

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический
университет»

Кафедра «Ракетные двигатели»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине
«Теплопередача» для студентов специальности 160700.65,
24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных
двигателей» очной формы обучения

Воронеж 2015

Составители: канд. техн. наук Д.П. Шматов
канд. техн. наук С.В. Дахин
асп. Т.С. Тимошинова

УДК 621.45.038

Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Теплопередача» специальности 160700.65, 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» очной формы обучения / ФГБОУ ВПО "Воронежский государственный технический университет"; сост. Д.П. Шматов, С.В. Дахин, Т.С. Тимошинова. Воронеж, 2015. 85 с.

Разработанные методические указания предназначены для студентов, выполняющих лабораторный практикум по дисциплине «Теплопередача».

Библиогр: 3 назв. Ил. 13.

Рецензент: д-р техн. наук А.В. Иванов.

Ответственный за выпуск зав. кафедрой д-р техн. наук проф. В.С. Рачук

Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета.

© ФГБОУ ВПО "Воронежский
государственный технический
университет", 2015

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания для студентов, изучающих дисциплину «Теплопередача» (специальность 160700.65), содержат описание лабораторных работ.

Каждая из предлагаемых работ включает в себя сжатый теоретический материал, необходимый для ее понимания и выполнения, и представляет собой небольшое, но самостоятельное и законченное экспериментальное исследование, посвященное снятию рабочих характеристик и изучению физической сущности исследуемых явлений.

Проведение лабораторных работ возможно также в электронном виде на персональных компьютерах, программы для выполнения которых реализованы на языке Pascal.

Лабораторные работы выполняются на унифицированных лабораторных стендах.

При выполнении лабораторных работ следует строго выполнять следующие правила безопасности:

1. Перед выполнением работы студент должен внимательно изучить электрическую схему и схему измерений установки.

2. Перед включением установки необходимо проверить надежность заземления конструкций стенда.

3. Включение и выключение установки, а также изменение режима работы нагревателей производится студентом под наблюдением лаборанта или преподавателя.

4. Запрещается открывать переднюю панель стендов, а также трогать руками металлические части клемм на панелях стенда находящиеся под напряжением.

5. В случае загорания проводки или в других случаях, угрожающих целостности оборудования лаборатории или жизни находящихся в ней людей, студент обязан немедленно обесточить стенд путем поворота ручки выключателя на щите электропитания.

6. Обо всех неисправностях стендов студент обязан немедленно сообщить лаборанту или преподавателю.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ЛАТУНИ МЕТОДОМ СТЕРЖНЯ

Цель работы — экспериментально определить коэффициент теплопроводности латуни при стационарном режиме методом стержня и закон распределения температур по его длине.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ.

Уравнение теплопроводности Фурье может быть использовано для определения коэффициентов теплопроводности различных материалов по опытным данным при стационарном тепловом режиме:

$$Q = -\lambda F \frac{\partial t}{\partial n}, \quad (1.1)$$

где Q — количество тепла, переданное в единицу времени через сечение F м², перпендикулярное направлению распространению тепла, Вт; $\frac{\partial t}{\partial n}$ — температурный градиент, К\м; λ — коэффициент теплопроводности, Вт\(\м·К).

Из исследуемого материала изготавливается образец определенной формы (например, шар, стержень, цилиндр и др.). Опыт ставится таким образом, чтобы можно было определить количество тепла, проходящее по образцу и измерить температуры в различных сечениях.

В работе использован образец, имеющий форму цилиндрического стержня.

Стержень из исследуемого материала вставлен одним из торцов в электрическую печь. Через торец стержня непрерывно протекает некоторое количество тепла Q_0 . Если через торец $x=0$ полубесконечного в направлении оси x цилиндрического стержня (рис. 1.1) подводится стационарный тепловой поток Q_0 , а сам стержень находится в среде с температурой t_f , которая ниже температуры стержня, то величина теплового потока, идущего по стержню, не будет одинаковой при любых x и равной Q_0 , а будет убывать с ростом x , поскольку все возрастающая доля тепла будет рассеиваться в окружающую среду через боковую поверхность стержня.

Рассмотрим элемент стержня длиной $dx=x_2-x_1$. Через сечение x_1 согласно (1.1) входит тепловой поток:

$$Q_1 = -\lambda F \frac{dt}{dx} \Big|_{x_1},$$

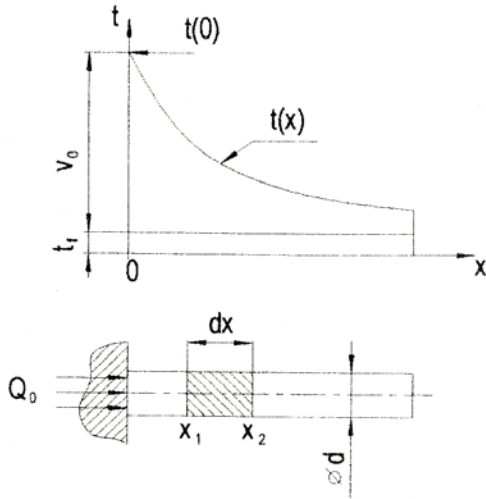
а через сечение x_2 выходит:

$$Q_2 = -\lambda F \frac{dt}{dx} \Big|_{x_2}.$$

Кроме того, тепловой поток, уходящий через боковую поверхность элемента $F_{bok}=\pi d \cdot dx$, согласно закону теплоотдачи Ньютона будет:

$$Q_{bok} = \alpha \cdot F_{bok} \cdot [t(x) - t_f] \text{ Вт},$$

где α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); t_f — температура окружающей среды, °С; $t(x)$ — средняя температура стержня на участке dx (переменною температуры стержня по сечению можно пренебречь), °С.



Считая процесс стационарным, а следовательно, количество тепла, вошедшее в элемент за единицу времени, равным количеству тепла, покинувшего его за то же время, уравнение теплового баланса элемента длиной dx можно записать в виде:

$$-\lambda F \frac{dt}{dx} \Big|_{x_1} = -\lambda F \frac{dt}{dx} \Big|_{x_2} + \alpha F_{бок} (t - t_f)$$

или

$$-\alpha F_{бок} (t - t_f) = \lambda F \left[\frac{dt}{dx} \Big|_{x_1} - \frac{dt}{dx} \Big|_{x_2} \right],$$

но

$$\frac{dt}{dx} \Big|_{x_1} - \frac{dt}{dx} \Big|_{x_2} = -\frac{d^2 t}{dx^2} dx$$

и

$$-\alpha \pi d \cdot dx \cdot (t - t_f) = -\lambda \frac{\pi d^2}{4} \frac{d^2 t}{dx^2} dx;$$

$$\alpha(t - t_f) = \frac{\lambda d}{4} \frac{d^2 t}{dx^2}.$$

Вводя избыточную температуру $v = t(x) - t_f$ и считая $t_f = \text{const}$, получаем дифференциальное уравнение, описывающее распределение температуры по стержню:

$$\frac{d^2 \vartheta}{dx^2} = k^2 \vartheta, \quad (1.2)$$

где $k^2 = \frac{4\alpha}{d\lambda}$

Решение уравнения (1.2) для рассматриваемого случая имеет вид:

$$\vartheta = \vartheta_0 e^{-kx}, \quad (1.3)$$

где $v_0 = t(0) - t_f$.

Граничное условие при $x=0$ определяется подводимым в этом сечении тепловым потоком Q_0 .

Из уравнения Фурье (1.1)

$$Q_0 = \lambda F \left. \frac{dt}{dx} \right|_{x=0} = -\lambda F \left. \frac{d\vartheta}{dx} \right|_{x=0},$$

а из уравнения (1.3)

$$\left. \frac{d\vartheta}{dx} \right|_{x=0} = -\vartheta_0 k \cdot e^{-kx} \Big|_{x=0} = -\vartheta_0 k.$$

Следовательно:

$$Q_0 = \lambda F \vartheta_0 k$$

и

$$\lambda = \frac{Q_0}{Fk(t(0) - t_f)}$$

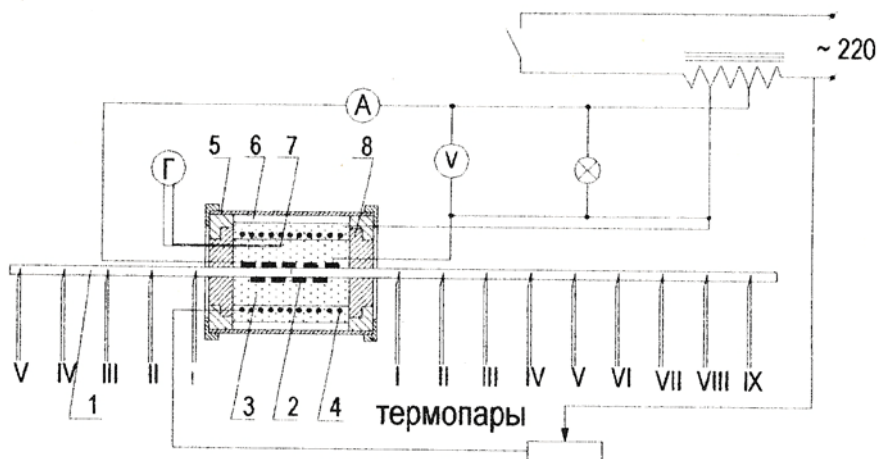
Таким образом, для определения λ методом стержня нужно знать тепловой поток Q_0 , температуру в сечении $x=0$ и показатель экспоненты в зависимости $\vartheta = \vartheta_0 e^{-kx}$. Поскольку установка представляет собой как бы два полубесконечных стержня (от 0 до $+\infty$ и от 0 до $-\infty$) с общим источником тепла, то тепло из источника будет симметрично распределяться между обоими полубесконечными стержнями. Принимая за Q_0 полную мощность источника, помещенного в сечении $x=0$, выражение для λ преобразуем к виду:

$$\lambda = \frac{1}{2} \frac{Q_0}{Fk(t(0) - t_f)} \quad (1.4)$$

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ.

Экспериментальная установка, схема которой была изображена на (рис. 1.2), представляет собой латунный стержень 1 длиной $l=1400$ мм, средняя часть которого помещена в электропечь, состоящую из обмотки 2, нагревающий стержень, асбестовой тепловой изоляции 3, компенсационного нагревателя 4, тепловой изоляции 6 и фторопластового кожуха 5. Разность температур между внешней и внутренней поверхностями асбестовой изоляции 3 измеряется дифференциальной термопарой 7, показания которой фиксируются гальванометром Г. Путем

регулирования мощности нагревателя 4 достигают разности температур, равной 0.



С этой целью нагрев компенсационной печи 4 регулируется трансформатором. Напряжение и сила тока обмотки электропечи, нагревающей стержень, измеряются амперметром А и вольтметром V. Температуры в поперечных сечениях стержня измеряются термопарами I — X, заделанными в стержень на расстоянии 50 мм друг от друга, как показано на рис. 1.2. Показания термопар фиксируются при помощи универсального измерительного прибора А565. Для подготовки прибора к работе необходимо открыть верхнюю крышку прибора и нажать кнопочный переключатель «сеть». При этом загорается светодиод индикации включения прибора. При измерении температуры необходимо, чтобы номер нажатой кнопки на передней панели прибора А565 совпал с номером, выбранным на левом или правом переключателях стенда соответственно для левой или правой части исследуемого стержня. В этом случае на цифровом табло высвечивается

температура стержня в месте расположения термопары с заданным номером.

Термопары 1 заделаны в сечениях (42 мм от оси симметрии установки), когда стержень после нагревателя 2 выходит из торцовых тепловых изоляторов 8. Подобное расположение термопар 1 приближает установку к схеме с торцовым подводом тепла к стержню (см рис.1.1). Координата первой термопары принимается равной 0.

ПРОВЕДЕНИЕ ОПЫТА.

Для вычисления коэффициента теплопроводности материала стержня должно быть предварительно вычислено количество тепла Q_0 , которое передается по телу стержня вследствие его теплопроводности и рассеивается в окружающую среду через боковую поверхность стержня. Это количество тепла можно принять эквивалентным мощности, расходуемой электропечью, если тепловые потери печью будут полностью исключены. Поэтому для снятия замеров следует отрегулировать мощность, расходуемую компенсационным нагревателем, таким образом, что показания гальванометра I дифференциальной термопары были равны нулю.

Затем определяют показания амперметра, вольтметра и значения температур в местах подсоединения термопар. Все данные замеров и результаты обработки опытных данных заносятся в протокол тетради для лабораторных работ по форме, представленной в таблице.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТА.

Задается тепловой поток, переданный окружающей среде с боковых поверхностей стержня:

$$Q_0 = I U \text{ Вт,}$$

где I — показания амперметра, A ; U — показания вольтметра, B .

