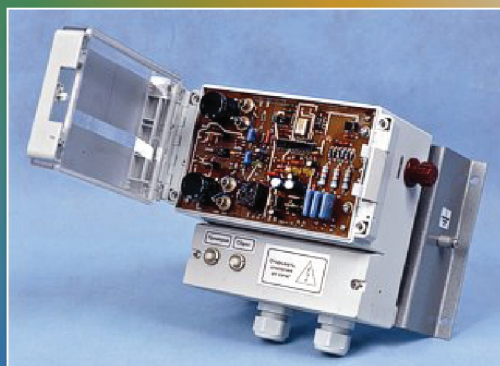


Министерство образования и науки Российской Федерации
Тольяттинский государственный университет
Институт энергетики и электротехники
Кафедра «Промышленная электроника»

В.А. Медведев

РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Электронное
учебно-методическое пособие



© ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», 2017

ISBN 978-5-8259-1197-7

УДК 621.314.572

ББК 32.852

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор Поволжского государственного
университета сервиса *В.И. Аникин*;

канд. техн. наук, доцент Тольяттинского государственного
университета *М.В. Позднов*.

Медведев, В.А. Расчет тепловых режимов полупроводниковых преобразовательных устройств : электрон. учеб.-метод. пособие / В.А. Медведев. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2017. – 1 оптический диск.

Рассмотрены примеры решения задач по расчету нагрева и охлаждения полупроводниковых приборов, токоведущих частей и других элементов конструкции полупроводниковых преобразовательных устройств. Приведены варианты задач и справочные материалы, помогающие студентам на практических занятиях по дисциплине и позволяющие выполнять задания для самостоятельной работы.

Пособие предназначено для студентов вузов направления подготовки бакалавров 11.03.04 «Электроника и микроэлектроника» всех форм обучения при изучении дисциплин «Конструирование преобразователей» и «Конструкции электронных устройств».

Текстовое электронное издание.

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

Минимальные системные требования: IBM PC-совместимый компьютер: Windows XP/Vista/7/8; ПИИ 500 МГц или эквивалент; 128 Мб ОЗУ; SVGA; CD-ROM; Adobe Acrobat Reader.

Редактор *Г.В. Данилова*
Технический редактор *Н.П. Крюкова*
Компьютерная верстка: *Л.В. Сызганцева*
Художественное оформление,
компьютерное проектирование: *И.И. Шишкина*

Дата подписания к использованию 17.10.2017.
Объем издания 6,35 Мб.
Комплектация издания:
компакт-диск, первичная упаковка.
Заказ № 1-81-16.

Издательство Тольяттинского государственного университета
445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14,
тел. 8 (8482) 53-91-47, www.tltsu.ru

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	5
1. Основные виды тепловых потерь в полупроводниковых преобразовательных устройствах	7
2. Расчет тепловых режимов при естественном охлаждении	14
3. Расчет тепловых режимов при принудительном охлаждении	22
4. Расчет тепловых характеристик охладителей при воздушном охлаждении	30
5. Расчет теплоотдачи полупроводниковых приборов на охладителях при принудительном жидкостном охлаждении	37
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	43
Приложение	44

ВВЕДЕНИЕ

Тепловое состояние любого нагреваемого объекта (полупроводникового прибора, токоведущих частей и др.) определяется мощностью выделяющихся в нем потерь и процессом передачи тепловой энергии в охлаждающую среду. Для отвода, например, от полупроводниковых приборов заданного количества тепла при сохранении допустимого уровня их нагрева в мощных полупроводниковых приборах используют специальные теплоотводящие устройства, называемые охладителями или радиаторами. Многообразие конкретных конструкций теплоотводящих устройств влечет за собой наличие различных методов их тепловых расчетов. В основе этих методов лежит рассмотрение уравнений трех видов передачи тепла – конвекции, теплового излучения и теплопроводности. В большинстве случаев все три способа теплообмена действуют одновременно и определяют тепловой режим полупроводникового прибора или другого нагреваемого элемента конструкции преобразователя.

Передача тепла теплопроводностью имеет место в твердой среде. Этим способом тепло отводится от зоны тепловыделения к поверхностям прибора и охладителя, соприкасающимся с охлаждающей средой.

Отвод тепла с поверхности нагретого прибора и теплоотводящего устройства в охлаждающую среду осуществляется либо за счет конвекции, либо за счет совместного действия конвекции и теплового излучения. Конвекцией называется процесс передачи тепла, связанный с перемещением микрообъемов газа или жидкости относительно поверхности нагретого тела. Конвекция бывает естественная (свободная) и искусственная (вынужденная).

Естественная конвекция возникает в неравномерно нагретых жидкости или газе. Частицы среды, соприкасающиеся с поверхностью нагретого тела, приобретают большую температуру, чем удаленные от поверхности частицы, и под воздействием разности давлений начинают перемещаться, унося с собой некоторое количество тепла из зоны более высоких температур в зону более низких. Холодные частицы поступают на их место, и процесс повторяется. Вынужденная конвекция происходит за счет энергии, сообщаемой

охлаждающей среде посторонним источником – вентилятором для газа и насосом для жидкости.

Расчет тепловых потерь, выделяющихся в элементах конструкции преобразователя, зависит от внешнего вида и назначения элемента конструкции (полупроводниковый прибор, токоведущая шина, катушка индуктивности, магнитопровод трансформатора или дросселя и др.); рода тока (постоянный, переменный, импульсный); частоты тока; вызваны ли тепловые потери непосредственно протекающим через элемент конструкции током или индуцированы с помощью электромагнитного поля.

В предлагаемом учебно-методическом пособии рассмотрены примеры задач по расчету как нагрева, так и охлаждения различных элементов конструкции полупроводниковых преобразовательных устройств, а также приведены варианты задач для самостоятельной работы студентов.

1. Основные виды тепловых потерь в полупроводниковых преобразовательных устройствах

1. Потери мощности в проводниках при протекании по ним постоянного тока:

$$P = I^2 \cdot R, \quad (1.1)$$

где $R = \rho_0(1 + \alpha_c t) \frac{l}{S}$ – сопротивление проводника постоянному току; ρ_0 – удельное электрическое сопротивление материала проводника при 0°C ; α_c – температурный коэффициент сопротивления; t – температура нагрева проводника; l – длина проводника; S – площадь поперечного сечения проводника.

2. Потери мощности в неферромагнитных проводниках при протекании по ним переменного тока. При переменном токе потери мощности увеличиваются из-за неравномерного распределения тока по поверхности проводника. Так, в частях поперечного сечения, расположенных ближе к наружной поверхности, плотность тока оказывается больше, чем во внутренних его частях. Отношение потерь мощности в проводнике при переменном токе (действующее значение) к потерям при постоянном токе такой же величины называется коэффициентом поверхностного эффекта $\kappa_{\text{п}}$.

$$\kappa_{\text{п}} = \frac{P_{\sim}}{P_{\text{—}}} = \frac{I^2 R_{\sim}}{I^2 R_{\text{—}}} = \frac{R_{\sim}}{R_{\text{—}}}, \quad (1.2)$$

где R_{\sim} – сопротивление проводника протеканию переменного тока; $R_{\text{—}}$ – сопротивление проводника протеканию постоянного тока.

Значения коэффициента поверхностного эффекта в зависимости от параметра $\sqrt{f/R_{100}}$, где f – частота переменного тока; R_{100} – сопротивление проводника длиной 100 метров постоянному току, находятся по графикам (рис. 1.1), приведенным в справочниках.

Распределение тока по сечению проводника зависит не только от магнитного поля внутри проводника (поверхностный эффект), но и от магнитного поля, создаваемого другими, рядом находящимися проводниками – эффект близости.

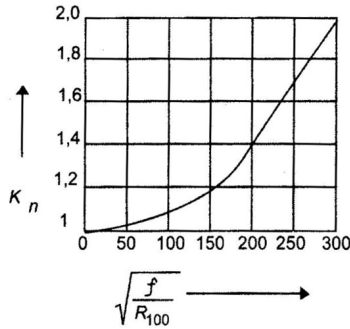


Рис. 1.1. Значения коэффициента поверхностного эффекта для сплошных круглых немагнитных проводников

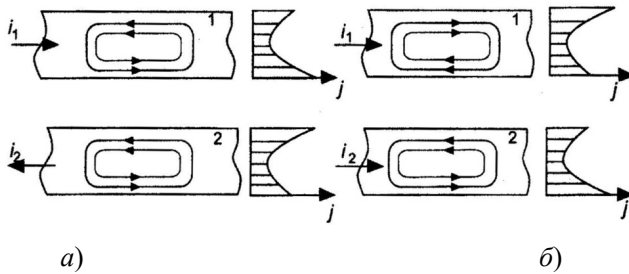


Рис. 1.2. К пояснению эффекта близости

Предположим, что имеются два проводника 1 и 2 (рис. 1.2, а), расположенных параллельно друг другу, по которым проходят токи i_1 и i_2 противоположного направления. Магнитный поток, созданный током i_1 , будет пронизывать проводник 2, причем элементы проводника 2, расположенные ближе к проводнику 1, будут охватываться большим магнитным потоком. В результате в этих элементах будут наводиться неодинаковые по величине противо-ЭДС и между ними будут проходить токи, встречные i_1 вблизи проводника 1 и согласные с i_1 вдали от проводника 1. Таким образом, в элементах проводника 2, расположенных ближе к проводнику 1, наведенные токи складываются с i_2 , а в противоположных элементах — вычитаются из i_2 . Это приводит к неравномерному распределению тока по поперечному сечению проводника, а следовательно, к увеличению потерь в нем. При одинаковых направлениях токов i_1 и i_2 в прово-

дниках 1 и 2 (рис. 1.2, б) токи, наведенные в проводнике 2, вычитаются из i_2 с ближней к проводнику 1 стороны и складываются с i_2 с дальней к проводнику 1 стороны.

