

Б. ОТВОД ТЕПЛА В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ

Б.1. Конструктивные особенности радиаторов

Элементы радиоэлектронной аппаратуры (РЭС) во время работы потребляют электрическую энергию. Значительная доля энергии питания при этом превращается в тепловую энергию, что вызывает перегрев элементов и аппаратуры. Если не принять соответствующих мер, то это приведёт к снижению надёжности конструируемой аппаратуры.

Для обеспечения заданной работоспособности элементов РЭС необходимо, чтобы температура элементов не превышала допустимой температуры по техническим условиям, т.е. $t_{эл} < t_{эл. доп.}$. Так максимальная температура переходов германиевых приборов не должна превышать 90°C , а кремниевых - $(150-200)^{\circ}\text{C}$, поэтому допустимая область рабочих температур окружающей среды для германиевых приборов задаётся от минус 60 до $+70^{\circ}\text{C}$, а для кремниевых от минус 60 до $+120^{\circ}\text{C}$ [13].

Мощность, рассеиваемая элементом РЭС,

$$P = \alpha S (t_{эл} - t_c), \quad (Б.1)$$

где P - рассеиваемая элементом электрическая мощность, Вт; t_c - температура окружающей среды, К; α - эквивалентный коэффициент теплоотдачи, учитывающий конвекцию, теплопроводность и излучение, Вт/м² К; S - площадь поверхности элемента или поверхность, с которой тепловая энергия рассеивается в окружающую среду, м².

В соответствии с этим уравнением задача конструктора сводится к отводу рассеиваемой в элементе электрической энергии при необходимом значении температуры элемента РЭС.

Есть несколько способов достижения величины такой температуры элемента РЭС:

интенсификация теплоотдачи (увеличение α);

уменьшение температуры окружающей среды за счёт применения специальных охлаждающих устройств;

увеличение поверхности теплообмена за счёт применения специального теплоотвода [14].

Для полупроводниковых приборов наиболее часто используют радиаторы в качестве дополнительных теплообменников.

Радиаторы за счёт большой поверхности охлаждения имеют соответственно повышенную тепловую проводимость к окружающей среде. По конструкции радиаторы подразделяются на пластинчатые, пластинчато-ребристые, игольчато-штыревые, проволочные и пластинчато-штыревые (рис. Б.1.). Рёбра или штыри могут располагаться с одной или с двух сторон основания.

Пластинчатые радиаторы применяются для обеспечения теплового режима элементов, рассеивающих небольшие мощности 3-10 Вт, т.к. обладают наиболее низкими коэффициентами теплоотдачи (при естественном воздушном охлаждении $\alpha = 5...15 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$) и не большими площадями S теплоотдающей поверхности (до 0,02 м²).

Более эффективными являются пластинчато-штыревые радиаторы. Коэффициент теплоотдачи призматических штырей у таких радиаторов в 2-3 раза выше, чем у пластинчатых радиаторов. Пластинчато-штыревые радиаторы, как правило, применяются для мощностей рассеивания 5-30 Вт и особенно удобны для установки нескольких элементов РЭС на одном радиаторе.

Пластинчато-ребристые и игольчато-штыревые радиаторы целесообразно применять для мощностей рассеивания свыше 10 Вт. В РЭС их часто используют в качестве несущих конструкций, например, выполняя заднюю стенку блока РЭС в виде ребристого радиатора. При установке таких радиаторов их рёбра необходимо ориентировать по направлению потока охлаждающего воздуха в случае использования принудительного воздушного охлаждения. Это иногда усложняет работу конструктора. Этот недостаток значительно меньше проявляется у игольчато-штыревых радиаторов, однако они более сложны и трудоёмки в изготовлении, чем ребристые радиаторы.

При естественном воздушном охлаждении необходимо располагать рёбра радиатора вертикально, т.к. в этом случае воздушному потоку ничего не препятствует, и тёплые слои воздуха быстро заменяются холодными. В случае горизонтального расположения рёбер радиатора смена слоёв воздуха затруднена, вследствие чего значительно падает эффективность используемого радиатора, что может привести к дополнительному неучтённому нагреву ЭРЭ.

