлаждения; 8 – возможно применение естественного и принудительного испарительного охлаждения.

Целью приближенного расчета является определение температур нагретой зоны и поверхности компонентов; знание температур необходимо также для оценки надежности.

Следует отметить, что выбор системы охлаждения не сводится только к определению области охлаждения, необходимо также учитывать техническую возможность осуществления данного способа охлаждения, то есть массу, объем, потребляемую мощность.

Для РЭС, охлаждаемых воздухом, тепловой режим изучен наиболее полно. Для подобного способа охлаждения можно оценить вероятность, с которой выбранная система охлаждения позволит обеспечить заданный тепловой режим.

## 2.2. Методика проведения расчета радиаторов

Перегрев компонентов можно существенно уменьшить путем увеличения теплоотдающей поверхности, то есть установки компонента на радиатор.

Для систем воздушного охлаждения широко применяют следующие типы радиаторов [3], [1]: пластинчатые, ребристые, игольчато-штыревые, типа «краб», жалюзийные, петельно-проволочные.

Для характеристики теплообменных свойств радиатора используют следующие параметры: эффективный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{эф}$ , тепловую проводимость  $\sigma_{\Sigma}$ , тепловое сопротивление  $R_{\Sigma}$ .

Эти параметры связаны со средним перегревом  $\theta_s$  основания и рассеиваемым потоком  $\Phi$  зависимостями

$$\alpha_{эф} A = \sigma_{\Sigma} = R_{\Sigma}^{-1}, \quad A = L_1 L_2, \quad A = \frac{\pi D^2}{4}, \quad (4)$$

$$\Phi = \sigma_{\Sigma} \theta_s = R_{\Sigma}^{-1} \theta_s = \alpha_{эф} \theta_s A,$$

где  $L_1$   $L_2$  – размеры основания прямоугольного радиатора;

$D$  – диаметр круглого основания.

Представленная зависимость справедлива для любого типа радиатора. Вся сложность переноса теплоты и конструктивные особенности сосредоточены здесь в одной величине – эффективном коэффициенте теплоотдачи. Этот коэффициент можно определить экспериментально, либо расчетным путем. В первом случае в основу положена



зависимость (4), которая позволяет по полученным из опытов значениям  $\Phi$  и  $\theta_s$ , определить  $\alpha_{эф}$ .

Обобщение результатов расчетов и опытов позволило построить графики, на которых представлены зависимости  $\alpha_{эф} = f_1(\theta_s)$ ,  $\alpha_{эф} = f_2(v)$  для различных радиаторов, работающих в условиях свободной и вынужденной конвекции. На рис. 2 приведены графики для игольчато-штыревых радиаторов с различным шагом  $S_{ш}$  (сплошные кривые 1,2,3,4) и  $S''_{ш}$  (пунктирные кривые 5,6,7,8). Заштрихованные области 9, 10, 11 относятся к ребристым радиаторам, у которых размер квадратного основания меняется от 40 до 80 мм.

В табл. 1 приведены значения высоты  $h$ , шагов  $S_{ш}$  и  $S''_{ш}$ , диаметров штыря  $d$ , толщины ребра  $\delta_1$ .

Таблица 1

Номера позиций радиаторов по рис. 19	Размеры, мм						
	$h$	$S_{ш}$	$S''_{ш}$	$d$	$\delta_1$	$L_1$	$L_2$
1	32	7	5	2,5	—	—	—
2	20	7	5	2	—	—	—
3	15	7	5	2	—	—	—
4	12,5	7	5	2	—	—	—
5	32	9	7	2,5	—	—	—
6	20	9	7	2	—	—	—
7	15	9	7	2	—	—	—
8	12,5	9	7	2	—	—	—
9	32	10	5	—	1	40-80	40-125
10	20	10	5	—	1	40-80	40-125
11	12,5	10	5	—	1	40-80	40-125

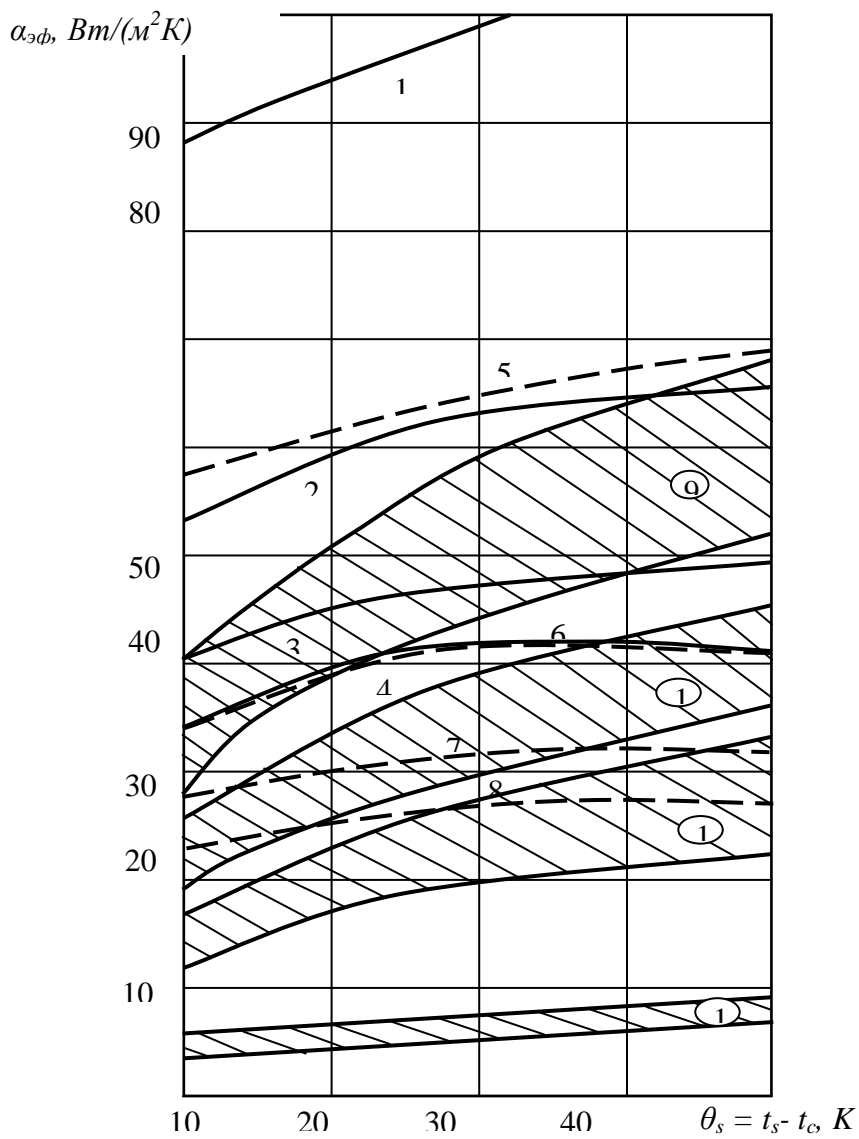


Рис. 2

Область 12 относится к группе пластинчатых радиаторов с размерами ребра квадратного основания от 40 до 155мм.

На рис. 3 представлен эффективный коэффициент теплоотдачи в зависимости от скорости вынужденного потока воздуха для тех же типов радиаторов, размеры которых указаны в табл. 1. При этом шаг между штырями или ребрами обозначен  $S_{ш}$  (сплошные кривые) и  $S'_{ш}$  (пунктирные кривые). Размеры квадратного основания пластинчатого радиатора (область 12)  $L_2$  изменяются в пределах от 40 до 125 мм.

Методика расчета радиатора следующая[4]:

1. Определяем перегрев в месте крепления компонента к радиатору по следующей формуле:

$$t_u - t_c = (t_p - t_c) - \Phi(R_{вн} + R_k) \quad (5)$$

где  $R_{вн}$  – внутреннее тепловое сопротивление прибора между рабочей областью и корпусом;  $R_k$  – тепловое сопротивление контакта;  $t_c$  – температура окружающей среды или набегающего потока;  $t_p$  – предельная температура рабочей области прибора;  $t_u$  – температура в месте крепления прибора к радиатору.

