

Федеральное агентство по образованию  
**Томский государственный университет систем  
управления и радиоэлектроники (ТУСУР)**

# **Материалы для расчетов тепловых режимов РЭС в групповом проектном обучении**

Учебно-методическое пособие для студентов  
специальности 210201 Проектирование и технология  
радиоэлектронных средств

2010

**Рецензент:** профессор, д-р техн. наук Татаринов В.Н.

**Материалы** для расчетов тепловых режимов РЭС в групповом проектном обучении: Учебно-методическое пособие для студентов специальности 210201 Проектирование и технология радиоэлектронных средств / Сост. Чернышев А.А. – 2-е изд. – Томск: Томский гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, кафедра КИПР. – 31 с., ил.

Пособие предназначено для проведения инженерных расчетов тепловых режимов РЭС при выполнении проектов конструкторского профиля, связанных с принятием окончательных технических решений и оформлением комплекта конструкторских документов на изделие.

Составлено на основе материалов практико-ориентированных работ Г.Н.Дульнева, Н.Н.Тарновского, Л.Л.Роткопа и Ю.Е.Спокойного, выпущенных в 70-е годы прошедшего века и более не издававшихся.

Может быть использовано студентами различных специальностей при выполнении соответствующих учебных заданий.

- © Чернышев А.А. (составление), 2007
- © Кафедра КИПР Томского гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2007
- © Кафедра КИПР Томского гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2010 (2-е изд.)

## Содержание

Предисловие.....	4
Часть 1. Определение коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи .....	5
Часть 2. Тепловые сопротивления и тепловые проводимости.....	7
Часть 3. Расчеты тепловых режимов РЭС коэффициентными методами.....	21

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее пособие составлено в связи с настоятельной необходимостью иметь в университете достаточное количество экземпляров методик расчетов тепловых режимов РЭС, с одной стороны, простых и не требующих значительного времени на их освоение, а с другой – дающих возможность принимать на основе расчетов инженерные решения.

К сожалению, весьма удачные в этом отношении работы Г.Н.Дульнева, Н.Н.Тарновского, Л.Л.Роткопа и Ю.Е.Спокойного, выпущенные в 70-е годы прошедшего века, более не издавались и превратились в библиографическую редкость. Выпущенные примерно в то же время отраслевые стандарты по расчету тепловых режимов РЭС также прекратили свое существование.

Пособие составлено как факсимильное издание: нами специально отобраны и включены в него наиболее востребованные страницы книг указанных выше авторов.

Для удобства пользователей, которые могут при необходимости обратиться к первоисточникам, сохранена рубрикация и нумерация формул оригиналов.

Следует отметить, что представленные материалы многократно апробированы в расчетах, проводившихся в разные годы на кафедре КИПР ТУСУРа, и сопоставлены с результатами экспериментов. Это позволяет нам рекомендовать исполнителям расчетов принимать максимальную погрешность расчетов соответствующих температур и перегревов равной  $\pm 10$  К (разумеется, при правильном выборе тепловой модели радиоаппарата).

## Часть 1.

### Определение коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи<sup>1</sup>

Перенос тепла излучением. Связь между результирующим тепловым потоком  $P_{ij}$ , излучаемым с поверхности тела  $i$ , площадью  $S_i$ , к поверхности другого тела  $j$  с площадью  $S_j$  может быть найдена на основе законов теплового излучения и имеет вид

$$P_{ij} = \epsilon_{ni} C_0 [(T_i/100)^4 - (T_j/100)^4] S_i \varphi_{ij}, \quad (2-17)$$

где  $\epsilon_{ni}$  — приведенная степень черноты тел  $i$  и  $j$ ;  $\varphi_{ij}$  — коэффициент облученности  $i$ -го тела  $j$ -м;  $T_i$ ,  $T_j$  — значения абсолютных температур тел  $i$  и  $j$ ;  $C_0$  — коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный  $5,67 \text{ вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})^4$ .

Методы расчета величин  $\epsilon_{ni}$  и  $\varphi_{ij}$  для конкретных условий теплообмена рассматриваются в прилож. 1.

Представим зависимость (2-17) в форме, аналогичной закону Ньютона—Рихмана (2-14) для конвективного теплообмена:

$$P_{ij} = \alpha_{nij} (t_i - t_j) S_i, \quad (2-18)$$

где  $\alpha_{nij}$  — коэффициент теплообмена излучением (лучистый коэффициент теплообмена) между поверхностями  $i$  и  $j$ . Если поверхность  $i$  находится в неограниченной среде, то  $t_j$  равно температуре среды  $t_c$ .

В формуле (2-18) вся сложность процесса теплообмена излучением сконцентрирована в одной величине —  $\alpha_{nij}$ , структуру которой нетрудно определить, приравняв правые части формул (2-17) и (2-18):

$$\alpha_{nij} = \epsilon_{ni} \varphi_{ij} f(t_i, t_j), \quad (2-19)$$

$$\begin{aligned} f(t_i, t_j) &= 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{(t_i + 273,2)^4 - (t_j + 273,2)^4}{t_i - t_j} = \\ &= 5,67 \cdot 10^{-8} (t_i + t_j + 546,4) [(t_i + 273,2)^2 + \\ &\quad + (t_j + 273,2)^2] \text{ вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}). \end{aligned} \quad (2-20)$$

Если температуры  $t_i$  и  $t_j$  близки так, что  $0,5 < T_i/T_j < 1$ , то с погрешностью не больше 10% расчеты  $f(t_i, t_j)$  целесообразно вести по приближенной формуле

$$f(t_i, t_j) = 0,227 (T/100)^3, \quad T = 0,5 (T_i + T_j). \quad (2-20a)$$

Тепловое сопротивление и тепловая проводимость при теплообмене излучением определяются по формулам:

$$R_{ij} = \frac{1}{\alpha_{nij} S_i}, \quad \sigma_{ij} = \alpha_{nij} S_i. \quad (2-21)$$

<sup>1</sup> Выдержки из книги: Дульнев Г.Н., Гарновский Н.Н. Тепловые режимы электронной аппаратуры. — Л.: Энергия, 1971 - 248 с.: ил.

Таблица П1-1

 Коэффициент  $K_{jш}$  теплопередачи в контакте различных пар контактирующих материалов [14, 39]

Материал	Условия контакта	$K_{jш}$ вт/(м <sup>2</sup> ·град)
Медь — алюминий	Чистота обработки $\nabla 5$ , удельная нагрузка свыше $100 \text{ кг/см}^2$	$12 \cdot 10^4$
Медь — медь	То же	$10 \cdot 10^4$
Медь — латунь	»	$5,5 \cdot 10^4$
Медь — дюралюминий	»	$5,0 \cdot 10^4$
Дюралюминий — дюралюминий	»	$4,0 \cdot 10^4$
Сталь — медь	»	$1,2 \cdot 10^4$
Сталь — дюралюминий	»	$8,4 \cdot 10^3$
Сталь — сталь	»	$1,5 \cdot 10^3$
Металл — краска-металл	»	500
Металл — металл	Два листа толщиной 1—3 мм соединены внахлест при помощи заклепок. Длина листов 25—200 мм, расстояние между заклепками 20—40 мм	$(3 - 6,4) \cdot 10^4$
Металл — стекло	Контакт стеклянного баллона электронной лампы с металлическим экраном	$(0,6—2,3) \cdot 10^4$
Сталь — сталь	Чистые гладкие поверхности, высокое давление	$2,6 \cdot 10^3$
Сталь — сталь	Резьбовое соединение	$1,7 \cdot 10^3$
Сталь — дюралюминий	Чистые гладкие поверхности, высокое давление	$3,1 \cdot 10^3$

Тепловое сопротивление контакта двух поверхностей. В месте контакта поверхностей двух тел поток тепла преодолевает тепловое сопротивление, вызванное неплоскопараллельностью и волнистостью поверхностей, а если последние устранены, то микронеровностями обеих поверхностей.

Для металлических поверхностей, имеющих в месте контакта только микронеровности, величина теплового сопротивления определяется физико-механическими свойствами материала, чистотой обработки поверхностей и удельным давлением сжатия. При удельной нагрузке  $N > 200 \text{ кг/см}^2$  удельное тепловое сопротивление контакта практически не зависит от величины нагрузки. Такие удельные нагрузки имеются, например, в контактах созданных с помощью резьбовых соединений.

Ориентировочные значения величины коэффициента теплопередачи контакта различных пар контактирующих материалов приведены в табл. П1-1. Тепловые сопротивления контактов, встречающихся в радиоэлектронных устройствах, в настоящее время изучены мало. Поэтому данные, приведенные в табл. П1-1, следует рассматривать как сугубо ориентировочные.

## Часть 2. Тепловые сопротивления и тепловые проводимости<sup>1</sup>

### П1-1. Тепловая проводимость стенок и оболочек различной конфигурации без источников энергии

Плоская, цилиндрическая и шаровая стенки. На рис. П1-1 изображены плоская стенка, а также цилиндрическая и шаровая оболочки, ограниченные изотермическими поверхностями с температурами  $t_1$  и  $t_2$ ; коэффициент теплопроводности  $\lambda$  не изменяется с температурой, внутренние источники

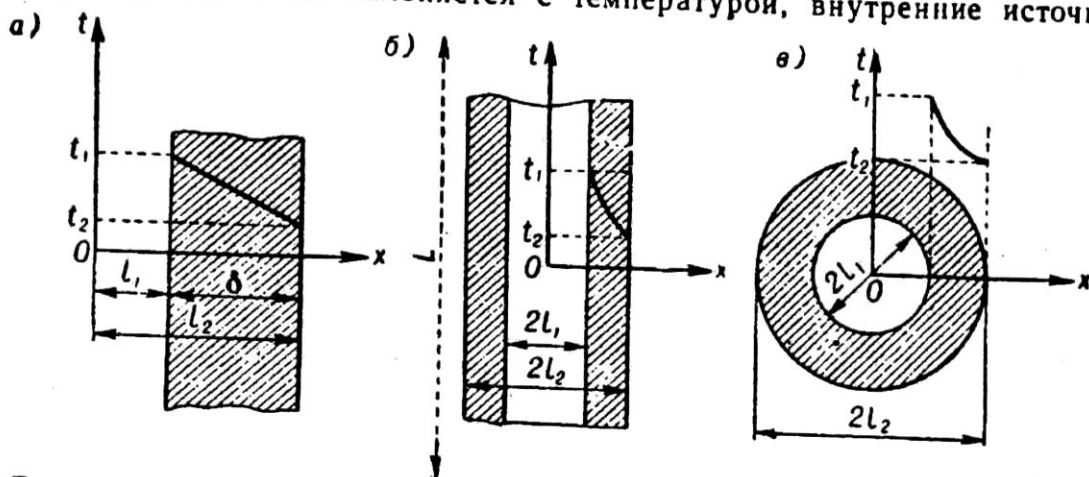


Рис. П1-1. Стенки различной формы: а — плоская; б — цилиндрическая; в — шаровая

и стоки тепла отсутствуют. В § 2-4 показано, что при сформулированных условиях тепловой коэффициент  $F_{ij}$  равен тепловому сопротивлению  $R_{ij}$ , т. е.

$$F_{ij} = R_{ij}; \quad \sigma_{ij} = \frac{1}{R_{ij}}, \quad (\text{П1-1})$$

где индексы  $i = 1, j = 2$  соответствуют номерам изотермических поверхностей.