Количественно эффект близости принято характеризовать коэффициентом близости, равным отношению активного сопротивления проводника, расположенного в непосредственной близости от других проводников с переменным током к его активному сопротивлению, когда он уединен, то есть не находится в магнитном поле других проводников.

$$\kappa_6 = \frac{R_{\sim}}{R_{\sim\text{уед}}} = \frac{R_{\sim}}{\kappa_{\Pi} R_{\sim}}. \quad (1.3)$$

Коэффициент близости зависит от частоты переменного тока, формы проводника, расстояния между проводниками, их взаимного расположения и определяется по графикам и таблицам, приводимым в справочниках.

Таким образом, тепловые потери в проводниках на переменном токе в общем случае равны:

$$P_{\sim} = P_{\sim} \cdot \kappa_{\Pi} \cdot \kappa_6. \quad (1.4)$$

3. *Потери мощности в ферромагнитных проводниках при переменном токе.* В ферромагнитных сплошных проводниках переменное электромагнитное поле проникает лишь на небольшую глубину, отсчитываемую от наружной поверхности проводника. Поэтому тепловые потери зависят не от площади поперечного сечения, а от периметра поперечного сечения проводника и определяются по формуле

$$P = \frac{I^2 l}{\Pi} \sqrt{\omega \cdot \mu_e \cdot \rho}, \quad (1.5)$$

где I – действующее значение тока, протекающего через проводник; Π – периметр поперечного сечения проводника; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота; μ_e – абсолютная магнитная проницаемость материала проводника; $\rho = \rho_0(1 + \alpha_c \cdot t)$ – удельное электрическое сопротивление материала проводника.

4. *Потери мощности в нетоковедущих ферромагнитных частях.* При переменном токе в нетоковедущих ферромагнитных частях преобразователя (магнитопроводах дросселей, трансформаторов, оболочке шкафа и т. д.) возникают потери мощности за счет тепловых потерь на гистерезис и вихревые токи. Для уменьшения этих

потерь магнитопровод дросселей и трансформаторов выполняется шихтованным или витым. Для расчета тепловых потерь в нетоковедущих ферромагнитных частях пользуются различными эмпирическими зависимостями, например:

$$P = (\alpha_r \cdot B_m^{1,6} + \alpha_b \cdot f \cdot B_m^2) f \cdot G, \quad (1.6)$$

где B_m – максимальное значение магнитной индукции; G – масса; α_r и α_b – соответственно коэффициенты потерь от гистерезиса и вихревых токов.

5. *Потери в диэлектриках.* В преобразователях высокого напряжения помимо потерь в проводниках и ферромагнитных материалах необходимо учитывать и потери в изоляции, определяемые следующим образом:

$$P = \omega \cdot c \cdot U^2 \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (1.7)$$

где c – емкость изоляции; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь.

Задача 1.1

Определить потери мощности в 1 метре круглого медного проводника диаметром $d = 15$ мм, если по нему протекает постоянный ток $I = 1000$ А. Температура нагрева проводника $t = 100$ °С.

Решение

Для определения тепловых потерь в проводнике воспользуемся формулой (1.1)

$$P = I^2 R = I^2 \rho_0 (1 + \alpha t) \frac{e}{S}, \quad (1.8)$$

где $S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,015^2}{4} = 1,77 \cdot 10^{-4}$ м² – площадь поперечного сечения проводника;

$\rho_0 = 1,62 \cdot 10^{-8}$ Ом · м; $\alpha = 4,3 \cdot 10^{-3}$ 1/град (табл. П1);

$$P = 1000^2 \cdot 1,62 \cdot 10^{-8} (1 + 4,3 \cdot 10^{-3} \cdot 100) \frac{1}{1,77 \cdot 10^{-4}} = 131 \text{ Вт.}$$

Ответ: $P = 131$ Вт.

Задача 1.2

Определить потери мощности в проводнике с геометрическими размерами и температурой нагрева из условий задачи 1.1, если по нему протекает переменный ток $I = 1000$ А с частотой $f = 500$ Гц.

Решение

Тепловые потери при протекании по проводнику переменного тока равны

$$P_{\sim} = P \cdot K_{\text{пЭ}}, \quad (1.9)$$

где $P = 131$ Вт (из задачи 1.1) – тепловые потери в проводнике на постоянном токе; $K_{\text{пЭ}}$ – коэффициент поверхностного эффекта, определяемый по графикам в зависимости от формы поперечного сечения проводника и параметра $\sqrt{\frac{f}{R_{100}}}$; R_{100} – активное сопротивление постоянному току проводника длиной 100 м.

$$R_{100} = f_0(1 + \alpha t) \frac{e}{S} = 1,62 \cdot 10^{-8} (1 + 4,3 \cdot 10^{-3} \cdot 100) \frac{100}{1,77 \cdot 10^{-4}} = 0,0131 \text{ Ом}$$

$$\sqrt{\frac{f}{R_{100}}} = \sqrt{\frac{500}{0,0131}} = 195.$$

По графику [3] $K_{\text{пЭ}} = 1,4$, $P_{\sim} = 131 \cdot 1,4 = 183,4$ Вт.

Ответ: 183,4 Вт.

Задача 1.3

Определить потери мощности в проводнике длиной e , размерами поперечного сечения (рис. 1.3), по которому протекает переменный ток I , частотой f . Температура нагрева проводника t . Численные значения исходных данных приведены в табл. 1.1.

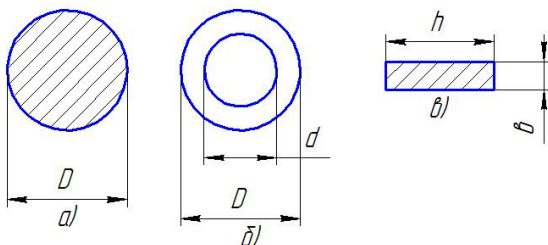


Рис. 1.3. Поперечное сечение проводника: а – круглый сплошной; б – полый трубчатый; в – прямоугольный

Таблица 1.1

Исходные данные

№ варианта	Материал проводника	Вид проводника	I, А	f, Гц	t, °С	l, м	D, мм	d, мм	h, мм	b, мм
1	Медь	Круглый сплошной	100	500	100	2	10			
2	Медь	Полый трубчатый	200	1000	90	1	12	8		
3	Медь	Прямоугольный	400	1500	80	3			15	5
4	Алюминий	Круглый сплошной	300	800	100	4	15			
5	Алюминий	Полый трубчатый	450	1200	95	2	18	12		
6	Алюминий	Прямоугольный	550	700	90	3			20	5
7	Серебро	Круглый сплошной	150	1100	85	4	11			
8	Серебро	Полый трубчатый	250	800	80	1	14	10		
9	Серебро	Прямоугольный	350	1300	100	2			18	6
10	Медь	Круглый сплошной	500	1600	95	3	16			
11	Медь	Полый трубчатый	600	900	90	4	20	15		
12	Медь	Прямоугольный	300	600	75	0,5			12	7
13	Алюминий	Прямоугольный	650	1400	85	5			20	10
14	Алюминий	Круглый сплошной	750	900	80	1	20			
15	Алюминий	Полый трубчатый	200	400	75	1,5	16	12		
16	Серебро	Полый трубчатый	700	1700	75	2	15	10		
17	Серебро	Круглый сплошной	200	600	95	2,5	10			
18	Серебро	Прямоугольный	300	450	90	0,5			10	6

№ ва-ри-анта	Материал проводника	Вид проводника	I, А	f, Гц	t, °С	l, м	D, мм	d, мм	h, мм	b, мм
19	Медь	Круглый сплошной	150	1500	75	1	14			
20	Медь	Полый трубчатый	250	1000	80	1,5	18	10		
21	Алюминий	Круглый сплошной	350	1700	85	2	17			
22	Серебро	Круглый сплошной	450	800	90	2,5	15			
23	Медь	Прямоугольный	200	600	70	1			9	4
24	Алюминий	Полый трубчатый	300	700	80	2	19	13		
25	Серебро	Круглый сплошной	100	400	65	0,5	9			

2. Расчет тепловых режимов при естественном охлаждении

Различные данные об экспериментальном исследовании теплообмена при естественном движении жидкости были обобщены М.А. Михеевым, в результате чего была получена следующая критериальная зависимость:

$$Nu = c \cdot [Gr \cdot Pr]^n, \quad (2.1)$$

где c и n – коэффициенты, зависящие от произведения $[Gr \cdot Pr]$ и определяемые по табл. 2.1; Gr – критерий Грасгофа; Pr – критерий Прандтля.