2. Определяем в первом приближении средний перегрев основания радиатора. Для этого введем безразмерную величину  $\beta$ , связывающую среднюю температуру  $t_s$  основания радиатора и температуру  $t_u$  в месте крепления прибора к радиатору (в первом приближении  $\beta = 1,2$ ):

$$t_s - t_c = \frac{(t_p - t_c) - \Phi(R_{вн} + R_k)}{\beta} \quad (6)$$

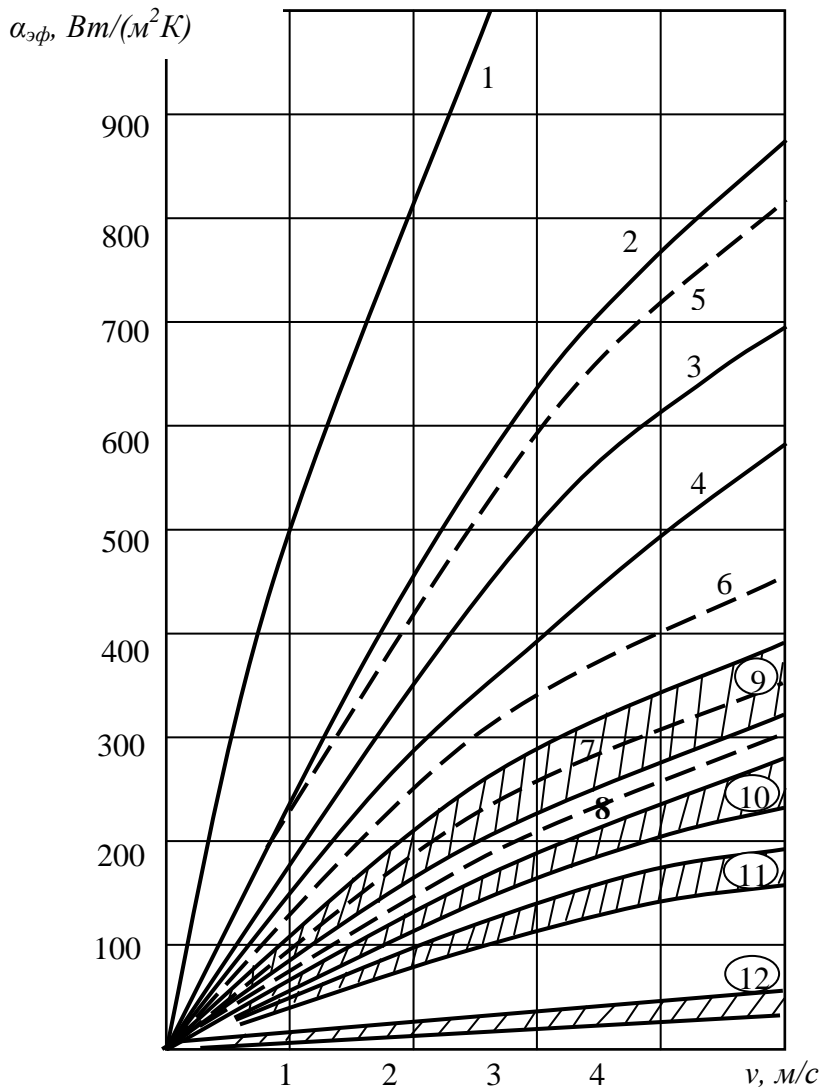


Рис. 3

3. Выбираем тип радиатора. Эта процедура является эмпирической и предполагает знание сравнительной эффективности различных типов радиаторов. В первом приближении выбрать тип радиатора и условия теплообмена можно с помощью графиков изображенных на рис. 4.

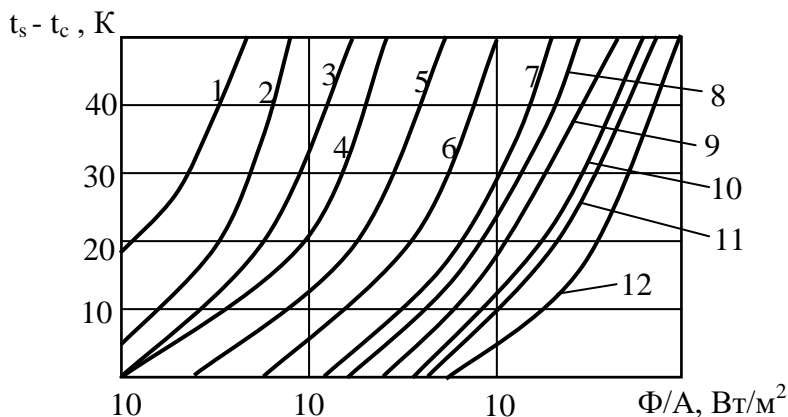


Рис. 4. Графики выбора типа радиатора: при свободной конвекции - пластинчатые (1), ребристые (1...4), игольчато-штыревые (1...5), при вынужденной конвекции – пластинчатые (3), ребристые (6...8), петельно-проволочные (8,9), жалюзные (10,11), игольчато-штыревые (11,12)

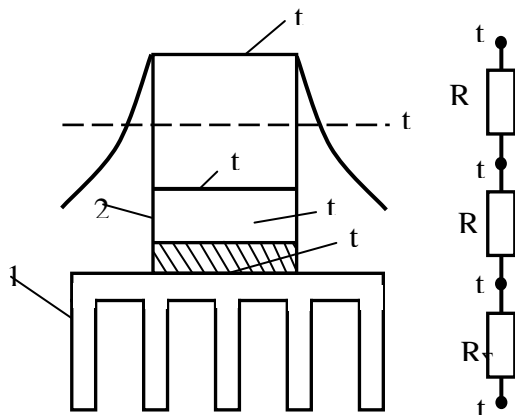


Рис. 5. Температурное поле радиатора – 1 и прибора – 2

На рис. 5 схематически изображен радиатор 1 с закрепленным на нем прибором 2, внутри которого имеются источники мощностью  $\Phi$ , разогревающие рабочую область прибора (например, область р-п-перехода) и его корпус до температур  $t_p$  и  $t_k$ ; в месте крепления прибора к радиатору температура  $t_{и}$ , а средняя температура основания радиатора  $t_s$ .

При выборе радиатора предполагается, что удельная мощность рассеивания  $q$  задана и точка пересечения параметров  $t_s - t_c$  и  $q$  указывает область, которой соответствует определенный тип радиатора и условия охлаждения.

4. Определяем эффективный коэффициент теплоотдачи радиатора.

Графики зависимости коэффициента теплоотдачи игольчато-штыревых и ребристых радиаторов приведены на рис. 19 и 20, а их конструктивные параметры в табл. 1.

В условиях принудительного воздушного охлаждения коэффициент эффективности теплоотдачи этих радиаторов

выбирается в зависимости от скорости потока воздуха  $v$  из графика изображенного на рис. 3.

$$A_p = L_1 L_2 = \frac{\Phi}{\alpha_{\text{эф}}(t_s - t_c)}. \quad (7)$$

5. Находим площадь основания радиатора:

6. Определяем средний перегрев радиатора во втором приближении:

$$(t_s - t_c)_0 = \frac{\frac{\theta_k A_u}{A_p}}{\left[ \left[ \text{sh} \left( \Phi \sqrt{\frac{A_u}{A_p}} \right) \text{ch}^2 \left( \frac{\Phi}{2} \right) / \Phi - \text{ch} \left( \Phi \sqrt{\frac{A_u}{A_p}} \right) + 1 \right] \right]^{-1}}, \quad (8)$$

$$\text{где } \Phi = \sqrt{B \left[ 1,5 - \left( \frac{\text{sh}(2\sqrt{B})}{2\sqrt{B}} + 1 \right) \right]^{-1}}; \quad (9)$$

$$B = \frac{\alpha_{\text{эф}} A_p}{\lambda_p \delta_p}; \quad (10)$$

$\lambda_p$  – коэффициент теплопроводности материала, из которого изготовлен радиатор;  $\delta_p$  – толщина основания радиатора;  $A_u$  и  $A_p$  площади основания прибора и радиатора соответственно.

7. Уточняем площадь основания радиатора:

$$A_{p0} = \frac{\Phi}{\alpha_{\text{эф}}(t_s - t_c)_0}. \quad (11)$$

Теплоотвод-пластину рекомендуется применять при рассеиваемой мощности не более 5 Вт. При значениях мощности более 5 Вт габаритные размеры теплоотвода очень велики. Теплоотводы оребренные, штыревые, петельно-проволочные, типа «Краб» целесообразно применять для отвода мощностей от 5 до 20 Вт при температуре окружающей среды до + 120°С. При значениях рассеиваемой мощности свыше 20 Вт и температуре окружающей среды выше + 120°С эти конструкции необходимо использовать в условиях принудительного воздушного охлаждения или применять жидкостное охлаждение. Для обеспечения равномерного температурного поля длину и ширину теплоотвода целесообразно делать близкими по величине. Соотношение сторон теплоотвода не должно быть более 2.