На основании (2-10) и (П1-1) нетрудно найти выражения для тепловых сопротивлений  $R_{\text{п}}$  плоской стенки и  $R_{\text{ц}}, R_{\text{ш}}$  цилиндрической и шаровой оболочек:

$$R_{\text{п}} = \frac{\delta}{\lambda S_{\text{п}}}, \quad R_{\text{ц}} = \frac{1}{2\pi\lambda L} \ln \frac{l_2}{l_1}, \quad R_{\text{ш}} = \frac{1}{4\pi\lambda} \left( \frac{1}{l_1} - \frac{1}{l_2} \right), \quad (\text{П1-2})$$

где  $\delta$  — толщина плоской стенки;  $l_1$  и  $l_2$  — внутренний и внешний радиусы

<sup>1</sup> Выдержки из книги: Дульнев Г.Н., Тарновский Н.Н. Тепловые режимы электронной аппаратуры. — Л.: Энергия, 1971 - 248 с.: ил.

цилиндрической и шаровой оболочек;  $S_n$  — площадь стенки, нормальная потоку тепла;  $L$  — длина цилиндра.

Рассмотрим плоскую стенку, состоящую из  $n$  разнородных слоев, толщины и коэффициенты теплопроводности которых  $\delta_i$  и  $\lambda_i$ . Поверхности стенки омываются газом или жидкостью с температурами  $t_{c1}$  и  $t_{c2}$ ; коэффициенты теплообмена от сред к поверхностям равны  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  (рис. П1-2). Известно, что тепловое сопротивление последовательно соединенных стенок и сред

$$R = \frac{1}{\alpha_1 S_n} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i S_i} + \frac{1}{\alpha_2 S_n}, \quad (\text{П1-3})$$

а разность температур ( $t_{c1} - t_{c2}$ ) связана с потоком  $P$  зависимостью:

$$t_{c1} - t_{c2} = RP. \quad (\text{П1-4})$$

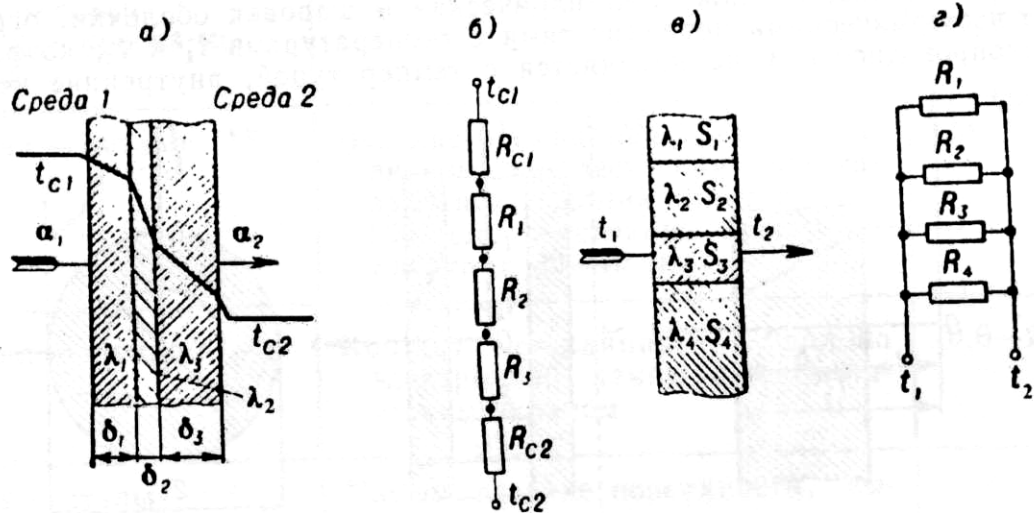


Рис. П1-2. Составные стенки: последовательно (а) и параллельно (б) соединенные; в, г — схемы соединения тепловых сопротивлений для случаев (а) и (б)

Если заданы температуры  $t_1$  и  $t_{n+1}$  внутренней и наружной стенок, то выражение для теплового сопротивления неоднородной стенки примет вид

$$R = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i S_n}. \quad (\text{П1-5})$$

Тепловое сопротивление цилиндрической неоднородной стенки, состоящей из  $n$  слоев, определяется по формуле

$$R = \frac{1}{2\pi L} \left( \frac{1}{\alpha_1 l_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{l_{i+1}}{l_i} + \frac{1}{\alpha_2 l_{n+1}} \right) \quad (\text{П1-6})$$

где  $\lambda_i$ ,  $l_i$  — коэффициент теплопроводности материала и радиус  $i$ -го цилиндрического слоя.



### П1-6. Тепловые сопротивления лучистому потоку

Сопротивление и проводимость потоку тепла, переносимому излучением от тела  $i$  к телу  $j$ , определены зависимостями (2-21):

$$R_{ij} = \frac{1}{\alpha_{л\ ij} S_i}, \quad \sigma_{ij} = \alpha_{л\ ij} S_i,$$

где  $\alpha_{л\ ij}$  — коэффициент теплообмена излучением между поверхностями  $i$ -го и  $j$ -го тел;  $S_i$  — площадь излучающей поверхности тела  $i$ .

Структура коэффициента  $\alpha_{л\ ij}$  представлена зависимостью (2-19), расчеты по которой сводятся к определению трех параметров: приведенной степени черноты  $\epsilon_{п\ ij}$  системы тел  $i, j$ , коэффициента облученности  $\Phi_{ij}$  в этой системе и функцией  $f(t_i, t_j)$ , зависящей от температур  $t_i$  и  $t_j$  поверхностей  $i$  и  $j$ . Последняя зависимость выражена формулой (2-20) и представлена в табл. П1-10. Если температуры  $t_i$  и  $t_j$  поверхностей мало отличаются, то величина  $f(t_i, t_j)$  может быть вычислена по приближенной формуле

$$f_i = 0,227 \left( \frac{\bar{T}}{100} \right)^3 \text{ вт/(м}^2 \cdot \text{град)}, \quad (\text{П1-87})$$

где  $\bar{T} = 0,5 (\bar{T}_i + \bar{T}_j)$  — среднее значение абсолютных температур поверхностей  $i$  и  $j$ .

Напомним физический смысл параметров  $\Phi_{ij}$  и  $\epsilon_{п\ ij}$ . Коэффициенты облученности, или угловые коэффициенты  $\Phi_{ij}$  показывают, какая часть  $P_{ij}$  лучистого потока  $P_i$ , испускаемая телом  $i$  в полупространство, падает на другое тело  $j$ , находящееся с ним в лучистом теплообмене, т. е.  $\Phi_{ij} = P_{ij}/P_i$ . Аналогично  $\Phi_{ji}$  показывает, какая часть  $P_{ji}$  лучистого потока  $P_j$ , испускаемого телом  $j$  в полупространство, падает на другое тело  $i$ , т. е.  $\Phi_{ji} = P_{ji}/P_j$ .

Степень черноты характеризует излучательную способность реального тела по сравнению с излучательной способностью абсолютно черного тела.

Значение  $\varepsilon$  изменяется в пределах от нуля до единицы. В табл. П1-9 приведены значения суммарных степеней черноты различных технических материалов и покрытий.

Таблица П1-9

Степень черноты различных поверхностей

Материал и состояние поверхности	Температура, С	Степень 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
» » (в кокильной форме) . . . . .	100—500	0,16—0,22
Дюралюминий Д16 . . . . .	50—350	0,37—0,41
Сталь полированная . . . . .	100	0,066
» листовая холоднокатаная . . . . .	93	0,075—0,085
» » сильно окисленная . . . . .	25	0,80—0,82
» 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
» хромированная полированная . . . . .	100	0,075
Медь торговая шлифованная . . . . .	20	0,030
Медь, шабренная до блеска . . . . .	22	0,072
Медь; пластина после нагрева до 600° . . . . .	200	0,57
Никель; проволока окисленная . . . . .	70—200	0,44
Олово; луженое 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 металлическую пластинку . . . . .	20	0,92
Краски эмалевые, лаки различных цветов . . . . .	20—100	0,92
» матовые различных цветов . . . . .	100	0,92—0,96
Лак черный матовый . . . . .	40—100	0,96—0,98
Муар серый, черный . . . . .	20	0,89—0,90
Краска защитно-зеленая . . . . .	20	0,90
» бронзовая . . . . .	100	0,51
» алюминиевая . . . . .	100	0,28
Краски алюминиевые разной давности с переменным содержанием алюминия . . . . .	100	0,28—0,67
Алюминиевая фольга без масла . . . . .	100	0,09
» фольга, покрытая слоем масла . . . . .	100	0,56
Окиси металлов . . . . .	—	0,4—0,8

Коэффициенты облученности  $\Phi$  тел характеризуют геометрические свойства излучения и зависят только от размеров и формы тел, их взаимной ориентации. Степени черноты  $\varepsilon$  характеризуют физические особенности излучения тела, приведенные степени черноты  $\varepsilon_{п ij}$  зависят как от степеней черноты  $\varepsilon_i, \varepsilon_j$  тел  $i, j$ , так и от коэффициентов облученности  $\Phi_{ij}$ :

$$\varepsilon_{п ij} = \varepsilon (\varepsilon_i \varepsilon_j, \Phi_{ij}, \Phi_{ji}).$$

Таблица П1-10

Значение функции  $f(t_j)$ ,  $t_j = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{T_i^4 - T_j^4}{T_i - T_j}$