Критерий Грасгофа:

$$Gr = \beta \cdot g \cdot \frac{l^3}{\nu^2} (t_s - t_c), \quad (2.2)$$

где β – температурный коэффициент объемного расширения охлаждающей среды; g – ускорение свободного падения; l – характерный геометрический размер охлаждаемого тела; ν – коэффициент кинематической вязкости охлаждающей среды; t_s – температура нагретой поверхности тела; t_c – температура охлаждающей среды.

Критерий Прандтля характеризует физические свойства охлаждающей среды и выбирается по таблицам приложения П2–П4.

Таблица 2.1

Значения коэффициентов для уравнения (2.1)

$Gr \times Pr$	c	n
до 1×10^{-3}	0,5	0
$1 \times 10^{-3} \dots 5 \times 10^3$	1,18	0,125
$5 \times 10^2 \dots 2 \times 10^7$	0,54	0,25
$2 \times 10^7 \dots 1 \times 10^{13}$	0,135	0,333

Уравнение (2.1) можно использовать и при расчете теплоотдачи свободной конвекцией в газообразную среду. В качестве определяющей температуры при выборе значения физических параметров охлаждающей среды принимается среднеарифметическая температура:

$$t_m = 0,5(t_c + t_s). \quad (2.3)$$

Так как теплоотдача лучеиспусканием осуществляется обычно совместно с конвекцией, то уравнение теплоотдачи лучеиспуска-

нием желательно записать в форме, аналогичной формуле Ньютона для конвективного теплообмена:

$$P_{\text{л}} = \alpha_{\text{л}}(t_1 - t_2)S_1, \quad (2.4)$$

где $\alpha_{\text{л}}$ – коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием между двумя поверхностями; t_1 – температура поверхности, отдающей тепло; t_2 – температура поверхности, воспринимающей тепло.

$$\alpha_{\text{л}} = \varepsilon_n \cdot \varphi \cdot c_0 \frac{\left(\frac{t_1 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_2 + 273}{100}\right)^4}{t_1 - t_2} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}}, \quad (2.5)$$

где $c_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}^4$ – коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела; $\varepsilon_n = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)\varphi}$ – приведенная степень черноты

системы тел; φ – приведенный коэффициент взаимоблуженности.

Для теплообмена излучением поверхности S_1 с окружающей средой: $\varphi = 1$; $\varepsilon_n = \varepsilon_1$; $t_2 = t_s$.

Общий тепловой поток, отдаваемый от нагретого тела в окружающую среду совместным действием конвекции и теплового излучения:

$$P = P_{\text{к}} + P_{\text{л}} = \alpha_{\text{с}}(t_s - t_{\text{с}})S, \quad (2.6)$$

где $\alpha_{\text{с}} = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{л}}$ – результирующий коэффициент теплоотдачи конвекцией и излучением.

При проведении практических тепловых расчетов следует помнить, что теплоотдача лучеиспусканием рассчитывается только в случае теплопередачи в спокойную газообразную окружающую среду. Если теплоотдача с поверхности нагретого тела осуществляется в принудительно движущуюся газообразную среду, либо в неподвижную или движущуюся жидкую среду, то коэффициент теплоотдачи излучением считают равным нулю, то есть теплоотдачей лучеиспусканием пренебрегают.

Задача 2.1

Определить максимальный допустимый постоянный ток, который может протекать по вертикально расположенному проводнику длиной $e = 1 \text{ м}$, диаметром $d = 15 \text{ мм}$, находящемуся в спокойном

воздухе с температурой $t_c = 40$ °С. Проводник выполнен из меди и соприкасается с изоляцией класса Е.

Решение

В установившемся тепловом режиме работы тепловая мощность, выделяемая в проводнике P_v , равна тепловой мощности, отдаваемой в окружающую среду $P_{от}$.

$$P_{от} = (\alpha_k + \alpha_l)(t_s - t_c)S_{ох},$$

где α_k и α_l — соответственно коэффициенты теплоотдачи конвекцией и лучеиспусканием; t_s — температура нагрева проводника (при максимально допустимом токе определяется классом нагревостойкости изоляции и выбирается из табл. П5); t_c — температура окружающей среды; $S_{ох}$ — поверхность охлаждения.

Из уравнений (1.1), (2.6) и условия равенства отдаваемой и выделяемой мощности в установившемся режиме работы следует, что максимально допустимый ток равен:

$$I_{доп} = \sqrt{\frac{P_{от}}{R}}. \quad (2.7)$$

Определяем активное сопротивление проводника:

$$R = \rho_0(1 + \alpha t_s) \frac{e}{S} = 1,39 \cdot 10^{-4} \text{ Ом},$$

где $\rho_0 = 1,62 \cdot 10^{-8}$ Ом · м (табл. П1); $t_s = 120$ °С (табл. П5);

$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,015^2}{4} = 1,77 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ — площадь поперечного сечения проводника.

Рассчитываем поверхность охлаждения проводника:

$$S_{ох} = \pi \cdot d \cdot e = 0,047 \text{ м}^2.$$

Определяем коэффициент теплоотдачи конвекцией:

$$\alpha_k = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{e},$$

где $\text{Nu} = c[\text{Gr} \cdot \text{Pr}]^n$ — формула Михеева (уравнение 2.1);

$\text{Gr} = \beta \cdot g \frac{l^3}{\nu^2}(t_s - t_c)$ — критерий Грасгофа (уравнение 2.2).

Рассчитываем определяющую температуру:

$$t_m = 0,5(t_c + t_s) = 0,5(120 + 40) = 80 \text{ °С},$$

по которой из табл. П2 выбираем необходимые для расчета физические параметры воздуха:

$$\nu = 21,09 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \quad \lambda = 3,05 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}; \quad \text{Pr} = 0,692.$$

Определяем коэффициент объемного расширения воздуха:

$$\beta = \frac{1}{273 + t_m} = 2,83 \cdot 10^{-3} \text{ 1/град.}$$

Подставляя необходимые значения, рассчитываем критерий Грасгофа $\text{Gr} = 4,988 \cdot 10^9$; критерий Нуссельта $\text{Nu} = 202,5$ и коэффициент теплоотдачи конвекции $\alpha_k = 6,17 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град.}$

Находим коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием (уравнение 2.5):

$$\alpha_{\text{л}} = \varepsilon \cdot C_0 \frac{\left(\frac{t_S + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_C + 273}{100}\right)^4}{t_S - t_C} = 6,06 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}},$$

где $C_0 = 5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$ — постоянная Больцмана; ε — степень черноты тела, отдающего тепло (определяется по табл. Пб).

Рассчитываем тепловую мощность, отдаваемую от проводника в окружающую среду:

$$P = (6,17 + 6,06) (120 - 40) 0,047 = 46 \text{ Вт.}$$

Определяем максимально допустимый ток:

$$I_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{46}{1,39 \cdot 10^{-4}}} = 575 \text{ А.}$$

Ответ: 575 А.

Задача 2.2

Определить максимально допустимый ток для условий задачи 2.1, если проводник находится в трансформаторном масле с температурой 40 °С.

Ответ: 2277 А.

Задача 2.3

Определить максимально допустимый ток для условий задачи 2.1, если проводник находится в воде с температурой 40 °С.

Ответ: 7014 А.

