

Государственный комитет по народному  
образованию СССР

Московский орденов Ленина, Октябрьской Революции  
и Трудового Красного Знамени государственный  
технический университет им. Н.Э.Баумана

Е.М.Парфенов, В.Г.Костиков, В.В.Буренин

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАКОНА  
ТЕПЛОЕМЕНА И КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ

Лабораторная работа

Учебное пособие по курсу "Конструирование РЭС"

Под редакцией Е.М.Парфенова

Москва 1991

Данное учебное пособие издается в соответствии  
с учебным планом.

Рассмотрено и одобрено решением кафедры ИУ-4 от 15.10.1990 г.  
методической комиссией факультета ИУ МГТУ им. Н.Э.Баумана

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

#### Оглавление

Цель работы .....	3
Объект исследований .....	3
Используемые приборы .....	3
Содержание работ .....	3
Порядок выполнения работы .....	3
Содержание отчета .....	9
Приложение 1 .....	10
Приложение 2 .....	12
Приложение 3 .....	15
Литература .....	27
Вопросы для проверки .....	28

Редактор *А. Саф*

Корректор *Таня*

---

Заказ 1364      Объем I, I п.л.      Тираж 300(50) экз.

---

Типография НИЭМИ

121471, Москва, ул. Вережская, д.41

## 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 теплоотдачи  $\alpha$  Вт/(м<sup>2</sup>.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  $\alpha$  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  $\alpha_k$  от температуры и скорости потока воздуха.

3. Экспериментальное определение коэффициентов теплоотдачи компонентов РЭС.

4. Сравнение экспериментальных и расчетных значений коэффициентов теплоотдачи.

## Объект исследований.

1 Резисторы типов ПЭВ, ВС, МЛТ.

### Используемые приборы и оборудование.

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

### Содержание работы.

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

### Порядок выполнения работы.

#### I. Расчетное задание.

I.1. Определить критерии Грасгофа и Прандтля для неограниченного цилиндра с диаметром  $d$  и температурой (30, 40, 50, 60, 70, 80 °C) при температуре среды  $t_c = 20$  °C (значение  $d$  задает преподаватель).

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

где  $\beta$  - коэффициент объемного расширения газа,

$$\beta = 1 / (t_c + 273),$$

$g$  - ускорение свободного падения,

$\nu$  - коэффициент кинематической вязкости газа,

$a$  - коэффициент температуропроводности газа.

Значения  $\nu$  и  $Pr$  взять из табл. III.1 Приложения I для

среднеарифметической температуры  $t_m = 0,5(t + t_c)$ .

I.2. Вычислить произведения критериев  $Gz, Pz$  и по табл. III.2 Приложения I определить коэффициенты  $c$  и  $n$ .

I.3. Рассчитать критерий Нуссельта по формуле

$$Nu = c (Gz \cdot Pz)_m^n,$$

где  $m$  - индекс, указывающий на необходимость выбора параметров  $\lambda, a, \nu$  для среднеарифметической температуры  $t_m$ .

I.4. По критерию Нуссельта рассчитать значения коэффициента теплообмена по формуле

$$\alpha_k = Nu \lambda / d.$$

Результаты свести в таблицу.

№	$t$	$Gz$	$Pz$	$Nu$	$\alpha_k$

Построить графическую зависимость  $\alpha_k$  от  $t$ .

I.5. Рассчитать критерий по формуле

$$Re_f = V\ell / \nu_f,$$

где число  $f$  относится к параметру при температуре газа,  $\ell$  - длина поверхности по направлению потока воздуха,  $V$  - скорость потока воздуха.

Исходные данные для расчета выдает преподаватель.

По значению  $Re_f$  определить режим движения газа.

I.6. Вычислить критерий Нуссельта (в зависимости от режима движения газа):

$$Nu_f = 0,57 \sqrt{Re_f} \quad - \text{ для ламинарного режима } (Re_f < 4 \cdot 10^4),$$

$$Nu_f = 0,032 Re_f^{0,8} \quad - \text{ для турбулентного режима } (Re_f \geq 4 \cdot 10^4).$$

I.7. Рассчитать коэффициент теплоотдачи по формуле

$$\alpha_k = Nu_f \lambda_f / \ell.$$

Результаты свести в таблицу.

№	V	$R_{ef}$	Режим	$N_{uf}$	$\alpha_k$

Построить графическую зависимость  $\alpha_k$  от V .

## 2. Лабораторное задание.

В работе исследуются коэффициенты теплоотдачи 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 Приложения I).