Коэффициент теплопроводности латуни определяется следующим образом:

1. Строится зависимость $\ln(\vartheta)=f(x)$. Из формулы (1.3) видно, что эта зависимость должна иметь линейный характер. По наклону этой зависимости определяется k , так как $\ln(\vartheta)-$

$$\ln(\vartheta_0)=-kx \text{ м, следовательно, } \frac{d \ln(\vartheta)}{dx} = -k \text{ 1/м.}$$

2. Подставляя полученные значения k и $(t(0)-t_{\rho})$ в выражение (1.4), определяем λ .

По результатам расчетов составляется таблица:

x	Изменения температур			
	t_f	стержень		
м	$^{\circ}C$	$t(x) ^{\circ}C$	$\vartheta ^{\circ}C$	$\ln(\vartheta)$
....				
I	A			
U	B			
k	1/м			
ϑ_0	$^{\circ}C$			
λ	Вт/(м·К)			

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Что такое коэффициент теплопроводности и в каких единицах он выражается?

2. Что такое температурный градиент?
3. Что такое изотермическая поверхность?
4. Почему исследуемый стержень может рассматриваться как стержень бесконечной длины?

Проведение данных лабораторной работы возможно также в электронном виде на ПК.

Программа составлена на языке Pascal:

```

$N+
program Teploperedacha Lab 1;
uses graph,crt;
label 10;
const
lambda=133.745;
alfa=170;
var
name:string;
j,c,e,xx,xx1: integer;
y1,x1,x2,v0,Q0,k,d,f,x,t,Tf,y,k1,lambda1:double;
G,g1:text;
begin
clrscr;
write('Введите свою фамилию - '); readln(name);
writeln;
write('Введите тепловой поток, переданный окружающей среде - Q0 (в
Ваттах): '); readln(Q0);
write('Введите диаметр стержня (в метрах): '); read(d);
write('Введите температуру окружающей среды Tf (в град. цельсия): ');
read(Tf);
k:=4*alfa/d/lambda;
F:=pi*d*d/4;
v0:=Q0/(lambda*F*k*2);
writeln('ln(v0=)',ln(v0));
writeln('k=',k); writeln;
writeln('Для продолжения нажмите любую клавишу');
readkey;

```

```

c:=detect;
initgraph(c,j,^);
setcolor(15);
setbkcolor(0);
line(30,30,30,getmaxy-30);
line(30,getmaxy-30,590,getmaxy-30);
moveto(50,30);
outtext('T,C');
moveto(550,455);
outtext('X,MM');

xx:=30;
while(xx<(10*50)) do
begin
xx:=xx+50;
line(xx,getmaxy-35,xx,getmaxy-25);
end;

xx:=0;
while(xx<10) do
begin
xx:=xx+1;
line(25,getmaxy-30-xx*40,35,getmaxy-30-40*xx);
end;

moveto(30+198,getmaxy-20); outtext('5');
moveto(30+394,getmaxy-20); outtext('10');
moveto(15,getmaxy-30-43); outtext('8');
moveto(8,getmaxy-30-83); outtext('16');
moveto(8,getmaxy-30-123); outtext('24');
moveto(8,getmaxy-30-163); outtext('32');
moveto(8,getmaxy-30-203); outtext('40');
moveto(8,getmaxy-30-243); outtext('48');
moveto(8,getmaxy-30-283); outtext('56');
moveto(8,getmaxy-30-323); outtext('64');
moveto(8,getmaxy-30-363); outtext('72');
moveto(8,getmaxy-30-403); outtext('80');

x:=0;
while(x<0.09) do

```

```

begin
x1:=x-0.00001;
y1:=y;
y:=Tf+v0*exp(-k*x);

if (x>0) then line(round(40000*x1)+30,getmaxy-round(5*y1)-
30,round(40000*x)+30,getmaxy-30-round(5*y));
x:=x+0.00001;
end;
readkey;

closegraph;
writeln('- Получены следующие значения температур на координатах
стержня -');
writeln(' X, метр.                                t(x), град. цельсия');
x:=0;
while (x<0.02) do
begin
t:=Tf+v0*exp((-k)*x);
writeln(x,' ',t);
x:=x+0.001;

end;
assign(G,name+'.txt');
rewrite(g);
writeln(g,'Тепловой поток, переданный окружающей среде-',Q0,' Вт');
writeln(g,'Диаметр стержня-',d,' метра');
writeln(g,'Температура окружающей среды-',Tf,' град. цельсия');
writeln(g,'');
writeln(g,'- Получены следующие значения температур на координатах
стержня -');
writeln(g,' X, метр.                                t(x), град. цельсия');
x:=0;
while (x<0.02) do
begin
t:=Tf+v0*exp((-k)*x);
writeln(g,x,' ',t);
x:=x+0.001;
end;

```

```

close(g);

writeln('Результаты распределения температуры по длине образца ');
writeln('вы можете посмотреть в файле данного каталога с вашим именем');
readkey;
c:=detect;
initgraph(c,j,"");
setcolor(15);
setbkcolor(0);
line(30,30,30, getmaxy-30);
line(30, getmaxy-30,590, getmaxy-30);
moveto (50,30);
outtext ('ln(v)');
moveto (550,455);
outtext ('X,M');

xx:=30;
while (xx<(10*50)) do
begin
xx:=xx+50;
line(xx,getmaxy-35,xx,getmaxy-25);
end;

xx:=0;
while(xx<10) do
begin
xx:=xx+1;
line(25,getmaxy-30-xx*40,35,getmaxy-30-40*xx);
end;
xx:=5;
xx1:=20;
line(30+xx1,getmaxy-30-400,30+xx+xx1,round(getmaxy-30-400+k*xx));
readkey;
closegraph;

assign(G1,name);
rewrite(g1);
k1:=-((ln(v0*exp(-k*0.001))-ln(v0*exp(-k*0.009)))/(0.001-0.009));
writeln(g1,'Из графика находим K=',k1);
lambda1:=Q0/(F*k1*v0*2);

```

```
writeln(g1,'Коэффициент теплопроводности-',lambda1,' Вт/(м*K)');
close(g1);

writeln('Для выхода нажмите любую клавишу');

readkey;

end.
```

Проведение данной лабораторной работы возможно также на альтернативном стенде.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ СТЕРЖНЯ

Цель работы: экспериментальное изучение процесса передачи теплоты теплопроводностью при стационарном тепловом режиме. Оно основано на использовании задачи о передаче теплоты по тонкому стержню постоянного сечения бесконечной длины при стационарном тепловом режиме.

Исследованию подлежит температурное поле металлического стержня постоянного поперечного сечения. По результатам исследования необходимо получить закономерность распределения температур по длине стержня и определить коэффициент теплопроводности его материала.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Теплопроводностью (кондукцией) называется процесс переноса теплоты структурными частицами вещества и акустическими тепловыми волнами, обусловленный наличием градиента температур.

В основе изучения процессов теплопроводности в однородных и изотропных твердых телах лежит экспериментальный закон, установленный французским физиком Ж. Фурье. Согласно этому закону количество

теплоты dQ , проходящее теплопроводностью через элементарную площадку dF изотермической поверхности за единицу времени в направлении нормали к площадке пропорционально величине температурного градиента $\partial t/\partial n$ в данной точке тела:

$$dQ = -n\lambda \frac{\partial t}{\partial n} dF, \text{ Вт} \quad \text{или} \quad (1)$$

$$\bar{q} = -n_0\lambda \frac{\partial t}{\partial n}, \text{ Вт/м}^2 \quad (2)$$

где n_0 – единичный вектор, направленный по нормали в сторону температуры; λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); q – плотность теплового потока в данной точке тела, Вт/м².

Коэффициент теплопроводности – это физический параметр, характеризующий способность вещества проводить теплоту и численно равный плотности теплового потока при градиенте температуры, равном единице.

Коэффициент теплопроводности зависит от природы и состояния вещества и может существенно меняться в зависимости от структуры материала, его температуры и влажности.

Уравнения (1 и 2) могут быть использованы для определения коэффициенты теплопроводности различных материалов по результатам опытного исследования стационарного температурного поля, возникающего в опытном образце из исследуемого материала под влиянием заданного теплового потока. Опыт ставится так, чтобы можно было определить тепловой поток Q , проходящий через образец, и измерить температуру в характерных точках образца.

В данной работе используется образец в виде тонкого цилиндрического прута из испытуемого материала, работающий как стержень постоянного сечения. Образец одним торцом помещен в электрическую печь. Через торец образца в него направляется тепловой поток Q , который

может быть измерен с высокой точностью. Теплопроводностью теплота распространяется вдоль образца и рассеивается с его наружной поверхности в окружающую среду. Количество теплоты dQ , рассеиваемое элементом образца длиной dx может быть найдено по формуле Ньютона-Рихмана так:

$$dQ = \alpha(t_c - t_{жс})Udx, \quad (3)$$

где U – наружный периметр образца, м; t_c , $t_{жс}$ – соответственно температура наружной поверхности образца и окружающей среды, °С; α – коэффициент теплоотдачи от поверхности образца в окружающую среду, Вт/(м² К).

Этот тепловой поток можно рассматривать как поверхностный сток теплоты, и если его отнести к объему материала в элементе образца dx , то из (3) можно определить мощность объемного притока теплоты:

$$q_v = \frac{dQ_x}{f dx} = \frac{\alpha U}{f}(t_x - t_{жс}), \text{ Вт/м}^3 \quad (4)$$

где f – площадь поперечного сечения образца, м²; в данном случае $f = 0,25\pi d_n^2$, м².

С учетом (3) дифференциальное уравнение теплопроводности стержня для одномерной стационарной задачи можно записать так:

$$\frac{d^2 t}{dx^2} - \frac{q_v}{\lambda} = 0 \text{ и далее}$$

$$\frac{\partial^2 t}{dx^2} - \frac{\alpha U}{\lambda f}(t_x - t_{жс}) = 0. \quad (5)$$

Если принять, что $v_x = t_x - t_{жс}$ – избыточная температура образца в точке с координатой x : $m^2 = \frac{\alpha U}{\lambda f}$ – параметр,

характеризующий соотношение внутреннего и внешнего термических сопротивлений образца, $1/m^2$;

Следовательно, уравнение (5) можно записать следующим образом:

$$\frac{d^2 v_x}{dx^2} - m^2 v_x = 0. \quad (6)$$

Для решения уравнения (6) используются следующие граничные условия:

$$\begin{aligned} \text{при } x = 0: t_{x=0} &= t_0; v_0 = t_0 - t_{жс}; \\ \text{при } x = \infty: t_{x=\infty} &= t_{жс}; v_\infty = 0 \text{ } ^\circ\text{C}; \end{aligned} \quad (7)$$

где t_0 – максимальная температура основания стержня, $^\circ\text{C}$.

Решение уравнения (6) с граничными условиями (7) можно получить относительно коэффициента теплопроводности материала стержня:

$$\lambda = \frac{Q \cdot x}{f v_0 \left| \ln \left(\frac{v_x}{v_0} \right) \right|}, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)} \quad (8)$$

По (8) значение λ может быть вычислено, если известны: тепловой поток Q от поверхности образца в окружающую среду, Вт; площадь его поперечного сечения f , м^2 ; температура t_x , $^\circ\text{C}$ поперечного сечения стержня на расстоянии x , м от его торца; максимальная температура торца стержня t_0 , $^\circ\text{C}$ и температура окружающей среды $t_{жс}$, $^\circ\text{C}$. Значения этих величин устанавливаются по данным проведенного эксперимента.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Установка, схема которой показана на рис.1, включает в себя металлический стержень диаметром $d_n = 10$ мм из исследуемого материала, средняя часть которого помещена в электрическую печь 1, состоящую из нихромовой спирали, нагревающей стержень, керамической изоляции, тепловой изоляции и кожуха. Мощность нагревателя, который создает тепловой поток Q в обе половины образца, измеряется методом вольтметра-амперметра с помощью щитовых приборов – вольтметра V и амперметра A . Изменение мощности нагревателя производится лабораторным трансформатором 3. Температура в поперечных сечениях стержня t_x , °С, измеряется с помощью 12 хромель – копелевых термопар 2, приваренных к стержню на разных расстояниях (в мм) друг от друга.

Значения температуры стержня и окружающей среды в °С считываются с цифрового прибора ТРМ 2, подключаемого к термопарам через переключатель ПМТ-12.

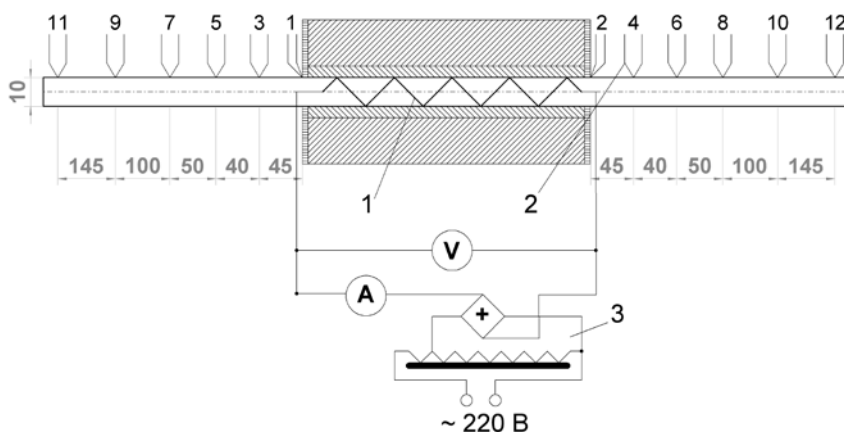


Рис. 1. Расположение термопар на образце

ПРОВЕДЕНИЕ ОПЫТОВ

Для вычисления коэффициента теплопроводности λ по формуле (8) тепловой поток Q можно принять равным половине мощности нагревателя 1 (вследствие симметрии установки), если тепловые потери нагревателя в окружающую среду принять равным нулю. Необходимо получить в образце стационарный тепловой режим, о чем будет свидетельствовать неизменность показания всех термопар при неизменной мощности нагревателя.