$t_j, ^\circ\text{C}$	$t_j, ^\circ\text{C}$																																	
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150				
5	4.88																																	
10	5.02	5.15																																
15	5.15	5.29	5.43																															
20	5.29	5.43	5.57	5.71																														
25	5.44	5.58	5.72	5.86	6.01																													
30	5.58	5.72	5.87	6.02	6.17	6.32																												
35	5.73	5.87	6.02	6.17	6.32	6.48	6.64																											
40	5.88	6.03	6.18	6.33	6.48	6.64	6.80	6.97																										
45	6.04	6.19	6.34	6.49	6.65	6.81	6.97	7.14	7.31																									
50	6.20	6.35	6.50	6.66	6.81	6.98	7.15	7.31	7.48	7.66																								
55	6.36	6.51	6.67	6.82	6.98	7.15	7.31	7.48	7.66	7.84	8.02																							
60	6.53	6.68	6.84	7.00	7.16	7.32	7.49	7.66	7.84	8.02	8.20	8.39																						
65	6.70	6.86	7.01	7.17	7.34	7.50	7.67	7.85	8.03	8.21	8.39	8.58	8.77																					
70	6.88	7.03	7.19	7.35	7.52	7.69	7.86	8.03	8.21	8.40	8.58	8.78	8.97	9.17																				
75	7.06	7.21	7.37	7.54	7.70	7.87	8.05	8.23	8.41	8.59	8.78	8.97	9.17	9.37	9.57																			
80	7.24	7.40	7.56	7.72	7.89	8.06	8.24	8.42	8.60	8.79	8.91	9.18	9.37	9.58	9.78	9.99																		
85	7.42	7.58	7.75	7.91	8.08	8.26	8.44	8.62	8.80	8.99	9.19	9.38	9.58	9.79	10.00	10.21	10.42																	
90	7.61	7.77	7.94	8.11	8.28	8.46	8.64	8.82	9.01	9.20	9.39	9.59	9.79	10.00	10.21	10.43	10.64	10.87																
95	7.81	7.97	8.14	8.31	8.48	8.66	8.84	9.03	9.22	9.41	9.61	9.81	10.01	10.22	10.43	10.65	10.87	11.09	11.32															
100	8.00	8.17	8.34	8.51	8.69	8.87	9.05	9.24	9.43	9.62	9.82	10.03	10.23	10.44	10.66	10.87	11.10	11.32	11.55	11.79														
105	8.20	8.37	8.54	8.72	8.90	9.08	9.26	9.45	9.65	9.84	10.04	10.25	10.46	10.67	10.88	11.11	11.33	11.56	11.79	12.03	12.27													
110	8.41	8.58	8.75	8.93	9.11	9.29	9.48	9.67	9.87	10.07	10.27	10.47	10.68	10.90	11.12	11.34	11.57	11.80	12.03	12.27	12.51	12.76												
115	8.62	8.79	8.97	9.14	9.33	9.51	9.70	9.89	10.09	10.29	10.50	10.71	10.92	11.13	11.35	11.58	11.81	12.04	12.28	12.52	12.76	13.01	13.27											
120	8.83	9.01	9.18	9.36	9.55	9.73	9.93	10.12	10.32	10.52	10.73	10.94	11.15	11.37	11.60	11.82	12.05	12.29	12.53	12.77	13.02	13.27	13.53	13.79										
125	9.05	9.22	9.40	9.59	9.77	9.96	10.16	10.35	10.55	10.76	10.97	11.18	11.40	11.62	11.84	12.07	12.30	12.54	12.78	13.03	13.28	13.53	13.79	14.05	14.32									
130	9.27	9.45	9.63	9.81	10.00	10.19	10.39	10.59	10.79	11.00	11.21	11.42	11.64	11.86	12.09	12.32	12.56	12.80	13.04	13.29	13.54	13.80	14.06	14.32	14.59	14.87								
135	9.50	9.68	9.86	10.05	10.24	10.43	10.63	10.83	11.03	11.24	11.45	11.67	11.89	12.12	12.35	12.58	12.82	13.06	13.30	13.55	13.81	14.07	14.33	14.60	14.87	15.15	15.43							
140	9.73	9.91	10.09	10.28	10.47	10.67	10.87	11.07	11.28	11.49	11.71	11.92	12.15	12.37	12.61	12.84	13.08	13.32	13.57	13.82	14.08	14.34	14.61	14.88	15.15	15.43	15.71	16.00						
145	9.96	10.14	10.33	10.52	10.72	10.91	11.12	11.32	11.53	11.74	11.96	12.18	12.41	12.64	12.87	13.11	13.35	13.59	13.84	14.10	14.36	14.62	14.89	15.16	15.44	15.72	16.00	16.29	16.59					
150	10.20	10.39	10.57	10.77	10.96	11.16	11.37	11.57	11.79	12.00	12.22	12.44	12.67	12.90	13.14	13.38	13.62	13.87	14.12	14.38	14.64	14.90	15.17	15.45	15.73	16.01	16.30	16.59	16.89	17.19				

Ниже будут рассмотрены значения  $\varphi_{ij}$  и  $\varepsilon_{pij}$  для разных пар тел  $i$  и  $j$  при разнообразной их ориентации.

Теплообмен между неограниченными плоскопараллельными плоскостями ( $i = 1, j = 2$ ). В этом случае приведенная степень черноты и коэффициент облученности равны:

$$\varepsilon_{p12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}, \quad \varphi_{12} = \varphi_{21} = 1. \quad (\text{П1-88})$$

Из формулы (П1-93) следует, что если  $\varepsilon_1 \gg \varepsilon_2$ , то  $\varepsilon_{p12}$  определяется величиной, меньшей степени черноты, т. е.  $\varepsilon_p \approx \varepsilon_2$ . Для тел с большим значением степени черноты  $\varepsilon_{p12}$  приближенно может быть принято

$$\varepsilon_{p12} \approx \varepsilon_1 \varepsilon_2, \quad \varepsilon_1, \varepsilon_2 \geq 0,8. \quad (\text{П1-89})$$

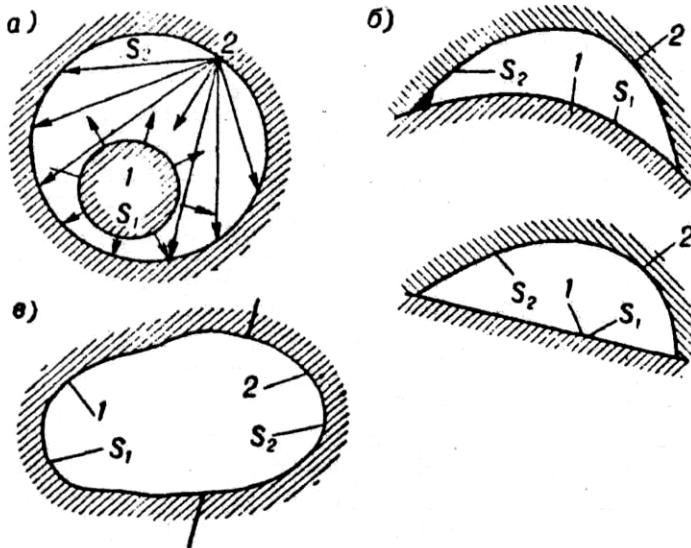


Рис. П1-12. Лучистый теплообмен между телами в замкнутом пространстве: а — тело 1 внутри тела 2, б — тело 2 охватывает плоское или выпуклое тело 1; в — система из двух вогнутых тел 1 и 2

Теплообмен между телом и его оболочкой. На рис. П1-12, а и б представлены следующие системы двух тел: тело 1 находится в замкнутой полости тела 2, тело 2 охватывает плоское или выпуклое тело 1.

Для рассматриваемых систем двух тел значения  $\varphi_{12}$ ,  $\varphi_{21}$ ,  $\varepsilon_{p12}$  могут быть найдены по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{12} = 1, \quad \varphi_{21} = \frac{S_1}{S_2}; \\ \varepsilon_{p12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \varphi_{21} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}, \end{aligned} \right\} \quad (\text{П1-90})$$

где  $S_1$  и  $S_2$  — площади поверхностей тел 1 и 2.

Теплообмен излучением в замкнутой системе из двух вогнутых серых тел (рис. П1-12, в). Приведенная степень черноты такой системы тел

$$\varepsilon_{p12} = \frac{1}{1 + \varphi_{12} \left( \frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) + \varphi_{21} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}. \quad (\text{П1-91})$$

Определение величин  $\varphi_{12}$  и  $\varphi_{21}$  представляет, как правило, значительные математические трудности.

Теплообмен излучением между двумя произвольно расположенными в пространстве серыми поверхностями с высокой степенью черноты ( $\varepsilon_1, \varepsilon_2 \geq 0,8$ ). Приведенная степень черноты в этом случае может быть определена по формуле (П1-89), а коэффициент облученности  $\varphi_{12}$  для некоторых систем тел находится из приводимых ниже графиков рис П1-13 — П1-15. Второй коэффициент облученности  $\varphi_{21}$  связан с  $\varphi_{12}$  зависимостью:

$$\varphi_{21} = \varphi_{12} S_1 / S_2. \quad (\text{П1-92})$$

Коэффициенты облученности характеризуют геометрические свойства систем тел, в которых происходит теплообмен излучением.

Рассмотрим замкнутую систему из  $n$  тел, в которой требуется определить результирующее излучение от  $i$ -й поверхности к остальным  $(n-1)$  поверхностям.<sup>1</sup> В этом случае справедливы следующие зависимости:

$$\sum_{j=1}^n \varphi_{ij} = 1, \quad \varphi_{ij} S_i = \varphi_{ji} S_j. \quad (\text{П1-93})$$

Если известно значение коэффициента облученности между двумя ограниченными поверхностями, то коэффициент облученности между одной из поверхностей и внешним пространством легко определить из уравнения (П1-93). Например, между двумя параллельными прямоугольными поверхностями 1 и 2

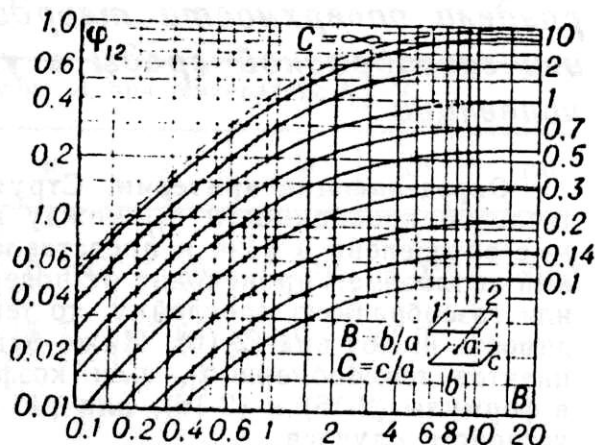


Рис. П1-13. Коэффициент облученности между одинаковыми прямоугольниками, лежащими в параллельных плоскостях

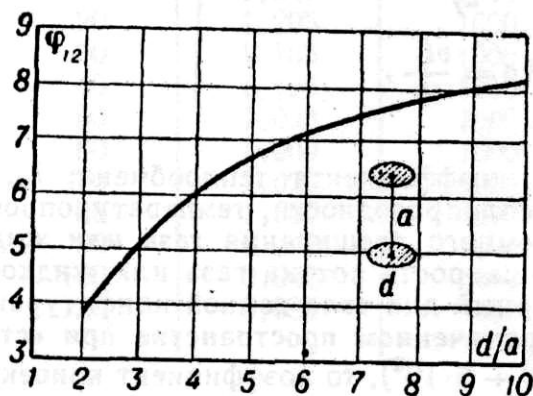


Рис. П1-14. Коэффициент облученности между одинаковыми кругами, лежащими в параллельных плоскостях

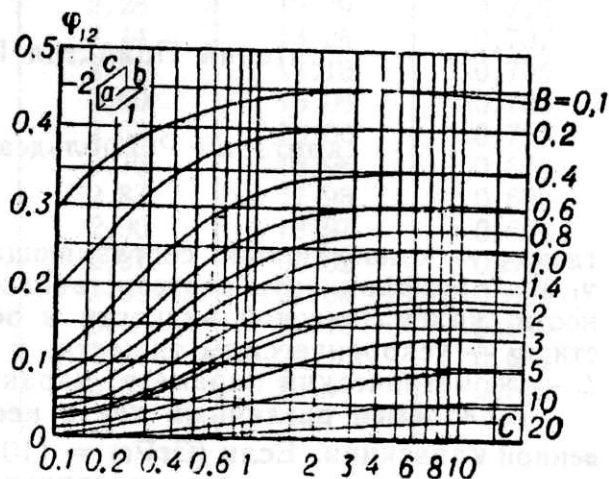


Рис. П1-15. Коэффициент облученности между прямоугольниками с общей стороной, лежащими во взаимно-перпендикулярных плоскостях

коэффициент облученности  $\varphi_{12}$  может быть найден из рис. П1-13, тогда коэффициент облученности между поверхностью 1 и окружающим пространством

$$\varphi_{10} = 1 - \varphi_{12}. \quad (\text{П1-94})$$

<sup>1</sup> Если при этом система тел сообщается с окружающим пространством, то ее можно также рассматривать как замкнутую, мысленно вводя «натянутую» поверхность.