Температура резисторов измеряется термопарой (железо-константан). График зависимости тока термопары от температуры представлен на рис.П.2 Приложения I.

Для обдува образцов воздухом используется вентилятор. Зависимость скорости движения воздуха от расстояния между вентилятором и макетом представлена на рис.П.3 Приложения I.

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 теплоотдачи для каждого измерения. Данные свести в таблицу.

Номер измерения	U, В	I, А	P, Вт	R, Ом	t, °C	t-t <sub>c</sub> , °C	$\frac{d, \text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$

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.

Таблица П. I. I

Физические параметры сухого воздуха  
при  $H=750$  мм рт. ст.

$t, ^\circ\text{C}$	$\gamma, \text{кг/м}^3$	$C_p,$ дж/кг. гр.	$\lambda \cdot 10^2$ вт/м. град	$\nu \cdot 10^{-6}$ $\text{м}^2/\text{сек}$	$P_z$
- 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	2,75	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



Зависимость  $C$  и  $n$  в формуле (4)  
от произведения критериев Грасгофа и Прандтля

$(Gz \cdot Pr)_m$	$C$	$n$
$1 \cdot 10^{-3}$	0,50	0
$1 \cdot 10^{-3} + 5 \cdot 10^{-2}$	1,18	1/8
$5 \cdot 10^2 + 2 \cdot 10^7$	0,54	1/4
$2 \cdot 10^7 + 1 \cdot 10^{13}$	0,135	1/3