Порядок конструктивного расчета теплоотвода пластины для естественного охлаждения приведен в табл. 2. Внешний вид теплоотвода-пластины показан на рис. 6.

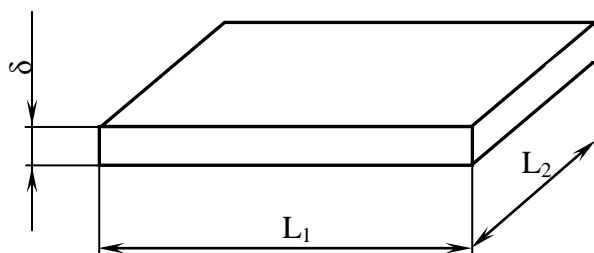


Рис. 6



Таблица 2

## Порядок конструктивного расчета теплоотвода пластины

№	Параметр	Обозначение	Расчетная формула или способ определения	Примечания
1	Мощность, рассеиваемая п/п прибором	P, Вт	Задается	
2	Температура окружающей среды	$t_{окр.ср}$ , °C	Задается	
3	Максимальная температура перехода	$t_{пер}$ , °C	По ТУ	
4	Тепловое сопротивление переход-корпус	$R_{пер-кор}$ , °C / Вт	По ТУ	
5	Тепловое контактное сопротивление	$R_{кор-м}$ , °C / Вт	Определяется экспериментально	
6	Среднеповерхностная температура теплоотвода	$t_{ср}$ , °C	$t_{ср} = q[t_{пер} - P(R_{пер-кор} + R_{кор-м})]$	Для естественного охлаждения $q=0.96$
7	Перепад между среднеповерхностной температурой и окружающей средой	$\Delta t$ , °C	$\Delta t = t_{ср} - t_{окр.ср}$	
8	Высота пластины	L <sub>1</sub> , м	Задается	
9	Коэффициент теплоотдачи конвекцией	$\alpha_{к}$ , Вт / м <sup>2</sup> * °C	$\alpha_{к} = A_1(t_m) * B$ $B = (\frac{\Delta t}{L})^{1/4}$ $t_m = (t_{ср} + t_{окр.ср})$	$A_1(t_m)$ - определяется по графику

Продолжение табл. 2

10	Коэффициент теплоотдачи излучением	$\alpha_{\lambda}, \text{Вт} / \text{м}^2 \cdot ^\circ$	$\alpha_{\lambda} = \varepsilon \varphi f(t_{cp}, t_{окр.ср})$  $\varepsilon$ - коэффициент черноты	$\varphi = 1$
11	Коэффициент теплоотдачи	$\alpha, \text{Вт} / \text{м}^2 \cdot ^\circ$	$\alpha = \alpha_{\kappa} + \alpha_{\lambda}$	
12	Теплообменная поверхность	$F, \text{м}^2$	$F = \frac{P}{\alpha \Delta t} = 2L(l + \delta) + 2l\delta$	
13	Толщина пластины	$\delta, \text{м}$	Выбирается	Рекомендуется 3-5 мм
14	Длина пластины	$L_2, \text{м}$	$l = \frac{F - 2L\delta}{2(L + \delta)}$	

Методика проведения расчета игольчато-штыревого радиатора приведена в табл. 3.

На рис. 7 изображен внешний вид и обозначение размеров игольчато-штыревого радиатора.

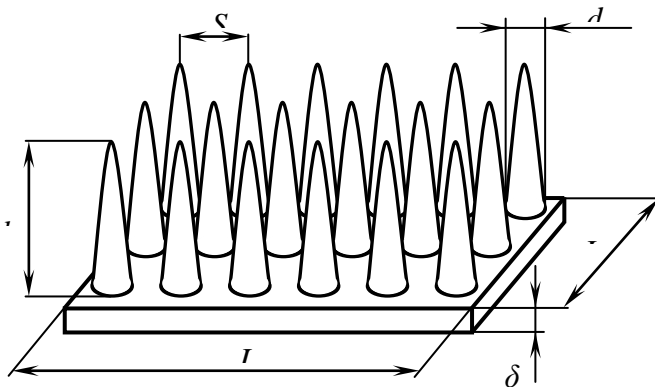


Рис. 7

Таблица 3

## Порядок конструктивного расчета штыревого теплоотвода

№	Параметр	Обозначение	Расчетная формула или способ определения	Примечания
1	Мощность рассеиваемая полупроводником прибором	P, Вт	Задается	
2	Температура окружающей среды	$t_{окр.ср}, ^\circ C$	Задается	
3	Максимальная температура перехода	$t_{пер}, ^\circ C$	По ТУ	
4	Тепловое сопротивление переход-корпус	$R_{пер-кор}, ^\circ C / Вт$	По ТУ	
5	Тепловое контактное сопротивление	$R_{кор-м}, ^\circ C / Вт$	Определяется экспериментально	
6	Среднеповерхностная температура	$t_{ср}, ^\circ C$	$t_{ср} = q[t_{пер} - P(R_{пер-кор} + R_{кор-м})]$	Q=0.96 для естественного и Q=0.94 для принудительного охлаждения
7	Температурный напор	$\theta, ^\circ C$	$\theta = \frac{t_1 + t_2}{2}$	$t_1 = t_{окр.ср}$ $t_2 = t_{ср} - 3$ для естественного $t_2 = t_{ср} - 10$ для принуд.
8	Высота штыря	h, м	Выбирается	Рекомендуется 15-30 мм
9	Нижнее основание штыря	$d_1, м$	Выбирается	Рекомендуется 2,5-3 мм
10	Верхнее основание штыря	$d_2, м$	Выбирается	Рекомендуется 1-1,5 мм
11	Шаг штырей	s, м	Выбирается	Рекомендуется 5-7 мм

Продолжение табл. 3

12	Толщина теплопроводящей пластины	$\delta, \text{м}$	Выбирается	Рекомендуется 4-5 мм
13	Эквив. диаметр среднего сечения штыря	$d_{\text{экв}}, \text{м}$	Задается	
14	Коэфф. кинематической вязкости	$\vartheta, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	Справочная величина	
15	Перепад температуры	$\Delta t, ^\circ \text{C}$	$\Delta t = t_{\text{ср}} - t_{\text{окр.ср}}$	
16	Коэффициент теплопроводности воздуха	$\lambda_{\text{в}}, \text{Вт} / \text{м}^2 \times ^\circ \text{C}$	Справочная величина	
№	Параметр	Обозначение	Расчетная формула или способ определения	Примечания
17	Критерий Грасгофа	Gr	$Gr = \frac{qd_{\text{экв}}^3}{\vartheta^2} \times \beta \times \Delta t$	$\beta = \frac{1}{273 + t_{\text{окр.ср}}}$
18	Критерий Нуссельта	Nu	$Nu = 0,47(Gr)^{1/4}$	
19	Общий коэффициент теплоотдачи	$\alpha, \text{Вт} / \text{м}^2 \times ^\circ \text{C}$	$\alpha = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{л}}$	
20	Коэффициент теплоотдачи конвекцией	$\alpha_{\text{к}}, \text{Вт} / \text{м}^2 \times ^\circ \text{C}$	$C \alpha_{\text{к}} = \frac{Nu * \lambda_{\text{в}}}{d_{\text{экв}}}$	
21	Периметр поперечного сечения штыря (ср. по высоте)	$u, \text{м}$	$u = \pi d_{\text{экв}}$	
22	Площадь поперечного сечения штыря	$f, \text{м}^2$	$f = \frac{\pi d_{\text{экв}}^2}{4}$	
23	Коэффициент теплопроводности материала	$\lambda_{\text{м}}, \text{Вт} / \text{м}^2 \times ^\circ \text{C}$	Задается	

Продолжение табл. 3

24	Коэффициент	x	$x = \sqrt{\frac{4\alpha_k}{\lambda_m d_{эвб}}}$	
25	Теплоотдача единичного штыря	Ршт, Вт	$P_{шт} = k\theta th(xh)\sqrt{\alpha u f \lambda_m}$	$K=1.14$
26	Общее количество штырей	n, шт	$n = \frac{P}{P_{шт}} C$	C=0.6
27	Площадь основания теплоотвода	$S_T, м^2$	$S_T = S^2 n + S_{пр}$	$S_{пр}$ - площадь занимаемая прибором
28	Площадь 1- стороннего теплоотвода	$S'_T, м^2$	$S'_T = S^2 n$	Прибор расположен на свободной от штырей стороне
29	Площадь 2- стороннего теплоотвода	$S''_T, м^2$	$S''_T = \frac{S_T}{2}$	

Методика проведения расчета ребристого радиатора приведена в табл. 4.