Задача 2.4

Определить максимальный допустимый ток, который может протекать по проводнику, находящемуся в спокойном воздухе. Проводник соприкасается с изоляцией класса нагревостойкости, указанного в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Исходные данные

№ варианта	Материал проводника	Вид проводника	Класс изол.	Расположение проводника	Температура воздуха, °С	l, м	D, мм	h, мм	b, мм
1	Медь	Круглый	У	Горизонтальный	20	2	10		
2	Алюминий	Круглый	А	Горизонтальный	30	0,5	12		
3	Сталь	Круглый	Е	Горизонтальный	40	3	15		
4	Медь	Прямоугольный	В	Горизонтальный плашмя	25	4		10	4
5	Алюминий	Прямоугольный	F	Горизонтальный на реб.	35	2		12	5
6	Сталь	Прямоугольный	У	Горизонтальный плашмя	20	3		20	5
7	Медь	Прямоугольный	А	Горизонтальный на реб.	30	5		8	4
8	Алюминий	Прямоугольный	Е	Горизонтальный плашмя	40	1		6	3
9	Сталь	Прямоугольный	В	Горизонтальный на реб.	15	1,5		7	2
10	Медь	Круглый	Е	Вертикальный	25	0,5	16		
11	Алюминий	Круглый	F	Вертикальный	35	1,5	20		
12	Сталь	Прямоугольный	У	Вертикальный	45	0,8		20	10
13	Медь	Прямоугольный	А	Вертикальный	20	1,2		10	5
14	Алюминий	Прямоугольный	Е	Вертикальный	30	2		12	6
15	Медь	Круглый	В	Горизонтальный	40	4	8		

№ варианта	Материал проводника	Вид проводника	Класс изол.	Расположение проводника	Температура воздуха, °С	l, м	D, мм	h, мм	b, мм
16	Алюминий	Круглый	F	Горизонтальный	15	5	9		
17	Сталь	Круглый	У	Горизонтальный	25	6	11		
18	Медь	Прямоугольный	A	Горизонтальный плашмя	35	1,5	14	7	
19	Алюминий	Прямоугольный	E	Горизонтальный плашмя	45	2,5	16	8	
20	Сталь	Прямоугольный	B	Горизонтальный плашмя	20	3,5	18	9	
21	Медь	Прямоугольный	F	Горизонтальный на реб.	30	4,5	9	5	
22	Алюминий	Прямоугольный	A	Вертикальный	40	0,5	11	6	
23	Сталь	Круглый	У	Вертикальный	15	1	10		
24	Медь	Круглый	B	Горизонтальный	25	2	12		
25	Алюминий	Прямоугольный	F	Горизонтальный плашмя	35	3	7	4	

Задача 2.5

Определить максимальный допустимый ток, который может протекать по проводнику, находящемуся в жидкости. Температура жидкости 40 °С.

Таблица 2.3

Исходные данные

№ варианта	Материал проводника	Вид проводника	Температура проводника, °С	Расположение проводника	Охлаждающая жидкость	l, м	D, мм	h, мм	b, мм
1	Медь	Прямоугольный	80	Горизонтальный плашмя	Трансформаторное масло	4		11	4
2	Алюминий	Прямоугольный	90	Горизонтальный на реб.	Вода	2		12	5

№ ва-ри-анта	Матери-ал про-водника	Вид прово-дника	Температу-ра прово-дника, °С	Располо-жение про-водника	Охлажда-ющая жид-кость	l, м	D, мм	h, мм	b, мм
3	Сталь	Прямо-угольный	75	Горизон-тальный плашмя	Вода	3		20	5
4	Медь	Прямо-угольный	85	Горизон-тальный на реб.	Трансфор-маторное масло	5		8	4
5	Алюми-ний	Прямо-угольный	95	Горизон-тальный плашмя	Трансфор-маторное масло	1		6	3
6	Сталь	Прямо-угольный	60	Горизон-тальный на реб.	Вода	1,5		7	2
7	Медь	Круглый	70	Верти-кальный	Трансфор-маторное масло	0,5	16		
8	Алюми-ний	Круглый	80	Верти-кальный	Вода	1,5	20		
9	Сталь	Прямо-угольный	90	Верти-кальный	Трансфор-маторное масло	0,8		20	10
10	Медь	Прямо-угольный	65	Верти-кальный	Вода	1,2		10	5
11	Алюми-ний	Прямо-угольный	90	Верти-кальный	Трансфор-маторное масло	2		12	6
12	Медь	Круглый	85	Горизон-тальный	Вода	2	10		
13	Алюми-ний	Круглый	80	Горизон-тальный	Трансфор-маторное масло	0,5	12		
14	Сталь	Круглый	75	Горизон-тальный	Вода	3	15		
15	Медь	Прямо-угольный	70	Горизон-тальный плашмя	Трансфор-маторное масло	1,5		5	3
16	Алюми-ний	Прямо-угольный	65	Горизон-тальный плашмя	Вода	2,5		9	4

№ ва-ри-анта	Матери-ал про-водника	Вид прово-дника	Температу-ра прово-дника, °С	Располо-жение про-водника	Охлажда-ющая жид-кость	l, м	D, мм	h, мм	b, мм
17	Сталь	Прямо-угольный	60	Горизон-тальный на реб.	Трансфор-маторное масло	3,5		13	7
18	Медь	Прямо-угольный	55	Горизон-тальный на реб.	Вода	4,5		14	8
19	Алюмини-ный	Круглый	60	Верти-кальный	Трансфор-маторное масло	0,4	8		
20	Сталь	Прямо-угольный	70	Верти-кальный	Вода	0,8		7	4
21	Медь	Круглый	80	Горизон-тальный	Трансфор-маторное масло	2	11		
22	Алюмини-ный	Круглый	90	Горизон-тальный	Вода	3	13		
23	Сталь	Круглый	75	Верти-кальный	Вода	0,7	9		
24	Медь	Прямо-угольный	65	Верти-кальный	Трансфор-маторное масло	0,5		8	4
25	Алюмини-ный	Прямо-угольный	55	Горизон-тальный плашмя	Трансфор-маторное масло	2,5		11	5

3. Расчет тепловых режимов при принудительном охлаждении

Из всего многообразия случаев теплообмена при вынужденной конвекции следует выделить три наиболее часто встречающихся случая: теплоотдача при вынужденном движении охлаждающей среды вдоль плоской или цилиндрической поверхности; теплоотдача при движении охлаждающей среды в трубах или каналах; теплоотдача при поперечном обтекании тел различной формы.

Чтобы определить коэффициент теплоотдачи при вынужденном движении охлаждающей среды, прежде всего необходимо подсчитать критерий Рейнольдса, численное значение которого в каждом конкретном случае указывает, в каком режиме происходит движение среды. Возможны два режима движения охлаждающей среды: *ламинарный* (слоистый) и *турбулентный* (вихревой). Переход от одного режима к другому определяется значением критерия Рейнольдса, называемого критическим $Re_{кр}$. Величина $Re_{кр}$ различна для различных случаев вынужденного движения охлаждающей среды.

При движении охлаждающей среды вдоль плоской или цилиндрической поверхности $Re_{кр} = 10^5$.

Для ламинарного режима течения ($Re_{кр} < 10^5$) критериальное уравнение теплоотдачи имеет вид:

$$Nu = 0,66 Re^{0,5}. \quad (3.1)$$

Для турбулентного режима течения ($Re_{кр} > 10^5$):

$$Nu = 0,032 Re^{0,8}. \quad (3.2)$$

В обоих случаях в качестве определяющей температуры, при которой выбираются все физические параметры охлаждающей среды, принимается температура набегающего потока, а в качестве определяющего размера — длина стенки l по направлению потока.

При вынужденном движении охлаждающей среды в трубах или каналах $Re_{кр} = 2000...2300$. Для каналов круглого сечения определяющим размером является диаметр канала d . Если форма поперечного сечения канала отличается от круга, то в качестве определяющего размера принимается гидравлический диаметр канала:

$$d_{\Gamma} = \frac{4F}{\Pi}, \quad (3.3)$$

где d_{Γ} – периметр поперечного сечения канала или трубы.

В качестве определяющей температуры принимается средняя температура среды в канале или трубе:

$$t_m = 0,5(t_{\text{вх}} + t_{\text{вых}}), \quad (3.4)$$

где $t_{\text{вх}}$ и $t_{\text{вых}}$ – соответственно температура охлаждающей среды на входе и выходе канала.

Для ламинарного режима течения ($Re < 2000$) при расчете охлаждения используется следующее критериальное уравнение:

$$Nu = 1,86 \cdot Re^{0,33} \cdot Pr^{0,33} \left(\frac{d}{l}\right)^{0,33} \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0,14}, \quad (3.5)$$

где l – длина трубы или канала; μ и μ_s – коэффициенты динамической вязкости и охлаждающей среды при определяющей температуре t_m и при температуре стенок трубы t_s .

При развитом турбулентном течении охлаждающей среды в трубах или каналах для расчета коэффициента теплоотдачи используется следующее уравнение:

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0,25} \cdot \varepsilon_l, \quad (3.6)$$

где Pr и Pr_s – значения критерия Прандтля соответственно при температуре t_m и температуре t_s ; ε_l – поправочный коэффициент, учитывающий изменение среднего коэффициента теплоотдачи по длине трубы (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Значения коэффициента ε_l

l/d	1	2	5	10	15	20	30	40	50
ε_l	1,90	1,70	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02	1,00

При переходных режимах течения охлаждающей среды ($2000 < Re < 10000$) для расчета теплоотдачи в трубах и каналах рекомендуется следующее критериальное уравнение:

$$Nu = k \cdot E, \quad (3.7)$$

где k – табличный безразмерный коэффициент, значения которого приведены в табл. 3.2; $E = Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0,25}$ – безразмерный параметр.

