

Министерство образования Российской Федерации

Московский государственный технический университет

им. Н.Э. Баумана

В.П. Усачев, В.П. Григорьев, В.Г. Костиков

**Экспериментальное определение закона
теплообмена и коэффициента теплоотдачи**

Лабораторная работа № 4

Учебное пособие по курсу “Конструирование ЭВС и РЭС”

Под редакцией Е.М. Парфенова

Москва 2008 г.

Данное учебное пособие издается в соответствии с учебным планом.
Учебное пособие рассмотрено и одобрено решением кафедры ИУ-4 от
15.10.97 , методической комиссией факультета ИУ МГТУ им. Н.Э. Баумана

Рецензент: доктор технических наук, профессор кафедры ИУ-6 В.А. Ов-
чинников.

Оглавление

. Введение	3
. Цель работы	3
Объект исследования	3
Используемые приборы и оборудование	3
Содержание работы	3
Порядок выполнения работы	4
Содержание отчета	5
Приложение 1	6
Приложение 2	8
Литература	13
. Контрольные вопросы	13

Введение

В процессе работы радиоэлектронной аппаратуры часть потребляемой электрической энергии превращается в тепловую, вызывая нагрев компонентов. Повышение температуры компонентов может привести к снижению надежности их работы вплоть до выхода из строя. Задачей разработчика РЭА является обеспечение заданного температурного режима путем отвода рассеиваемой мощности. Решение этой задачи может быть достигнуто несколькими способами, одним из которых является интенсификация отвода теплоты, т.е. увеличение коэффициента теплообмена

$$\alpha \text{ (Вт /м}^2 \text{ град)}$$

Этот коэффициент входит в основные уравнения теплообмена, поэтому определение его имеет важное значение при проведении инженерных расчетов и анализе конструкций. В настоящем учебном пособии приведена методика определения коэффициента α при помощи расчетных соотношений и экспериментальным путем.

Цель работы.

1. Ознакомление с основными понятиями и методами расчета теплообмена компонентов РЭС (необходимые теоретические сведения приведены в Приложении 2).
2. Определение расчетным путем зависимости α_k от температуры и скорости потока воздуха.
3. Экспериментальное определение коэффициентов теплообмена компонентов РЭС.
4. Сравнение экспериментальных и расчетных значений коэффициентов теплоотеплообмена.

Объект исследования.

Резисторы типов ПЭВ, ВС, МЛТ.

Используемые приборы и оборудование.

1. Источник электропитания типа ТЕС 13 1шт.
2. Лабораторный макет 1шт.
3. Микроамперметр..... 1шт.
4. Вентилятор..... 1шт.

Содержание работы.

1. Расчет коэффициента теплообмена при естественном и вынужденном движении воздуха.
2. Измерение параметров резисторов при естественном и вынужденном движении воздуха.
3. Определение коэффициента теплообмена по результатам измерений.
4. Выводы о зависимости коэффициента теплообмена от температуры нагреваемого тела и об эффективности принудительного охлаждения.

Порядок выполнения работы.

1. Расчетное задание.

1.1 Определить критерии Грасгофа и Прандтля для неограниченного цилиндра с диаметром d и температурой (30, 40, 50, 60, 70, 80 °C) при температуре среды $t_c = 20^\circ\text{C}$ (значение d задает преподаватель).

$$Gr = \beta g [d^3 (t - t_c) / \nu^2] , \quad Pr = \nu / a$$

где β - коэффициент объемного расширения газа,
 ν - коэффициент кинематической вязкости газа,
 a - коэффициент температуропроводности газа.

Значения ν и P_r взять из табл. П1.1 Приложения 1 для среднеарифметической температуры $t_m = 0.5 \cdot (t + t_c)$.

1.2 Вычислить произведения критериев Gr , P_r и по табл. П1.2 Приложения 1 определить коэффициенты c и n .

1.3 Рассчитать критерий Нуссельта по формуле

$$Nu = c \cdot (Gr \cdot Pr)_m^n ,$$

где m - индекс, указывающий на необходимость выбора параметров λ , a , ν для среднеарифметической температуры t_m .

1.4 По критерию Нуссельта рассчитать значения коэффициента теплообмена по формуле $\alpha_k = Nu (\lambda / d)$.

Результаты свести в таблицу.