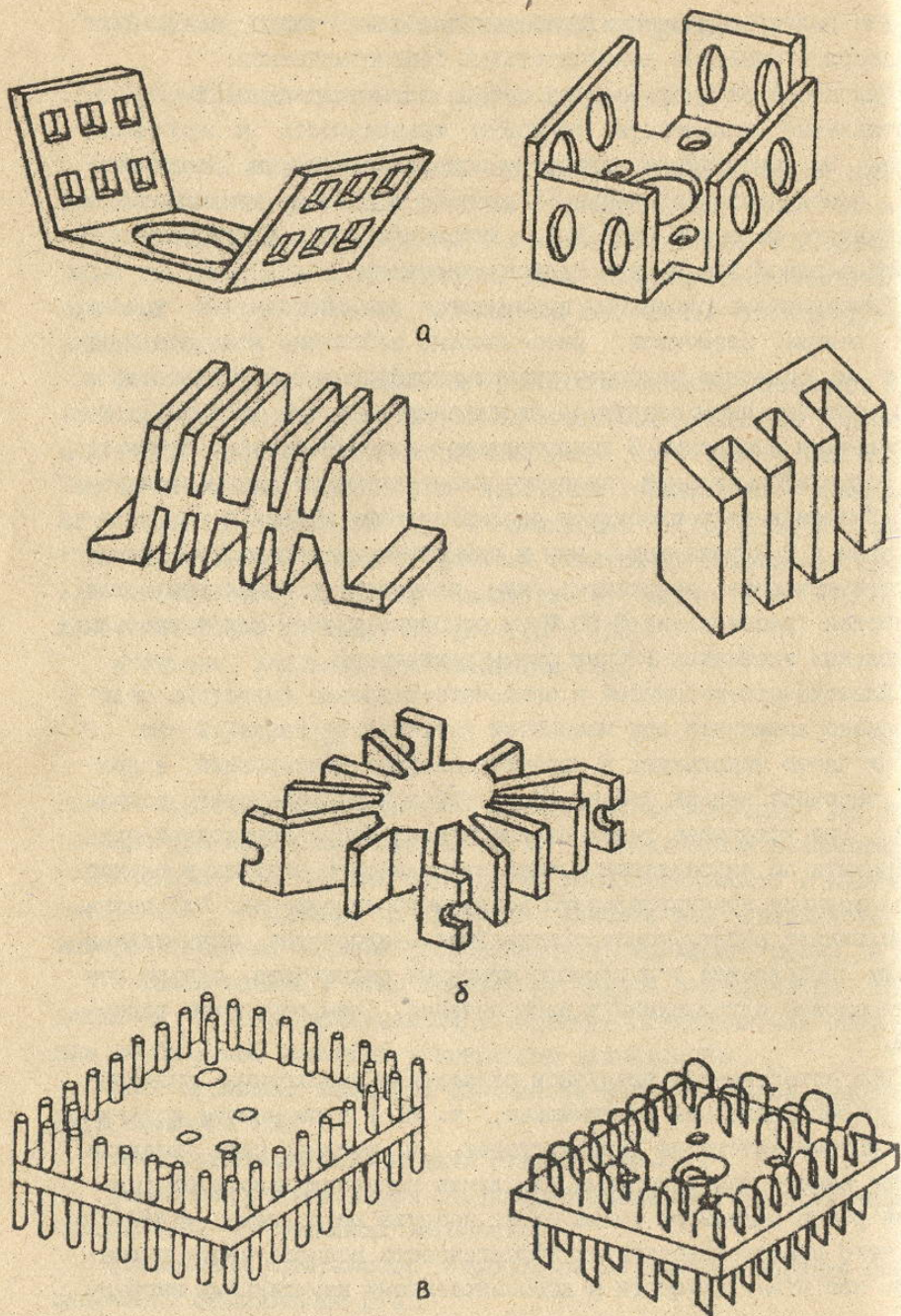


Рис. Б. 1. Конструкции радиаторов для естественного воздушного охлаждения:
 а) пластинчатые; б) ребристые; в) штырьковый и проволочный.