Таблица 3.2

Значения коэффициента k

$Re \times 10^3$	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	3	4	5	6	8	10
k	1,9	2,2	3,3	3,8	4,4	6,0	10,3	15,5	19,5	27	33,3

При поперечном обтекании тел различной формы наиболее полно исследованы случаи обтекания тел цилиндрической формы. По окружности поперечно обтекаемого тела теплоотдача неодинакова. Зона максимальных значений коэффициента теплоотдачи лежит на лобовой образующей цилиндра. По мере перемещения по поверхности цилиндра в направлении движения охлаждающей среды величина коэффициента теплоотдачи падает, а затем вновь возрастает в кормовой части. Средний коэффициент теплоотдачи вычисляется по следующему критериальному уравнению:

$$Nu = c \cdot Re^n \cdot Pr^{0,4}, \quad (3.8)$$

где c и n – коэффициенты, зависящие от величины критерия Рейнольдса, которые определяются по табл. 3.3.

Таблица 3.3

Значения постоянных c и n

Re	c	n
50...80	0,93	0,4
80...5000	0,715	0,46
Свыше 5000	0,226	0,6

Задача 3.1

Определить тепловую мощность, отдаваемую с внешней поверхности проводника длиной $e = 1$ м, диаметром $d = 15$ мм, охлаждаемого протекающим поперек него воздухом со скоростью $V = 2$ м/с. Температура воздуха $t_c = 40$ °С. Температура нагрева поверхности проводника $t_s = 80$ °С.

Решение

Тепловая мощность, отдаваемая с поверхности проводника, рассчитываемая по формуле Ньютона,

$$P = \alpha_k (t_s - t_c) S_{\text{ок}},$$

где α_k – коэффициент теплоотдачи конвекцией с поверхности проводника; $t_s = 80^\circ\text{C}$ – температура нагрева проводника; $t_c = 40^\circ\text{C}$ – температура окружающей среды; $S_{\text{ок}} = \pi d \cdot e = \pi \cdot 0,015 \cdot 1 = 0,047 \text{ м}^2$.

Для расчета коэффициента теплоотдачи конвекцией необходимо выбрать критериальное уравнение, соответствующее условиям задания. Так как имеет место поперечное обтекание охлаждающей средой цилиндрического тела, то для расчета используется уравнение (3.8)

$$\text{Nu} = c \cdot \text{Re}^n \cdot \text{Pr}^{0,4}.$$

Физические параметры окружающей среды выбираем по табл. П2 для температуры набегающего потока воздуха

$$t_s = 40^\circ\text{C}; \lambda = 2,76 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}; \nu = 16,96 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \text{Pr} = 0,699.$$

Рассчитываем критерий Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{V \cdot l}{\nu} = \frac{2 \cdot 0,015}{16,96 \cdot 10^{-6}} = 1769.$$

Для рассчитанного критерия Рейнольдса $\text{Re} = 1769$ по табл. 3.3 выбираем постоянные $c = 0,715$ и $n = 0,46$.

Вычисляем критерий Нуссельта

$$\text{Nu} = 0,715 \cdot 1769^{0,46} \cdot 0,699^{0,4} = 19,32.$$

Определяем коэффициент теплоотдачи конвекцией:

$$\alpha_k = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{d} = \frac{19,32 \cdot 2,76 \cdot 10^{-2}}{0,015} = 35,55 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}.$$

Находим тепловую мощность, отдаваемую с поверхности проводника,

$$P = 35,55 \cdot (80 - 40) \cdot 0,047 = 66,8 \text{ Вт}.$$

Ответ: 66,8 Вт.

Задача 3.2

Определить тепловую мощность для условий задачи 3.1, если проводник охлаждается трансформаторным маслом с температурой 40 °С.

Ответ: 2812 Вт.

Задача 3.3

Определить тепловую мощность для условий задачи 3.1, если проводник охлаждается водой с температурой 40 °С.

Ответ: 5351 Вт.

Задача 3.4

Определить тепловую мощность, отдаваемую с внешней поверхности проводника, обтекаемого охлаждающей средой с заданной скоростью и температурой.

Таблица 3.4

Исходные данные

№ варианта	Вид проводника	Температура проводника, °С	Направление потока среды	Температура среды, °С	Скорость среды, м/с	Вид среды	l , м	D , мм	h , мм	b , мм
1	Круглый	95	Поперек	40	10	Вода	2	10		
2	Круглый	90	Вдоль	35	8	Воздух	0,5	12		
3	Круглый	85	Поперек	30	6	Трансформаторное масло	3	15		
4	Прямоугольный	80	Вдоль	25	4	Вода	1		10	4
5	Прямоугольный	75	Поперек	20	2	Трансформаторное масло	2		12	5
6	Прямоугольный	100	Вдоль	40	11	Воздух	1,5		20	5
7	Прямоугольный	95	Поперек	35	9	Вода	5		8	4
8	Прямоугольный	90	Вдоль	30	7	Трансформаторное масло	0,4		6	3
9	Прямоугольный	85	Поперек	25	5	Воздух	1,5		7	2

№ варианта	Вид проводника	Температура проводника, °С	Направление потока среды	Температура среды, °С	Скорость среды, м/с	Вид среды	l, м	D, мм	h, мм	b, мм
10	Круглый	80	Вдоль	20	3	Вода	0,7	16		
11	Круглый	75	Поперек	15	1	Трансформаторное масло	1,5	20		
12	Прямоугольный	95	Вдоль	40	10	Воздух	0,8		20	10
13	Прямоугольный	90	Поперек	35	8	Вода	1,2		10	5
14	Прямоугольный	85	Вдоль	20	6	Трансформаторное масло	0,3		12	6
15	Круглый	60	Поперек	25	5	Воздух	2,5	6		
16	Круглый	70	Вдоль	30	4	Вода	0,5	8		
17	Круглый	80	Поперек	35	3	Трансформаторное масло	3,5	11		
18	Прямоугольный	90	Вдоль	40	2	Вода	0,7		9	5
19	Прямоугольный	55	Поперек	20	7	Воздух	2		5	3
20	Прямоугольный	65	Вдоль	25	6	Трансформаторное масло	0,9		11	6
21	Круглый	75	Поперек	30	5	Вода	3	7		
22	Круглый	85	Вдоль	35	4	Воздух	0,4	13		
23	Прямоугольный	60	Вдоль	20	3	Трансформаторное масло	0,9		18	8
24	Прямоугольный	70	Поперек	25	2	Вода	4		16	6
25	Круглый	80	Вдоль	15	1	Воздух	0,6	9		

Задача 3.5

Определить тепловую мощность, отдаваемую с внутренней поверхности полого проводника, обтекаемой охлаждающей средой с заданной скоростью и температурой.

Таблица 3.5

Исходные данные

№ варианта	Вид внутр. поверх.	Температура проводника, °С	Температура среды, °С	Скорость среды, м/с	Вид среды	l , м	d , мм	h , мм	b , мм
1	Прямоугольный	95	40	10	Трансформаторное масло	4		5	3
2	Прямоугольный	90	35	8	Вода	3,5		10	5
3	Прямоугольный	85	20	6	Трансформаторное масло	3		12	6
4	Круглый	95	40	10	Вода	2,5	10		
5	Круглый	90	35	8	Вода	2	12		
6	Круглый	85	30	6	Трансформаторное масло	1,5	8		
7	Прямоугольный	80	25	4	Вода	1		9	4
8	Прямоугольный	75	20	2	Трансформаторное масло	4		12	5
9	Прямоугольный	100	40	11	Трансформаторное масло	3,5		14	7
10	Прямоугольный	95	35	9	Вода	3		8	4
11	Прямоугольный	90	30	7	Трансформаторное масло	2,5		16	6
12	Прямоугольный	85	25	5	Вода	2		7	3
13	Круглый	80	20	3	Вода	4	16		

№ ва-ри-анта	Вид внутр. поверх.	Темпера-тура про-водника, °С	Темпе-ратура среды, °С	Ско-рость среды, м/с	Вид среды	<i>l</i> , м	<i>d</i> , мм	<i>h</i> , мм	<i>b</i> , мм
14	Круглый	75	15	1	Трансфор-маторное масло	3,5	14		
15	Круглый	70	40	2	Вода	0,5	9		
16	Круглый	65	30	3	Трансфор-маторное масло	1	7		
17	Прямо-угольный	60	35	4	Вода	1,5		6	4
18	Прямо-угольный	55	25	5	Трансфор-маторное масло	2		11	6
19	Прямо-угольный	90	20	6	Вода	2,5		4	2
20	Прямо-угольный	80	40	7	Трансфор-маторное масло	3		5	3
21	Круглый	70	35	1	Вода	3,5	6		
22	Круглый	60	30	2	Трансфор-маторное масло	4	11		
23	Прямо-угольный	55	15	3	Трансфор-маторное масло	4,5		15	3
24	Прямо-угольный	65	20	4	Вода	5		13	4
25	Круглый	75	25	5	Вода	5,5	5		

4. Расчет тепловых характеристик охладителей при воздушном охлаждении

Расчет теплоотдачи от охладителя полупроводникового прибора чаще всего сводится к получению зависимости рассеиваемой охладителем мощности от превышения среднеповерхностной температуры t_s над температурой охлаждающей среды t_c . Эта зависимость $P = f(t_s - t_c)$ называется тепловой характеристикой охладителя.