№	t	Gr	Pr	Nu	α_k

Построить графическую зависимость 1.5 α_k от t.

Рассчитать критерий по формуле $Re_f = \frac{V \cdot l}{\nu_f}$

где число f относится к параметру при температуре газа (воздуха , при нормальных условиях, при $t_c = 20^\circ\text{C}$),

l -длина поверхности по направлению потока воздуха,

V - скорость потока воздуха.

ν_f -коэффициент кинематической вязкости газа (при $t = 20^\circ\text{C}$)

Исходные данные для расчета выдает преподаватель.

По значению Re_f определить режим движения газа.

1.6 Вычислить критерий Нуссельта (в зависимости от режима движения газа):

$$Nu_c = 0.57 \sqrt{Re_c} \text{ - для ламинарного режима } (Re_f < 4 \cdot 10^4),$$

$$Nu_f = 0.032 \cdot Re_f^{0.8} \text{ - для турбулентного режима } Re_f > 4 \cdot 10^4.$$

1.7 Рассчитать коэффициент теплоотдачи по формуле $\alpha_k = Nu_f \cdot (\lambda_f / l)$.

Результаты свести в таблицу.

№	V	Re _f	режим	Nu _f	α_k

Построить графическую зависимость α_k от V.

2. Лабораторное задание.

В работе исследуются коэффициенты теплообмена резисторов типов ВС, МЛТ, ПЭВ и других при свободном теплообмене и вынужденном движении воздуха.

Образцы прогреваются электрическим током от регулируемого источника электропитания типа ТЕС 13 (рис.П 1.1 Приложения 1).

Температура резисторов измеряется термопарой (железо-константан). График зависимости тока термопары от температуры представлен на рис. П 1.1 Приложения 1.

Для обдува образцов воздухом используется вентилятор. Зависимость скорости движения воздуха от расстояния между вентилятором и макетом представлена на рис.П 1.3 Приложения 1.

2.1. Получить образцы и произвести замеры, необходимые для расчетов, и рассчитать значения напряжений, при которых на образцах рассеивается номинальная мощность.

2.2. Познакомиться с работой приборов. Собрать схему.

ВНИМАНИЕ !!!

Перед подключением источника тока к схеме регулятор напряжения установить в левое крайнее положение.

2.3. После проверки преподавателем подключить источник тока, установить расчетное напряжение.

2.4. Произвести замеры тока в цепи, определить температуру, снять зависимость тока и температуры образца от напряжения (5-7 точек). Время установления режима 3-5 минут.

2.5. Рассчитать излучаемую мощность и коэффициенты теплообмена для каждого измерения. Данные свести в таблицу.

Номер измерения	U, В	I, А	P, Вт	R, Ом	t, °C	t-t _c , °C	α ($\frac{Вт}{м^2 \cdot град}$)

2.5. Включить вентилятор, установить необходимую скорость потока воздуха и повторить измерения. Данные свести в таблицу.

Содержание отчета.

В отчете указать цель работы, объяснить методику расчетов, привести исходные данные, расчетные формулы, таблицы расчетов, таблицы измерений, расчетные и экспериментальные графики. Дать выводы по результатам эксперимента.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица П 1.1

Физические параметры сухого воздуха при Н=750 мм рт. ст.

$t, ^\circ\text{C}$	$\gamma, \text{ кг / м}^2$	$C_p, \text{ Дж/кг гр}$	$\lambda, [10^2, \text{ Вт / м}\cdot\text{град}]$	$\nu, \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{сек}$	Pr
-50	1.584	1010	2.04	9.23	0.728
-20	1.395	1010	2.23	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	27.5	16.86	0.699
50	1.093	1000	2.83	17.95	0.693
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	3.31	23.13	0.682
120	0.898	1000	3.34	25.45	0.685

Pr	Критерий Прантля
ν	Коэффициент кинематической вязкости газа
ν_f	Коэффициент кинематической вязкости газа (при $t=20^\circ\text{C}$)
a	Коэффициент температуропроводности газа
Gr	Критерий Грасгофа
β	Коэффициент объемного расширения газа
Nu	Критерий Нусельта
λ	Коэффициент теплопроводности газа (жидкости)
C_p	Удельная температуропроводность газа (или жидкости) при постоянном давлении

Зависимость s и n в формуле (4) произведения критериев Грасгофа и Прандтля.