### П1-4. Тепловые сопротивления на границе раздела поверхности твердого тела и жидкой или газообразной среды в условиях естественной конвекции

**Определяющие критерии.** Структура теплового сопротивления  $R_{ij}$  или тепловой проводимости  $\sigma_{ij}$  между поверхностью  $i$  твердого тела и средой  $j=c$  определена в § 2-4 и представлена выражением (2-15). Если конвективный теплообмен происходит от поверхности  $i$  к поверхности  $j$  через жидкую или газообразную прослойку, то тепловое сопротивление и тепловая проводимость имеют вид (2-16). Ниже будут рассмотрены выражения для коэффициентов теплообмена  $\alpha_{ic}$  или коэффициента теплопередачи  $k_{ij}$ , входящих в формулы (2-15) и (2-16), для различных типичных для радиоэлектронных устройств случаев.

Для расчета этих коэффициентов потребуется оценивать следующие критериальные величины:

$$\left. \begin{aligned} \text{критерий Нуссельта } Nu &= \frac{\alpha_k L}{\lambda_f}; \\ \text{критерий Грасгофа } Gr &= g\beta (t - t_c) \frac{L^3}{\nu_f^2}; \\ \text{критерий Прандтля } Pr &= \frac{\nu_f}{a_f}; \\ \text{критерий Рейнольдса } Re &= \frac{vL}{\nu_f}, \end{aligned} \right\} \quad (\text{П1-49})$$

где  $\alpha_k$  — конвективная составляющая коэффициента теплообмена;  $\lambda_f$ ,  $a_f$ ,  $\nu_f$ ,  $\beta$  — коэффициенты соответственно теплопроводности, температуропроводности, кинематической вязкости и объемного расширения газа или жидкости;  $g$  — ускорение силы тяжести;  $v$  — скорость потока газа или жидкости;  $L$  — геометрический параметр, характерный для тела данной конфигурации.

**Теплообмен различных тел в неограниченном пространстве при естественной конвекции.** Если  $(GrPr) = (10^{-3} \div 5 \cdot 10^2)$ , то коэффициент конвективного теплообмена с удовлетворительной точностью можно определить по формуле

$$\alpha_k = A_1 \left( \frac{t - t_c}{d^5} \right)^{1/8} \text{ вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}) \quad (\text{П1-50})$$

где  $d$  — диаметр проводника, м;  $t$  и  $t_c$  — температуры поверхности проволоки и среды вдали от тела. В коэффициент  $A_1$  вошли все физические параметры среды:

$$A_1 = 1,18 (\beta g Pr)_m^{1/8} \frac{\lambda_m}{\nu_m^{1/4}} \text{ вт}/(\text{м}^{11/8} \cdot \text{град}^{9/8}) \quad (\text{П1-51})$$

где индекс  $m$  означает, что физические параметры среды определены при температуре  $t_m = 0,5 (t + t_c)$ . Значения  $A_1$  для воздуха и воды, рассчитанные по формуле (П1-51), приведены в табл. П1-3. Физические параметры сухого воздуха и воды на линии насыщения приведены в табл. П1-4, П1-5.

**Таблица П1-3**

Значения  $A_1$  для воздуха и воды

Среда	Значения $A_1$ при температуре $t_m$ , °C						
	0	20	40	60	80	100	120
Воздух . . . . .	0,291	0,295	0,300	0,306	0,310	0,315	0,320
Вода . . . . .	9,35	13,1	15,7	17,6	19,0	20,0	—

**Таблица П1-4**

Физические параметры сухого воздуха при  $H = 760$  мм рт. ст.

$t$ , °C	$\rho$ , кг·м <sup>-3</sup>	$c_p$ , Дж/(кг·град)	$\lambda \cdot 10^2$ , Вт/(м·град)	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> ·сек	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 П1-5**

Физические параметры воды на линии насыщения

$t$ , °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_p$ , Дж/(кг·град)	$\lambda$ , Вт/(м·град)	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /сек	$\beta \cdot 10^4$ , 1/град	Pr
0	999,9	4230	0,552	1,790	-0,63	13,7
10	999,6	4220	0,575	1,306	+0,70	9,56
20	998,2	4210	0,600	1,006	1,82	7,06
30	995,6	4200	0,618	0,805	3,21	5,5
40	992,2	4200	0,635	0,659	3,87	4,3
50	988,0	4200	0,647	0,556	4,49	3,56
60	983,2	4210	0,660	0,478	5,3	3,00
70	977,7	4220	0,667	0,415	5,8	2,56
80	971,8	4220	0,674	0,366	6,3	2,23
90	965,3	4225	0,680	0,326	7,0	1,95
100	958,3	4230	0,682	0,295	7,5	1,75

**Таблица П1-6**  
**Расчетные формулы для коэффициентов теплообмена тел в условиях естественной конвекции в неограниченной среде**

Рассматриваемое тело	Закон степени 1/4		Закон степени 1/3	
	вид формулы	номер формулы	вид формулы	номер формулы
Шары, горизонтальные цилиндры с диаметром $d$	$\alpha_k = A_2 \left( \frac{t - t_c}{d} \right)^{1/4}$	(П1-53)	$\alpha_k = A_3 (t - t_c)^{1/3}$	(П1-57)
Вертикальные пластины, цилиндры с высотой $h$	$\alpha_k = A_2 \left( \frac{t - t_c}{h} \right)^{1/4}$	(П1-54)	$\alpha_k = A_3 (t - t_c)^{1/3}$	(П1-58)
Горизонтальная пластина, рассеивающая тепловой поток вверх; $l_{\text{мин}}$ — меньший размер пластин	$\alpha_k = 1,3A_2 \left( \frac{t - t_c}{l_{\text{мин}}} \right)^{1/4}$	(П1-55)	$\alpha_k = 1,3A_3 (t - t_c)^{1/3}$	(П1-59)
Горизонтальная пластина, рассеивающая тепловой поток вниз	$\alpha_k = 0,7A_2 \left( \frac{t - t_c}{l_{\text{мин}}} \right)^{1/4}$	(П1-56)	$\alpha_k = 0,7A_3 (t - t_c)^{1/3}$	(П1-60)



Рассмотрим теплообмен плоской и цилиндрических поверхностей в неограниченном пространстве; здесь следует различать два случая.

Если определяющий размер ( $L$ , мм) плоской или цилиндрической поверхности и ее температурный напор ( $t - t_c$ ) удовлетворяют неравенству

$$t - t_c \leq \left( \frac{840}{L} \right)^3, \quad (\text{П1-52})$$

то движение жидкости подчиняется закону степени 1/4. в противном случае имеет место теплообмен по закону степени 1/3.

В табл П1-6 приведены расчетные формулы для коэффициента конвективного теплообмена различных тел, находящихся в неограниченной среде, в условиях естественной конвекции.

В коэффициенты  $A_2$  и  $A_3$  вошли все физические параметры среды:

$$A_2 = 0,54 (\beta g Pr)_m^{1/4} \frac{\lambda_m}{\nu_m^{1/2}} \text{ вт}/(\text{м}^{7/4} \cdot \text{град}^{5/4});$$

$$A_3 = 0,135 (\beta g Pr)_m^{1/3} \frac{\lambda_m}{\nu_m^{2/3}} \text{ вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}^{4/3}).$$

Значения  $A_2$  и  $A_3$  для воздуха и воды, рассчитанные по этим формулам, приведены в табл. П1-7 и П1-8.

Таблица П1-7

Значения  $A_2$  для воздуха и воды

Среда	Значения $A_2$ при температуре $t_m$ , °C									
	10	20	30	40	60	80	100	120	140	150
Воздух . . . . .	1,40	1,38	1,36	1,34	1,31	1,29	1,27	1,26	1,25	1,245
Вода . . . . .	90	105	127	149	178	205	227	—	—	

Таблица П1-8

Значения  $A_3$  для воздуха и воды

Среда	Значения $A_3$ при температуре $t_m$ , °C							
	0	20	40	60	80	100	150	
Воздух . . . . .		1,69	1,61	1,53	1,45	1,39	1,33	1,23
Вода . . . . .		102	198	290	363	425	480	610

Тепловая проводимость между поверхностями тел, отделенных друг от друга прослойкой, заполненной жидкостью или газом. Выражение для коэффициента теплопередачи  $k$  через плоскую ( $k_n$ ), цилиндрическую ( $k_u$ ) и шаровую прослойки ( $k_{ш}$ ) имеют вид

$$k_n = \frac{\epsilon_k \lambda_f}{\delta}, \quad k_u = \frac{2\epsilon_k \lambda_f}{d_1 \ln \frac{d_2}{d_1}}, \quad k_{ш} = \frac{\epsilon_k \lambda_f d_2}{d_i \delta}, \quad (\text{П1-60})$$

где  $\epsilon_k$  — коэффициент конвекции;  $\lambda_f$  — коэффициент теплопроводности среды

Коэффициент  $A_5$  зависит от температуры  $t_m = 0,5 (t_1 + t_2)$  и для воздуха равен:

▶		$t_m, \text{C} \dots \dots \dots$	0	50	100	200
		$A_5 \dots \dots \dots$	0,63	0,58	0,56	0,44

**Теплообмен при давлении, отличном от нормального.** Конвекция в неограниченном пространстве и в ограниченных прослойках изменяется с давлением газа. Если конвективные коэффициенты теплообмена и теплопередачи при нормальном давлении  $H_0$  равны  $\alpha_k$  и  $k_k$ , а при давлении  $H - \alpha_{kH}, k_{kH}$ , то между этими параметрами при  $1 \text{ мм рт.ст.} < H < 10 \text{ ат}$  существует следующая связь:

$$\alpha_{kH} = \alpha_k \left( \frac{H}{H_0} \right)^{2n}, \quad k_{kH} = k_k \left( \frac{H}{H_0} \right)^{2n} \quad (\text{П1-64})$$

Показатель степени в формуле (П1-64) соответствует показателю степени при разности температур  $(t - t_c)$  или  $(t_1 - t_2)$  в формулах (П1-50), (П1-54) — (П1-59), (П1-62), (П1-63). Например, для теплообмена между поверхностью тела и неограниченной средой при законе теплообмена  $1/4$  и для теплопередачи через неограниченные и ограниченные прослойки  $2n = 0,5$ .