Таблица 4

Порядок расчета ребристого теплоотвода

№	Параметр	Обозначение	Расчетная формула или способ определения	Примечания
1	Мощность рассеиваемая прибором	P, Вт	Задается	
2	Температура окружающей среды	$t_{окр.ср}, °C$	Задается	
3	Максимальная температура перехода	$t_{пер}, °C$	По ТУ	
4	Тепловое сопротивление переход-корпус	$R_{пер-кор}, °C/Вт$	По ТУ	

5	Тепловое контактное сопротивление	$R_{кор-т}, \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	Определяется экспериментально	
6	Тепловое сопротивление перехода (по исходным данным)	$R_{т.исх.дан}, \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	$R_{т.исх.дан} = \frac{t_{окр.сп} - t_{кор}}{P} - q \frac{P(R_{кор-т} + R_{пер-кор})}{P}$	$q=0.9$
7	Среднеповерхостная температура тепловода	$t_{сп}, \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_{сп} = PR_{т.исх.дан} + t_{окр.сп}$	
8	Толщина ребра	$d, \text{ м}$	Выбирается	Рекомендуется 2-3 мм
9	Толщина плиты тепловода	$\delta, \text{ м}$	Выбирается	Рекомендуется 3-5 мм
10	Расстояние между ребрами	$b, \text{ м}$	Выбирается	Рекомендуется 8-12 мм
11	Высота ребра	$h, \text{ м}$	Выбирается	Рекомендуется 8-35 мм
12	Протяженность ребра	$L, \text{ м}$	Выбирается	
13	Число ребер	$n, \text{ шт}$	$n = \frac{L+b}{b+\delta}$	
14	Длина плиты тепловода, на которой развиты ребра	$l, \text{ м}$	$l = b(n-1) + dn$	
15	Площадь гладкой поверхности тепловода	$S_{зл}, \text{ м}^2$	$S_{зл} = L \times l$	

Продолжение табл. 4

6	Площадь оребренной пов-ти для 1-сторонне оребр. теплоотвода	$S_{op}, M^2$	$S_{op} = S_1 + S_2 + S_3$	$S_1 = (n-1)Lb$ $S_2 = (\delta + 2h)Ln$ $S_3 = 2ndh$
17	Площадь полной поверхности для 2-сторонне оребренного теплоотвода	$S_{op}^*, M^2$	$S_{op}^* = 2S_{op} - n\left(\sqrt{\frac{4S_{np}}{\pi}} \times (d + 2h) + (n-1)b\right)$	
18	Коэффициент теплоотдачи излучением (для гладкой поверхности)	$\alpha_{л.эл}, Bm/M^2 \cdot C$	$\alpha_{л.эл} = \varepsilon \varphi_1 f(t_{cp}, t_{окр.ср})$	$\varepsilon$ – степень черноты $\varphi_1 = 1$ для гладкой поверхности
19	Коэффициент теплоотдачи конвекцией (для гладкой пов-ти)	$\alpha_{к.эл}, Bm/M^2 \cdot C$	$\alpha_{к.эл} = A_1(t_m) \times \left(\frac{t_{cp} - t_{окр.ср}}{L}\right)^{1/4}$	$t_m = 0.5(t_{cp} + t_{окр.ср})$
20	Коэффициент теплоотдачи гладкой пов-ти	$\alpha_{эл}, Bm/M^2 \cdot C$	$\alpha_{эл} = \alpha_{к.эл} + \alpha_{л.эл}$	
21	Мощность рассеиваемая гладкой поверхностью	$P_{эл}, Bm$	$P_{эл} = S_{эл}(t_{cp} - t_{окр.ср})$	
22	Тепловое сопротивление гладкой пов-ти	$R_{м.эл}, C/Bm$	$R_{м.эл} = \frac{1}{\alpha_{эл} S_{эл}}$	
23	Определение вспомогательных коэффициентов		$A_2(t_m)$ -определяется по графику $K = (t_{cp} - t_{окр.ср})^{1/4}$ $M = L^{1/4} \quad C = \frac{K}{M}$ $\eta = A_2(t_m)bC$	

24	Относительный температурный напор	$H$	$H = f(\eta)$ - определяется по графику	
25	Температура среды между ребрами	$t'_{окр.ср}, ^\circ C$	$t'_{окр.ср} = t_{ср} - H(t_{ср} - t_{окр.ср})$  $t'_m = 0.5(t_{ср} + t'_{окр.ср})$ $A_1(t'_m)$ -определяется по графику  $K' = (t_{ср} - t_{окр.ср})^{1/4}$  $C' = \frac{K'}{M}$	Продолжение таблицы 4
26	Коэффициент теплоотдачи конвекцией (для оребренной поверхности)	$\alpha_{к.оп}, Bm / m^2$	$\alpha_{к.оп} = A_1(t'_m)C'$	
27	Коэффициент теплоотдачи излучением (для оребренной поверхности)	$\alpha_{л.оп}, Bm / m^2$	$\alpha_{л.оп} = \varepsilon qf(t_{ср}, t_{окр.ср})$	$\varphi = \frac{b}{2h = b}$
28	Мощность рассеиваемая оребренной поверхностью тепловода	$P_{м.оп}, Bm$	$P_{м.оп} = [\alpha_{к.оп}(t_{ср} - t_{окр.ср}) + \alpha_{л.оп} \times (t_{ср} - t_{окр.ср})]S_{оп}$	
29	Тепловое сопротивление оребренной поверхности тепловода	$R_{м.оп}, ^\circ C / Bm$	$R_{м.оп} = \frac{t_{ср} - t_{окр.ср}}{P_{м.оп}}$	
30	Общее расчетное сопротивление тепловода	$R_{м.расч}, ^\circ C / Bm$	$R_{м.расч} = \frac{R_{м.зл} R_{м.оп}}{R_{м.зл} + R_{м.оп}}$	



31	Мощность рассеиваемая теплоотводом	$P_T, \text{Вт}$	$P_T = P_{T, \text{гл}} + P_{T, \text{оп}}$	
32	Проверка правильности расчета		$R_{m, \text{расч}} \leq R_{m, \text{исх. дан}}$ $P_m \geq P$	

На рис. 8 изображен внешний вид и обозначение размеров ребристого радиатора.

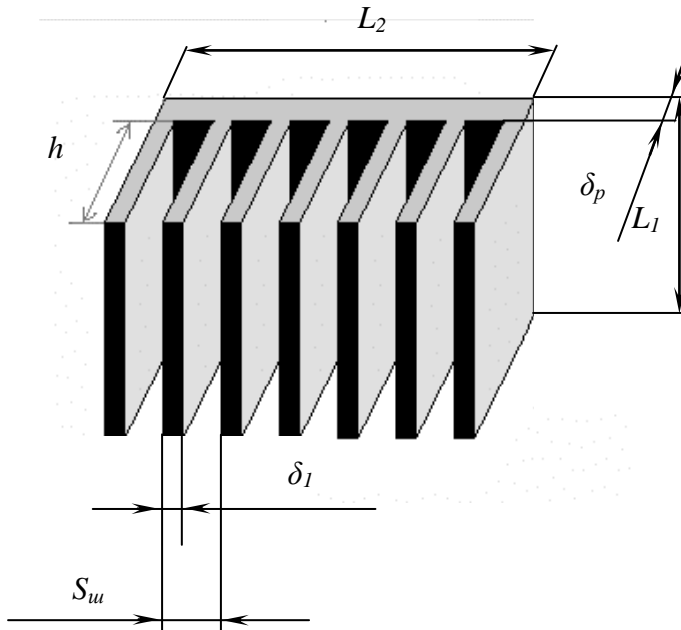


Рис. 8

На рис. 9 изображен жалюзийный радиатор.