Последовательность операций при расчете тепловых характеристик охладителя в условиях воздушного охлаждения на примере широко применяемых охладителей с прямыми ребрами на плоскости приведена в [3].

Исходные данные для расчета: геометрические размеры охладителя; температура окружающей среды t_c ; степень черноты поверхности охладителя ε для естественного воздушного охлаждения; скорость движения воздуха v для принудительного воздушного охлаждения.

Задача 4.1

Расчитать и построить тепловую характеристику охладителя с прямыми ребрами на плоской поверхности и геометрическими размерами, приведенными на рис. 4.1, при естественном воздушном охлаждении. Исходные данные для расчета приведены в табл. 4.1.

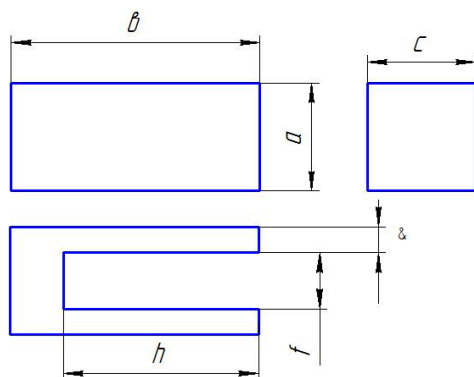


Рис. 4.1. Геометрические размеры охладителя

Таблица 4.1

Исходные данные

№ варианта	a , мм	b , мм	c , мм	h , мм	f , мм	Материал охладителя	Температура охлаждающей среды
1	20	50	15	15	2,5	Медь	40
2	30	60	20	25	3	Алюминий	35
3	40	70	25	33	4	Сталь	30
4	50	80	30	43	5	Алюминий	25
5	60	90	35	50	6	Медь	20
6	70	100	40	60	7	Сталь	25
7	80	110	45	70	8	Медь	30
8	90	120	50	75	9	Алюминий	35
9	25	55	20	20	2,5	Сталь	40
10	35	65	25	30	3,5	Алюминий	35
11	45	75	30	38	4	Медь	30
12	55	85	35	48	5	Сталь	25
13	65	95	40	55	6	Медь	20
14	75	105	45	65	6,5	Алюминий	25
15	85	115	50	70	7	Сталь	30
16	20	55	20	30	2	Алюминий	35
17	30	65	30	40	4	Медь	40
18	40	75	40	50	6	Сталь	20
19	50	85	50	60	8	Медь	25
20	60	95	60	70	10	Алюминий	30
21	70	105	70	80	12	Сталь	35
22	80	115	80	90	14	Алюминий	40
23	90	125	90	100	16	Медь	20
24	35	70	30	35	4.5	Алюминий	25
25	55	90	45	53	7	Сталь	30

Решение

1. Разбиваем всю поверхность охладителя на поверхности с одинаковыми условиями охлаждения с окружающей средой и рассчитываем их площадь:

$$S_1 = 2ba + ca + 2\alpha a;$$

$$S_2 = (2h + f)a;$$

$$S_3 = 2(b - h)c;$$

$$S_4 = 4\delta h.$$

2. Задаемся превышением температуры нагрева охладителя над температурой окружающей среды (шагом расчета) $\Delta t_s = 10^\circ\text{C}$.

3. Рассчитываем температуру нагрева поверхности охладителя

$$t_s = t_c + \Delta t_s.$$

4. Рассчитываем определяющую температуру для поверхностей S_1, S_3, S_4

$$t_{m1} = t_{m3} = t_{m4} = \frac{1}{2}(t_s + t_c).$$

5. Находим температуру окружающей среды для поверхности S_2 в пространстве между ребрами охладителя по формуле (2.57) [3]

$$t_{ic} = t_s - (t_s - t_c)L(\eta).$$

6. Рассчитываем определяющую температуру для поверхности S_2

$$t_{m2} = 0,5(t_s + t_{ic}).$$

7. Находим коэффициент теплоотдачи конвекций с поверхности S_1

$$\alpha_{k1} = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_{m1}}{a},$$

где Nu – критерий Нуссельта, рассчитываемый по формуле (2.1); λ_{m1} – коэффициент теплопроводности, выбираемый из табл. П2 при температуре t_{m1} .

8. Определяем коэффициент теплоотдачи конвекцией для поверхности S_2

$$\alpha_{k2} = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_{m2}}{a}.$$

9. Рассчитываем коэффициент теплоотдачи конвекцией с поверхности S_3

$$\alpha_{k3} = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_{m2}}{(b - h)}.$$

10. Находим коэффициент теплоотдачи конвекцией с поверхности S_4

$$\alpha_{k4} = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_{m2}}{\delta}.$$

11. Рассчитываем коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием с поверхностями S_1, S_3, S_4

$$\alpha_{л1} = \alpha_{л3} = \alpha_{л4} = \frac{\varepsilon C_0 \left[\left(\frac{t_s + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_c + 273}{100} \right)^4 \right]}{(t_s - t_c)},$$

где ε – степень черноты поверхности охладителя (по табл. П6);

$C_0 = 5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}^4}$ – постоянная Больцмана.

12. Определяем коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием с поверхности S_2

$$\alpha_{л2} = \frac{\varepsilon C_0 \varphi \left[\left(\frac{t_s + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_c + 273}{100} \right)^4 \right]}{(t_s - t_c)},$$

где $\varphi = \frac{f}{f + 2h}$ – коэффициент взаимооблученности ребер охлаждения.

13. Рассчитываем суммарный коэффициент теплоотдачи конвекцией и лучеиспусканием с каждой поверхности

$$\alpha_i = \alpha_{ki} + \alpha_{ли}$$

14. Определяем тепловую мощность, отдаваемую с каждой поверхности:

$$P_1 = \alpha_1 \cdot S_1(t_s - t_{ic});$$

$$P_2 = \alpha_2 \cdot S_2(t_s - t_{ic});$$

$$P_3 = \alpha_3 \cdot S_3(t_s - t_c);$$

$$P_4 = \alpha_4 \cdot S_4(t_s - t_c).$$

15. Находим полную тепловую мощность, отдаваемую с поверхности охладителя:

$$P = \sum_{i=1}^5 P_i.$$

16. Задаемся следующими значениями температуры нагрева охладителя над температурой окружающей среды Δt_s и повторяем расчет (п. 3–15).

17. Строим тепловую характеристику охладителя

$$P = f(\Delta t_s).$$

Задача 4.2

Рассчитать и построить тепловую характеристику охладителя с прямыми ребрами на плоской поверхности (рис. 4.1) для принудительного воздушного охлаждения. Исходные данные для расчета приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Исходные данные

№ варианта	a , мм	b , мм	c , мм	h , мм	f , мм	Температура охлаждающей среды	Скорость воздуха, м/с
1	20	50	15	15	2,5	40	1
2	30	60	20	25	3	35	2
3	40	70	25	33	4	30	3
4	50	80	30	43	5	25	4
5	60	90	35	50	6	20	5
6	70	100	40	60	7	25	6
7	80	110	45	70	8	30	7
8	90	120	50	75	9	35	8
9	25	55	20	20	2,5	40	9
10	35	65	25	30	3,5	35	10
11	45	75	30	38	4	30	11
12	55	85	35	48	5	25	12
13	65	95	40	55	6	20	1
14	75	105	45	65	6,5	25	2
15	85	115	50	70	7	30	3
16	20	55	20	30	2	35	4
17	30	65	30	40	4	40	5
18	40	75	40	50	6	20	6
19	50	85	50	60	8	25	7
20	60	95	60	70	10	30	8
21	70	105	70	80	12	35	9
22	80	115	80	90	14	40	10
23	90	125	90	100	16	20	11
24	35	70	30	25	4,5	25	12
25	55	90	45	53	7	30	3

Решение

1. Разбиваем всю поверхность охладителя на поверхности с одинаковыми условиями охлаждения с окружающей средой и рассчитываем их площади.

1.1. Поверхность S_1 с характерным геометрическим размером a , вдоль которого движется охлаждаемая среда со скоростью v ,

$$S_1 = 2ba + ca + 2\delta a.$$

1.2. Поверхность S_2 с каналом, имеющим геометрические размеры f и h , в котором протекает воздух со скоростью v ,

$$S_2 = (2h + f)a.$$

1.3. Поверхность S_3 , которую поперек обтекает воздух со скоростью v ,

$$S_3 = 2(bc - hf).$$

2. Задаемся превышением температуры нагрева охладителя над температурой окружающей среды (шагом расчета)

$$\Delta t_s = 10 \text{ }^\circ\text{C}.$$

3. Рассчитываем температуру нагрева поверхности охладителя

$$t_s = t_c + \Delta t_s.$$

4. Определяем коэффициент теплоотдачи с поверхности S_1

$$\alpha_1 = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{a}.$$

Для выбора критериального уравнения по расчету критерия Нуссельта определяем критерий Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{Va}{\nu},$$

где λ и ν – соответственно коэффициент теплопроводности и кинетическая вязкость воздуха, выбираемые по табл. П2 при температуре t_c .