### **П1-5. Тепловые сопротивления на границе раздела поверхности твердого тела и жидкой или газообразной среды; условия вынужденной конвекции**

**Теплообмен при вынужденном движении жидкости вдоль плоской поверхности.** Выражения, определяющие коэффициент теплообмена при этих условиях, представляются в виде зависимости между критериями Нуссельта  $Nu_f$ , Рейнольдса  $Re_f$  и Прандтля  $Pr_f$  или  $Pr_W$

$$Nu_f = \frac{\alpha}{\lambda_f} l, \quad Re = \frac{vl}{\nu_f}, \quad Pr_f = \frac{\nu_f}{a_f}, \quad Pr_W = \frac{\nu_W}{a_W},$$

где индексы  $f$  и  $W$  означают, что физические параметры определяются либо при температуре жидкости ( $f$ ), либо при температуре стенки ( $W$ ).

Различают три режима течения жидкости: ламинарный, турбулентный и переходный. Ламинарное течение переходит в турбулентное при критическом значении числа Рейнольдса  $Re_{кр}$ . Если жидкость движется вдоль плоской стенки в неизотермических условиях, то  $Re_{кр} = 4 \cdot 10^4$ .

При ламинарном движении жидкости ( $Re_f < 4 \cdot 10^4$ ) критериальное уравнение для среднего коэффициента теплообмена имеет вид

$$Nu_f = 0,66 Re_f^{0,50} Pr_f^{0,43} \left( \frac{Pr_f}{Pr_W} \right)^{0,25} \quad (\text{П1-75})$$

За определяющую температуру здесь принята температура набегающего потока  $t_f$ , а за определяющий размер — длина стенки  $l$  в направлении потока. Влияние физических свойств жидкости и их зависимости от температуры учитываются в формуле (П1-75) параметром  $Pr_f^{0,43}$ , а влияние направления температурного напора и теплового потока (от жидкости к стенке или наоборот) — параметром  $(Pr_f/Pr_W)^{0,25}$ .

Опытным путем установлено, что для газов при небольших температурных напорах (меньше сотен градусов) коэффициент теплообмена практически не зависит от соотношения температур газа и стенки, если физические параметры выбираются по температуре ( $t_f$ ) потока. В частности, полагая для воздуха  $Pr_f^{0,43} = 0,86$ , а  $(Pr_f/Pr_W)^{0,25} = 1$ , получим из (П1-75):

$$Nu_f = 0,57 \sqrt{Re_f} \quad (\text{П1-76})$$

Эта зависимость представлена ниже в форме, удобной для практических расчетов:

►		$Re_f \cdot 10^{-3}$ . . .	5	10	15	20	25	30	40	50	60	80
		$Nu_f$ . . . . .	41	56	68	81	90	100	115	127	140	160

Расчет коэффициента теплообмена следует проводить в следующем порядке: находят критерии  $Re_f$ ,  $Pr_f$ ,  $Pr_w$ , и если  $Re_f < 4 \cdot 10^4$ , то — по формуле (П1-75), а для воздуха по (П1-76) определяют значение критерия  $Nu_f$  и далее коэффициент теплообмена

$$\alpha = Nu_f \frac{\lambda_f}{l} = \frac{P}{(t_w - t_f) S}, \quad (\text{П1-77})$$

где  $P$  — рассеиваемый стенкой тепловой поток;  $S$  — площадь теплоотдающей поверхности стенки;  $t_w$  — средняя температура стенки.

При турбулентном движении жидкости ( $Re_f \geq 4 \cdot 10^4$ ) критериальное уравнение для среднего коэффициента теплообмена имеет вид

$$Nu_f = 0,037 Re_f^{0,80} Pr_f^{0,43} \left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}. \quad (\text{П1-78})$$

Уравнение (П1-78) для воздуха принимает более простой вид

$$Nu_f = 0,032 Re_f^{0,8}. \quad (\text{П1-79})$$

Рис. П1-11. Поперечное обтекание тела: а — стенка; б — труба; в — шар; г — параллелепипед

Определяющая температура и определяющий размер те же, что и в предыдущем случае. Зависимость (П1-79) представлена ниже:

►		$Re_f \cdot 10^{-5}$ . . .	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
		$Nu_f \cdot 10^{-2}$ . .	3,20	4,42	5,70	7,87	9,66	11,6	13,4	15,0	17,2	18,4	20,2

Приведенные выше формулы были получены при исследовании теплообмена плоской плиты, омываемой потоком жидкости; для оценочных расчетов возможно использовать эти формулы для определения коэффициентов теплообмена цилиндрических поверхностей, омываемых продольным потоком жидкости.

Теплообмен тел различной конфигурации, омываемых поперечным потоком воздуха. Различными исследователями проделано большое число опытов по определению коэффициента теплообмена тел различной формы, омываемых поперечным потоком воздуха. В радиоэлектронных аппаратах, охлаждаемых вынужденным потоком воздуха, протекающим через аппарат, поперечному обтеканию могут подвергаться радиодетали самой различной конфигурации. Целесообразно ввести для таких тел характерный размер, определяемый по какому-нибудь общему принципу. В качестве характерного размера плоской плиты обычно используют ее длину  $l$  в направлении омывающего потока, а для шара и цилиндра — их диаметр  $d$ . Для этих тел, так же как и для тел иной формы, О. Кришер предложил в качестве характерного размера выбирать длину  $l'$  обтекания тела потоком жидкости. Длина обтекания для цилиндра и шара  $l' = 0,5 \pi d$ , а для пластины  $l' = l$ , метод определения длины обтекания  $l'$  ясен также из рис. П1-11. Если в ка-

честве характерного размера рассматривать  $l'$ , то выражение для критериев Рейнольдса и Нуссельта примет вид

$$Re_{l'} = \frac{vl'}{\nu_f}, \quad Nu_{l'} = \frac{\alpha l'}{\lambda_f}.$$

При значениях критерия Рейнольдса  $10 < Re < 10^5$  критериальное уравнение конвективного теплообмена тел, омываемых поперечным потоком воздуха, при ошибке не более 20% может быть представлено в виде:

$$Nu_{l'} = 0,8 \sqrt{Re_{l'}}. \quad (\text{П1-80})$$

Формулу (П1-80) можно использовать для оценочных расчетов коэффициента теплообмена тел, находящихся в замкнутом пространстве и омываемых поперечным потоком воздуха. Определяющий размер в этом случае равен  $l'$ , а скорость движения воздуха около тела рассчитывается по формуле

$$v = G_V / F_{\text{ср}}, \quad (\text{П1-81})$$

где  $G_V$  — объемный расход воздуха, протекающего через ограниченное пространство;  $F_{\text{ср}}$  — площадь среднего сечения, свободного для прохождения потока воздуха.

Рассмотрим метод расчета параметров  $l'$  и  $F_{\text{ср}}$  тел различной конфигурации, находящихся внутри аппарата и омываемых поперечным потоком воздуха. Обозначим площадь теплоотдающей поверхности  $j$ -й детали через  $S_j$ , а длину траектории воздушного потока вдоль этой поверхности через  $l'_j$ , тогда

$$l' = \frac{\sum_{j=1}^n l'_j S_j}{\sum_{j=1}^n S_j}, \quad (\text{П1-82})$$

где  $n$  — число деталей в аппарате.

Для вентилируемых радиоэлектронных аппаратов средняя площадь сечения  $F_{\text{ср}}$  может быть в первом приближении оценена по предложенной Т. А. Абдрахмановым формуле

$$F_{\text{ср}} = F_{\text{ап}} (1 - k_3), \quad k_3 = \frac{V_d}{V}, \quad (\text{П1-83})$$

где  $F_{\text{ап}}$  — площадь сечения пустого корпуса аппарата в направлении, нормальном потоку;  $V_d$  — объем всех деталей, шасси и других твердых частей нагретой зоны аппарата;  $V$  — объем пустого корпуса.

### Часть 3.

## Расчеты тепловых режимов РЭС коэффициентными методами<sup>1</sup>

#### 4.2. РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА РЭА ПРИ ЕСТЕСТВЕННОМ ВОЗДУШНОМ ОХЛАЖДЕНИИ

Тепловой режим РЭА при естественном воздушном охлаждении зависит от многих факторов. Связь между перегревом нагретой зоны и влияющими факторами можно представить в виде [8].

$$\vartheta_3 = \prod_i K_i, \quad (4.36)$$

где  $\vartheta_3$  — перегрев нагретой зоны относительно температуры окружающей среды, а каждый коэффициент  $K_i$  зависит от одного параметра (фактора), влияющего на величину  $\vartheta_3$ . Величина перегрева нагретой зоны аппаратов в герметичном и перфорированном корпусах, работающих при нормальном атмосферном давлении и при отсутствии наружного обдува корпуса и внутреннего перемешивания воздуха, определяется в основном удельной мощностью нагретой зоны и коэффициентом перфорации, т. е.

$$\vartheta_3 = K_{q3} K_{\Pi}, \quad (4.37)$$

где  $K_{q3}$  — коэффициент, зависящий от удельной мощности нагретой зоны;  $K_{\Pi}$  — коэффициент, зависящий от коэффициента перфорации.

Удельная мощность нагретой зоны определяется как частное от деления мощности  $P_3$ , рассеиваемой нагретой зоной, на условную поверхность нагретой зоны  $S_3$ :

$$q_3 = P_3 / S_3, \quad (4.38)$$

где условная поверхность нагретой зоны определяется по формуле

$$S_3 = 2[l_1 l_2 + (l_1 + l_2) l_3 K_3]. \quad (4.39)$$

Здесь  $l_1 l_2$  — горизонтальные размеры корпуса аппарата;  $l_3$  — вертикальный размер корпуса аппарата;  $K_3$  — коэффициент заполнения.

Коэффициент перфорации определяется как отношение площади перфорационных отверстий  $S_{\Pi}$  к площади оснований корпуса аппарата:

$$\Pi = S_{\Pi} / 2l_1 l_2. \quad (4.40)$$

При создании методики расчета использовались экспериментальные данные по тепловым режимам реальных РЭА различного конструктивного исполнения: на шасси, с кассетами и смешанной конструкции. Аппараты имели герметичный либо перфорированный корпус. Тепловой режим этих РЭА определялся при нормальном и пониженном атмосферном давлении, причем в некоторых случаях для интенсификации теплообмена применялись либо наружный обдув корпуса, либо внутреннее перемешивание воздуха. Из анализа экспериментальных данных следует, что перегрев нагретой зоны нелинейно возрастает с ростом удельной мощности зоны и уменьшается с ростом коэффициента перфораций, асимптотически приближаясь к некоторой постоянной величине. Поэтому поведение  $K_{q3}$  и  $K_{\Pi}$  можно описать зависимостями вида

$$K_{q3} = a_1 q_3 + a_2 q_3^2 + a_3 q_3^3, \quad (4.41)$$

$$K_{\Pi} = a_4 + \frac{1}{a_5 + a_6 \Pi}, \quad (4.42)$$

<sup>1</sup> Выдержки из книги: Роткоп Л.Л., Спокойный Ю.Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Сов.радио, 1976. — 232 с.: ил.