Приложение I

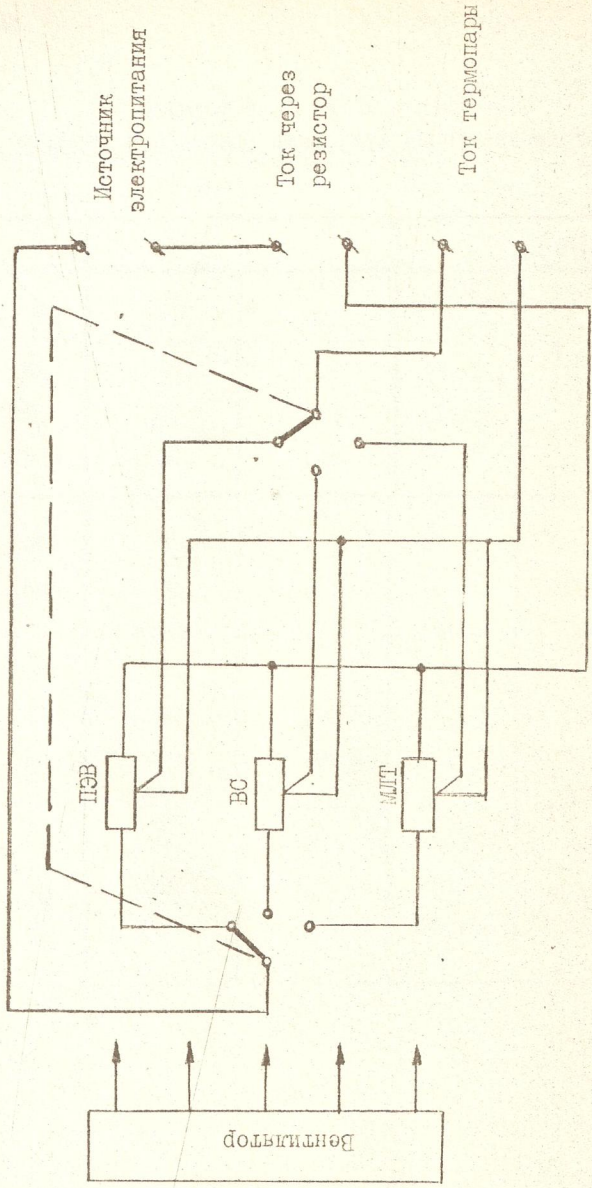


Рис. III.1. Схема установки

Приложение I

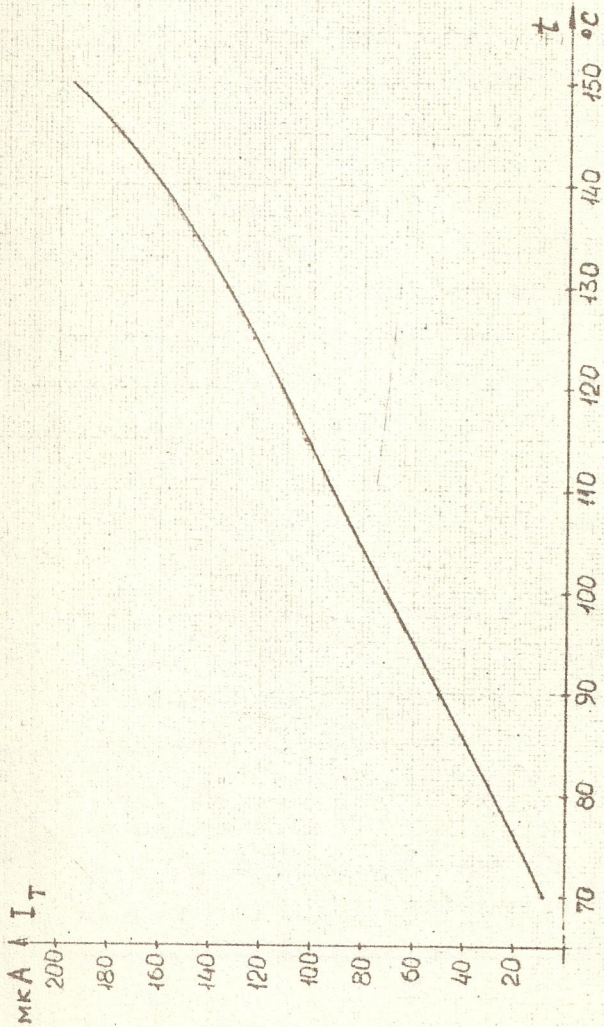


Рис. П. 2. Зависимость тока термонары от температуры

Приложение I

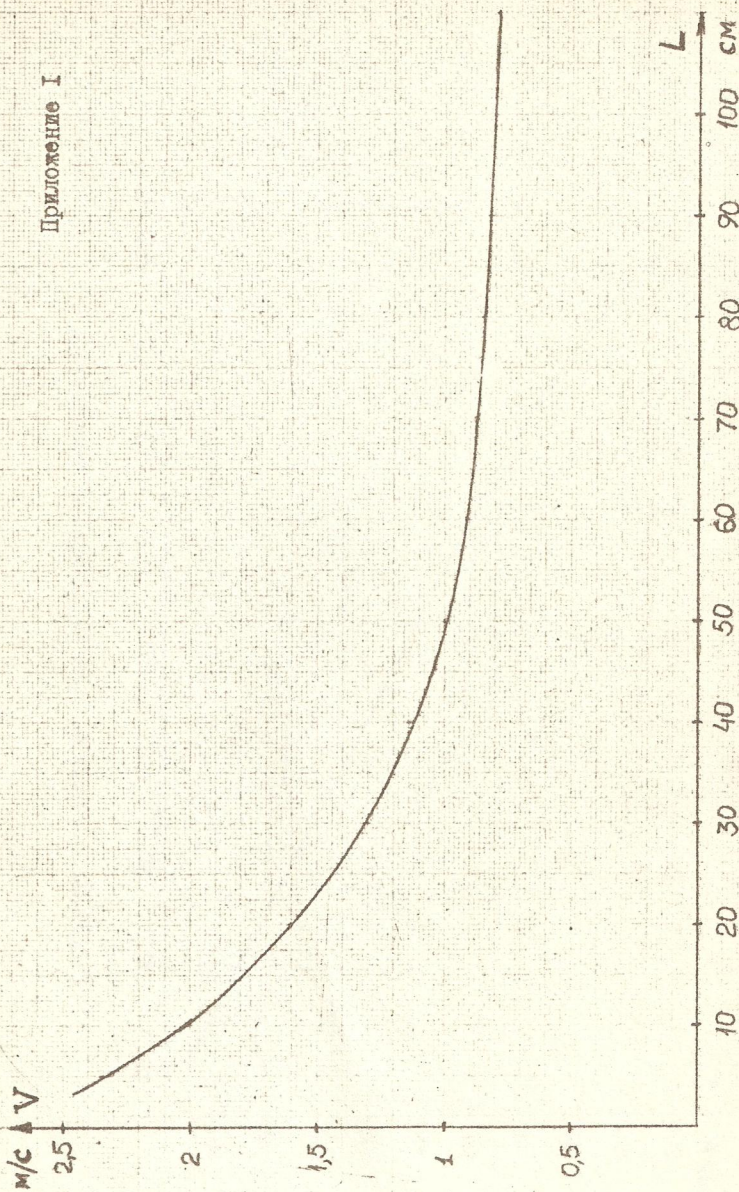


Рис. П.3. Зависимость скорости движения воздуха от расстояния до вентилятора

## ПЕРЕНОС ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ КОНВЕКЦИЕЙ

I. Теплоотдача при свободном движении жидкости

Свободные движения жидкости (газа) обусловлены разностью плотностей нагретых и холодных объемов. Под действием подъемной силы нагретые объемы жидкости 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, так и между твердым телом и средой. В этом случае свободное движение называется естественной или тепловой конвекцией.