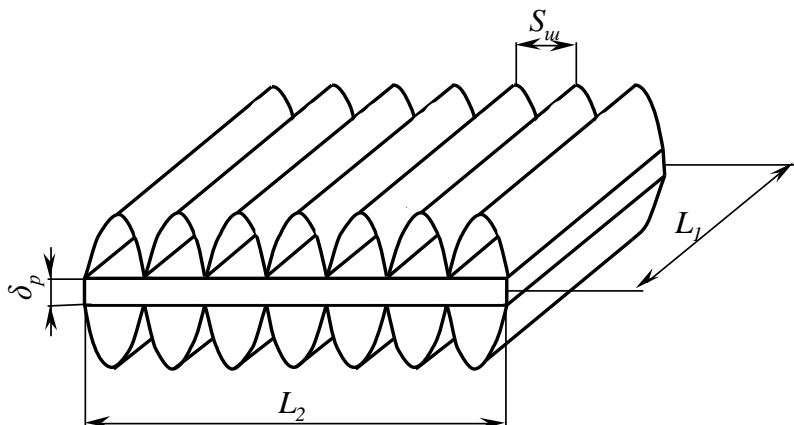
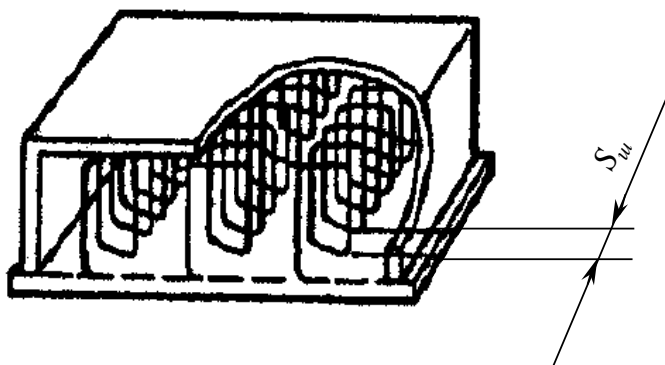


Рис. 9



На рис. 10 изображен радиатор типа «краб».

Рис. 10

На рис. 11 изображен петельно-проволочный радиатор.

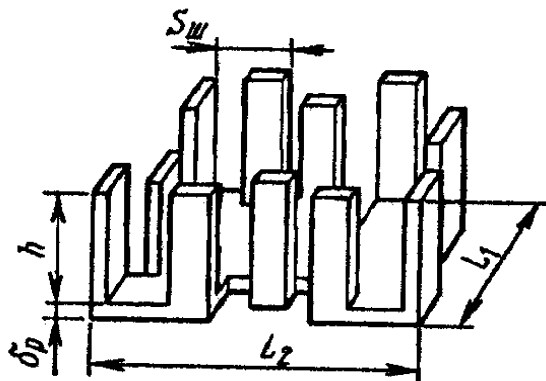


Рис. 11

### 2.3. Выбор элементов, для которых необходим подробный тепловой расчет

В связи с тем, что расчет температуры всех входящих в блок вторичного электропитания элементов представляет собой трудоемкий, а зачастую и практически трудно выполнимый процесс, встает вопрос: для каких элементов необходимо рассчитать температуру, чтобы с заданной достоверностью можно было судить о соответствии теплового режима всего аппарата требованиям технического задания.

При помощи электронно-вычислительной машины были рассчитаны зависимость величины  $\theta_{эл(д)}$  (действительное значение перегрева элементов) от  $\theta_{э}$  при дисперсии  $\sigma_{\varepsilon} = 10$  и вероятностях, равных  $p = 0,95; 0,96; 0,97; 0,98; 0,99; 0,995; 0,999$  [4]. Эти зависимости представлены на рис. 12 (для естественного воздушного охлаждения) и на рис. 13 (для принудительного воздушного охлаждения).

Методика определения числа элементов ИВЭП, подлежащих расчету теплового режима, состоит в следующем:

1. Задаем вероятность правильного расчета  $p$  (произвольно).

2. По одной из методик, изложенных в [6], определяем средний перегрев нагретой зоны (или воздуха) в ИВЭП.

3. По рис. 12, 13 находим значения  $\theta_{эл}(д)$ .

4. Расчету подлежат те элементы ИВЭП, допустимые по техническому заданию, перегревы которых больше найденных по п. 3, то есть  $\theta_{эл} k(д) > \theta_{эл}(д)$ ,  $k = 1, 2, 3 \dots, (n - m)$ , где  $(n - m)$  – число элементов ИВЭП, для которых необходимо выполнить расчет теплового режима.

Все элементы, для которых необходим дальнейший расчет, делятся на группы, к каждой из которых принадлежат элементы одного типа и наименования с близкой рассеиваемой мощностью. Для блоков вторичного питания с естественным воздушным охлаждением рассчитывается перегрев поверхности (либо окружающей среды) любого одного элемента из каждой группы.

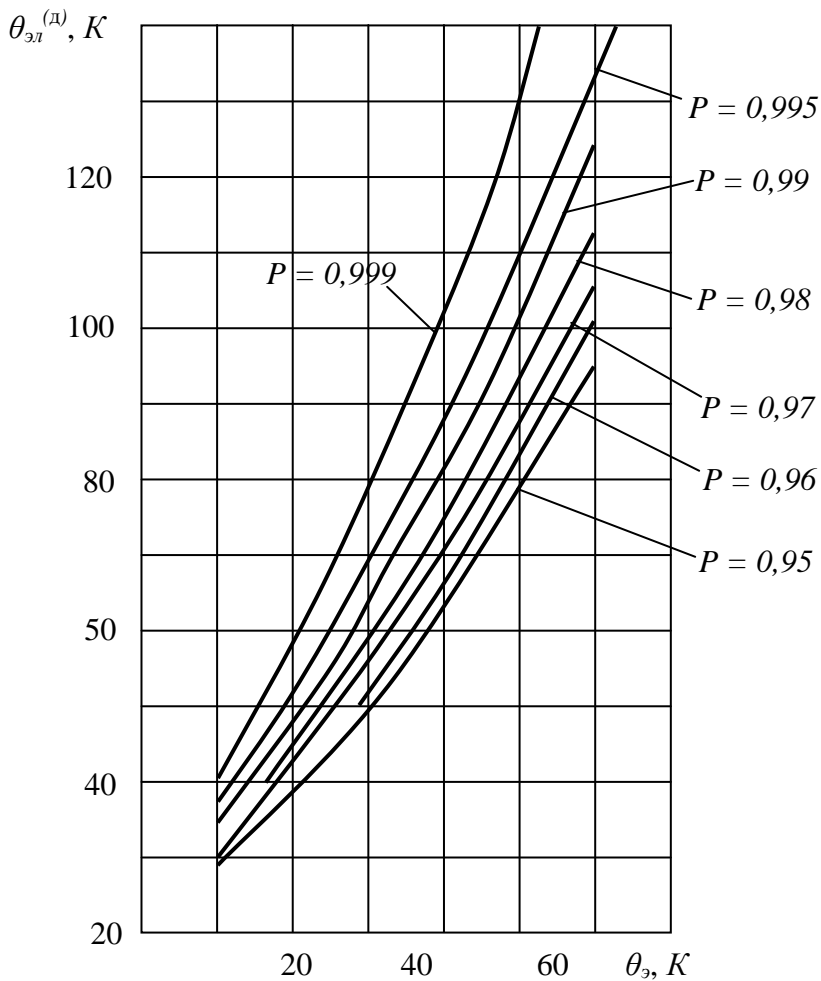


Рис. 12

Для источников вторичного электропитания с принудительным воздушным охлаждением рассчитывается перегрев поверхности (либо окружающей среды) того элемента из группы, который стоит последним по ходу теплоносителя.

## 2.4. Методы оценки тепловых режимов блоков

По окончании процесса конструирования и проектирования источника вторичного электропитания, после проведения всех тепловых расчетов, встает вопрос о соответствии реально получившегося теплового режима заданному, проектировщику, в ТУ. Существует несколько методов оценки теплового режима спроектированного ИВЭП [4], рассмотрим некоторые из них.

Необходимо сразу отметить, что соответствие реально полученного теплового режима заданному в ТУ можно определить двумя способами: экспериментально и проведя необходимые расчеты. Тепловой режим блока питания можно считать допустимым, если температуры в критических зонах элементов ИВЭП меньше допустимых значений в ТЗ и ТУ.

Практически установить температуры критических зон невозможно, по целому ряду причин:

- критические зоны элементов обычно недоступны для измерения;
- так, как в ТУ приводятся значения допустимых температур корпуса или окружающей элемент среды, то определенные разработчиком экспериментально или в результате поверочного расчета температуры лишь косвенно свидетельствуют о температуре критической зоны;
- в связи с тем, что тепловое сопротивление между корпусом и критической зоной элемента имеет определенный разброс по технологическим причинам при массовом производстве элементов, температуры критических зон могут быть определены только приближенно.