и вычислить их по формуле

$$K_{q_3} = 0,1390q_3 - 0,1223 \cdot 10^{-3} q_3^2 + 0,0698 \cdot 10^{-6} q_3^3, \quad (4.43)$$

$$K_{\Pi} = 0,29 + \frac{1}{0,41 + 4,95\Pi}. \quad (4.44)$$

Зависимости  $K_{q_3}$  и  $K_{\Pi}$  от  $q_3$  и  $\Pi$  представлены на рис. 4.4 и 4.5 (на рис. 4.4  $K_{q_3} = \vartheta_2$ ).

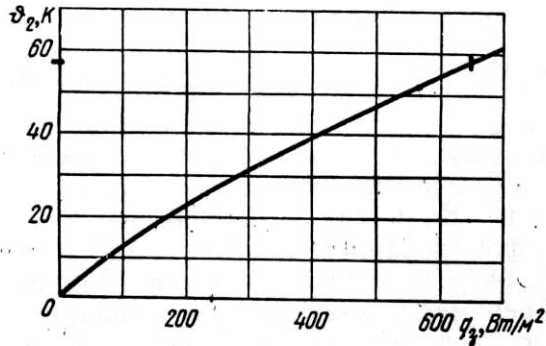


Рис. 4.4. Зависимость перегрева нагретой зоны от удельной мощности рассеивания.

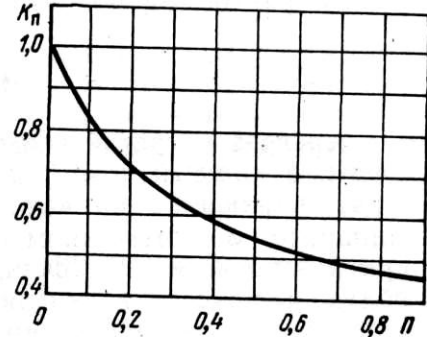


Рис. 4.5. Зависимость  $K_{\Pi}$  от коэффициента перфораций.

Аналогично было найдено выражение для определения перегрева корпуса герметичного аппарата ( $\vartheta_1 = K_{q_k}$ ), работающего в нормальных условиях. Этот перегрев зависит от удельной мощности корпуса аппарата  $q_k$ , определяемой по

$$q_k = P_3/S_k, \quad (4.45)$$

где

$$S_k = 2[l_1 l_2 + (l_1 + l_2) l_3]. \quad (4.46)$$

С использованием экспериментальных данных уравнение для  $K_{q_k}$  имеет вид

$$K_{q_k} = \vartheta_1 = 0,1472q_k - 0,2962 \cdot 10^{-3} q_k^2 + 0,3127 \cdot 10^{-6} q_k^3 \quad (4.47)$$

и графически представлено на рис. 4.6.

Наличие наружного обдува и изменение атмосферного давления снаружи влияет на величину перегрева корпуса  $\vartheta_1$  относительно температуры окружающей среды. Наличие внутреннего перемешивания и изменение атмосферного давления внутри корпуса влияет на величину перегрева ( $\vartheta_2 - \vartheta_1$ ) нагретой зоны относительно температуры корпуса аппарата.

В общем случае перегрев нагретой зоны определяется как

$$\vartheta_3 = \vartheta_1 K_{H1} K_v + (\vartheta_2 - \vartheta_1) K_{H2} K_w, \quad (4.48)$$

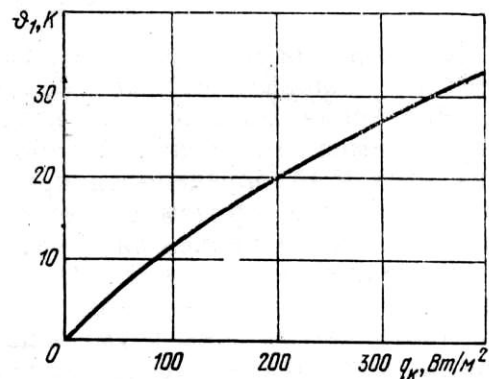


Рис. 4.6. Зависимость перегрева корпуса от удельной мощности.

где  $K_{H1}$  — коэффициент, зависящий от величины атмосферного давления снаружи корпуса аппарата  $H_1$ ;  $K_v$  — коэффициент, зависящий от скорости наружного обдува корпуса аппарата  $v$ ;  $K_{H2}$  — коэффициент, зависящий от величины атмосферного давления внутри корпуса аппарата  $H_2$ ;  $K_W$  — коэффициент, зависящий от скорости перемешивания воздуха в аппарате  $W$ :

$$W = a \frac{G_B}{V_B}, \quad (4.49)$$

где  $G_B$  — производительность вентилятора;  $V_B$  — объем воздуха в аппарате;  $a = 0,6$  м<sup>4</sup>/кг.

Учитывая, что с ростом давления среды внутри и вне корпуса аппарата, скоростей наружного обдува и внутреннего перемешивания перегрев нагретой зоны уменьшается, коэффициенты  $K_{H1}$ ,  $K_v$ ,  $K_{H2}$  и  $K_W$  определялись в виде (4.42). Найденные с использованием экспериментальных данных по тепловым режимам реальных радиоэлектронных аппаратов уравнения для расчета коэффициентов  $K_{H1}$ ,  $K_v$ ,  $K_{H2}$  и  $K_W$  имеют следующий вид:

$$K_{H1} = 0,82 + \frac{1}{0,925 + 4,6 \cdot 10^{-5} H_1}, \quad (4.50)$$

$$K_v = \frac{1}{1 + 0,347v}, \quad (4.51)$$

$$K_{H2} = 0,8 + \frac{1}{1,25 + 3,8 \cdot 10^{-5} H_2}, \quad (4.52)$$

$$K_W = 0,08 + \frac{1}{1,09 + 0,27W}. \quad (4.53)$$

Их графики показаны на рис. 4.7—4.10. Представленные выше коэффициенты получены в следующем диапазоне изменения исходных данных:  $0 \leq q_z \leq 600$  Вт/м<sup>2</sup>;  $0 \leq \Pi \leq 0,8$ ,  $0 \leq q_k \leq 400$  Вт/м<sup>2</sup>,  $700 \leq H \leq 1,2 \cdot 10^5$  Па,  $0 \leq v \leq 3,0$ ,  $0 \leq W \leq 4,0$ .

При определении вида зависимости величины перегрева поверхности элемента относительно температуры окружающей среды исходим из следующих рассуждений: тепловой поток, рассеиваемый элементом, поступает в нагретую зону и в окружающую среду, т. е.

$$P_{эл} = \sigma_{эл з} (\vartheta_{эл} - \vartheta_з) + \sigma_{эл с} \vartheta_{эл}, \quad (4.54)$$

где  $P_{эл}$  — тепловой поток, рассеиваемый элементом;  $\vartheta_{эл}$  — перегрев поверхности элемента относительно температуры окружающей среды;  $\vartheta_з$  — перегрев нагретой зоны относительно температуры окружающей среды;  $\sigma_{эл з}$  — тепловая проводимость между поверхностью элемента и нагретой зоной;  $\sigma_{эл с}$  — тепловая проводимость между поверхностью элемента и окружающей средой.

Из (4.54) следует, что

$$\vartheta_{эл} = \vartheta_з \left[ \frac{\sigma_{эл з}}{\sigma_{эл з} + \sigma_{эл с}} + \frac{P_{эл}}{\vartheta_з (\sigma_{эл з} + \sigma_{эл с})} \right], \quad (4.55)$$

так как

$$\vartheta_з = P_з / \sigma_{з с}; \quad q_{эл} = P_{эл} / S_{эл}; \quad q_з = P_з / S_з,$$

где  $\sigma_{з с}$  — тепловая проводимость между нагретой зоной и окружающей средой;  $S_{эл}$  — площадь теплоотдающей поверхности элемента (при на-

личии радиатора учитывается и поверхность радиатора), то (4.55) можно переписать так:

$$\vartheta_{эл} = \vartheta_3 \left[ \frac{\sigma_{элз}}{\sigma_{элз} + \sigma_{элс}} + \frac{q_{элз} c S_3}{q_3 S_{эл} (\sigma_{элз} + \sigma_{элс})} \right], \quad (4.56)$$

т. е. перегрев поверхности элемента можно представить в виде

$$\vartheta_{эл} = \vartheta_3 \left( a + b \frac{q_{эл}}{q_3} \right). \quad (4.57)$$

Найденные методом наименьших квадратов с использованием экспериментальных данных по тепловым режимам реальных радиоэлектронных аппаратов коэффициенты  $a$  и  $b$  равны соответственно:  $a = 0,75$ ;  $b = 0,25$ .

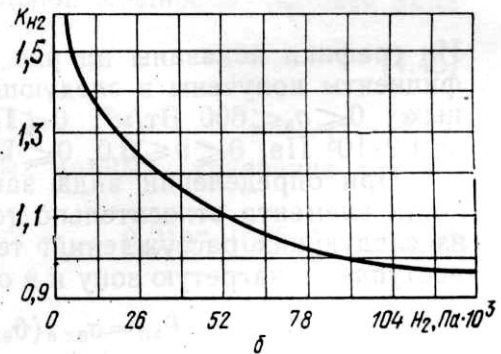
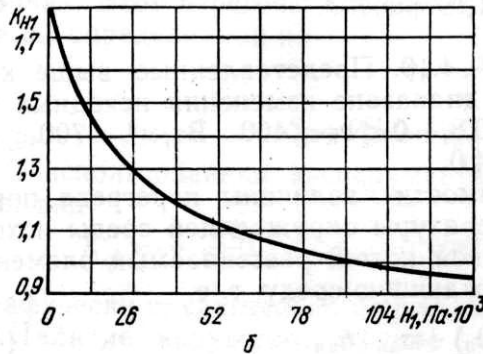
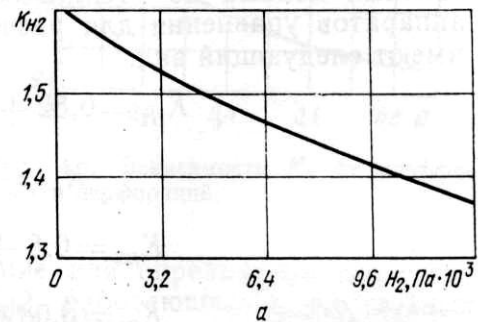
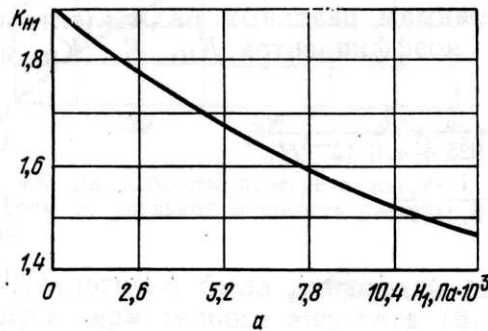


Рис. 4.7. Зависимость  $K_{H1}$  от давления окружающей среды: а)  $0 \leq H_1 \leq 2,6 \cdot 10^3$  Па; б)  $0 \leq H_1 \leq 130 \cdot 10^3$  Па.

Рис. 4.8. Зависимость  $K_{H2}$  от давления среды внутри аппарата: а)  $0 \leq H_2 \leq 12,8 \cdot 10^3$  Па; б)  $0 \leq H_2 \leq 130 \cdot 10^3$  Па.