Таблица П 1.2.

$(G_r \cdot P_r)_m$	s	n ..
$1 \cdot 10^{-3}$	0.50	0
$1 \cdot 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^2$	1.18	1/8
$5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^7$	0.54	1 / 4
$2 \cdot 10^7 \dots 1 \cdot 10^{13}$	0.135	1/3

Зависимость скорости движения воздуха от расстояния до вентилятора

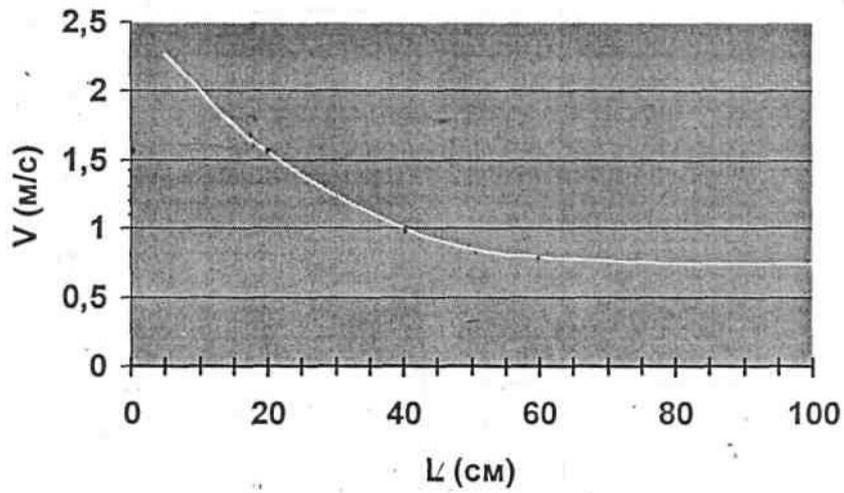


Рис.П 1.3.

Зависимость тока термопары от температуры.

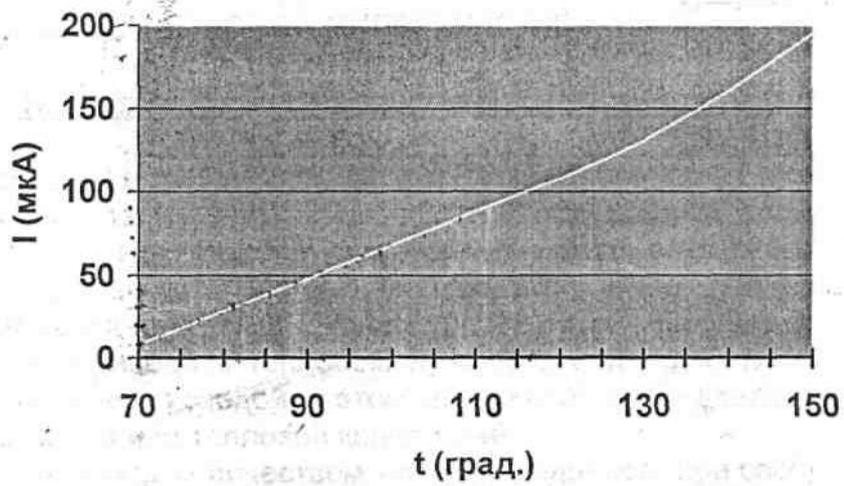


Рис П 1.2.