Установление стационарного режима контролируется следующим образом: периодически через каждые 2-3 минуты производится запись показаний температуры. Если её значения изменится не более чем на 0,1 - 0,2 °С за это время, то режим можно считать установившимся и после двух контрольных серий замеров можно перейти к основным измерениям.

После наступления стационарного теплового режима образца записывают показания амперметра и вольтметра нагревателя, показания всех термопар, температуру окружающего воздуха $t_{ж}$, °С. На установившемся режиме все измерения проводят не менее трех раз.

Все результаты измерений вносят в протокол измерений и результатов по форме, показанной в табл. 1

Всего исследуется 3 режима при различных Q в диапазоне от Q_{min} до Q_{max} . Размеры образца указаны на рис.1.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТОВ

Общее количество теплоты, переданное окружающей среде с боковых поверхностей правой и левой частей образца, определяется по формуле:

$$Q_{полн} = I \cdot U, \text{ Вт} \quad (9)$$

где I – показания амперметра, А; U – показания вольтметра, В.

Для каждой половины образца

Таблица 1

Форма протокола измерений и результатов

Измерение температур				$t_{жс},$ °С	$I,$ А	$U,$ В	$Q,$ Вт	$\ln \frac{\nu_x}{\nu_0}$		$\lambda_x,$ Вт/(м·К)		$\bar{\lambda}$
№	термопар	правая часть	левая часть					правая часть	левая часть	правая часть	левая часть	
1 - 12												
1 - 12	ОПЫТ № 1											
1 - 12												
1 - 12												
1 - 12	ОПЫТ № 2											
1 - 12												
1 - 12												
1 - 12	ОПЫТ № 3											
1 - 12												

$$Q = 0,5 \cdot Q_{полн}, \text{ Вт} \quad (10)$$

После того, как вычислены значения $\nu_x, \nu_0, Q, \ln \frac{\nu_x}{\nu_0}$, по формуле (8) определяются локальные значения λ_x , Вт/(м·К).

По полученным значениям λ_x определяют коэффициент теплопроводности материала образца как среднеарифметическую величину

$$\bar{\lambda} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \lambda_x \right)_{\text{прав.}} + \left(\sum_{i=1}^n \lambda_x \right)_{\text{лев.}}}{2(n-1)}, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)} \quad (11)$$

где n – число замеров температуры в правой и левой части образца.

Строят для левой и правой частей кривые распределения температуры по длине образца: по оси ординат откладываются значения величины избыточной температуры ν_x , °С, а по оси абсцисс – значения координаты x , м.

В отчете по лабораторной работе должны быть представлены:

1. Схема установки.
2. Протокол измерений и результатов.
3. Кривые измерений температуры $\nu_x = f(x)$ для правой и левой частей образца.
4. По найденному значению коэффициента теплопроводности $\bar{\lambda}$, Вт/(м·К) определяется материал исследуемого образца.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое изотермическая поверхность и изотермическая линия?
2. Что такое температурный градиент?
3. Что такое коэффициент теплопроводности, его физический смысл и размерность в системе СИ?
4. Почему исследуемый образец можно рассматривать, как бесконечно длинный стержень?

5. Почему температурное поле в исследуемом стержне можно считать одномерным?
6. Что такое теплопроводность (кондукция)?
7. От чего зависит коэффициент теплопроводности?
8. Что такое тепловой поток?
9. Что такое стационарный и не стационарный режим?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ МЕТОДОМ РЕГУЛЯРНОГО РЕЖИМА.

Цель работы — ознакомление с экспериментальной методикой изучения явления температуропроводности при нестационарном тепловом режиме.

В качестве исследуемого образца, для которого определяется коэффициент температуропроводности методом регулярного режима, служит фторопласт 4.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ.

Физический параметр, характеризующий скорость выравнивания температуры при нестационарной теплопроводности, называется коэффициентом температуропроводности вещества α . Он служит мерой быстроты, с которой материал передает изменение

температуры от одного места к другому, или мерой теплоинерционных свойств тела.

Скорость изменения температуры в элементарном объеме испытуемого материала зависит от количества тепла, поступившего за единицу времени в этот объем из соседних объемов. Следовательно, скорость повышения температуры пропорциональна коэффициенту теплопроводности λ [Вт/м·К]. Но чем больше объемная теплоемкость материала, тем меньше повышение температуры.

Коэффициент температуропроводности определяется по формуле:

$$\alpha = \lambda / (\rho \cdot c_p), \text{ [м}^2\text{/с]}, \quad (2.1)$$

где ρ , c_p — плотность и теплоемкость вещества соответственно.

Иначе говоря, скорость изменения температуры в любой точке тела будет тем больше, чем больше коэффициент температуропроводности α . Поэтому при прочих равных условиях выравнивание температур во всех точках пространства будет происходить быстрее в том теле, которое обладает большим коэффициентом температуропроводности. Величина α зависит от природы вещества. Например, жидкости и газы обладают большой тепловой инерционностью и, следовательно, малым коэффициентом температуропроводности. Металлы обладают малой тепловой инерционностью, так как они имеют большой коэффициент температуропроводности.

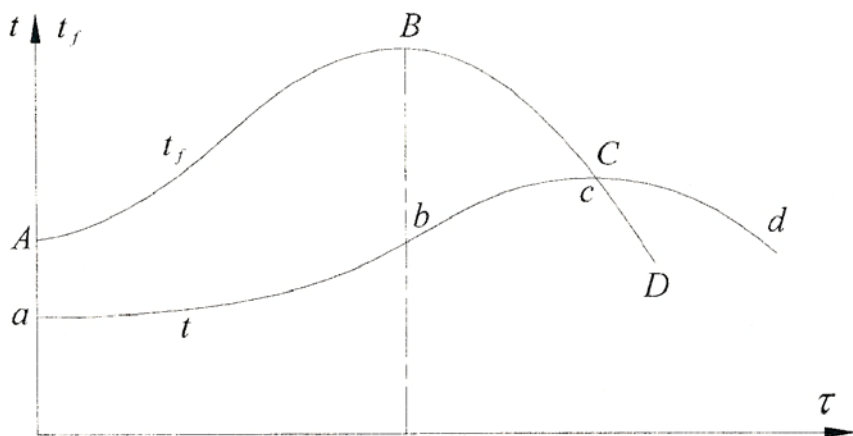


Рис. 2.1

На рис. 2.1. Линией $ABCD$ обозначено заданное изменение температуры среды, окружающей тело, в зависимости от времени τ , а линией $abcd$ — изменение температуры t тела в результате теплообмена с окружающей средой.

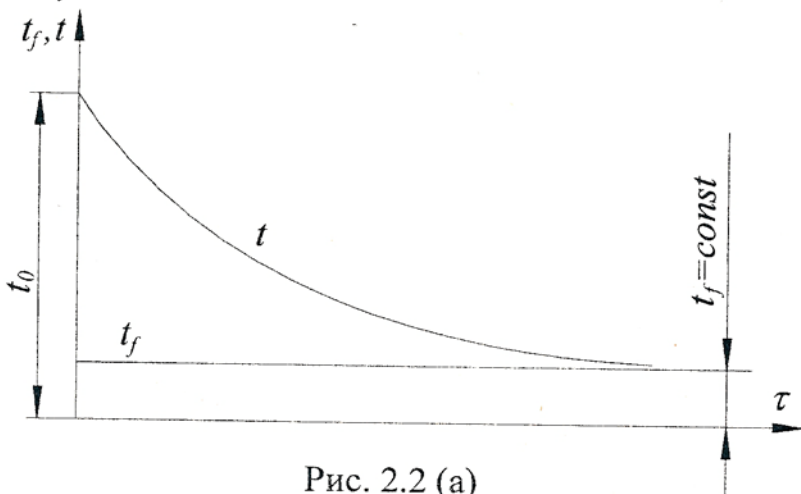
Из графика видно, что когда температура среды достигает своего максимума (точка B), температура тела все еще продолжает повышаться. Максимальная температура тела соответствует точке C пересечения кривых, когда температура среды и тела выровнялись. Причина этого такова: до точки C температура t_f окружающей среды выше температуры t тела и тепло от среды передается телу. Температура тела повышается. Начиная с точки C температура тела начинает снижаться, но из-за тепловой инерции остается выше температуры среды, понижающейся по заданному закону.

Таким образом, пока происходит изменение среды, имеется некоторая разность температур между средой и телом, величина которой зависит от скорости изменения температуры среды, геометрии тела, физических параметров и условий теплообмена на границе раздела.

Рассмотрим случаи проявления тепловой инерции.

Первый случай — регулярный тепловой режим первого рода — случай так называемого простого охлаждения или нагревания, когда в среду с постоянной температурой t_f внесено тело, имеющее в начальный момент времени температуру t_0 . На рис. 2.2 даны графики изменения температуры t тела в зависимости от времени охлаждения (а) и нагревания (б).

Температура тела асимптотически приближается к температуре среды. Разность температур тела и среды при его простом охлаждении изменяется по экспоненциальному закону.



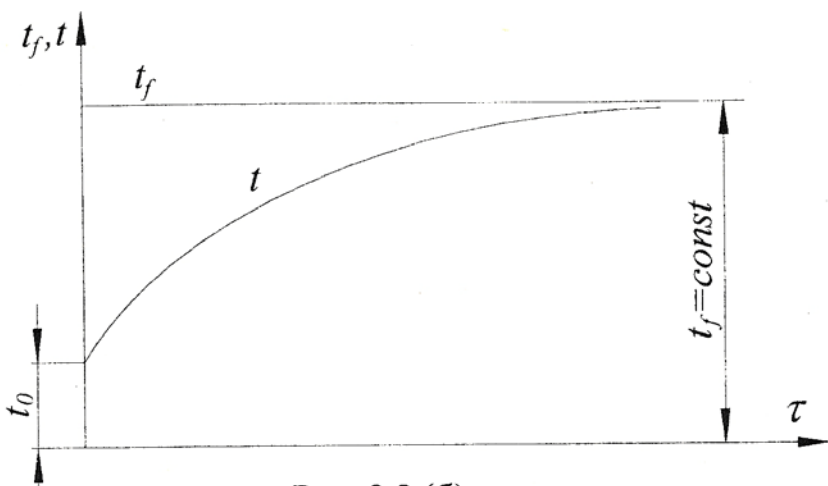


Рис. 2.2 (б)

В последние годы получили развитие и широкое распространение методы регулярного теплового режима для случаев, когда температура среды — линейная функция времени ($t_f = t_{f_0} + b \cdot \tau$), и температура среды — периодическая функция времени ($t_f = t_{f_0} + t_m \cdot \cos \pi \nu \tau$, где ν — частота колебания, t_m — амплитуда температуры среды). Эти два случая получили название методов регулярного режима второго и третьего родов. С регулярным режимом третьего рода встречаются при расчете суточных и годовых колебаний температуры земли, сооружений, при рассмотрении тепловых режимов ИСЗ и во многих других практически важных задачах. Известно, что спустя некоторое время температура тела $t=f(\tau)$ также начинает меняться по закону гармонических колебаний, но с меньшей амплитудой, чем у $t_f=f(\tau)$, и сдвинутых по фазе. Чем ниже теплопроводность тела и чем больше его размеры, тем больше будет отставание по фазе и меньше амплитуда при одном и том же законе изменения температуры среды. Отмечено, что регуляризация кинетики нагрева тела

происходит не только по температурным полям, но и по потокам тепла. Поэтому при нагревании нет надобности различать регулярные режимы первого, второго и третьего родов.

В работе рассматривается первый случай проявления тепловой инерции, когда процесс нестационарного теплообмена (нагревания или охлаждения тела) можно разделить на три последовательных режима.

Первый режим охватывает начало процесса, когда происходит распространение тепла от слоя к слою вглубь тела. В этом случае скорость изменения температуры в отдельных точках тела различна и поле температур зависит от начального состояния тела, которое может быть совершенно случайным. Поэтому первый режим является режимом неупорядоченного процесса.

С течением времени влияние начальных неравномерностей сглаживается, и изменение температурного поля во времени описывается простой экспонентой. Этот второй режим — режим упорядоченного процесса — назван регулярным. Температурное поле при регулярном режиме зависит от геометрической формы и размеров тела, его физических свойств и условий охлаждения или нагревания.