Формула (4.56) не учитывает особенностей монтажа элементов. Разработка методики, учитывающей особенности монтажа и конструкции элемента, позволит повысить точность расчета температуры поверхности элемента.

Приведенные зависимости позволяют определить среднеповерхностную температуру нагретой зоны и температуры поверхности элементов РЭА при естественном воздушном охлаждении.

На основании сравнения расчетных и экспериментальных данных были построены гистограммы погрешностей расчета перегревов нагретой зоны (рис. 4.11) и элементов (рис. 4.12). Анализ гистограмм показал, что среднеквадратическая погрешность предлагаемой методики



составляет 8 К при расчете перегрева поверхности элемента. Следовательно, погрешность этой методики имеет точность, рекомендованную нами в предыдущем параграфе для инженерных расчетов. Методика достаточно универсальна и при использовании рис. 4.4—4.10 является простой.

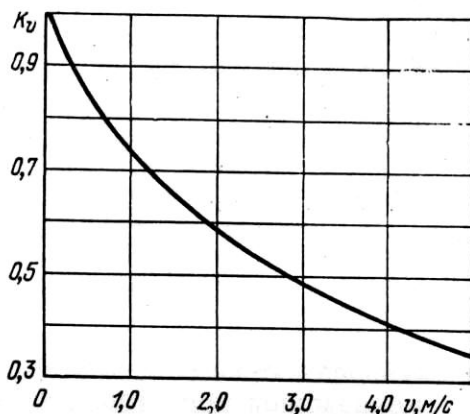


Рис. 4.9. Зависимость  $K_v$  от скорости обдува.

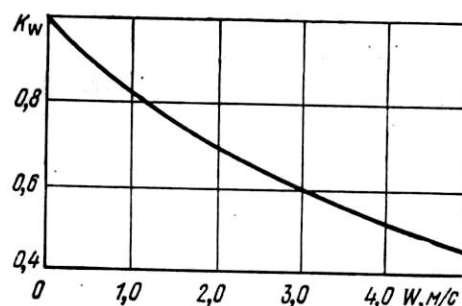


Рис. 4.10. Зависимость  $K_w$  от скорости перемешивания.

Для облегчения пользования методикой теплового расчета РЭА с естественным воздушным охлаждением приведем ряд алгоритмов и примеры расчета по ним.

#### Порядок расчета теплового режима блока в герметичном корпусе

1. Рассчитывается поверхность корпуса блока по (4.46), где  $l_1 l_2$  — горизонтальные размеры корпуса блока;  $l_3$  — вертикальный размер корпуса блока (рис. 4.13).
2. Определяется условная поверхность нагретой зоны по (4.39).
3. Определяется удельная мощность корпуса блока по (4.45).
4. Рассчитывается удельная мощность нагретой зоны по (4.38).
5. Находится коэффициент  $\vartheta_1$  в зависимости от удельной мощности корпуса блока (рис. 4.6).
6. Находится коэффициент  $\vartheta_2$  в зависимости от удельной мощности нагретой зоны (рис. 4.4).
7. Находится коэффициент  $K_{H1}$  в зависимости от давления среды вне корпуса блока  $H_1$  (рис. 4.7).
8. Находится коэффициент  $K_{H2}$  в зависимости от давления среды внутри корпуса блока  $H_2$  (рис. 4.8).
9. Определяется перегрев корпуса блока

$$\vartheta_k = \vartheta_1 K_{H1}. \quad (4.58)$$

10. Рассчитывается перегрев нагретой зоны

$$\vartheta_3 = \vartheta_k + (\vartheta_2 - \vartheta_1) K_{H2}. \quad (4.59)$$

11. Определяется средний перегрев воздуха в блоке

$$\vartheta_v = 0,5(\vartheta_k + \vartheta_3). \quad (4.60)$$

12. Определяется удельная мощность элемента

$$q_{эл} = P_{эл} / S_{эл}, \quad (4.61)$$

где  $P_{эл}$  — мощность, рассеиваемая элементом (узлом), температуру которого требуется определить;  $S_{эл}$  — площадь поверхности элемента (вместе с радиатором), омываемая воздухом.

13. Рассчитывается перегрев поверхности элемента по (4.57).

14. Рассчитывается перегрев окружающей элемент среды

$$\vartheta_{эс} = \vartheta_{в} \left( 0,75 + 0,25 \frac{q_{эл}}{q_{э}} \right). \quad (4.62)$$

15. Определяется температура корпуса блока

$$T_{к} = \vartheta_{к} + T_{с}, \quad (4.63)$$

где  $T_{с}$  — температура окружающей блок среды.

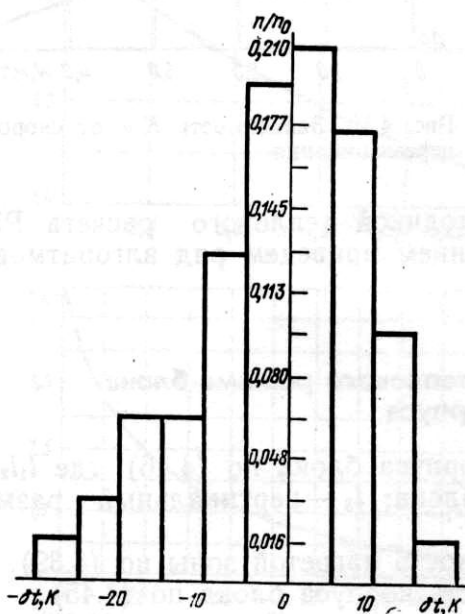


Рис. 4.11. Гистограмма погрешностей расчета перегревов нагретой зоны:  
 $n/n_0$  — относительное число блоков.

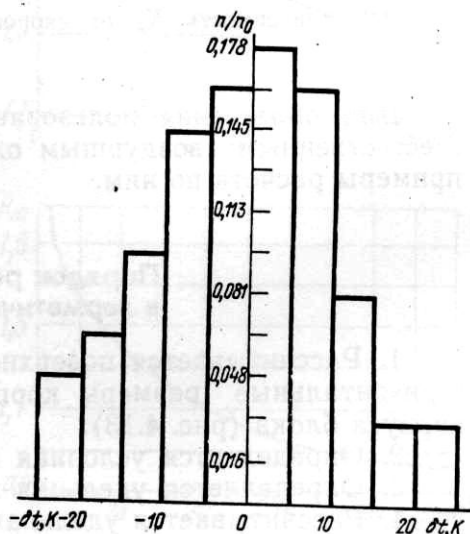


Рис. 4.12. Гистограмма погрешностей расчета перегревов элементов:  
 $n/n_0$  — относительное число элементов.

16. Определяется температура нагретой зоны

$$T_{з} = \vartheta_{з} + T_{с}. \quad (4.64)$$

17. Находится температура поверхности элемента

$$T_{эл} = \vartheta_{эл} + T_{с}. \quad (4.65)$$

18. Находится средняя температура воздуха в блоке

$$T_{в} = \vartheta_{в} + T_{с}. \quad (4.66)$$

19. Находится температура окружающей элемент среды

$$T_{эс} = \vartheta_{эс} + T_{с}. \quad (4.67)$$

**Порядок расчета теплового режима блока  
в герметичном корпусе с внутренним  
перемешиванием**

1. Рассчитывается поверхность корпуса блока по (4.46).
2. Рассчитывается условная поверхность нагретой зоны по (4.39).
3. Находится удельная мощность корпуса блока по (4.45).
4. Находится удельная мощность нагретой зоны по (4.38).
5. Определяется коэффициент  $\vartheta_1$  в зависимости от удельной мощности корпуса блока (рис. 4.6).
6. Определяется коэффициент  $\vartheta_2$  в зависимости от удельной мощности нагретой зоны (рис. 4.4).
7. Находится коэффициент  $K_{H1}$  в зависимости от атмосферного давления вне корпуса блока  $H_1$  (рис. 4.7).
8. Рассчитывается объем воздуха в блоке

$$V_B = l_1 l_2 l_3 (1 - K_s). \quad (4.68)$$

9. Рассчитывается средняя скорость перемешивания воздуха в блоке по (4.49) (при пониженном давлении внутри корпуса блока в (4.49) должна входить производительность вентилятора с учетом изменения давления).
10. Определяется коэффициент  $K_w$  в зависимости от средней скорости перемешивания (рис. 4.10).
11. Определяется перегрев корпуса блока по (4.58).
12. Определяется перегрев нагретой зоны

$$\vartheta_3 = \vartheta_1 (K_{H1} - 1) + \vartheta_2 K_w. \quad (4.69)$$

13. Определяется средний перегрев воздуха в блоке

$$\vartheta_B = 0,75 \vartheta_3. \quad (4.70)$$

14. Находится удельная мощность элемента по (4.61).
15. Рассчитывается перегрев поверхности элемента по (4.57).
16. Рассчитывается перегрев окружающей элемент среды по (4.62).
17. Находится температура корпуса блока по (4.63).
18. Находится температура нагретой зоны, поверхности элемента, средняя температура воздуха в блоке и температура окружающей элемент среды по формулам (4.64) — (4.67).

**Порядок расчета теплового режима блока  
в герметичном корпусе с наружным обдувом**

1. Рассчитывается поверхность корпуса блока по (4.46).
2. Рассчитывается условная поверхность нагретой зоны по (4.39).
3. Определяется удельная мощность корпуса блока по (4.45).
4. Определяется удельная мощность нагретой зоны по (4.38).
5. Находится коэффициент  $\vartheta_1$  в зависимости от удельной мощности корпуса блока (рис. 4.6).
6. Находится коэффициент  $\vartheta_2$  в зависимости от удельной мощности нагретой зоны (рис. 4.4).
7. Находится коэффициент  $K_{H2}$  в зависимости от давления внутри корпуса блока  $H_2$  (рис. 4.8).

8. Рассчитывается перегрев между нагретой зоной и корпусом блока

$$\vartheta_{21} = (\vartheta_2 - \vartheta_1) K_{H2}. \quad (4.71)$$

9. Рассчитывается перегрев корпуса блока с наружным обдувом

$$\vartheta_K = q_K / (12 + 4,17v), \quad (4.72)$$

где  $v$  — скорость обдува (при пониженном давлении в (4.72) должна входить скорость с учетом изменения давления).

10. Определяется перегрев нагретой зоны блока с наружным обдувом

$$\vartheta_3 = \vartheta_K + \vartheta_{21}. \quad (4.73)$$

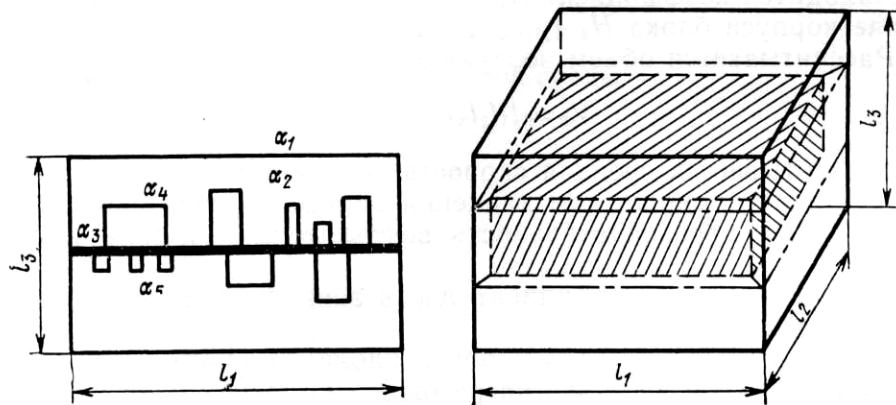


Рис. 4.13. Схемы блока в герметичном исполнении.