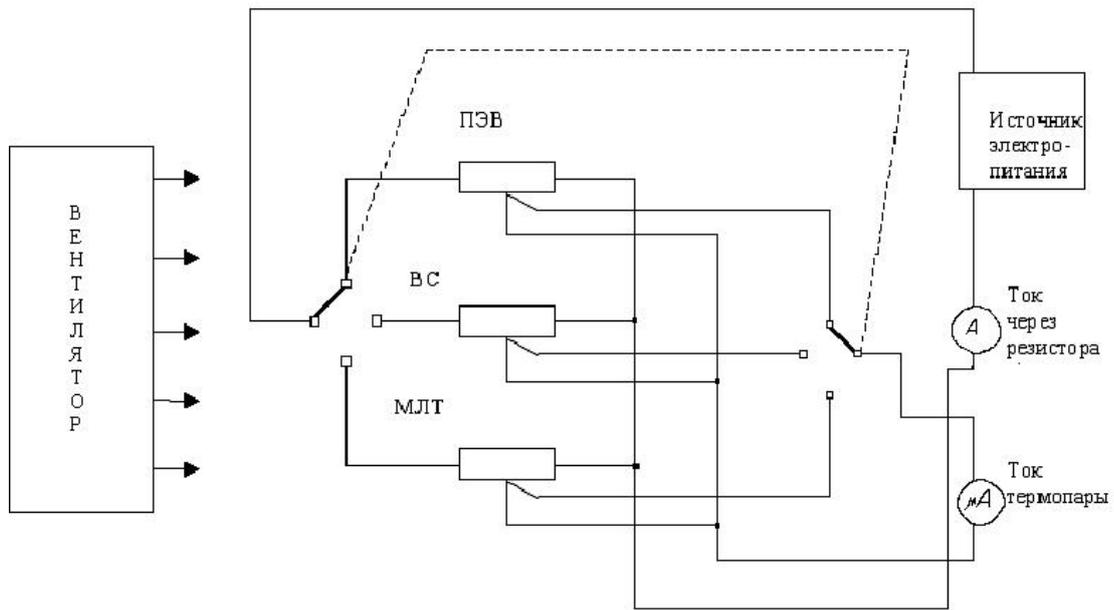


Рис.П 1. 1 .Схема установки

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ПЕРЕНОС ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ КОНВЕКЦИЕЙ.

1. Теплоотдача при свободном движении жидкости (или газа, в данном случае - воздуха)

Свободные движения жидкости (или газа, в данном случае - воздуха) обусловлены разностью плотностей нагретых и холодных объемов. Под действием подъемной силы нагретые объемы жидкости (или газа, в данном случае - воздуха) поднимаются вверх, а на их место поступают холодные объемы. В результате возникает сложное движение, в котором сталкиваются восходящие и нисходящие потоки. Перемещение элементов среды приводит к теплообмену как в самой жидкости (или газа, в данном случае - воздуха), так и между твердым телом и средой. В этом случае свободное движение называют естественной или тепловой конвекцией.

Связь между количеством тепла, переданного при свободном движении жидкости (или газа, в данном случае - воздуха), и условиями теплообмена устанавливается формулой Ньютона:

$$P = \alpha_k \cdot (t - t_c) \cdot S,$$

где

P - количество тепла , переносимого в единицу времени (мощность) от твердого тела к жидкости или жидкости к твердому телу , Вт;

α_k - коэффициент теплоотдачи конвекцией, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{град}}$

t -температура поверхности твердого тела, $^{\circ}\text{C}$;

t_c - температура среды, $^{\circ}\text{C}$; ($t_c=20^{\circ}\text{C}$)

S - площадь поверхности теплообмена, m^2 .

Коэффициент теплообмена конвекцией численно характеризует энергию, которую рассеивает или воспринимает единица поверхности твердого тела путем конвекции при разности температур между твердым телом и средой 1 град. Коэффициент теплообмена представляет собой сложную функцию большого числа параметров, существенно влияющих на процесс теплообмена. Так, для естественной конвекции

$$\alpha_k = \alpha(t, t_c, \beta, \lambda, c_p, \nu, a, g, \Phi),$$

где β - коэффициент объемного расширения жидкости или газа, $град^{-1}$;

λ - коэффициент теплопроводности жидкости или газа, $Вт / м \cdot град$

c_p - удельная теплоемкость жидкости или газа при постоянном давлении, $Дж \cdot кг^{-1} \cdot град^{-1}$;

ν - коэффициент кинематической вязкости жидкости или газа, $м^2 / сек$

g - ускорение свободного падения, $м / сек^2$

a - коэффициент температуропроводности жидкости или газа, $м^2 / сек$;

Φ - совокупность параметров, характеризующих форму, строение поверхности и ее размеры.

Для газа
$$\beta = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{(t_c + 273)}$$

Решающее влияние на процесс естественной конвекции имеют физические свойства среды и температурный режим, определяемый разностью температур $t - t_c$ между телом и средой. Конфигурация тела по сравнению с температурой имеет меньшее влияние, что в некоторых случаях позволяет представить коэффициент теплообмена в единообразной форме для тел различной конфигурации.