Далее наступает третий режим — стационарный, когда температура во всех точках тела стабилизируется и не меняется со временем. Итак, регулярный тепловой режим первого рода характеризуется тем, что с момента его наступления натуральный логарифм избыточной температуры Θ между температурой t в любой точке тела и постоянной температурой t_f окружающей среды изменяется во времени по линейному закону

$$\ln \Theta = -m \cdot \tau + c, \quad (2.2)$$

причем скорость его изменяется:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\ln \Theta) = -m, \quad (2.3)$$

одинаковая для всех точек тела. Постоянная m называется темпом охлаждения (или нагревания), не зависит ни от координат, ни от времени и характеризует быстроту процесса. Значение m не зависит от начального температурного поля и полностью определяется размерами и формой тела, значением его тепловых параметров и условий теплообмена t_f и коэффициента теплоотдачи α .

Теория регулярного режима дает возможность установить связь между темпом охлаждения или нагревания, с одной стороны, и физическими, геометрическими характеристиками тела и внешними условиями охлаждения (α) — с другой. Эта связь устанавливается уравнением баланса тепла, когда количество тепла, поступающее из тела в окружающую среду (или наоборот) за счет конвективного теплообмена, приводит к изменению энтальпии тела.

Для твердого тела темп охлаждения (нагрева) и коэффициент теплоотдачи связаны равенством:

$$m = \alpha \cdot \psi \cdot \frac{F}{c}, [1/c],$$

где m — темп охлаждения (нагрева), $1/c$;

α — коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$;

F — поверхность теплообмена, м^2

c — теплоемкость тела, $\text{Дж}/\text{К}$;

ψ — коэффициент неравномерности распределения температуры в теле.

Из равенства следует, что относительная скорость охлаждения, или, иначе говоря, темп охлаждения m

однородного и изотропного тела при конечном значении коэффициента теплоотдачи α пропорциональна коэффициенту теплоотдачи, поверхности тела и обратнопропорциональна его теплоемкости (первая теорема Кондратьева).

Величина ψ представляет отношение средних избыточных температур на поверхности $\bar{\Theta}_W$ к температуре по объему $\bar{\Theta}_V$:

$$\psi = \bar{\Theta}_W / \bar{\Theta}_V = (t_W - t_f) / (t_V - t_f).$$

Распределение температур в общем случае зависит от конфигурации тела, его размеров, интенсивности теплообмена на границе тела (коэффициента теплоотдачи α) и его теплопроводящих свойств (коэффициента теплопроводности λ).

Следовательно, ψ является функцией критерия Био (рис. 2.3):

$$Bi = \alpha \cdot l / \lambda,$$

где l — определяющий размер, м;
 α — коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·К;
 λ — коэффициент теплопроводности, Вт/м·К.

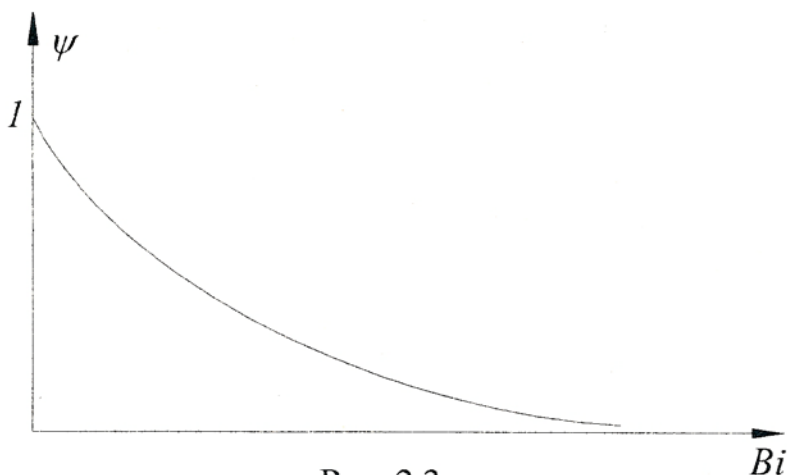


Рис. 2.3

Если рассматривать охлаждение или нагревание одного и того же тела при различных значениях критерия Bi , что в данном случае равносильно различным значениям коэффициента теплоотдачи от самых малых $\alpha \rightarrow 0$ до самых больших $\alpha \rightarrow \infty$, то каждому α будет соответствовать свое значение ψ , а следовательно, и m . При $\alpha \rightarrow \infty$ наступает наибольшая неравномерность распределения температур в теле, т. е. $\psi \rightarrow 0$, а произведение $\alpha \cdot \psi$ в формуле охлаждения принимает вид неопределенности $\infty \cdot 0$.

Однако, возрастание темпа охлаждения m в зависимости от роста α подчиняется асимптотическому закону, т. е. Для одного и того же тела темп охлаждения (нагрева) с увеличением α растет не беспредельно, а стремится к конечному числу $m_\infty = \lim_{\alpha \rightarrow \infty} f(\alpha)$, присущему данному телу (рис. 2.4). Следовательно, $\lim(\alpha, \psi)$ в силу асимптотического возрастания m от α будет число конечное. В этом случае согласно второй теореме Кондратьева при $Bi \rightarrow \infty$ или, что то же, при $\alpha \rightarrow \infty$ темп охлаждения m_∞ становится

прямо пропорциональным физической характеристике тела — его коэффициенту температуропроводности α :

$$\alpha = \lambda / (\rho \cdot c_p) = k \cdot m_\infty, \text{ м}^2/\text{с}. \quad (2.4)$$

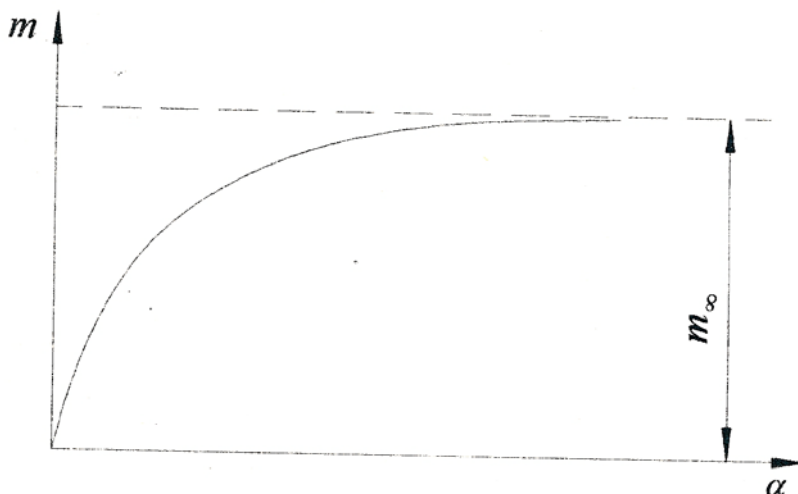


Рис. 2.4

Коэффициент пропорциональности k зависит от формы и размеров тела. Для цилиндров с радиусом R и высотой h его определяют по формуле:

$$k = \frac{1}{\left(\frac{2.405}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{h}\right)^2}, \text{ м}^2. \quad (2.5)$$

Коэффициент формы k может быть вычислен для некоторых тел любой формы. Для любой конфигурации тела коэффициент формы может быть найден полуэкспериментально.

Уравнение (2.4) используется для опытного определения коэффициента температуропроводности α .

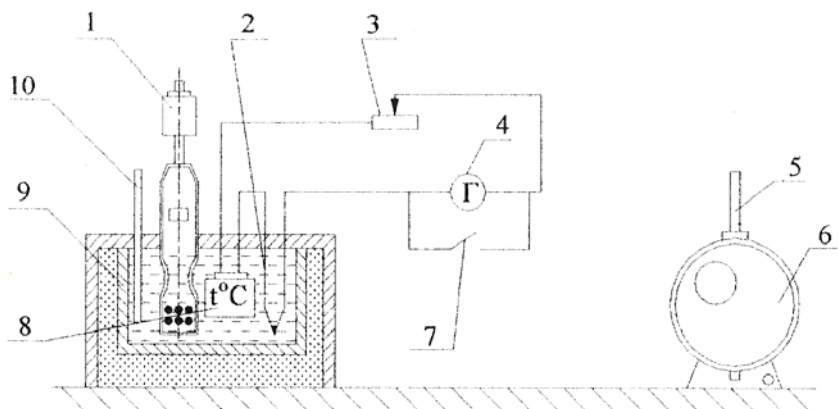
На практике невозможно получить $\alpha=\infty$. В силу асимптотического закона возрастания m по мере увеличения α в зоне, где $m \rightarrow m_\infty$, большие изменения α дают ничтожное приращение m . Следовательно, нужно знать то значение α , с которого его можно принимать за бесконечность. Если ограничиться точностью 3.5%, то для избранного образца объемом V [м³], площадью теплообмена F [м²], коэффициентом формы k [м²] и коэффициентом теплопроводности λ [Вт/м²·К] такое значение коэффициента теплоотдачи наступит тогда, когда

$$\alpha \geq 20 \frac{\lambda V}{kF}, [\text{Вт/м} \cdot \text{К}].$$

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ.

Схема опытной установки для определения коэффициента температуропроводности материалов методом регулярного режима представлена на рис. 2.5. Установка состоит из испытуемого образца 8, водяного термостата 9, сушильного шкафа 6 и измерительных приборов.

В качестве образца взят цилиндр из фторопласта диаметром $d=50$ мм и высотой $h=50$ мм. В центре образца помещен один спай хромель-капелевой дифференциальной термопары 2, второй спай погружен в воду термостата. Дифференциальная термопара служит для определения разности температуры образца и омывающей его воды. Э.д.с. термопары замеряется зеркальным гальванометром 4. Для лучшего использования шкалы гальванометра в цепь последовательно включается декадный магазин сопротивлений 3. В промежутках между замерами гальванометр шунтируется тумблером 7.



Для обеспечения $\alpha \rightarrow \infty$ и равномерного распределения температуры t_f охлаждающей среды образец охлаждают в водяном термостате ТС-24А, жидкость в котором энергично перемешивают. Термостат представляет собой теплоизолированный бак большой емкости, заполненный дистиллированной. Постоянная температура воды в реостате поддерживается с помощью электронагревателей, включаемых ртутным контактным термометром. Колебание температуры воды в термостате не превышает 0.05°C .

ПРОВЕДЕНИЕ ОПЫТА.

Включают термостат. Температура в нем устанавливается ниже, чем температура образца. Для измерения разности температур $Q = t - t_f$ дифференциальной термопарой включают зеркальный гальванометр (добавочное сопротивление 100 Ом).

Когда заданная температура в термостате установится, туда помещают образец и пускают секундомер. Через каждые 5 мин. записывают показания гальванометра, расшифровываемые затем по тарировочному графику.

Эксперимент следует производить до тех пор, пока разность температур тела и среды не станет меньше 1°C . После этого термостат и гальванометр выключаются.

Данные замеров и последующих расчетов заносят в протокол по прилагаемой форме.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТА.

Таблица 2.1

ФОРМА ПРОТОКОЛА

	Измерения		Расчет		
	τ, c	Θ $^{\circ}\text{C}$	$\ln \Theta$	$m, \frac{1}{\text{c}}$	$a, \frac{\text{M}^2}{\text{c}}$

1. По данным опыта строят графики: $\Theta = t - t_f(\tau)$ и $\ln \Theta = f(\tau)$ (рис 2.6).
2. По формуле (2.5) вычисляют для цилиндра ($R=0.025$ м, $h=0.05$ м) коэффициент формы.
3. На графике $\ln \Theta = f(\tau)$ выбирают две точки, лежащие на прямой, и по ним вычисляют темп охлаждения, используя формулу:

$$m_{\infty} = (\ln \Theta_1 - \ln \Theta_2) / (\tau_2 - \tau_1) \quad (2.6)$$

4. По формуле (2.4) вычисляют коэффициент температуропроводности.

В тетради для лабораторных работ должны быть представлены: краткая методика проведения опыта, схема установки, результаты замеров и расчетов, график охлаждения.

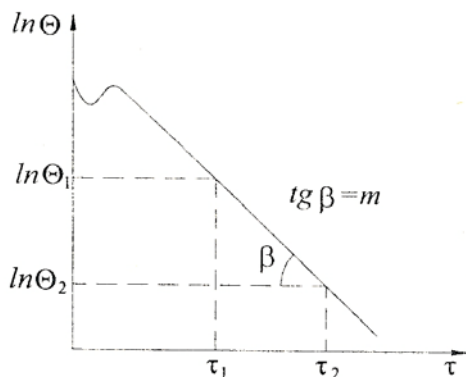


Рис. 2.6

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Что такое коэффициент теплопроводности?
2. Приведите случаи проявления тепловой инерции.
3. Чем характеризуется регулярный тепловой режим первого рода?
4. Что такое темп охлаждения?
5. В чем практическое приложение второй теоремы кандратьева?

Проведение данной лабораторной работы возможно также в электронном виде на ПК.