Качество естественного воздушного охлаждения зависит от мощности, выделяемой РЭА во время работы в виде теплоты, формы и габаритных размеров корпуса и площади его поверхности. Некоторое улучшение охлаждения можно получить искусственным увеличением площади поверхности корпуса, например введением специальных ребер-радиаторов.

К специальному типу относятся радиаторы, предназначенные для работы в особых условиях: в разреженном воздухе, невесомости, нестационарном режиме и т. п. Конструкции отдельных радиаторов могут значительно отличаться от описанных выше. Так, например, радиаторы для полупроводниковых приборов, работающих в кратковременном режиме, выполняются в виде массивных металлических деталей, имеющих большую теплоёмкость (см. табл. Б. 7).

Для изготовления радиаторов используют различные виды технологий (литьё, сварка, фрезерование, штамповка и т. д.). Основной технологией изготовления игольчато-штырьевых, пластинчато-штырьевых и ребристых радиаторов является литьё с использованием литьевых алюминиевых сплавов (см. табл. Б. 1). Изготовить радиаторы такого типа можно и при помощи сварки, т. е. пластина и рёбра соединяются при помощи сварного шва. Наиболее простыми в изготовлении являются пластинчатые радиаторы, изготавливаемые из металлических пластин методом штамповки. Материалы для данного типа радиаторов могут быть различными (алюминий, сталь, медь и её сплавы и т. д.). При их выборе необходимо учитывать коэффициент теплопроводности (см. табл. Б. 7). Для увеличения теплоотдачи излучением осуществляют окраску радиаторов лакокрасочным покрытием со степенью черноты не ниже 0,8 (см. табл. Б. 4.).

Для электроизоляции посадочных мест радиоэлементов применяют тонкие плёнки (10...30 мкм) лавсана, слюды, керамики на основе окиси бериллия, пластины электроизоляционного анодированного алюминия (ГОСТ 7134-82), а также различные пасты.

Любой тип радиатора может быть использован в РЭА как с естественным, так и с принудительным воздушным охлаждением. Эти способы охлаждения наиболее просты и доступны, т. к. все ЭРЭ РЭА находятся в объёме, заполненном воздухом или инертным га-

вом. Эффективность естественного воздушного охлаждения тем больше, чем больше разность температур между корпусом ЭРЭ или используемым радиатором и окружающей средой, и чем больше площадь поверхности нагретой зоны. Важное значение имеет также плотность окружающей среды, при уменьшении которой отвод теплоты от нагретой зоны уменьшается.

Принцип охлаждения естественной конвекцией основан на том, что слои воздуха (или другой среды), нагреваясь от выделяющего теплоту ЭРЭ и обладая вследствие этого меньшей плотностью и большей кинетической энергией, перемещаются вверх и замещаются более холодными слоями. Чем меньше коэффициент заполнения объема РЭА, тем больше объем замещаемого воздуха, тем лучше теплообмен. Эффективность теплообмена зависит и от места расположения ЭРЭ в объеме РЭА. В худшем положении будут ЭРЭ, находящиеся в верхней части РЭА, т. к. здесь замещения теплых слоев холодными практически не происходит и их охлаждение осуществляется только за счет теплоотдачи через более холодную крышку РЭА. Данный механизм теплообмена очень важен для случая реализации РЭА в виде герметичного блока, т. е. необходимо более тщательно производить размещение мощных ЭРЭ и печатных плат в целом относительно места расположения в объеме РЭА.

5.2. Теплообмен полупроводникового прибора

Полупроводниковый прибор отдает радиатору свое тепло теплопроводностью. Частично тепловой поток конвекцией и излучением рассеивается непосредственно корпусом прибора в окружающую среду. Радиатор отдает тепло в окружающую среду также конвекцией и излучением.

Наличие теплопроводности кремниевого или германиевого кристалла, на котором образован переход, а также теплопроводности клеевого (паяного) соединения с корпусом определяют возникновение теплового сопротивления "переход-корпус" ($R_{пк}$) и соответствующий перепад температур между переходом (t_n) и корпусом (t_k).