Критериальные уравнения. Из теории подобия следует, что сложные процессы характеризуются не отдельными физическими величинами, а определенным образом составленными из них безразмерными комплексами или критериями.

Если на основе теории подобия объединить физические и геометрические параметры в безразмерные комплексы (критерии подобия), то процесс теплообмена в условиях естественной конвекции можно описать следующими тремя критериями:

критерием Нуссельта:
$$Nu = \frac{\alpha_k \cdot L}{\lambda},$$

критерием Грасгофа
$$Gr = \beta \cdot g \cdot \frac{d^3}{\nu^2} \cdot (t - t_c),$$

критерием Прандтля
$$Pr = \frac{\nu}{a}.$$

Здесь через L обозначен геометрический параметр, характерный для тела данной конфигурации (диаметр для труб или шаров, высота для вертикальной пластины и т.д.). Таким образом, зависимость (2) между многочисленными параметрами можно представить в виде критериальной зависимости, связывающей три критерия подобия:

$$Nu = F(Gr, Pr). \quad (3)$$

Обрабатывать результаты экспериментальных исследований в виде зависимости (3) гораздо проще, чем в виде (2), так как число взаимосвязанных параметров значительно сокращается. Но этим не ограничиваются преимущества зависимости (3) перед зависимостью (2): зависимости типа (3) носят более общий характер, чем зависимость типа (2), что видно из следующего примера.

Предположим, что экспериментально измерялся коэффициент теплообмена проволок в различных средах при различных значениях диаметров проволок и градиентах температуры. В результате исследований были получены серии зависимостей, связывающих коэффициент теплообмена с каким-либо параметром (диаметром, градиентом температуры, средой и т.д.). Все эти зависимости носят частный характер и справедливы только для тех условий, при которых проводились опыты. При обработке опытных данных в форме зависимости (3) этот недостаток устраняется.

Допустим, что установлен вид зависимости (3) и обработка опытных данных в критериальном виде показала, что произведение критериев Грасгофа и Прандтля меняется в диапазоне $100 \leq Gr \cdot Pr \leq 1000$. Полученную формулу можно применить к неограниченному числу иных (подобных) случая теплообмена проволоки, так как произведение определяющих критериев $Gr \cdot Pr$ в пределах от 100 до 1000 можно получить при самых различных сочетаниях параметров, входящих в эти критерии. Подобными считаются те явления, которые протекают в геометрически подобных системах и имеют численно одинаковые определяющие критерии. В рассматриваемом примере определяющим критерием является $(Gr \cdot Pr)$.

Таким образом, полученная в форме (3) эмпирическая зависимость справедлива для проволок различных диаметров (геометрическое подобие), если теплообмен проволок происходит в условиях естественной конвекции и произведение определяющих критериев $(Gr \cdot Pr)$ лежит в пределах от 100 до 1000.

Теплоотдача в неограниченном пространстве. Общая зависимость для коэффициента теплообмена тел с одним определяющим размером (вертикальные плиты, бесконечно длинные проволоки, трубы и шары) определяется выражением

$$Nu = c \cdot (Gr \cdot Pr)_m^n \quad (4)$$

где c и n - эмпирические коэффициенты;
индекс m указывает, что значение физических параметров газа или жидкости следует выбирать для среднеарифметической температуры

$$t_m = 0.5 \cdot (t + t_c) \quad (5)$$

Значения постоянных c и n приведены в табл.П 1.2. Приложения 1.

Формула (4) применима для любых капельных и газообразных сред и для любых конфигураций тела, которые можно характеризовать одним размером (неограниченные цилиндры, плоские поверхности, шары).

2. Теплоотдача при вынужденном движении жидкости.

Различают три режима движения жидкости : ламинарный, турбулентный и переходной. Последний занимает малую область и практически переход из ламинарного в турбулентное осуществляется в момент , когда скорость достигает критического значения.

Коэффициенты теплообмена при вынужденном движении жидкости получают на основе экспериментального исследования явления и представляются обычно в виде зависимости между критериями:

$$\text{Нуссельта } Nu = (\alpha / \lambda_f) l$$

$$\text{Рейнольдса } Re = V \cdot l / \nu_f$$

$$\text{Прандтля } Pr_f = \nu_f / a_f \quad \text{и} \quad Pr$$

где индексы f обозначают, что соответствующие параметры рассматриваются при температурах жидкости или газа (f) (воздуха, при нормальных условиях, при $t_c = 20^\circ\text{C}$).