Программа составлена на языке Pascal:

\$N+

program Teploperedacha Lab 2;

{Распределение температур;

Динамический процесс повышения температуры образца ($T_e, \text{gr.C}$)

начиная с краев (100C) к середине (для определения начально 0C)

по относительной длине образца ($X=0\dots 1$) с шагом температуры по $t - 100$ }

uses graph, crt;

```

var
x,Tsrednee1,m,k,alfa,R,h,Tf,a:real;
Tsrednee: array[1..120] of real;
Te,c1,c2,T1:Double;
GraphDriver, GraphMode, t, intTe,xx,intX,Te1,X1: integer; s,name:string;
  G,G1:text;

begin
  ClrScr;
write('Введите свою фамилию - '); readln(name);
  {Исходные данные}
  R:=0.025; h:=0.05;
{ Температура окружающей среды}
  Tf:=100;

  ClrScr; a:=0.000165;

  GraphDriver:=Detect;
  InitGraph (GraphDriver, GraphMode,"");
  ClearViewPort;

  line(30,30,30, getmaxy-30);
  line(30, getmaxy-30,590, getmaxy-30);
  moveto (50,30);
  outtext ('T,C');
  moveto (550,435);
  outtext ('Xotnos');
  xx:=30;
  while (xx<(10*50)) do
  begin
  xx:=xx+50;
  line(xx,getmaxy-35,xx,getmaxy-25);
  str((xx-30) div 50,s);
  s:=0,'+s;
  outtextXY(xx-10,getmaxy-25+5,s);

  end;

  xx:=0;
  while(xx<10) do
  begin
  xx:=xx+1;

```

```

line(25,getmaxy-30-xx*40,35,getmaxy-30-40*xx);
str(xx*10,s);
outtextXY(3,getmaxy-30-xx*40-4,s);
end;

t:=0;
while t<=9000 do
begin
t:=t+75;
x:=0;
Te1:=400;
X1:=0;
Tsrednee1:=0; while x<=1 do
begin
x:=x+0.01;
c1:=400/pi/7*sin(7*pi*x)*exp(-a*49*pi*pi*t)+400/pi/9*sin(9*pi*x)*exp(-
a*81*pi*pi*t); c2:=400/pi/5*sin(5*pi*x)*exp(-a*25*pi*pi*t)+c1; Te:=Tf-
Tf*(400/pi*sin(pi*x)*exp(-
a*pi*pi*t)+400/pi/3*sin(3*pi*x)*exp(-a*9*pi*pi*t)+c2);
if Te<=0 Then Te:=0;
writeln(te);
Tsrednee1:=Tsrednee1+Te/100;
intTe:=round(4*te);
intX:=round(x*500);
line (30+x1,getmaxY-30-Te1,30+intX,getmaxY-30-intTe);

Te1:=intTe;
X1:=intx;

end;

Tsrednee[round(t/75)]:=Tsrednee1;

end;
outtextXY (30,10,'Распределение температуры на длине образца по
временным слоям');

readln;

```

```

{ Относительный график изменения средней температуры образца со
временем
по принятой Экстраполяции и ее натурального логарифма}
ClearViewPort;
line(30,30,30, getmaxy-30);
line(30, getmaxy-30-160,590, getmaxy-30-160);
moveto (50,30);
outtext ('T,C');
moveto (550,455-160-20);
outtext ('t,cek.');
```

outtextXY (30,10,'Изменение значения средней избыточной температуры
температуры и ее логарифма '); outtextXY (200,30,'с течением времени');

```

t:=15*50;
xx:=30;
while (xx<(10*50)) do
begin
xx:=xx+50;
line(xx,getmaxy-35-160,xx,getmaxy-25-160);
str(t,s);
outtextXY(xx-15,getmaxy-25-160+10,s);
t:=t+50*15;
end;
t:=-60;
xx:=0;
while(xx<10) do
begin
xx:=xx+1;
line(25,getmaxy-30-xx*40,35,getmaxy-30-40*xx);
str(t,s);
outtextXY(0,getmaxy-30-xx*40-3,s);
t:=t+20;
end;
outtextXY(50,70,'Tf-T=f(t)');
outtextXY(50,130,'ln(Tf-T)=f(t)');
```

```

T1:=0.00001;
X1:=0;
for t:=1 to 120 do
begin
```



```

line (30+x1,getmaxY-30-2*round(Tf-T1)-160,30+t*5,getmaxY-30-2*round(Tf-
Tsrednee[t])-160);
line (30+x1,getmaxY-30-round(30*ln(Tf-T1))-160,30+t*5,getmaxY-30-
round(30*ln(Tf-Tsrednee[t]))-160);

T1:=Tsrednee[t]; x1:=t*5;
end;
readln; CloseGraph;

{ Определяем темп охлаждения по 90-ой и 110-ой точке }

m:=(ln(Tf-Tsrednee[90])-ln(Tf-Tsrednee[110]))/(110*75-90*75);
Writeln('Темп охлаждения m=',m);
{ Коэффициент формы k }
k:=1/((2.405/R)*(2.405/R)+(pi/h)*(pi/h));
writeln('Коэффициент формы k=',k);
{ Коэффициент теплопроводности alfa }
alfa:=k*m;
writeln('Коэффициент теплопроводности alfa=',alfa);
writeln;
writeln('Изменение средней температуры с течением времени');
writeln('Вы можете найти в файле с вашим именем');
Writeln('Он находится в папке с данной программой.');
```

```

assign(G,name+'.txt');
rewrite(g);
  writeln(G,'Время, сек.          Температура, град. Цельсия');
  for t:=1 to 120 do writeln(G,t*75,'-----',Tsrednee[t]);
writeln(g,"");
close(g);

assign(G1,name);
rewrite(g1);
  Writeln(g1,'Темп охлаждения m=',m,' 1/c');
  writeln(g1,'Коэффициент формы k=',k,' кв. метр.');
```

```

  writeln(g1,'Коэффициент теплопроводности alfa=',alfa,'
кв. метр/сек.');
```

```

readln;
end.
```

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗЛУЧЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ НИХРОМОВОЙ ПЛАСТИНЫ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО ТЕПЛООБМЕНА.

Цель работы: экспериментальное определение коэффициента излучения поверхности нихромовой пластины в условиях одновременного действия процесса излучения и свободного конвективного теплообмена в неограниченном пространстве.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ.

Элемент, коэффициент излучения которого надо определить, находится в замкнутом, заполненном воздухом пространстве. В этом случае одна из поверхностей облекает другую. При стационарном режиме теплообмена температура T поверхности F излучающего элемента и температура T_n облекающей его поверхности помещения F_n постоянны. Отношение поверхностей $F/F_n \rightarrow 0$.

Теплообмен между поверхностями F и F_n разделен на процессы:

- а) лучистого теплообмена через воздушную среду, практически прозрачную для тепловых лучей;
- б) передачи тепла с помощью теплоносителя (воздуха) за счет свободного конвективного теплообмена.

Следовательно, баланс энергии при теплообмене, когда $T > T_n$ может быть выражен уравнением:

$$Q_{\text{э}} = Q_{\text{н}} + Q_{\text{к}} \quad \text{Вт}, \quad (3.1)$$

где $Q_{\text{э}}$ — электрическая мощность, идущая на обеспечение стационарного теплового режима пластины при температуре T , $Вт$;

$Q_{\text{и}}$ — лучистый поток, переданный пластиной облегающему ее телу в результате взаимного лучистого теплообмена, $Вт$;

$Q_{\text{к}}$ — тепловой поток, снятый воздухом с поверхности горячей пластины посредством свободного конвективного теплообмена для передачи его холодной поверхности облегающего тела, $Вт$.

Для случая определения коэффициента излучения, когда одна из поверхностей излучения облекает другую, расчетная формула используется в виде:

$$Q_{\text{и}} = \varepsilon_{\text{пр}} c_0 F [(T/100)^4 - (T_n/100)^4] \text{ Вт}, \quad (3.2)$$

где c_0 — коэффициент излучения абсолютно черного тела;

$$c_0 = 5,668 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{К}^4);$$

$\varepsilon_{\text{пр}}$ — приведенная степень черноты системы поверхностей пластины и облегающего ее тела.

Для подобной схемы:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon} + \frac{F}{F_n} \left(\frac{1}{\varepsilon_n} - 1 \right)}. \quad (3.3)$$

Так как у нас $F/F_n \rightarrow 0$, то $\varepsilon_{\text{пр}} = \varepsilon$. Тогда формула (3.2) может быть представлена как:

$$\varepsilon = \frac{Q_{\text{и}}}{c_0 F [(T/100)^4 - (T_n/100)^4]}, \quad (3.5)$$

$$c=c_0\varepsilon=5,668\cdot\varepsilon, \text{ Вм}/(\text{м}^2\text{К}^4). \quad (3.6)$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ T ПОВЕРХНОСТИ НАКАЛЕННОГО ТЕЛА.

По мере возрастания температуры любого накаливаемого тела яркость его свечения увеличивается, а цвет изменяется, так как изменяется процентное соотношение лучей различных длин волн, испускаемых телом и определяющих цвет излучения.

В работе используется оптический метод определения температуры T поверхности накаливаемого тела.

В оптическом пирометре с исчезающей нитью помещен эталон яркости (пирометрическая лампочка), для которого заранее способом сравнения с искусственным абсолютно черным телом установлена зависимость яркости от температуры. Доведя яркость нити эталона изменением тока накала до совпадения с яркостью накаливаемого тела (воспринимаемое наблюдателем как исчезновение нити лампы на фоне накаливаемого тела), получаем равенство монохроматических яркостей.

Черной температурой тела называется такая условная температура, которую должно иметь данное тело, чтобы испускаемое им излучение было черным. При сравнении яркостей монохроматических излучений данного тела и абсолютно черного тела температура $T_{\text{я}}$ носит название яркостной.

Следовательно, получив в работе равенство монохроматических яркостей накаливаемого тела и нити эталона пирометра, определена яркостная температура $T_{\text{я}}$ тела.

Черное тело представляет собой воображаемый идеальный излучатель, развивающий, развивающий наибольшую возможную при данной температуре мощность излучения. Если же реальное тело излучает одинаковую с черным телом энергию,

то его действительная температура T должна быть выше черной температуры $T_{\text{я}}$.

Если известно отношение монохроматических яркостей реального и абсолютно черного тела, т.е. известна монохроматическая (спектральная) степень черноты ε_{λ} , для выбранного цвета излучения и нужного интервала температур, то можно расчетом перейти от яркостной температуры $T_{\text{я}}$ к действительной температуре T поверхности нагретого тела.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА Q_K , ОТДАННОГО НАГРЕТОЙ ПЛАСТИНОЙ ПОСРЕДСТВОМ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА.

Лучистый поток $Q_{\text{и}}$, входящий в формулу (3.5), может быть найден из уравнения баланса (3.1), после определения теплового потока Q_K отданного пластиной конвективно, и электрической мощности $Q_{\text{э}}$, подсчитанной по силе тока и омическому сопротивлению пластины при температуре ее нагрева. Тепловой поток Q_K определяется формулой Ньютона:

$$Q_K = \alpha(t - t_n)F, \text{ Вт}, \quad (3.7)$$

где α — коэффициент теплоотдачи от нагретой пластины к охлаждающему ее воздуху, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

t — температура поверхности нагретой пластины, $^{\circ}\text{C}$

t_n — температура окружающего воздуха вдали от нагретой пластины, $^{\circ}\text{C}$;

F — полная поверхность пластины между токоподводами, м^2 .

В нашем случае процесс свободной конвекции протекает в неограниченном пространстве, когда движение нагреваемого газа у горячей поверхности происходит вдали от движения газа, вызываемого охлаждением его части у холодной поверхности, и эти движения не влияют друг на друга. Определение

коэффициента теплоотдачи α , входящего в уравнение (3.7), производится из критериального уравнения:

$$Nu_m = \frac{\alpha l}{\lambda_m} = c(Gr \cdot Pr)_m^n \quad (3.8)$$

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ.

На рис. 3.1 представлена схема установки для определения коэффициента излучения поверхности нихромовой пластины в условиях сложного теплообмена (излучения и конвекции).