Отношение перепада температур переход-корпус к мощности, рассеиваемой прибором, называется тепловым сопротивлением пере-

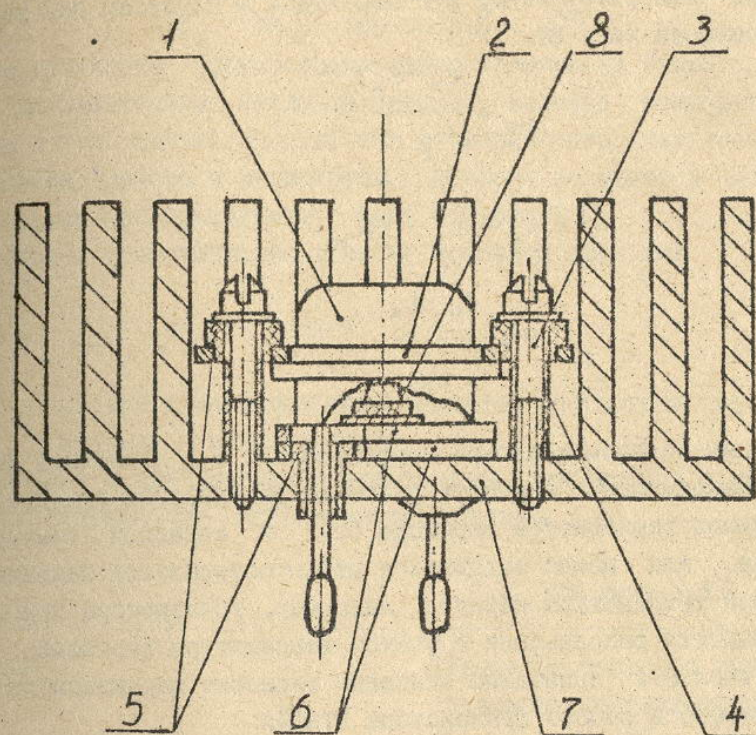


Рис. 5.2. Схема установки транзистора на радиаторе.

- 1 - транзистор; 2 - накидная шайба;
- 3 - винт; 4 - трубка; 5 - изолирующая трубка; 6 - прокладка; 7 - теплоотвод;
- 8 - кристалл.

ход-корпуса, которое показывает, на сколько градусов изменится перепад температур между р-п переходом и корпусом при увеличении мощности на 1 Вт:

$$R_{пк} = \frac{t_n - t_k}{P} \quad (5.2)$$

откуда

$$t_n = t_k + PR_{пк}$$

или

$$P = \frac{t_n - t_k}{R_{пк}} \quad (5.3)$$

Таким образом, тепловое сопротивление $R_{пк}$ позволяет определять максимальную мощность рассеивания прибором при предельно допустимой температуре перехода (t_n) и заданной температуре корпуса или можно задаваться целью определения величины допустимой температуры корпуса, например, транзистора при заданной мощности рассеивания с учётом температуры перехода.

В табл. 5.1 приведены основные тепловые характеристики используемого в работе транзистора КТ809А.

Таблица 5.1

Тип прибора	Постоянная рассеиваемая мощность, P , Вт	Площадь контактной поверхности, $S \cdot 10^4$, м ²	Температура перехода, $t_{пр}$, °С	Температура корпуса, t_k , °С	Тепловое сопротивление, $R_{пк}$, °С/Вт	Допустимая температура окружающей среды, °С
КТ809А	40	4,52	150	125	2,5	-60...+125

Пример. Найдём по данным таблицы предельно допустимую тем-

пературу корпуса транзистора КТ809А:

$$t_k = t_n - PR_{пк} = 150 - 40 \cdot 2,5 = 50^\circ\text{C}$$

При установке полупроводникового прибора на радиатор возникают дополнительные тепловые потери (перепад температуры), которые в этом случае обусловлены тепловым сопротивлением между корпусом прибора и радиатором, которое называется контактным тепловым сопротивлением - (рис. 5.2, рис. 5.3).

Тепловое сопротивление в месте контакта двух тел

$$R_{кр} = 1/(k S) \quad ,$$

где k - удельное тепловое сопротивление контактной пары;

S - площадь контактирования.