индекс w обозначают , что соответствующие параметры рассматриваются при температурах стенки (w)

l - длина поверхности по направлению потока.

При ламинарном движении жидкости ($Re_f < 4 \cdot 10^4$), критериальное уравнение для теплоотдачи имеет вид

$$Nu_f = 0,66 \cdot Re_f^{0,5} \cdot Pr_f^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25} \quad (9)$$

За определяющую температуру здесь принята температура набегающего потока t_f ,

l за определяющий размер - теплоотдающая длина стенки l по направлению потока,

v - скорость потока на удалении от тела. Влияние физических свойств жидкости учитывается в формуле (9) параметром $Pr^{0,43}$, а влияние направления теплового потока (от жидкости к стенке или наоборот) и градиента температуры - параметром $(Pr_f / Pr_w)^{0,25}$

Для воздуха в широком интервале температур (0-1000°C) можно считать $Pr_f = Pr_w = 0,7$;

$Pr_f^{0,43} = 0,86$ и формулу (9) записать в виде :

$$Nu_u = 0,57 \sqrt{Re_f} \quad (10)$$

Зависимость (10) представлена ниже в форме, удобной для практических расчетов:

Re_f	$5 \cdot 10^3$	$10 \cdot 10^3$	$15 \cdot 10^3$	$20 \cdot 10^3$	$25 \cdot 10^3$	$30 \cdot 10^3$
Nu_f	41	56	68	81	90	100

При турбулентном движении жидкости $Re_f > 4 \cdot 10^4$ критериальное уравнение для средней теплоотдачи имеет вид:

$$Nu_f = 0.037 Re_f^{0.8} Pr_f^{0.43} \left(\frac{Pr_f}{Pr_\omega} \right)^{0.25} \quad (11)$$

Уравнение (11) для воздуха принимает более простой вид:

$$Nu_f = 0.032 Re_f^{0.8} \quad (12)$$

Определяющая температура и определяющий размер те же, что и в предыдущем случае. Зависимость (12) представлена ниже в форме, удобной для расчетов:

Re_f	$1.0 \cdot 10^5$	$1.5 \cdot 10^5$	$2.0 \cdot 10^5$	$3.0 \cdot 10^5$	$4.0 \cdot 10^5$	$5.0 \cdot 10^5$	$6.0 \cdot 10^5$	$7.0 \cdot 10^5$	$8.0 \cdot 10^5$	$9.0 \cdot 10^5$	$10.0 \cdot 10^5$
Nu_f	$3.2 \cdot 10^2$	$4.42 \cdot 10^2$	$5.7 \cdot 10^2$	$7.87 \cdot 10^2$	$9.66 \cdot 10^2$	$11.6 \cdot 10^2$	$13.4 \cdot 10^2$	$15.0 \cdot 10^2$	$17.2 \cdot 10^2$	$18.4 \cdot 10^2$	$20.0 \cdot 10^2$

При известном критерии Nu_f из формулы (6) определяется коэффициент теплообмена:

$$\alpha = Nu_f \frac{\lambda_f}{l}$$

Приведенные выше формулы могут быть использованы для оценочных расчетов коэффициента теплообмена цилиндрических поверхностей, омываемым продольным потоком жидкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дульнев Г.Н., Семяшкин Э.М. «Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах». 'Энергия', 1968.

Контрольные вопросы.

1. Объяснить процессы , происходящие при естественной конвекции. Причина возникновения движения жидкости.
2. Записать и объяснить закон Ньютона.
- '3. Написать и объяснить критериальное уравнение, критерии.
4. Как аналитически определить закон теплообмена. Какие существуют законы теплообмена?
5. Какая существует связь законов теплообмена с режимами движения жидкости?
6. Какой размер будет характерным для шара, цилиндра, вертикальной стенки, горизонтальной поверхности?
7. Отличие критериальных уравнений при свободном теплообмене и вынужденном движении жидкости?
8. Каковы необходимые исходные данные для расчета коэффициента теплообмена в воздушной среде при вынужденном движении? ,
9. Порядок расчета a_k .
10. Объяснить, методику определения коэффициента теплоотдачи в данной работе.
11. Как определяется температура образцов?
12. Как определяется скорость движения воздуха