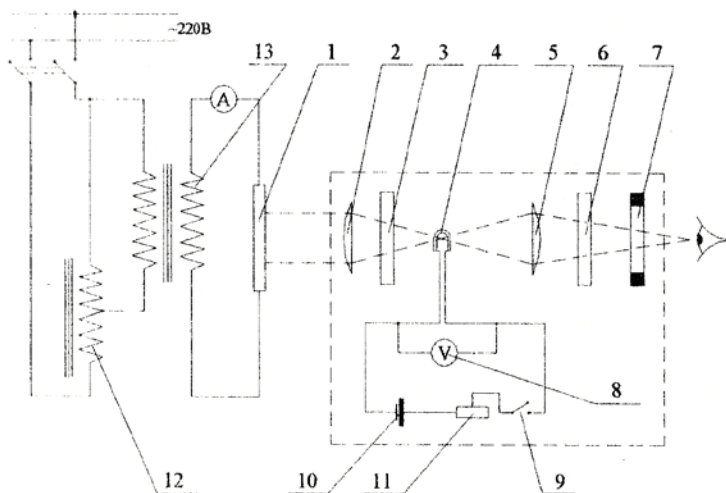


Рис 3.1

Исследуемая пластина 1 подключена к вторичной обмотке трансформатора 13 с помощью стоек-токоподводов. Мощность электрического тока, расходуемая на нагрев пластины до заданного температурного режима, регулируется автотрансформатором 12. Сила тока в цепи вторичной обмотки трансформатора определяется показанием амперметра А. Температура нагретой пластины определяется оптическим пирометром, который состоит из следующих основных элементов:

1) оптической системы, состоящей из объектива 2, окуляра 5 и монохроматического (красного светофильтра) 6, позволяющего рассматривать в лучах определенного цвета нить лампы 4 на фоне раскаленного тела 1 и поглощающих стекол 3;

2) пирометрической лампочки 4, включенной в электрическую схему последовательно с аккумулятором 10 и реостатом 11 для регулирования тока накала нити лампы и служащей эталоном измеряемой яркостной температуры;

3) электроизмерительного показывающего прибора 8, реагирующего на изменение напряжения и силы тока пирометрической лампы, изменяющихся в зависимости от сопротивления нити лампы, а следовательно и от температуры. Шкала прибора 8 градуирована в градусах яркостной температуры накаливаемого тела. Предусмотрен выключатель питания 9.

ПРОВЕДЕНИЕ ОПЫТА.

С помощью автотрансформатора устанавливается мощность электрического тока, необходимая для нагрева поверхности нихромовой пластины до ее яркостной температуры $t_{\text{я}} = 900-1000$ °С. Нить пирометрической лампы пирометра следует совмещать с серединой пластины, где продольный градиент температуры ближе всего к нулю, т. е. где тепловые потери за счет теплопроводности от пластины в токопроводы практически

равны нулю, а температура поверхности определяется энергией излучения и конвективным теплообменом.

Установление температурного режима пластины ведется постепенным увеличением мощности электрического тока при одновременном наблюдении за повышением яркостной температуры пластины с помощью оптического пирометра. По достижении фотометрического равновесия, воспринимаемого наблюдателем как исчезновение нити лампы 4 на фоне накаливаемого тела 1, производится отчет яркостной температуры $t_{я}$ объекта измерения и запись показания амперметра. Наступление стационарного теплового режима пластины можно принять с момента, когда три последовательных замера приборов (через 2-3 мин. каждый) не дадут практического расхождения.

В работе определяется коэффициент излучения c на одном режиме действительной температуры t излучающей поверхности нихромовой пластины.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТА.

В исходных данных приведены необходимые размеры нихромовой пластины:

- а) длина трех ребер a, b, c , м;
- б) площадь поперечного сечения $S = a \cdot b$, мм²;
- в) полная излучающая поверхность $F = 2(a + b) \cdot c$, м².

1. Определяется яркостная температура $t_{я}$ °С поверхности нагретой нихромовой пластины.

2. Определяется действительная температура t °С поверхности нагретой нихромовой пластины в зависимости от ее яркостной температуры по табл. 3.1; приближенно принимается, что спектральная степень черноты $\epsilon_{\lambda} = 0,66$ мк = 0,6.

Таблица 3.1.

Зависимость действительной температуры от яркостной при различных значениях ε_λ (температуры вычислены для значений $\lambda=0,66$ мк и $c_2=14380$ мк·К)

Спектральная степень черноты	Измеренные яркостные температуры, °С				
	800	900	1000	1100	1200
0,35	860	970	1080	1200	1310
0,60	830	930	1040	1150	1250
0,90	810	910	1010	1110	1210

Спектральная степень черноты	Измеренные яркостные температуры, °С				
	1300	1400	1600	1800	2000
0,35	1430	1550	1790	2030	2280
0,60	1360	1470	1690	1910	2150
0,90	1310	1410	1620	1820	2030

В красных лучах с $\lambda=0,66$ мк для сплавов нихрома Х20Н80 будет $\varepsilon_\lambda=0,35$, а для окисла на поверхности $\varepsilon_\lambda=0,90$.

3. Для расчета принимаем уравнение баланса энергии (3.1):

$$Q_{\Sigma} = Q_H + Q_K,$$

поскольку с достаточной для практики точности можно допустить, что тепловой поток, отданный за счет теплопроводности в токоподводы, $Q_n=0$.

4. Тепловой поток, отданный нагретой пластиной при свободном конвективном теплообмене в неограниченном объеме, находится из уравнения (3.7):

$$Q_k = \alpha(t - t_n)F, \text{ Вт.}$$

5. Определяется критерий Нуссельта для нахождения коэффициента теплоотдачи α по формуле (3.8):

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

где $(Gr \cdot Pr)$ — произведение критериев Грасгофа и Прандтля;
 c и n — коэффициент и показатель степени, которые определяются в зависимости от значения произведения $(Gr \cdot Pr)_m$;
 m — индекс, указывающий определяющую температуру, по которой находят физические параметры критериев.

В качестве определяющей температуры принята средняя температура t_m :

$$t_m = \frac{1}{2}(t + t_n), \text{ } ^\circ\text{C.} \quad (3.9)$$

Значение критерия Грасгофа находится из формулы:

$$Gr = \beta \frac{gl^3}{\nu^2} \Delta t, \quad (3.10)$$

g — ускорение силы тяжести: $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;

l — определяющий размер (в данном случае свободный конвективный теплообмен развивается вдоль вертикально расположенной большей стороны b поперечного сечения пластины) $l = b$, м;

Δt — температурный напор:

$$\Delta t = t - t_n, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.11)$$

ν — коэффициент кинематической вязкости воздуха, $\text{м}^2/\text{с}$;

β — коэффициент объемного расширения воздуха, 1/К:

$$\beta = 1/T_m, \quad (3.12)$$

T_m — средняя температура, К;

Значения коэффициента ν и критерия Pr для воздуха находятся по температуре t_m из табл. 3.2. Далее определяется произведение $(Gr \cdot Pr)_m$. Значения c и n в уравнении (3.8) являются функцией аргумента $(Gr \cdot Pr)_m$ и приведены в табл. 3.3. Найдя все величины, определяющие значение критерия Нуссельта, его величину можно рассчитать по формуле (3.8).

Таблица 3.2.
Физические параметры сухого воздуха при $P = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$

$t, ^\circ\text{C}$	ρ кг/м ³	c_p кДж/кгК	$\lambda \cdot 10^2$ Вт/мК	$\alpha \cdot 10^6$ м ² /с	$\mu \cdot 10^6$ Нс/м	$\nu \cdot 10^6$ м ² /с	Pr
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,18	0,688
300	0,615	1,047	4,60	71,6	29,7	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	81,9	31,4	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	93,1	33,0	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	115,3	33,2	79,38	0,687
600	0,404	1,114	6,22	138,3	39,1	96,89	0,699
700	0,362	1,135	6,71	163,4	41,8	115,4	0,706
800	0,329	1,156	7,18	188,8	44,3	134,8	0,713

Таблица 3.3.

Значения c и n в зависимости от величины комплекса $(Gr \cdot Pr)_m$

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

6. Определяется коэффициент теплоотдачи α между нагретой пластиной и окружающим холодным воздухом из формулы (3.8):

$$\alpha = Nu_m \frac{\lambda_m}{l}, \quad (3.13)$$

где λ_m — коэффициент теплопроводности воздуха (берется для воздуха по температуре t_m из табл. 3.2). Далее по формуле (3.7) определяется тепловой поток Q_K .

7. Электрическая мощность $Q_{\text{э}}$, идущая на обеспечение стационарного теплового режима пластины при температуре t , находится по формуле:

$$Q_{\text{э}} = I^2 r, \text{ Bm}, \quad (3.14)$$

где I — сила тока, А;

r — сопротивление пластины, Ом.

Сопротивление пластины определяется по формуле

$$r = \frac{\rho_t l}{S}, \text{ Ом}, \quad (3.15)$$

где l — длина пластины между токоподводами ($l=c$), м;
 S — площадь поперечного сечения пластины ($S=a \cdot b$), мм²;
 ρ_t — удельное сопротивление пластины при температуре опыта, Ом·мм²/м; удельное сопротивление материала пластины (нихрома) при ее температуре t определяется по формуле

$$\rho_t = \rho_0(1 + \alpha_p t), \quad (3.16)$$

здесь ρ_0 — удельное сопротивление нихрома при температуре 0 °С:

$$\rho_0 = 0,9 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м};$$

α_p — температурный коэффициент сопротивления:
 $\alpha_p = 0,00017 \text{ 1/К};$

t — средняя температура пластины (принимаем равной температуре ее поверхности), °С.

Таблица 3.4

ФОРМА ПРОТОКОЛА

Материал излучающей пластины:

Геометрические размеры: $a = \dots \text{ м}; b = \dots \text{ м}; c = \dots \text{ м}; F = \dots \text{ м}^2; S = \dots \text{ м}^2$

Номер режима	Номер измерения	Измерение			Расчет				
		$t_{\text{п}}$ °С	I А	$t_{\text{я}}$ °С	t °С	t_m °С	Pr_m	Gr_m	$(Gr \cdot Pr)_m$
1	1								
	2								
	3								
Среднее значение									

Номер режима	Номер измерения	Расчет							
		c	n	Nu_m	α $Вт/м^2К$	Q_K $Вт$	r , $Ом$	$Q_{Э}$ $Вт$	$Q_{И}$ $Вт$
1	1								
	2								
	3								
Среднее значение									

Номер режима	Номер измерения	Расчет			
		$(T/100)^4$, $К^4$	$(T_{II}/100)^4$, $К^4$	ε	c , $Вт/м^2К^4$
1	1				
	2				
	3				
Среднее значение					

Номер режима	Номер измерения	Расчет	
		$Q_{II}/Q_{Э} \cdot 100\%$	$Q_K/Q_{Э} \cdot 100\%$
1	1		
	2		
	3		
Среднее значение			

8. Лучистый поток находится из уравнения (3.1):

$$Q_{II} = Q_{Э} - Q_K.$$

9. Интегральная или средняя степень черноты и коэффициент излучения поверхности нихрома определяется из формул (3.5) и (3.6):

$$\varepsilon = \frac{Q_{И}}{c_0[(T/100)^4 - (T_n/100)^4]},$$

$$c = c_0 \cdot \varepsilon, \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$$

10. Определяются доли располагаемой электрической мощности Q_{Σ} , которые пошли на излучение и конвективный теплообмен при температуре пластины:

$$\frac{Q_{И}}{Q_{\Sigma}} \cdot 100\%, \quad (3.17)$$

$$\frac{Q_{К}}{Q_{\Sigma}} \cdot 100\%, \quad (3.18)$$

11. Составляется отчет о работе. В отчете необходимо представить: схему установки, краткую методику работы, данные измерений и результаты их обработки, занесенные в тетрадь лабораторных работ по форме протокола, указанной в табл. 3.4.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется сложным теплообменом?
2. Что такое абсолютно черное, белое, прозрачное тело?
3. Объясните отличие излучения реальных физических тел от излучения абсолютно черного тела.
4. Что такое серое тело и чем оно отличается от абсолютно черного тела?

5. Что такое монохроматическая степень черноты реального тела и в чем ее отличие от интегральной степени черноты серого тела?
6. Что такое яркостная температура тела и каков принцип действия оптического пирометра?
7. Каков физический смысл критериев Nu , Gr , Pr ? Что такое определяющая температура? Что дает представление искомой функции в форме критериальной зависимости?

Проведение данной лабораторной работы возможно также в электронном виде на ПК.