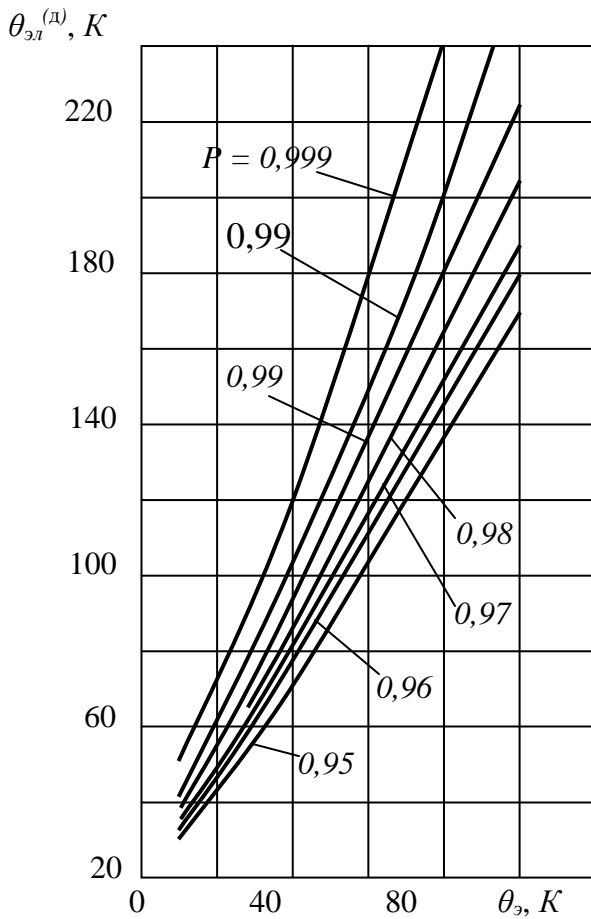


Рис. 13

Погрешность при определении температур элементов вносит и методика расчета или экспериментальное

оборудование, которое мы используем для определения температур элементов.

На стадии технического проектирования соответствие теплового режима блока нормальному может устанавливаться по соответствию расчетных значений температур корпуса элемента (либо окружающий элемент среды) заданными в ТУ и ТЗ значениями.

Выбор элементов, температура поверхности (окружающей среды) которых подлежит расчету на стадии технического проектирования, может производиться при помощи методики, изложенной в методичке. В данном случае задачу оценки теплового режима можно сформулировать следующим образом: по результатам расчета температур нескольких элементов определить, является ли тепловой режим блока в целом допустимым. Если расчетное значение температуры хотя бы одного из элементов больше заданного, то есть

$$T_{эл\ k}^{(p)} > T_{эл\ k}^{(з)}, \quad k = 1, 2, 3, \dots, (n - m),$$

где  $T_{эл\ k}^{(p)}$ ,  $T_{эл\ k}^{(з)}$  – расчетные и заданные в ТУ значения температуры  $k$ -го элемента;

$(n - m)$  – число элементов, для которых определено расчетное значение температуры, то тепловой режим блока вторичного электропитания будет считаться неудовлетворительным.

Если же для всех  $(n - m)$  элементов расчетные значения температуры меньше заданных (допустимых), то есть

$$T_{эл\ k}^{(p)} \leq T_{эл\ k}^{(з)}.$$



То это не говорит о том, что все остальные элементы в допуске. Отсюда можно сделать вывод о том, что необходим определенный критерий для правильности оценки. Так как, оценка теплового режима носит вероятностный характер, для выработки критерия можно воспользоваться следующими рассуждениями [4]. Если при испытании опытного образца обнаружится, что один или два элемента работают с недопустимым тепловым режимом, то можно температуру этих элементов снизить изменением места установки этих элементов или заменой теплоотвода, а тепловой режим блока питания может быть признан нормальным. Если обнаружиться три и более элемента с недопустимым тепловым режимом, то это свидетельствует о ненормальных тепловых режимах некоторых модулей ИВЭП, и могут потребоваться значительные конструктивные доработки. Поэтому в качестве критерия правильности оценки теплового режима блока вторичного питания целесообразно выбрать достаточно низкую вероятность наличия трех элементов с недопустимым тепловым режимом (предположим, что она равна 0,05). Если для элементов, у которых определены температуры, вычислить разность

$$\theta_{эл k} = T_{эл k}^{(3)} - T_{эл k}^{(p)} \quad (12)$$

и составить упорядоченную последовательность

$$\theta_1 \leq \theta_2 \leq \theta_3 \leq \dots \leq \theta_{(n-m)}, \quad (13)$$

то наибольшую вероятность того, что при проверке будет обнаружен недопустимый перегрев элементов имеют элементы с меньшим номером в последовательности.

Возможность обнаружения при проверки элементов с недопустимым тепловым режимом, в то время как по результатам расчета тепловой режим ИВЭП признан

нормальным, обусловлена ошибкой расчета, которая имеет нормальное распределение. Поэтому сформулированный выше критерий оценки правильности определения теплового режима ИВЭП как вероятность наличия трех элементов с недопустимым тепловым режимом запишется в следующем виде:

$$P\left(T_{эл1}^{(з)} < T_{эл1}^{(д)}; \quad T_{эл2}^{(з)} < T_{эл2}^{(д)}; \quad T_{эл3}^{(з)} < T_{эл3}^{(д)}\right) =$$

$$= \left[1 - \Phi\left(\frac{\theta_1}{\sigma_\varepsilon}\right)\right] \left[1 - \Phi\left(\frac{\theta_2}{\sigma_\varepsilon}\right)\right] \left[1 - \Phi\left(\frac{\theta_3}{\sigma_\varepsilon}\right)\right] < 0,05, \quad (14)$$

где

$$\Phi(x) = \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} dt; \quad (15)$$

$\sigma_\varepsilon$  – среднеквадратичное отклонение ошибки расчета; (д) – индекс измеренных (действительных) температур.

Значение функции (15) при использовании методик расчета, для  $0 \leq \theta \leq 30$ , приведены в табл. 5.

Приведем алгоритм оценки правильности определения теплового режима блока [4].:

1. Для элементов, у которых расчетным путем определена температура поверхности (окружающей их среды), находятся разности (12);

Таблица 5.

Значения функции  $\Phi(x)$  для  $0 \leq \theta \leq 30$ 

$\theta$	$\Phi(\theta/\sigma_\varepsilon)$	$\theta$	$\Phi(\theta/\sigma_\varepsilon)$	$\theta$	$\Phi(\theta/\sigma_\varepsilon)$	$\theta$	$\Phi(\theta/\sigma_\varepsilon)$	$\theta$	$\Phi(\theta/\sigma_\varepsilon)$	$\theta$	$\Phi(\theta/\sigma_\varepsilon)$
0	0,5	5	0,691	10	0,841	15	0,933	20	0,977	25	0,994
1	0,539	6	0,726	11	0,864	16	0,945	21	0,982	26	0,995
2	0,579	7	0,758	12	0,885	17	0,955	22	0,986	27	0,996
3	0,618	8	0,788	13	0,903	18	0,964	23	0,989	28	0,997
4	0,655	9	0,816	14	0,919	19	0,971	24	0,991	29	0,998

2. Если хотя бы у одного элемента  $\theta_k < 0$ , то тепловой режим блока является неудовлетворительным и следует принять конструктивные меры для обеспечения нормального теплового режима (перестановка элементов, применение более термостойких элементов, применение более эффективной системы охлаждения и т. п.);

3. Если для всех элементов справедливо неравенство

$$\theta_k \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, (n - m),$$

то составляется упорядоченная последовательность (13);

4. Определяется по формуле (14) вероятность одновременного выхода из строя первых трех элементов в упорядоченной последовательности;

5. Если вероятность, вычисленная в п. 4, меньше 0,05, то результатам расчета делается заключение о соответствии теплового режима блока нормальному. Если вероятность, вычисленная в п. 4, больше или равна 0,05, то для решения вопроса о соответствии теплового режима блока питания нормальному необходима экспериментальная проверка.

### **3. ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА**

Каждому студенту руководителем выдается индивидуальное задание.

Бланк задания приведен в приложении.

В задании указываются наименование темы курсовой работы и исходные данные. Исходными данными являются: электрические и конструктивные параметры радиоизделия, технические требования к нему и условия эксплуатации.

В задании могут содержаться не все данные, необходимые для выполнения курсового проекта. Студент должен самостоятельно выбрать, обосновать недостающие данные.