11. Определяется средний перегрев воздуха в блоке по (4.70).

12. Рассчитывается удельная мощность элемента, перегревы его поверхности и окружающей среды по (4.61), (4.57), (4.62).

13. Находятся температуры корпуса блока, нагретой зоны, поверхности элемента, воздуха в блоке и окружающей элемент среды по формулам (4.63) — (4.67).

#### Порядок расчета теплового режима блока в герметичном оребренном корпусе

1. Определяется поверхность неоребреного корпуса блока по (4.46).

2. Определяются условная поверхность нагретой зоны, удельная мощность неоребреного корпуса блока, удельная мощность нагретой зоны по формулам (4.39), (4.45), (4.38).

3. Определяется коэффициент  $\vartheta_1$  в зависимости от удельной мощности корпуса блока (рис. 4.6).

4. Определяется коэффициент  $\vartheta_2$  в зависимости от удельной мощности нагретой зоны (рис. 4.4).

5. Рассчитывается перегрев между нагретой зоной и корпусом неоребреного блока

$$\vartheta_{21} = \vartheta_2 - \vartheta_1. \quad (4.74)$$

6. Рассчитывается поверхность оребренного корпуса блока

$$S_{кр} = S_{кн} + S_p, \quad (4.75)$$

где  $S_{\text{кн}}$  — поверхность корпуса, не занятая ребрами;  $S_{\text{р}}$  — поверхность ребер.

7. Рассчитывается удельная мощность оребренного корпуса блока

$$q_{\text{кр}} = P/S_{\text{кр}}. \quad (4.76)$$

8. Определяется коэффициент  $\vartheta_{1\text{р}}$  в зависимости от удельной мощности оребренного корпуса блока (рис. 4.6).

9. Находятся коэффициенты  $K_{\text{Н1}}$  и  $K_{\text{Н2}}$  в зависимости от атмосферного давления вне и внутри корпуса блока —  $H_1$  и  $H_2$  (рис. 4.7 и 4.8).

10. Рассчитывается перегрев оребренного корпуса блока

$$\vartheta_{\text{к}} = \vartheta_{1\text{р}} K_{\text{Н1}}. \quad (4.77)$$

11. Рассчитывается перегрев нагретой зоны с оребренным корпусом

$$\vartheta_{\text{з}} = \vartheta_{\text{к}} + (\vartheta_2 - \vartheta_1) K_{\text{Н2}}. \quad (4.78)$$

12. Рассчитывается средний перегрев воздуха в блоке по (4.70).

13. Определяется удельная мощность элемента, перегревы его поверхности и окружающей среды по (4.61), (4.57) и (4.62).

14. Находятся температуры поверхности корпуса блока, нагретой зоны, поверхности элемента, воздуха в блоке и окружающей элемент среды по (4.63) — (4.67).

#### Порядок расчета теплового режима блока в перфорированном корпусе

1. Рассчитываются: поверхность корпуса блока, условная поверхность нагретой зоны, удельная мощность корпуса блока, удельная мощность нагретой зоны по (4.46), (4.39), (4.45) и (4.38).

2. Находятся коэффициенты  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  в зависимости от удельной мощности корпуса блока и удельной мощности нагретой зоны (рис. 4.4 и 4.6).

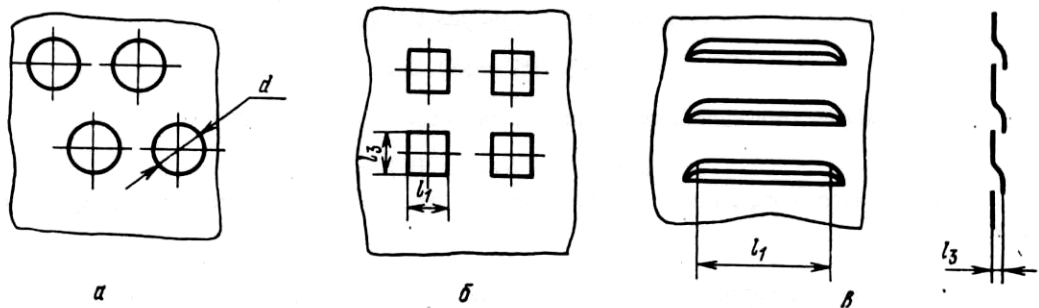


Рис. 4.14. Конфигурации перфорационных отверстий.

3. Находятся коэффициенты  $K_{\text{Н1}}$  и  $K_{\text{Н2}}$  в зависимости от давления вне и внутри корпуса блока —  $H_1$ ,  $H_2$  (рис. 4.7 и 4.8).

4. Рассчитывается площадь перфорационных отверстий. Для прямоугольных отверстий (рис. 4.14, б и в)  $S = nl_1l_3$ , где  $n$  — количество отверстий;  $l_1$  — горизонтальный размер отверстия;  $l_3$  — вертикальный размер отверстия. Для круглых отверстий (рис. 4.14, а)  $S = n\pi d^2/4$ , где  $d$  — диаметр отверстия.

5. Рассчитывается коэффициент перфораций по (4.40).

6. Находится коэффициент  $K_{\Pi}$  в зависимости от коэффициента перфораций (рис. 4.5).

7. Определяется перегрев корпуса блока

$$\vartheta_{\kappa} = \vartheta_1 K_{H1} K_{\Pi} \cdot 0,93. \quad (4.79)$$

8. Определяется перегрев нагретой зоны

$$\vartheta_3 = 0,93 K_{\Pi} \left[ \vartheta_1 K_{H1} + \left( \vartheta_2 \frac{1}{0,93} - \vartheta_1 \right) K_{H2} \right]. \quad (4.80)$$

9. Определяется средний перегрев воздуха в блоке

$$\vartheta_{\text{в}} = \vartheta_3 \cdot 0,6. \quad (4.81)$$

10. Рассчитываются удельная мощность элемента, перегрев поверхности элемента, перегрев окружающей элемент среды по (4.61), (4.57) и (4.62).

11. Находятся температуры корпуса блока, нагретой зоны, поверхности элемента, воздуха в блоке, окружающей элемент среды по (4.63) — (4.67).

**Пример.** Определить тепловой режим блока в герметичном корпусе и его элементов. Мощность, рассеиваемая в блоке,  $P=30$  Вт; мощность, рассеиваемая двумя элементами: 1)  $P_{\text{эл}}=2,8$  Вт; 2)  $P_{\text{эл}}=2,2$  Вт; горизонтальные размеры корпуса блока  $l_1=0,160$  м,  $l_2=0,180$  м, вертикальный размер корпуса блока  $l_3=0,190$  м; площадь поверхности элементов: 1)  $S_{\text{эл}}=8 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>, 2)  $S_{\text{эл}}=118 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>; коэффициент заполнения  $K_3=0,3$ ; температура окружающей среды  $T_c=293$  К (+20°C); давление окружающей среды  $H_1=H_2=0,1$  МПа.

1. Рассчитывается поверхность корпуса блока по (4.46)

$$S_{\kappa} = 2[0,160 \cdot 0,180 + (0,160 + 0,180) \cdot 0,190] = 0,187 \text{ м}^2.$$

2. Определяется условная поверхность нагретой зоны по (4.39)

$$S_3 = 2[0,160 \cdot 0,180 + (0,160 + 0,180) \cdot 0,190 \cdot 0,3] = 0,096 \text{ м}^2.$$

3. Определяется удельная мощность корпуса блока по (4.45)

$$q_{\kappa} = 30/0,187 = 160 \text{ Вт/м}^2.$$

4. Рассчитывается удельная мощность нагретой зоны по (4.38)

$$q_3 = 30/0,096 = 312 \text{ Вт/м}^2.$$

5. Находится коэффициент в зависимости от удельной мощности корпуса блока (рис. 4.6)

$$\vartheta_1 = 17,5 \text{ К.}$$

6. Находится коэффициент в зависимости от удельной мощности нагретой зоны (рис. 4.4)

$$\vartheta_2 = 33,0 \text{ К.}$$

7. Находится коэффициент, зависящий от атмосферного давления вне корпуса (рис. 4.7,а)

$$K_{H1} = 1,0.$$

8. Находится коэффициент, зависящий от давления внутри корпуса блока (рис. 4.8)

$$K_{H2} = 1,0.$$

9. Определяется перегрев корпуса блока по (4.58)

$$\vartheta_{\kappa} = 17,5 \cdot 1,0 = 17,5 \text{ К.}$$

10. Рассчитывается перегрев нагретой зоны по (4.59)

$$\vartheta_a = 17,5 + (33 - 17,5) \cdot 1,0 = 33 \text{ К.}$$

11. Определяется средний перегрев воздуха в блоке по (4.60)

$$\vartheta_b = 0,5(33 + 17,5) = 25,3 \text{ К.}$$

12. Определяется удельная мощность элементов по (4.61)

1)  $q_{эл} = 2,8/8 \cdot 10^{-3} = 350 \text{ Вт/м}^2,$

2)  $q_{эл} = 2,2/118 \cdot 10^{-3} = 18,6 \text{ Вт/м}^2.$

13. Рассчитывается перегрев поверхности элементов по (4.57)

1)  $\vartheta_{эл} = 33 \left( 0,75 + 0,25 \frac{350}{312} \right) = 34 \text{ К,}$

2)  $\vartheta_{эл} = 33 \left( 0,75 + 0,25 \frac{18,6}{312} \right) = 25,2 \text{ К.}$

14. Рассчитывается перегрев окружающей элементы среды по (4.62)

1)  $\vartheta_{ср} = 25,3 \left( 0,75 + 0,25 \frac{350}{312} \right) = 26,1 \text{ К,}$

2)  $\vartheta_{ср} = 25,3 \left( 0,75 + 0,25 \frac{18,6}{312} \right) = 19,3 \text{ К.}$

15. Определяется температура корпуса блока по (4.63)

$$T_k = 17,5 + 293 = 310,5 \text{ К.}$$

16. Определяется температура нагретой зоны по (4.64)

$$T_a = 33 + 293 = 326 \text{ К.}$$

17. Находится температура поверхности элементов по (4.65)

1)  $T_{эл} = 34 + 293 = 327 \text{ К,}$

2)  $T_{эл} = 25,2 + 293 = 318,2 \text{ К.}$

18. Находится средняя температура воздуха в блоке по (4.66)

$$T_b = 25,3 + 293 = 318,2 \text{ К.}$$

19. Находится температура окружающей элементы среды по (4.67)

1)  $T_{ср} = 26,1 + 293 = 319,1 \text{ К,}$

2)  $T_{ср} = 19,3 + 293 = 312,3 \text{ К.}$