Программа составлена на языке Pascal:

```

program Teploperedacha Lab 3;
uses crt;
var
a,b,c,S,F: real;
M1: array[1..10,1..4] of integer;
M2: array[1..4,1..9] of real;
N1,N2,x: integer;
Tja,range,Td,Tm,dT,beta,lambda,nu,Pr,k,Gr,cc,n: real;
epsilonL,alpha,Qk,r,I,Qe,Qi,epsilon,c1,QiQe,QkQe: real;
Rez: text; name: string;
begin
ClrScr;
write('Введите свою фамилию - '); readln(name);

assign(rez,name);
rewrite(rez);
writeln(rez,'-pè-xl èlîfхэлр ',name);
writeln(rez,'');
randomize;
writeln;

{Ввод исходных          данных}

```



```

write('Введите длину ребра "a" в метрах - '), readln(a);
write('Введите длину ребра "b" в метрах - '), readln(b);
write('Введите длину ребра "c" в метрах - '), readln(c);
write('Введите силу тока в пластине "I", A - '); readln(I);

```

```

writeln(rez,'длина ребра "a", метр = ',a);
writeln(rez,'длина ребра "b", метр = ',b);
writeln(rez,'длина ребра "c", метр = ',c);
writeln(rez,'сила тока в пластине, ампер = ',I);
writeln(rez,"");
{Площадь поперечного сечения}
S:=a*b;
writeln(rez,'Площадь поперечного сечения, м.кв = ',S);
{Полная излучающая поверхность}
F:=2*(a+b)*c;
writeln(rez,'Полная излучающая способность, м.кв = ',F);
writeln(rez,"");
{Создание массива Яркость - Действительная температура}
M1[01,01]:=800;
M1[02,01]:=900;
M1[03,01]:=1000;
M1[04,01]:=1100;
M1[05,01]:=1200;
M1[06,01]:=1300;
M1[07,01]:=1400;
M1[08,01]:=1600;
M1[09,01]:=1800;
M1[10,01]:=2000;
M1[01,02]:=860;
M1[02,02]:=970;
M1[03,02]:=1080;
M1[04,02]:=1200;
M1[05,02]:=1310;
M1[06,02]:=1430;
M1[07,02]:=1550;
M1[08,02]:=1790;
M1[09,02]:=2030;
M1[10,02]:=2280;
M1[01,03]:=830;
M1[02,03]:=930;
M1[03,03]:=1040;

```

```

M1[04,03]:=1150;
M1[05,03]:=1250;
M1[06,03]:=1360;
M1[07,03]:=1470;
M1[08,03]:=1690;
M1[09,03]:=1910;
M1[10,03]:=2150;
M1[01,04]:=810;
M1[02,04]:=910;
M1[03,04]:=1010;
M1[04,04]:=1110;
M1[05,04]:=1210;
M1[06,04]:=1310;
M1[07,04]:=1410;
M1[08,04]:=1620;
M1[09,04]:=1820;
M1[10,04]:=2030;

```

{Определение яркостной температуры с помощью случайного числа

Номер элемента массива – N}

```
range:=9;
```

```
N1:=round(800+1200*random);
```

```
Tja:=N1;
```

```
Write('Яркостная температура Тя=',Tja,' гр.цельсия'); readln;
```

```
{Определение спектральной степени черноты – epsilonL}
```

```
N2:=round(1+2*random);
```

```
if N2=1 then epsilonL:=0.35;
```

```
if N2=2 then epsilonL:=0.60;
```

```
if N2=3 then epsilonL:=0.90;
```

```
write('Спектральная степень черноты - ',epsilonL);readln;
```

```
Writeln(rez,'Яркостная температура Тя = ',Tja,'гр. цельсия');
```

```
{Определяем действительную температуру Td}
```

```
x:=1;
```

```
while (x<=9) do
```

```
begin
```

```
if Tja>=M1[x,1] then
```

```
if Tja<=M1[x+1,1] then
```

```
begin
```

```
k:=(M1[x+1,N2]-M1[x,N2])/(M1[x+1,1]-M2[x,1]);
```

```
Td:=M1[x,N2]+k*(Tja-M2[x,1]); end;
```

```

x:=x+1;
end;

writeln(rez,'Действительная температура = ',Td,' гр. цельсия');
{Определяющая температура - средняя температура Tm}
Tm:=(20+Td)/2;
writeln(rez,'Определяющая (средняя) температура tm = ',Tm,' гр. цельсия');
{Температурный напор dT}
dT:=Td-20;
writeln(rez,'Действительная температура Tд = ',dT,' гр. цельсия');
{Коэффициент объемного расширения воздуха – beta}
beta:=1/Tm;
writeln(rez,'Коэффициент объемного расширения = ',beta,' 1/K');
writeln(rez,"");
{Массив зависимости от средней температуры Tm - коэффициента
теплопроводности,
кинематической вязкости, числа Прандтля Pr}
M2[1,1]:=50;
M2[1,2]:=100;
M2[1,3]:=300;
M2[1,4]:=350;
M2[1,5]:=400;
M2[1,6]:=500;
M2[1,7]:=600;
M2[1,8]:=700;
M2[1,9]:=800;
M2[2,1]:=283;
M2[2,2]:=321;
M2[2,3]:=460;
M2[2,4]:=491;
M2[2,5]:=521;
M2[2,6]:=574;
M2[2,7]:=622;
M2[2,8]:=671;
M2[2,9]:=718;
M2[3,1]:=17950000;
M2[3,2]:=23180000;
M2[3,3]:=48330000;
M2[3,4]:=55460000;
M2[3,5]:=63090000;
M2[3,6]:=79380000;

```

```

M2[3,7]:=96890000;
M2[3,8]:=115400000;
M2[3,9]:=134800000;
M2[4,1]:=0.689;
M2[4,2]:=0.688;
M2[4,3]:=0.674;
M2[4,4]:=0.676;
M2[4,5]:=0.678;
M2[4,6]:=0.687;
M2[4,7]:=0.699;
M2[4,8]:=0.706;
M2[4,9]:=0.713;

```

{Получение параметров массива по заданой T_m }

```

if  $T_m < M2[1,1]$  then
begin
lambda:=M2[2,1];
nu:=M2[3,1];
Pr:=M2[4,1]; end;

```

```

if  $T_m > M2[1,9]$  then
begin
lambda:=M2[2,9];
nu:=M2[3,9];
Pr:=M2[4,9]; end;

```

```

x:=1;
while (x<=8) do
begin
if  $T_m > M2[1,x]$  then
if  $T_m < M2[1,x+1]$  then
begin
k:=(M2[2,x+1]-M2[2,x])/(M2[1,x+1]-M2[1,x]);
lambda:=M2[2,x]+k*( $T_m - M2[1,x]$ );
k:=(M2[3,x+1]-M2[3,x])/(M2[1,x+1]-M2[1,x]);
nu:=M2[3,x]+k*( $T_m - M2[1,x]$ );
k:=(M2[4,x+1]-M2[4,x])/(M2[1,x+1]-M2[1,x]);
Pr:=M2[4,x]+k*( $T_m - M2[1,x]$ ); end;
x:=x+1;
end;

```

```
writeln(rez,'Коэффициент теплопроводности воздуха при данной температуре
=' ,lambda,' Вт/мК');
writeln(rez,'Коэффициент кинематической вязкости воздуха = ',nu,' м. кв/с');
writeln(rez,'Критерий Прандтля Pr = ',Pr);
```

```
{Значение критерия Грасгофа}
Gr:=beta*dT*9.81*b*b/nu/nu;
writeln(rez,'Критерий Грасгофа Gr = ',Gr);
{Значения с и n в зависимости от величины комплекса (Gr*Pr)}
if Gr*Pr<2000000000000.0 then
begin
cc:=1.8;
n:=1/8;
end;
if Gr*Pr<20000000.0 then
begin
cc:=0.54;
n:=1/4;
end;
if Gr*Pr<500.0 then
begin
cc:=0.135;
n:=1/3;
end;
writeln(rez,'Коэффициент с = ',cc);
writeln(rez,'Показатель степени n = ',n);
```

```
{Определяем критерий Nu}
Nu:=cc*exp(n*ln(Gr*Pr));
writeln(rez,'Критерий Нуссельта Nu = ',Nu);
{Определение коэффициента теплоотдачи alfa }
alpha:=Nu*lambda/b;
writeln(rez,'Коэффициент теплоотдачи альфа = ',alpha);
{ Конвективный тепловой поток }
Qk Qk:=alpha*F*(Td-20);
writeln(rez,'Конвективный тепловой поток = ',Qk,' Вт');
{Сопrotивление пластины r }
r:=c/S*0.0000009*(1+Td*0.00017);
writeln(rez,'Сопrotивление пластины = ',r,' Ом');
{Электрическая мощность Qe}
Qe:=I*I*r;
```

```

writeln(rez,'Электрическая мощность Qэ = ',Qe,' Вт');
{ Лучистый поток Qi }
Qi:=Qe-Qk;
writeln(rez,'Лучистый тепловой поток Qi = ',Qi,' Вт');
{ Интегральная или средняя степень черноты }
epsilon:=Qi/(5.668*(exp(4*(ln(Td/100)))-exp(4*(ln(20/100)))));
writeln(rez,'Интегральная (средняя) степень черноты = ',epsilon);
{ Коэффициент излучения поверхности c1 }
c1:=5.668*epsilon;
writeln(rez,'Коэффициент излучения поверхности нихрома c = ',c1,'
Вт/(м^2*К^4)');

{ Определяем доли располагаемой электрической мощности Qe, которые
пошли на излучение и конвективный теплообмен при температуре пластины
}
QiQe:=Qi/Qe*100;
QkQe:=Qk/Qe*100;
writeln(rez,'Qш/QS=',QiQe);
writeln(rez,'Qъ/QS=',QkQe);
writeln;
writeln('Полученных результатов и исходных данных достаточно для
проведения');
writeln('расчетов по лабораторной работе. ');
writeln;
writeln('Для выхода нажмите любую кнопку. ');
readln;
close(rez);
end

```

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СЛОЯ

Цель работы: изучение методики экспериментального определения коэффициента теплопроводности изоляционных

материалов и приобретение навыков проведения теплотехнического эксперимента.

ЗАДАНИЕ

1. Определить значение среднего коэффициента теплопроводности исследуемого материала при трех температурных режимах.
2. Построить график зависимости коэффициента теплопроводности от средней температуры материала.
3. Оценить погрешность полученных экспериментальных результатов.
4. Составить отчет по выполненной работе.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

По закону Фурье плотность теплового потока в процессе кондукции в твердом теле определяется величинами температурного градиента и коэффициента теплопроводности, т.е.

$$q = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right), \text{ Вт/м}^2, \quad (4.1)$$

где λ - коэффициент теплопроводности, характеризующий способность различных веществ проводить теплоту. Он численно равен количеству теплоты, переносимой кондукцией через 1 м^2 изотермической поверхности в секунду при градиенте температуры 1 К/м .

Коэффициент теплопроводности, таким образом, зависит от температуры, давления и рода вещества, а для изоляционных материалов на его величину также существенно влияют пористость и влажность.

Градиент температуры характеризует направление максимального изменения температуры в температурном поле. Температурное поле в сплошных средах описывается дифференциальным уравнением теплопроводности и условиями однозначности, характеризующими тепловое взаимодействие рассматриваемого тела с окружающей средой. Для данного случая дифференциальное уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (4.2)$$

где t – температура, °C; τ – время, с; x, y, z – прямоугольные координаты; $a = \lambda / c\rho$, м²/с, коэффициент температуропроводности материала; c, ρ – соответственно удельная теплоемкость и плотность материала в Дж/(кг·К) и кг/м³.

Решение уравнения (4.2) для бесконечно длинной цилиндрической стенки ($l \gg d$) при стационарных граничных условиях 1-го рода имеет вид

$$t = t_{c1} - (t_{c1} - t_{c2}) \frac{\ln(d/d_1)}{\ln(d_2/d_1)}, \quad ^\circ\text{C}, \quad (4.3)$$

или

$$t = t_{c1} - \frac{Q}{2\pi l \lambda} \cdot \ln\left(\frac{d}{d_1}\right), \quad ^\circ\text{C}, \quad (4.4)$$

где t_{c1}, t_{c2} – температура на внутренней и внешней поверхностях цилиндрической стенки, °C; d, d_1, d_2 – диаметры цилиндрической стенки соответственно для произвольной, внутренней и внешней цилиндрических поверхностей; l – длина цилиндрической стенки, м; Q – тепловой поток через стенку, Вт.

Из уравнения (4.4) следует, что если в процессе эксперимента измерить тепловой поток Q , проходящий через цилиндрическую стенку заданных размеров (d_1 , d_2 , l) и температуру двух произвольных цилиндрических поверхностей стенки (например, внутренней и наружной) t_{c1} и t_{c2} при установившемся тепловом режиме, то можно вычислить средний коэффициент теплопроводности материала стенки:

$$\lambda = \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}{2\pi l(t_{c1} - t_{c2})}, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)} \quad (4.5)$$

Если определить зависимость коэффициента теплопроводности от температуры, то рассчитанное по формуле (4.5) значение λ следует отнести к средней температуре

$$\bar{t} = \frac{t_{c1} + t_{c2}}{2}, \text{ }^\circ\text{C}. \quad (4.6)$$

Если изменить тепловой поток Q , то соответственно изменится температурное поле в стенке. Это позволяет измерить коэффициент теплопроводности при различных температурах материала и получить его зависимость от температуры. Если зависимость по опытным данным оказывается в пределах погрешности эксперимента, то можно считать в пределах этой погрешности λ постоянной величиной. В противном случае зависимость коэффициента теплопроводности от температуры необходимо учитывать.

Схема экспериментального стенда показана на рис. 4.1.

Исследуемый образец материала 1 в форме полого цилиндра диаметром 40/27 мм и длиной $l = 1$ м плотно установлен на керамической трубке 2, внутри которой

расположен электрический нагреватель из нихромовой проволоки 3. На нагревательный элемент подается переменное напряжение через лабораторный автотрансформатор 4.