Значения k для разных контактирующих материалов с шероховатостью поверхности Rz20 приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Материал	Удельное тепловое сопротивление контактной пары, $k \cdot 10^4$
Медь - алюминий	12
Медь - медь	10
Медь - латунь	5,5
Медь - дюралюминий	5
Сталь - медь	1,2
Сталь - сталь	1,5
Алюминий - алюминий	15
Металл - стекло	3-6,4
Сталь - сталь (резьбовое соединение)	0,17

Тепловое сопротивление $R_{кр}$ обусловлено наличием между корпусом прибора и радиатором тонкого электроизоляционного слоя с малой теплопроводностью. Величина контактного сопротивления зависит от следующих факторов: площади контактных поверхностей; фи-

аикохимических свойств материалов контактных поверхностей; качества обработки контактных поверхностей; температуры в области контакта; наличия электроизоляционных прокладок; силы, прижимающей контактирующую поверхность прибора к поверхности радиатора.

Для снижения контактного теплового сопротивления необходимы высокая чистота обрабатываемых поверхностей и заполнение контактной зоны пастами (полиметилсилоксановой жидкости ПМС-200 или ПМС-500, окись бериллия КПТ-8).

Кроме уменьшения термического сопротивления контакта, смазка уменьшает влияние на контактное сопротивление случайных факторов (затяжка винтов, наличие заусениц и т. д.).

Допуская, что температуры р-п перехода (t_n), корпуса (t_k) и радиатора (t_p) постоянны, можно представить эквивалентную схему теплообмена (рис. 5. 3).

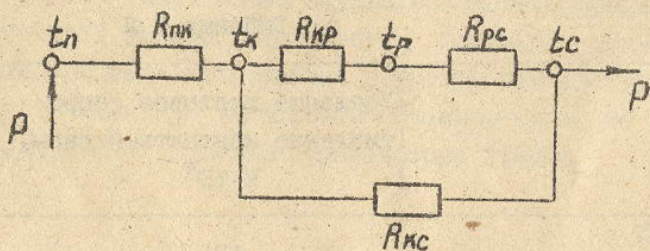


Рис. 5. 3. Эквивалентная схема теплообмена полупроводникового прибора;

где P - тепловой поток, выделяемый полупроводниковым прибором;

R_{nk} - теплое сопротивление между переходом и корпусом прибора;

R_{kp} - контактное теплое сопротивление между корпусом и радиатором;

R_{pc} - теплое сопротивление радиатор-среда.

В большинстве случаев теплое сопротивление R_{ks} оказывается намного больше теплового сопротивления радиатора, поэтому без существенного уменьшения точности расчёта можно упро-

стить эквивалентную схему, пренебрегая потерями тепла при его прямом рассеивании с поверхности корпуса (рис. 5. 4).

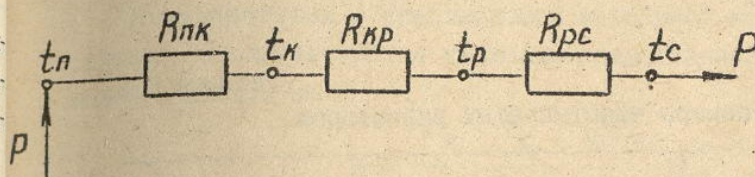


Рис. 5. 4. Упрощённая эквивалентная схема теплообмена полупроводникового прибора

При расчётах теплового режима обычно исходят из требуемой температуры перехода и условий эксплуатации, определяя тепловые сопротивления радиатора (см. рис. 5. 4).

При расчёте теплового сопротивления радиатора необходимо иметь в виду, что теплое сопротивление радиатора зависит от температуры радиатора и среды, т. к. обусловлено конвекцией и излучением.

5. 3. Методика выбора и расчета радиатора для обеспечения заданного теплового режима

Для обеспечения заданного теплового режима радиоэлемента выбор той или иной конструкции радиатора определяется мощностью рассеивания, условиями теплообмена с окружающей средой, технологией изготовления, а также их малогабаритными характеристиками.

Задача конструктора сводится к выбору размеров радиатора. Малогабаритные размеры позволяют разместить тепловод в отведённом месте проектируемого блока РЭС с проверкой достаточности

его типоразмеров для обеспечения заданной температуры элемента при заданной мощности рассеяния в соответствующих условиях окружающей среды.