Связь между количеством тепла, переданного при свободном движении жидкости, и условиями теплообмена устанавливается формулой Ньютона:

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

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

$\alpha_k$  — коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/м<sup>2</sup>.град;

$t$  — температура поверхности твердого тела, °С;

$t_c$  — температура среды, °С;

$S$  — площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией численно характеризует способность поверхности, которую рассеивает или воспринимает единица поверхнос-

ти твердого тела путем конвекции при разности температур между твердым телом и средой  $t - t_c$ . Коэффициент теплоотдачи представляет собой сложную функцию большого числа параметров, существенно влияющих на процесс теплообмена. Так, для естественной конвекции

$$\lambda_k = d(t, t_c, \beta, \lambda, c_p, \nu, a, g, \varphi), \quad (2)$$

- где:
- $\beta$  - коэффициент объемного расширения жидкости или газа, град<sup>-1</sup>;
  - $\lambda$  - коэффициент теплопроводности жидкости или газа, Вт./м. град;
  - $c_p$  - удельная теплоемкость жидкости или газа при постоянном давлении, дж.кг<sup>-1</sup>.град<sup>-1</sup>;
  - $\nu$  - коэффициент кинематической вязкости жидкости или газа, м<sup>2</sup>/сек;
  - $g$  - ускорение свободного падения, м<sup>2</sup>/с;
  - $a$  - коэффициент температуропроводности жидкости или газа, м<sup>2</sup>/с;
  - $\varphi$  - совокупность параметров, характеризующих форму, строение поверхности и ее размеры.

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

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 представлять коэффициент теплоотдачи 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  $Nu = \frac{\alpha k L}{\lambda},$

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

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 критериального уравнения, связывающего три критерия подобия:

$$Nu = F(Gz \cdot Pr). \quad (3)$$

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 уравнения (3) перед уравнением (2): формулы типа (3) носят более общий характер, чем формулы типа (2), что видно из следующего примера.

Предположим, что экспериментально измерялся коэффициент теплоотдачи проволок в различных средах при различных значениях диаметров проволок и градиентах температуры. В результате исследований были получены серии зависимостей, связывающих коэффициент теплоотдачи 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 уравнения (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) случаев 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.



Предположим, что экспериментально измерялся коэффициент теплоотдачи проволок в различных средах при различных значениях диаметров проволок и градиентах температуры. В результате исследований были получены серии зависимостей, связывающих коэффициент теплоотдачи 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 уравнения (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) случаев 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 оправдана 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.

смаатриваются при температурах жидкости (  $f$  ) и стенки (  $\omega$  );

$l$  - длина поверхности по направлению потока.

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

$$Nu_f = 0,66 Re_f^{0,5} Pz_f^{0,43} \left( \frac{Pz_f}{Pz_\omega} \right)^{0,25} \quad (9)$$

За определяющую температуру здесь принята температура набегающего потока  $t_f$ , а 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  $Pz_f^{0,43}$ , а влияние направления теплового потока (от жидкости к стенке или наоборот) и градиента температуры - параметром  $(Pz_f/Pz_\omega)^{0,25}$ .

Для воздуха в широком интервале температур (0-1000°C) можно считать  $Pz_f = Pz_\omega = 0,7$ ;  $(Pz_f)^{0,43} = 0,86$  и формулу (9) можно записать в виде:

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

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

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

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

$$Nu_f = 0,037 Re_f^{0,8} Pz_f^{0,43} \left( Pz_f / Pz_\omega \right)^{0,25} \quad (11)$$

Уравнение (II) для воздуха принимает более простой вид:

$$Nu_f = 0,032 Re_f^{0,8} \quad (I2)$$

Определяющая температура и определяющий размер те же, что и в предыдущем случае. Зависимость (I2) представлена ниже в форме, удобной для расчетов:

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

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

$$\alpha = Nu_f \lambda_f / l. \quad (I3)$$

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

## ЛИТЕРАТУРА

- I. Дульнев Г.Н., Семьяшкин Э.М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. "Энергия", 1968

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- I. 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  $\alpha_k$ .
10. Объяснить методику определения коэффициента теплоотдачи в данной работе.
- II. Как определяется температура образцов?
12. Как определяется скорость движения воздуха?