Если рассчитанный критерий Рейнольдса $\text{Re} < 10^5$, то режим течения воздуха ламинарный и выбираем критериальное уравнение (3.1). Если $\text{Re} > 10^5$, то режим течения турбулентный и используется уравнение (3.2).

5. Вычисляем коэффициент теплоотдачи с поверхности S_2

$$\alpha_2 = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{d_r},$$

где $d_r = \frac{2hf}{(h+f)}$ – гидравлический диаметр канала, образованного ребрами охладителя.

Определяем критерий Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{Vd_r}{\nu},$$

Если $\text{Re} < 2100$, то режим течения воздуха ламинарный. Выбираем критериальное уравнение (3.5).

Если $\text{Re} > 10000$, то режим течения воздуха турбулентный. Используем уравнение (3.6).

Если $2100 < \text{Re} < 10000$, то режим течения воздуха переходный. Рассчитываем критерий Нуссельта по уравнению (3.7).

6. Вычисляем коэффициент теплоотдачи с поверхности S_3

$$\alpha_3 = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{D_r}.$$

Для расчета критерия Нуссельта используем критериальное уравнение (3.8). За характерный геометрический размер для поперечно обтекаемой поверхности принимается эквивалентный диаметр

$$D_r = \frac{2bc}{b+c}.$$

7. Определяем тепловую мощность, отдаваемую с каждой поверхности,

$$P_1 = \alpha_1(t_s - t_c)S_1;$$

$$P_2 = \alpha_2(t_s - t_c)S_2;$$

$$P_3 = \alpha_3(t_s - t_c)S_3.$$

8. Находим полную мощность, отдаваемую с поверхности охладителя,

$$P = \sum_{i=1}^3 P_i.$$

9. Задаемся следующим значением превышения температуры нагрева поверхности охладителя над температурой окружающей среды Δt_s и повторяем расчеты (п. 3–8).

10. Строим тепловую характеристику охладителя $P = f(\Delta t_s)$.

5. Расчет теплоотдачи полупроводниковых приборов на охладителях при принудительном жидкостном охлаждении

Наряду с воздушным охлаждением широкое применение в силовых полупроводниковых преобразователях нашли системы жидкостного охлаждения. Теплоемкость и теплопроводность жидких теплоносителей гораздо выше, чем газообразных, поэтому системы жидкостного охлаждения более эффективны, чем системы воздушного охлаждения. Недостатком систем жидкостного охлаждения по сравнению с системами воздушного охлаждения является большая сложность их конструктивного исполнения и меньшая надежность.

Технико-экономические исследования ряда жидких теплоносителей, таких как вода, трансформаторное масло, глицерин, этиловый спирт, различные сложные композиционные жидкости, показали, что тепловая мощность, переносимая в равных условиях различными жидкостями, максимальна у воды. Поэтому вода получила особенно широкое распространение в качестве охлаждающей жидкости. Наряду с водой в ряде случаев применяется трансформаторное масло. Обе охлаждающие жидкости в силу своих специфических физических свойств имеют свои сферы применения.

Задача 5.1

Определить максимальную тепловую мощность, которая может отвестись от тиристора Т25, установленного на жидкостном охладителе с геометрическими размерами, указанными на рис. 5.1. Охлаждающая жидкость – вода, движущаяся в трубе со скоростью $V = 2$ м/с. Температура воды $t_c = 40$ °С, изоляционная пленка между трубой и охладителем – лавсан толщиной $\Delta = 1$ мм и коэффициентом теплопроводности $\lambda_{из} = 0,88$ Вт/м·град. Охладитель выполнен из алюминия, труба из стали.

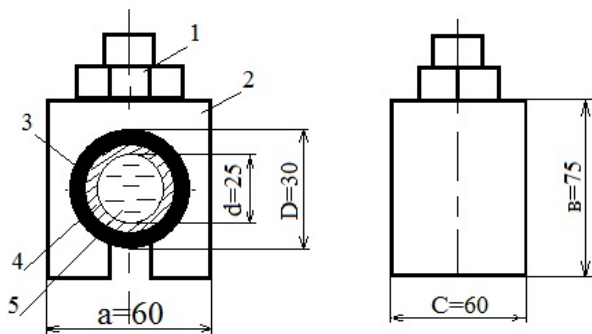


Рис. 5.1. Полупроводниковый прибор на жидкостном охладителе: 1 – полупроводниковый прибор; 2 – охладитель; 3 – изоляционная пленка; 4 – труба; 5 – вода

Решение

1. Составляем тепловую схему замещения прибора на охладителе, пренебрегая теплоотдачей от корпуса прибора и гибкого вывода (рис. 5.2).

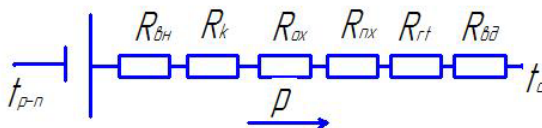


Рис. 5.2. Тепловая схема замещения прибора на жидкостном охладителе: $R_{вн}$ – внутреннее тепловое сопротивление теплопроводности прибора; $R_к$ – сопротивление контакта между корпусом прибора и охладителем; $R_{ох}$ – сопротивление теплопроводности охладителя; $R_{тх}$ – сопротивление теплопроводности трубы; $R_{рт}$ – сопротивление теплоотдачи от трубы в воду; t_{p-n} – температура нагрева $p-n$ перехода прибора; t_c – температура воды; P – тепловая мощность, отводимая от полупроводникового прибора в воду

2. Выбираем необходимые для расчета параметры тиристора T25 из справочника [6]:

- внутреннее тепловое сопротивление прибора (тепловое сопротивление $p-n$ переход – корпус) $R_{вн} = 0,9 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$;
- максимально допустимая температура нагрева $p-n$ перехода $t_{p-n} = 125 \text{ } ^\circ\text{C}$.

3. Определяем тепловое сопротивление контакта между корпусом прибора с охладителем [3]

$$R_k = \frac{S_k}{\lambda_b S_k} = \frac{10^{-5}}{3,2 \cdot 10^{-2} \cdot 1,28 \cdot 10^{-3}} = 0,244 \frac{\text{град}}{\text{Вт}},$$

где $S_k = 10^{-5}$ – двойная высота микронеровностей места контакта тиристора и охладителя; λ_b – коэффициент теплопроводности воздуха (табл. П2); S_k – поверхность контакта тиристора с охладителем (из геометрических размеров тиристора Т25).

4. Рассчитываем тепловое сопротивление теплопроводности пленки [2]

$$R_{пк} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_{из} \cdot C} \ln \frac{D+2\Delta}{D} = \frac{1}{2\pi \cdot 0,88 \cdot 0,06} \ln \frac{30+2}{32} = 0,195 \frac{\text{град}}{\text{Вт}}.$$

5. Находим тепловое сопротивление теплопроводности трубы

$$R_{тр} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_{мп} \cdot C} \ln \frac{D}{d} = \frac{1}{2\pi \cdot 40 \cdot 0,06} \ln \frac{30}{25} = 0,012 \frac{\text{град}}{\text{Вт}},$$

где $\lambda_{мп} = 40 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$ – коэффициент теплопроводности материала трубы (табл. П1).

6. Рассчитываем тепловое сопротивление теплопроводности охладителя

$$R_{ок} = \frac{\delta_{ок}}{\lambda_{ок} S_{ок}} = \frac{3,75 \cdot 10^2}{210 \cdot 3,6 \cdot 10^{-3}} = 0,05 \frac{\text{град}}{\text{Вт}},$$

где $\delta_{ок} = \frac{75}{2} = 37,5$ мм – средняя длина пути теплового потока по охладителю; $S_{ок} = a \cdot c = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ – площадь поверхности, через которую проходит тепловой поток по охладителю; $\lambda_{ок} = 210 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$ – коэффициент теплопроводности материала охладителя (табл. П1).

7. Определяем сопротивление теплоотдачи от трубы в воду.

$$R_{вд} = \frac{1}{\alpha_{вд} \cdot S_{вд}} = \frac{1}{14680 \cdot 4,7 \cdot 10^{-3}} = 0,014 \frac{\text{град}}{\text{Вт}},$$

где $S_{вд} = \pi \cdot d \cdot c = 4,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ – поверхность теплоотдачи от трубы к воде; $\alpha_{вд}$ – коэффициент теплоотдачи от трубы к воде

$$\alpha_{вд} = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_{вд}}{d} = \frac{578 \cdot 0,635}{0,025} = 14680 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}},$$

где $\lambda_{вд}$ – коэффициент теплопроводности воды (табл. П4).