### **4. СОДЕРЖАНИЕ И ОБЪЕМ КУРСОВОГО ПРОЕКТА**

Курсовой проект оформляется в виде пояснительной записки и включает в себя: титульный лист; бланк задания; содержание; введение; анализ технического задания; расчетную часть; заключение; список литературы; приложения.

При необходимости могут быть включены дополнительные разделы. Объем пояснительной записки без приложений должен составлять 15-20 листов.

Графическая часть (эскизы конструкций РЭС, радиаторов, графики тепловых характеристик и т.д.) выполняется на отдельных листах и размещается по тексту пояснительной записки.

## **5. СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ**

### **5.1. Введение**

Введение содержит общие сведения по данному курсовому проекту. Здесь обосновывается актуальность решаемых вопросов в свете задач, поставленных перед наукой и техникой в данной области. Раскрывается значение темы курсовой работы, ее место среди задач современного проектирования РЭС. Излагаются решения, позволяющие выполнить поставленную задачу по обеспечению нормального теплового режима РЭС.

### **5.2. Анализ технического задания**

В этом разделе приводится подробный анализ исходных данных и технических требований с точки зрения их влияния на тепловой режим радиоэлектронного аппарата. Проводится выбор системы охлаждения [1, 6]. Обосновывается выбор недостающих исходных данных. На этом этапе выполнения курсового проекта необходимо широко использовать литературу.

### **5.3. Расчетная часть**

Эта часть является основной частью курсового проекта.

Расчет тепловых режимов проводится с использованием различных методик, приведенных в литературных источниках (см. список литературы).

При проведении расчетов необходимо приводить эскизы конструкций РЭС, радиаторов, тепловые модели блоков, узлов и элементов РЭС, подлежащих расчету. Результаты расчетов представляются в виде таблиц, графиков тепловых характеристик, эскизов радиаторов и т.д.

При выполнении расчетов необходимо использовать ЭВМ. Так, для элементов, перегревы которых оказались выше допустимых, окончательный расчет проводится на ЭВМ с учетом площади радиаторов.

#### 5.4. Заключение

В этом разделе излагаются результаты проведенных расчетов с точки зрения обеспечения нормальных тепловых режимов РЭС. Анализируется соответствие полученных результатов требованиям технического задания. Проводится анализ полученных тепловых характеристик. Даются рекомендации по улучшению теплового режима данной конструкции РЭС. Сравняются результаты; расчетов при ручном проведении и при использовании ЭВМ.

#### 5.5. Список литературы

В список литературы включаются только те литературные источники, которые были использованы при выполнении работы и на которые имеются ссылки. Список литературы оформляется согласно ГОСТ 7.1 -84.

## 6. ОФОРМЛЕНИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Расчетно-пояснительная записка (РПЗ) оформляется на листах формата А4 по СТП. Допускается представление иллюстраций, таблиц и распечаток с ЭВМ на листах формата А3.

Текст РПЗ выполняется одним из следующих способов:

- машинописный через 1,5 интервала;
- с применением печатающих и графических устройств вывода ЭВМ;
- рукописным с высотой букв не менее 2,5 мм. Текст РПЗ следует писать.(печатать), соблюдая следующие размеры полей:

левое - не менее 30 мм, правое - не менее 10 мм, верхнее - не менее 15 мм, нижнее - не менее 20 мм. Цифры и буквы необходимо писать четким почерком, тушью, чернилами или пастой, только одного цвета (черного, синего или фиолетового).

Иллюстрации (чертежи, графики, схемы, диаграммы, рисунки, фотоснимки, эскизы) располагаются как по тексту РПЗ (возможно ближе к соответствующим частям текста), так и в конце его или в приложении. Иллюстрации должны быть выполнены в соответствии с требованиями стандартов ЕСКД, СПДС. Иллюстрации, за исключением иллюстраций приложений, нумеруются арабскими цифрами сквозной нумерацией. Допускается нумеровать иллюстрации в пределах раздела. При ссылках на иллюстрации следует писать: «... в соответствии с рисунком 2». Слово «Рисунок» и наименование помещают после пояснительных данных и располагают следующим образом: Рисунок 1 - Детали прибора.

Страницы РПЗ следует нумеровать арабскими цифрами, соблюдая сквозную нумерацию по всему тексту РПЗ. Номер страницы проставляют в правом верхнем углу без точки в конце. Титульный лист имеет номер один, который не проставляют. Иллюстрации и таблицы, расположенные на отдельных листах, и распечатки с ЭВМ, содержание, введение, заключение включают в общую нумерацию страниц РПЗ.

Разделы должны иметь порядковые номера в пределах РПЗ, обозначенные арабскими цифрами без точки и записанные с абзачного отступа. Подразделы должны иметь нумерацию в пределах каждого раздела. Номер подраздела состоит из номеров раздела и подраздела, разделенных точкой. В конце номера подраздела точка не ставится. Разделы, как и подразделы, могут состоять из одного или нескольких пунктов. Если РПЗ не имеет подразделов, то нумерация пунктов должна быть в пределах каждого раздела и номер пункта должен состоять из номеров раздела и пункта, разделенных точкой.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дульнев, Г. Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре [Текст]: учеб. пособие / Г.Н. Дульнев. - М.: Высш. шк., 1984. – 247 с.
2. Роткоп, Л. Л. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры [Текст] / Л. Л. Роткоп. – М.: Советское радио, 1976. – 472 с.
3. Шуваев, В. А. Методы обеспечения тепловых режимов при проектировании радиоэлектронных средств [Текст]: учеб. пособие / В. А. Шуваев, А.В. Муратов, О.Ю. Макаров. - Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2008. - 147 с.
4. Скрипников, Ю. Ф. Радиаторы для полупроводниковых приборов [Текст] / Ю. Ф. Скрипников. – М.: «Энергия», 1973. - 48 с.
5. Дульнев, Г. Н. Методы расчета теплового режима приборов [Текст] / Г. Н. Дульнев, В. Г. Парфенов, А. В. Сигалов. - М.: Радио и связь, 1990. - 312 с.
6. Муратов, А.В. Расчёт теплового режима блока РЭС: методические указания по выполнению практических работ [Текст]: учеб. пособие / А.В. Муратов, Н.В. Ципина. - Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2014. - 27 с.



## ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П1.

Теплопроводность  $\lambda$ , плотность  $\rho$  и удельная теплоемкость  $C_p$  различных твердых материалов

Наименование материала	Температура, °C	$\lambda$ , Вт/(м*К)	$\rho$ , кг/м	$C_p$ , 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	7884400	
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 V-12	0 – 100	45	7900	470
Сталь 20	0 – 100	50	7850	
Сталь легированная конструкционная	0 – 100	38	7780	480
Медь	0 – 100	390	8930	380
Неметаллические материалы				
Асбест листовой	30	0,11	770	816
Асбест волокно	50	0,11	470	816
Бакелитовый лак	20	0,29	1400	–
Бумага	20	0,1 – 0,14	300 – 730	1507
Дерево (фанера)	20	0,15	600	1256

Продолжение табл. П1

Картон обыкновенный	20	0,17	700	1510
Плексиглас (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
Гетинакс	20	0,15 –0,18	1215	–
Компаунд ЭК-16А	50 – 100	0,30 –0,35	1350	1200 –1400

Таблица П2.

Коэффициенты черноты различных поверхностей

Материалы и состояние поверхности	Температура, °С	Коэффициенты черноты
Алюминий (тщательно полированная пластина)	200 – 600	0,04 – 0,06
Алюминий (сильно окислен)	35 – 500	0,20 – 0,31
Силуминовое литье (в песчаной форме)	100 – 500	0,33 –0,31
Силуминовое литье (в кокильной форме)	100 – 500	0,16 – 0,23
Дюралюминий Д-16	50 – 350	0,37 – 0,41
Сталь полированная	100	0,066
Сталь листовая холоднокатанная	93	0,075 – 0,085
Сталь листовая сильно окисленная	25	0,80 – 0,82