В качестве примера в табл. 5.3 приведены размеры пластинчатых радиаторов.

Таблица 5.3
Размеры пластинчатых радиаторов

Длина, L	Ширина, B					
36	32	42	52	-	-	-
40	32	42	52	62	-	-
50	32	42	52	62	72	-
63	-	42	52	62	72	92
80	-	-	52	62	72	92
100	-	-	-	62	72	92

Для проверки выбранного стандартного радиатора заданным являются:

P - мощность, рассеиваемая элементом РЭС, Вт;

t_c - максимально возможная температура окружающей среды и условия теплообмена с окружающей средой;

$t_{доп}$ - значение допустимой температуры радиоэлемента, которая задается в зависимости от задач;

тип, конструкция и все размеры выбранного радиатора.

В результате проводимой расчетной проверки пригодности выбранного радиатора задачам обеспечения требуемого теплового режима необходимо определить значение температуры радиоэлемента и сравнить его с заданным (допустимым).

Если расчетное значение температуры элемента окажется меньше заданного (допустимого), то радиатор удовлетворяет требованиям локального обеспечения теплового режима.

Если расчетное значение температуры элемента окажется больше заданного (допустимого), то необходимо выбрать другой стандартный радиатор с последующей перекомпоновкой проектируемой конструкции.

Если габариты выбранного радиатора обеспечивают заданный тепловой режим с большим запасом, величина которого обычно регламентируется, то целесообразно выбрать радиатор меньших габаритов и провести его повторную проверку.

В соответствии с предлагаемой методикой каждый стандартный радиатор характеризуется тепловым сопротивлением R_p , которое можно выразить так:

$$R = \frac{t_p - t_c}{P} = \frac{\Delta t_p}{P}, \quad (5.5)$$

где t_p - максимальная температура радиатора.

В стандартах [15,16] для каждого типа и размера радиатора приводятся характеристики $R_p = f(\Delta t_p)$ для применения в условиях естественного воздушного охлаждения.

По определенному значению R_p и при известном значении мощности P , рассеиваемой элементом РЭС, по (5.5) рассчитывается значение Δt_p или t_p :

$$\Delta t_p = P \cdot R_p; \quad t_p = t_c + P \cdot R_c. \quad (5.6)$$

Температура корпуса радиоэлемента определяется из разности температур, возникающей на контактном термическом сопротивлении, между корпусом полупроводникового прибора и основанием радиатора по формуле

$$t_k = t_p + P \cdot R_{кр}. \quad (5.7)$$

Средние экспериментальные значения контактных тепловых сопротивлений $R_{кр}$ с различными прокладками приведены в [15-17].

В случае отсутствия указанных данных их ориентировочно можно определить по формуле

$$R_{кр} = \frac{1,0 \dots 2,0}{S \cdot 10^4}, \quad \text{°C/Вт}, \quad (5.8)$$

где S - площадь контакта в м^2 .

Если задается температура не корпуса радиоэлемента, а чувствительного к температуре р-п перехода, то

$$t_n = t_p + P(R_{пк} + R_{кр}).$$

Б.4. Методика расчета тепловых характеристик радиаторов

Существует несколько методик расчета тепловых характеристик радиаторов [19-22]. Это свидетельствует об отсутствии единого универсального подхода к составлению тепловых моделей радиаторов при расчете их тепловых характеристик. Так, методика [20] учитывает перепад температуры по ребру радиатора, но не учитывает ориентацию основания радиатора, и коэффициент облученности взаимозакрывающих друг друга поверхностей ребер, который, согласно методике [21], существенно влияет на конечный результат теплового расчета.

Б.4.1. Методика расчета пластинчатого радиатора при естественном воздушном охлаждении

1. Задаются исходными данными:

- а) мощность транзистора, P , Вт;
- б) температура окружающей среды, t_c , °C;
- в) максимально допустимая температура перехода, t_n , °C (выбирается из справочника, паспорта на прибор или табл. 5.1);
- г) тепловое контактное сопротивление между переходом и корпусом, $R_{пк}$, °C/Вт (выбирается из справочника, паспорта на прибор или табл. 5.1).