Для выбора критериального уравнения по расчету критерия Нуссельта рассчитаем критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu_{\text{вд}}} = \frac{2 \cdot 0,025}{0,659 \cdot 10^{-6}} = 75872,$$

где $\nu_{\text{вд}}$ – кинематическая вязкость воды (табл. П4).

Так как режим течения воды в трубе будет турбулентным ($Re > 10000$), то для расчета выбираем критериальное уравнение (3.6)

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0,25} \quad \epsilon e = 578.$$

8. Находим общее тепловое сопротивление.

$$R = R_{\text{вн}} + R_{\text{к}} + R_{\text{ок}} + R_{\text{л}} + R_{\text{тр}} + R_{\text{вд}} = 1,415 \frac{\text{град}}{\text{Вт}}.$$

9. Определяем максимальную тепловую мощность.

$$P = \frac{t_{p-n} - t_c}{R} = \frac{125 - 40}{1,415} = 60 \text{ Вт}.$$

Ответ: 60 Вт.

Задача 5.2

Определить максимальную тепловую мощность, которая может отвестись от полупроводникового прибора жидкостным охладителем.

Общие исходные данные: максимальная температура $p-n$ перехода 100 град.; внутреннее тепловое сопротивление прибора 0,5 град/Вт; геометрические размеры охладителя, мм; вид охлаждающей среды и ее температура; материал охладителя; материал трубы; коэффициент теплопроводности изоляции, Вт/м · град; скорость движения охлаждающей среды, м/с.

Таблица 5.1

Исходные данные

№ варианта	a	b	c	d	D	Δ	Вид охлаждающей среды	Температура охлаждения среды	Материал охладителя	Материал труб	$\lambda_{\text{из}}$	Скорость охлаждения среды
1	40	45	50	6	10	0,5	Вода	40	Сталь	Алюминий	1	1
2	50	55	60	11	15	0,8	Трансформаторное масло	35	Алюминий	Сталь	0,9	2

№ варианта	a	b	c	d	D	Δ	Вид охлаждения среды	Температура охлаждения среды	Материал охладителя	Материал труб	$\lambda_{из}$	Скорость охлаждения среды
3	60	65	70	16	20	1	Вода	30	Медь	Алюминий	0,8	3
4	70	75	80	20	25	1,2	Трансформаторное масло	25	Сталь	Сталь	0,7	4
5	80	85	90	25	30	1,5	Трансформаторное масло	20	Алюминий	Алюминий	0,6	5
6	90	95	100	30	35	0,5	Вода	40	Медь	Сталь	0,5	1
7	100	105	110	34	40	0,8	Трансформаторное масло	35	Сталь	Алюминий	0,4	2
8	45	40	45	7	10	1	Вода	30	Алюминий	Сталь	0,3	3
9	55	50	55	12	15	1,2	Вода	25	Медь	Алюминий	0,2	4
10	65	60	65	17	20	1,5	Трансформаторное масло	20	Сталь	Сталь	0,3	5
11	75	70	75	21	25	0,5	Вода	40	Алюминий	Алюминий	0,4	1
12	85	80	85	36	30	0,8	Трансформаторное масло	35	Медь	Сталь	0,5	2
13	95	90	95	31	35	1	Вода	30	Сталь	Алюминий	0,6	3
14	105	100	105	40	45	1,2	Трансформаторное масло	25	Алюминий	Сталь	0,7	4
15	110	110	110	45	50	1,4	Вода	20	Медь	Алюминий	0,8	5
16	40	40	40	10	14	0,5	Трансформаторное масло	25	Сталь	Сталь	0,9	4
17	50	50	50	15	21	0,6	Вода	30	Алюминий	Алюминий	1	3
18	60	60	60	26	32	0,7	Трансформаторное масло	35	Медь	Сталь	0,4	2
19	70	70	70	35	42	0,8	Вода	40	Сталь	Алюминий	0,5	1

№ варианта	a	b	c	d	D	Δ	Вид охлаждения среды	Температура охлаждения среды	Материал охладителя	Материал труб	$\lambda_{из}$	Скорость охлаждения среды
20	80	80	80	38	44	0,9	Трансформаторное масло	35	Алюминий	Сталь	0,6	2
21	90	90	90	40	46	1	Вода	30	Медь	Алюминий	0,7	3
22	100	100	100	44	50	1.1	Трансформаторное масло	25	Сталь	Сталь	0,8	4
23	55	55	55	24	31	0,6	Вода	20	Медь	Сталь	1	2
24	65	65	65	28	36	0,8	Трансформаторное масло	15	Алюминий	Сталь	0,9	5
25	75	75	75	31	38	1	Вода	30	Медь	Алюминий	0,7	1

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Григорьян, С.Г. Конструирование электронных устройств систем автоматизации и вычислительной техники / С.Г. Григорьян. – Ростов н/Д : Феникс, 2007. – 303 с.
2. Конструирование силовых полупроводниковых преобразовательных агрегатов / С.Р. Резинский [и др.]. – М. : Энергия, 1973. – 288 с.
3. Медведев, В.А. Конструирование преобразователей : электрон. учеб. пособие / В.А. Медведев. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2015. – 164 с.
4. Проектирование источников электропитания электронной аппаратуры : учеб. пособие для вузов / О.К. Березин [и др.] ; под ред. В.А. Шахнова. – М. : КноРус, 2010. – 532 с.
5. Славик, И. Конструирование силовых полупроводниковых преобразователей / И. Славик. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 222 с.
6. Замятин, В.Я. Мощные полупроводниковые приборы : справочник / В.Я. Замятин, В.В. Кондратьев. – М. : Радио и связь, 1987. – 524 с.

Физические постоянные проводниковых материалов

Материал	Плотность γ , кг/м ³	Удельное электрическое сопротивление при 0 °С ρ_0 , 10 ⁻⁸ Ом·м	Температурный коэффициент сопротивления α , 10 ⁻³ 1/град	Теплопроводность λ , Вт/м·град
Алюминий	2700	2,62	4,2	210
Медь	8700...8900	1,62	4,3	390
Сталь	7800	10...13	9,0	40
Серебро	10500	1,5	4,0	420
Латунь	8500	7,2	1,5	100

Таблица П2

Физические свойства сухого воздуха

Температура t_c , °С	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/м·град	Кинематическая вязкость ν , 10 ⁻⁶ м ² /с	Критерий Прандтля Pr
10	2,51	14,16	0,705
20	2,59	15,06	0,703
30	2,67	16,01	0,701
40	2,76	16,96	0,699
50	2,83	17,96	0,697
60	2,90	18,97	0,696
70	2,97	20,03	0,694
80	3,05	21,09	0,692
90	3,13	22,11	0,690
100	3,21	23,14	0,688

Таблица ПЗ

Физические свойства трансформаторного масла

Температура $t_c, ^\circ\text{C}$	Коэффициент теплопроводности $\lambda, \text{Вт/м} \cdot \text{град}$	Кинематическая вязкость $\nu, 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	Коэффициент объемного расширения $\beta, 10^{-4} 1/\text{град}$	Критерий Прандтля Pr
10	0,1115	37,6	6,85	484
20	0,1106	22,5	6,90	298
30	0,1098	14,7	6,95	202
40	0,1090	10,3	7,00	146
50	0,1082	7,58	7,05	111
60	0,1072	5,78	7,10	87,8
70	0,1064	4,54	7,15	71,3
80	0,1056	3,66	7,20	59,3
90	0,1047	3,03	7,25	50,5
100	0,1038	2,5	7,30	43,9

Таблица П4

Физические свойства воды

Температура $t_c, ^\circ\text{C}$	Коэффициент теплопроводности $\lambda, \text{Вт/м} \cdot \text{град}$	Кинематическая вязкость $\nu, 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	Коэффициент объемного расширения $\beta, 10^{-4} 1/\text{град}$	Критерий Прандтля Pr
10	0,574	1,306	0,7	9,52
20	0,599	1,006	1,82	7,02
30	0,618	0,805	3,21	5,42
40	0,635	0,659	3,87	4,31
50	0,648	0,556	4,49	3,54
60	0,659	0,478	5,11	2,98
70	0,668	0,415	5,7	2,55
80	0,674	0,365	6,32	2,21
90	0,680	0,326	6,95	1,95
100	0,683	0,295	7,52	1,75

Таблица П5

Классы нагревостойкости изоляции

Класс нагревостойкости изоляции	У	А	Е	В	F	Н	С
Максимально допустимая температура, °С	90	105	120	130	155	180	≥180

Таблица П6

Степень черноты различных материалов

Материал	Степень черноты ϵ
Алюминий	0,055
Вольфрам	0,053...0,31
Железо литое	0,87...0,96
Медь окисленная	0,6
Олово	0,043...0,064
Сталь вальцованная	0,65
Сталь листовая, оцинкованная	0,276