Продолжение табл. П2

Сталь различных сортов после окисления	300 – 800	0,86 – 0,92
Латунь прокатанная	22	0,06
Латунь прокатанная и обработанная грубым наждаком	22	0,20
Латунь тусклая	50 – 350	0,22
Латунь хромированная полированная	100	0,075
Латунь торговая шлифованная	20	0,030
Медь, шабренная до блеска	22	0,072
Медь (пластина после нагрева до 600 °С)	200	0,57
Никель, проволока окисленная	70 – 200	0,44
Олово, луженное кровельное железо	100	0,07 – 0,08
Цинк, оцинкованное железо	25	0,23 – 0,27
Асбестовый картон, бумага, ткань	20 – 300	0,93
Бумага тонкая, наклеенная на лакированную пластинку	20	0,92
Краски эмалевые, лаки различных цветов	20 – 100	0,92
Краски матовые различных цветов	100	0,92 – 0,96
Лак черный матовый	40 – 100	0,96 – 0,98
Муар серый, черный	20	0,86 – 0,90
Краска защитно-зеленная	20	0,90
Краска бронзовая	100	0,51
Краска алюминиевая	100	0,28
Краски алюминиевые, разной давности с переменным содержанием алюминия	100	0,28 – 0,67
Алюминиевая фольга без масла	100	0,09
Алюминиевая фольга покрытая слоем масла	100	0,56
Окиси металлов	–	0,04 – 0,8
Никелированные поверхности	20	0,05 – 0,07

Таблица ПЗ

Значения плотности  $\rho$ , удельной теплоемкости  $C_p$ , теплопроводности  $\lambda$ , кинематической вязкости  $\nu$  и числа Прандтля (Pr) сухого воздуха при давлении  $10^5$  Па и различных температурах

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$C_p, \text{Дж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	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

Таблица П4

Значения плотности  $\rho$ , удельной теплоемкости  $C_p$ , теплопроводности  $\lambda$ , кинематической вязкости  $\nu$ , объемного расширения  $\beta$ , поверхностного натяжения  $\sigma$  и числа Прандтля (Pr) воды на линии насыщения при давлении  $10^5$  Па и различных температурах

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$C_p,$ кДж/(кг*К)	$\lambda$ Вт/(м*К)	$\nu * 10^6,$ м <sup>2</sup> /с	$\beta * 10^4,$ 1/К	$\sigma * 10^4,$ Н/м	Pr
0	999,9	4,212	0,560	1,789	- 0,63	756,4	13,5
20	998,2	4,183	0,597	1,006	1,82	726,9	7,03
40	992,2	4,174	0,627	0,659	3,87	696,5	4,36
60	983,1	4,179	0,650	0,478	5,11	662,2	3,03
80	971,8	5,195	0,669	0,365	6,32	625,9	2,23
100	958,4	4,220	0,684	0,295	7,52	588,6	1,75
150	917,0	4,313	0,684	0,203	10,3	486,6	1,17
180	886,9	4,417	0,672	0,173	11,9	422,8	1,03
200	863,0	4,505	0,658	0,158	13,3	376,7	0,932
220	840,3	4,614	0,64	0,148	14,8	331,6	0,898
240	813,6	4,76	0,617	0,141	16,8	285,5	0,883
260	784,0	4,98	0,593	0,135	19,7	237,4	0,892
280	750,7	5,30	0,565	0,131	23,7	191,3	0,917
300	712,5	5,76	0,532	0,128	29,2	144,2	0,986
320	667,1	6,57	0,494	0,128	38,2	98,10	1,14
370	450,5	40,32	0,338	0,126	264	4,709	6,80

Таблица П5

## Физические свойства водяного пара на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^{-5}, \text{Па}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$r, \text{кДж/кг}$	$C_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\lambda \cdot 10^{-2}, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
100	1,013	0,598	2256,8	2,135	2,372	20,02	1,08
150	4,76	2,547	2114,3	2,395	2,884	5,47	1,16
180	10,08	5,157	2015,2	2,709	3,268	2,93	1,25
200	15,55	7,862	1940,7	3,023	3,547	2,03	1,36
220	23,20	11,62	1857,8	3,408	3,896	1,45	1,47
240	33,48	16,76	1766	3,881	4,290	1,06	1,61
260	46,94	23,72	1661	4,467	4,800	0,794	1,75
280	64,19	39,15	1476	5,694	5,830	0,526	2,01
300	85,92	46,21	1404	6,280	6,270	0,461	2,13
320	112,90	65,72	1238	8,206	7,510	0,353	2,50
370	210,53	203,0	438,4	56,52	17,10	0,166	11,10

Таблица П6

## Физические свойства хладагентов

Хладагент	Температура кипения при давлении $10^5 \text{ Па}$	Удельная теплота парообразования, кДж/кг	Плотность жидкости, $\text{кг/м}^3$	Удельная теплота плавления, кДж/кг	Плотность в твердом состоянии, $\text{кг/м}^3$
Гелий	4,22	20,43	125	4,56	160
Водород	20,38	441,70	71	58,20	90
Неон	27,10	86,25	1206	16,62	1440
Азот	77,36	198,45	804	25,75	950
Аргон	87,29	162,03	1393	29,52	1700
Метан	111,67	510,79	426	58,60	520
Этан	184,53	489,86	546	95,46	–
Двуокись	194,70	571,08	1180	199,04	1600
Аммиак	239,76	1369	682	332,01	800

Таблица П7

## Коэффициенты поглощения солнечного излучения

Наименование материала	Коэффициент поглощения
Алюминий полированный	0,26
Алюминий тщательно полированный	0,14
Асфальт	0,89
Бумага белая	0,27
Вольфрам тщательно полированный	0,37
Гравий	0,29
Железо полированное	0,45
Железо окисленное, ржавое	0,74
Земля	0,38
Кирпич красный	0,70 – 0,77
Краска:	
алюминиевая	0,55
белая	0,12 – 0,26
масляная светло-зеленая	0,50
масляная светло-серая	0,75
черная на оцинкованном железе	0,90
Медь полированная	0,26
Медь тусклая	0,64
Никель полированная	0,40
Окись цинка	0,15
Оцинкованное железо новое	0,66
Оцинкованное железо старое	0,89
Серебро тщательно полированное	0,07
Сталь нержавеющая 301, полированная	0,37
Черепица красная и коричневая	0,65 – 0,74

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Воронежский государственный технический университет  
Кафедра конструирования и производства аппаратуры

ЗАДАНИЕ  
на курсовую работу  
вариант 1

по дисциплине Теплофизические процессы в устройствах ЭС  
тема работы Расчет тепловых характеристик блоков ЭС при различных условиях охлаждения

студент группы \_\_\_\_\_

перечень вопросов, подлежащих разработке

1. Выбрать способ охлаждения блока РЭС
2. Рассчитать тепловой режим блока
3. Рассчитать радиатор для наиболее теплонагруженных транзисторов

Размеры блока, м	0.42 × 0.27 × 0.12		
Коэффициент заполнения	0.3		
Мощность, Вт	42		
Температура среды, К	291		
Давление среды, МПа	0.1		
Транзисторы	Кт602	Кт805	Кт602
Мощность, выделяемая	1.0	9.6	1.0
Координаты элементов, м			
x	0.06	0.06	0.06
y	0.02	0.2	0.4
z	0.105	0.105	0.105

объем работы (графические работы, расчеты, прочее) текст  
пояснительной записки без приложений 25 – 30 страниц

сроки выполнения этапов

сроки защиты курсовой работы до

Руководитель \_\_\_\_\_

Задание принял студент \_\_\_\_\_



## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	
1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ.....	1
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА.....	2
2.1. Ориентировочный выбор способа охлаждения на ранней стадии проектирования.....	2
2.2. Методика проведения расчета радиаторов.....	6
2.3. Выбор элементов, для которых необходим подробный тепловой расчет.....	25
2.4. Методы оценки тепловых режимов блоков .....	28
3. ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА.....	34
4 СОДЕРЖАНИЕ И ОБЪЕМ КУРСОВОГО ПРОЕКТА.....	34
5. СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ.....	34
5.1. Введение.....	34
5.2. Анализ технического задания.....	35
5.3. Расчетная часть.....	35
5.4. Заключение.....	36
5.5. Список литературы.....	36
6. ОФОРМЛЕНИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА.....	36
Библиографический список.....	38
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	39
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	46
СОДЕРЖАНИЕ.....	47

# РАСЧЁТ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА БЛОКА РЭС

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

по курсовому проектированию  
по дисциплинам «Теплофизические процессы в приборах»,  
«Теплофизические процессы в электронных средствах» для  
студентов направлений подготовки бакалавров 12.03.01  
«Приборостроение» профиль «Приборостроение», 11.03.03,  
«Конструирование и технология электронных средств» профиль  
«Проектирование и технология радиоэлектронных средств»  
очной и заочной форм обучения.

Составитель:  
Ципина Наталья Викторовна

В авторской редакции  
Подписано к изданию . .2022.  
Уч.-изд.л. 2,9.

ФГБОУ ВО "Воронежский государственный  
технический университет"  
394026 Воронеж, Московский просп., 14