2. Необходимо сопоставить максимальную мощность рассеяния транзистора при допустимой температуре р-п перехода t_n , температуре среды t_c и тепловом контактном сопротивлении $R_{пк}$ с заданной мощностью транзистора

$$P_{max} = \frac{t_n - t_c}{R_{пк}}, \quad (5.9)$$

где $t_{пк}$ и $R_{пк}$ - выбираются из ТУ на транзистор или из табл. 5.1. Если заданная мощность превышает P_{max} , то данный транзистор на заданную мощность применять нельзя.

3. Рассчитывается средняя поверхностная температура тепловода (радиатора) t_p , °C:

$$t_p = q[t_n - P(R_{пк} + R_{кр})], \quad (5.10)$$

где q - коэффициент, учитывающий неравномерное распределение температуры по тепловоду ($q \approx 0,96$);

$R_{кр}$ - тепловое контактное сопротивление между корпусом и радиатором (выбирается по данным [15-17] или вычисляется по (5.8)).

4. Определяется перепад между средней поверхностной температурой радиатора и окружающей средой, Δt , °C:

$$\Delta t = t_p - t_c. \quad (5.11)$$

5. Определяется коэффициент теплоотдачи конвекцией для вертикально ориентированной пластины, α_k :

$$\alpha_k = A_1 \left(\frac{t_p - t_c}{L} \right)^{1/4}, \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}, \quad (5.12)$$

где $A_1 = f(t_m)$ - определяется по графику (рис. 5.5) или по формуле

$$A_1 = 1,424767136 - 0,002510109 \cdot t_m + 0,00001109 \cdot t_m^2 - 0,000000013 \cdot t_m^3, \quad (5.13)$$

где $t_m = 0,5(t_p + t_c)$. (5.14)

6. Определяется коэффициент теплоотдачи излучением, α_l :

$$\alpha_l = \varepsilon \cdot \varphi \cdot f(t_p, t_c), \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}, \quad (5.15)$$

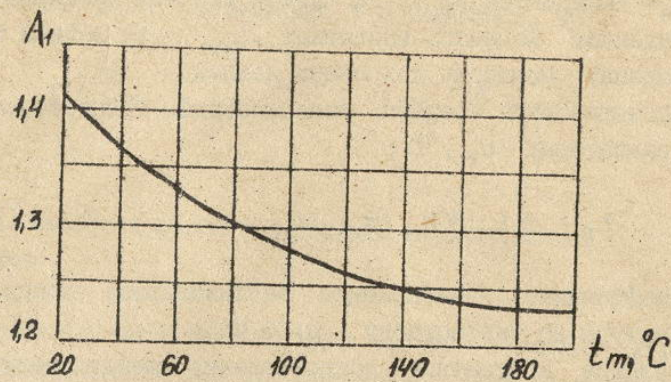


Рис. 5.5. График зависимости коэффициента A_1 от величины t_m .

где ϵ - степень черноты тела (выбирается из табл. 5.4);
 φ - коэффициент облучённости (для гладкой поверхности $\varphi = 1$);
 $f(t_p, t_c)$ - определяется из табл. 5.5 или рассчитывается по формуле

$$f(t_p, t_c) = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{(t_p + 273)^4 - (t_c + 273)^4}{t_p - t_c} \quad (5.16)$$

Таблица 5.4
 Коэффициенты черноты различных поверхностей

Материалы и состояние поверхности	Температура, °C	Коэффициенты черноты
Алюминий (тщательно полированная пластина)	200-600	0,04-0,06
Алюминий (сильно окислен)	35-500	0,20-0,31
Силуминовое литьё (в песчаной форме)	100-500	0,33-0,31

Продолжение табл. 5.4

Силуминовое литьё (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
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 °C)	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 пластину	20	0,92
Краски эмалевые, лаки различных цветов	20-100	0,92
Краски матовые различных цветов	100	0,92-0,96
Лак чёрный матовый	40-100	0,96-0,98
Муар серый, чёрный	20	0,86-0,90
Краска защитно-зелёная	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	-	0,04-0,08
Никелированные поверхности	20	0,05-0,07