Электрическая мощность, подводимая к нагревательному элементу, измеряется методом амперметра-вольтметра. В стационарном состоянии поток теплоты, создаваемый нагревателем, полностью проходит радиально через исследуемый образец. За счет тепловой изоляции торцевые потери стенок у исследуемого образца сведены к нулю.

Температура внутренней поверхности образца измеряется тремя (хромель-копель) термопарами t_1 , t_2 и t_3 , а наружной – термопарами t_4 , t_5 и t_6 одной и той же градуировки. Значения температуры в °С считываются с цифрового прибора ТРМ 2, а переключение термопар осуществляется переключателем 5.

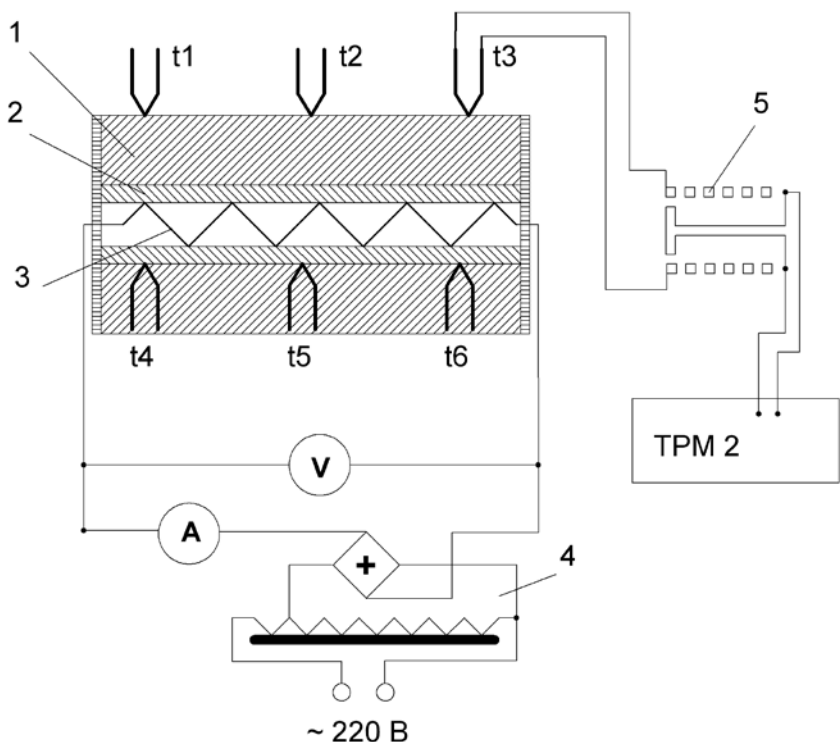


Рис. 4.1. Принципиальная схема установки

ПРОВЕДЕНИЕ ОПЫТОВ

Перед проведением опытов студенты должны подготовить протокол измерений. После проверки преподавателем готовности студентов разрешается приступить к проведению эксперимента.

Внимание: включение установки производится только лаборантом или преподавателем!

После подачи электрического напряжения на стенд устанавливается первый из заданных преподавателем режим работы. Так как опыты на стенде должны проводиться в стационарном режиме, то начало измерений должно

производиться не ранее 50 – 60 минут после установки заданного режима.

На установившемся режиме основные измерения производятся не менее трех раз по каждому прибору.

Внимание. Результаты измерений и их первичной обработки обязательно обсуждаются с преподавателем, после чего можно переходить к следующему режиму работы установки.

Рекомендуемая форма протокола измерений приведена в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Протокол результатов измерений

№ реж имо в	№ серии замеро в	I, А	U В	Показания термомпар °С					
				t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
1	1								
	2								
	3								
	среднее			\bar{t}_{c1}			\bar{t}_{c2}		
2	1								
	2								
	3								
	среднее			\bar{t}_{c1}			\bar{t}_{c2}		
3	1								
	2								
	3								
	среднее			\bar{t}_{c1}			\bar{t}_{c2}		

Тепловой поток через исследуемый образец определяется мощностью электрического нагревателя

$$Q = I \cdot U, \text{ Вт} \quad (4.7)$$

Среднее значение температуры на внутренней \bar{t}_{c1} и наружной \bar{t}_{c2} поверхностях образца определяется по формулам:

$$\bar{t}_{c1} = 0,33(t_1 + t_2 + t_3), \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (4.8)$$

$$\bar{t}_{c2} = 0,33(t_4 + t_5 + t_6), \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (4.9)$$

Средняя температура образца определяется по формуле

$$\bar{t} = 0,5(\bar{t}_{c1} + \bar{t}_{c2}), \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (4.10)$$

Среднее значение коэффициента теплопроводности материала при температуре \bar{t} рассчитывается по формуле (4.5).

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТОВ

Обработке подлежат результаты только тех измерений, которые получены в стационарном процессе теплопроводности.

По найденным значениям коэффициента теплопроводности строится график зависимости $\lambda = f(t)$.

Точность полученных экспериментальных значений коэффициента теплопроводности оценивается по предельной относительной погрешности результата:

$$\partial\lambda = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta(\bar{t}_{c1} - \bar{t}_{c2})}{\bar{t}_{c1} - \bar{t}_{c2}}, \quad (4.11)$$

где $\frac{\Delta I}{I}, \frac{\Delta U}{U}, \frac{\Delta L}{L}, \frac{\Delta(\bar{t}_{c1} - \bar{t}_{c2})}{\bar{t}_{c1} - \bar{t}_{c2}}$ - соответственно предельные относительные погрешности прямых измерений

тока, напряжения, длины и перепада температур; абсолютные погрешности приборов, $\Delta I, \Delta U, \Delta L, \Delta(\bar{t}_{c1} - \bar{t}_{c2})$, определяется исходя из класса точности прибора ε_{np} , если он не известен – то используют половину минимального деления шкалы измерения. Следует помнить, что в нашем случае, из-за небольшой разницы между \bar{t}_{c1} и \bar{t}_{c2} ,

$$\frac{\Delta(\bar{t}_{c1} - \bar{t}_{c2})}{\bar{t}_{c1} - \bar{t}_{c2}} = \frac{2\Delta t}{\bar{t}_{c1} - \bar{t}_{c2}}. \quad (4.12)$$

Абсолютная погрешность, которую дает прибор, определяется из выражения (на примере амперметра)

$$\Delta I = \frac{\varepsilon_{np}}{100\%} I_{np}, \quad (4.13)$$

где I_{np} – предельное значение шкалы прибора, А.

Результаты расчетов оформляются протоколом следующей формы:

Таблица 4.2

Протокол результатов вычислений

№ режима	I , А	U , В	Q , Вт	\bar{t}_{c1} , °С	\bar{t}_{c2} , °С	λ , Вт/(м·К)	$(\Delta\lambda / \lambda)$, 100%
1							
2							
3							

В отчете по лабораторной работе должны быть представлены:

1. Схема лабораторной установки.
2. Протоколы измерений и результатов.
3. График зависимости $\lambda = f(\bar{t})$.

4. Оценка предельной погрешности результатов измерений с указанием типов применяемых приборов и их точности.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дать определение температурного поля.
2. Изотермическая поверхность. Определение, примеры.
3. Что такое температурный градиент?
4. Коэффициент теплопроводности, его смысл и размерность?
5. Почему исследуемый в работе образец можно считать бесконечно длинным?
6. Тепловой поток, его смысл и размерность?
7. Граничные условия первого, второго и третьего рода.
8. Дифференциальное уравнение теплопроводности в общем виде.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЦИЛИНДРА ПРИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ В НЕОГРАНИЧЕННОМ ОБЪЕМЕ

Цель работы: углубление знаний по теории теплоотдачи при свободном движении жидкости – естественной конвекции в неограниченном объеме, ознакомление с методикой опытного исследования процесса и получение навыков экспериментирования.

В результате работы должны быть усвоены понятия свободного движения жидкости и зависимость коэффициента теплоотдачи от различных факторов.

ЗАДАНИЕ

1. Определить значение среднего коэффициента теплоотдачи для горизонтального цилиндра при свободном движении воздуха и установить его зависимость от температурного напора.
2. Обработать результаты опытов по средней теплоотдаче в обобщенном критериальном виде.
3. Построить зависимости $\alpha = f(\Delta t)$, $Nu = f(Ra)$.
4. Составить отчет о выполненной работе.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Свободное движение – движение, возникающее вследствие разности плотностей нагретых и холодных частиц жидкости. Подобное движение всегда возникает около тела, если температура этого тела отличается от температуры окружающей среды. Тогда в окружающей среде устанавливается неравномерное распределение температуры и свободное движение частиц жидкой или газообразной среды. По мере нагревания частицы жидкости или газа становятся легче и поднимаются вверх, а на их место поступают более холодные частицы. Теплота, воспринятая частицами жидкости или газа от тела, переносится в окружающую среду.

Количество перенесенной теплоты будет тем больше, чем больше скорость жидкости или газа, скорость тем больше, чем больше разность температур тела и окружающей его среды. Кроме того, интенсивность теплоотдачи зависит от теплофизических свойств среды, формы тела и положения его в пространстве.

В настоящей работе требуется установить влияние температурного напора на значение среднего коэффициента теплоотдачи от горизонтальной трубки к окружающему воздуху при свободной конвекции.

Средний коэффициент теплоотдачи определяется по соотношению

$$\alpha = \frac{Q_K}{(t_C - t_{ж})F}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (5.1)$$

где Q_K - тепловой поток от нагретого тела, передаваемый путем конвекции, Вт; F - площадь поверхности тела, м^2 ; t_C - температура поверхности тела, $^{\circ}\text{C}$; $t_{ж}$ - температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$.

На рис. 5.1. приведена схема лабораторной установки, которая состоит из стальной полированной трубки 1, внешним диаметром d и длиной l . Внутри трубки установлен электронагреватель 2. Напряжение и сила тока, потребляемая нагревателем, измеряются вольтметром 3 и амперметром 4. Регулирование электрической мощности нагревателя осуществляется автотрансформатором 5.

Геометрия трубки указана на стенде:

d – диаметр трубки – 25 мм;

l – длина трубки – 1000 мм.

Для измерения температурного поля на поверхности трубки вмонтировано шесть термопар типа хромель-копель. Значения температуры в $^{\circ}\text{C}$ считываются с цифрового прибора ТРМ 2, который подключается к термопарам через переключатель 6 типа ПМТ-12.

Ознакомившись с описанием установки и методикой измерений необходимо детально разобраться в электрической схеме обогрева трубки. Далее следует заготовить протокол для записи измеряемых величин $(U, I, t_1 - t_6)$ и проверить правильность подключения измерительных приборов.

После того, как установка подготовлена к работе и проверена исправность действий всех ее элементов, включают нагреватель.

До наступления стационарного режима мощность нагревателя поддерживают постоянной в течение 50 - 60 мин.

О наступлении стационарного режима свидетельствует постоянство показаний любой из шести термопар, установленных на внешней поверхности трубки.

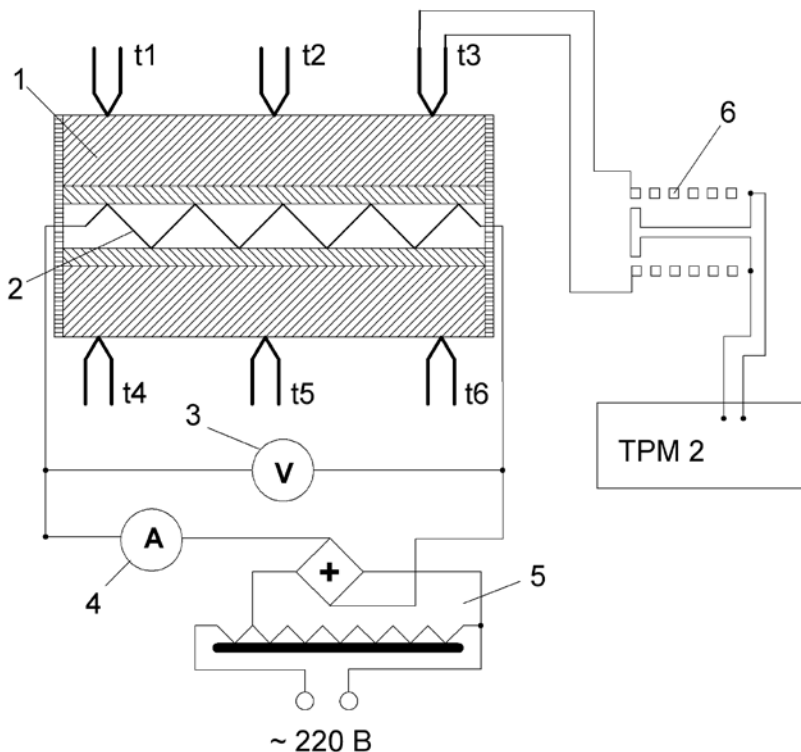


Рис. 5.1. Принципиальная схема установки

Все измерения при данном температурном режиме проводятся три раза через 3 - 5 мин. Всего исследуется три температурных режима.

Все измеренные величины заносятся в табл. 5.1 протокола измерений.

Таблица 5.1

Форма протокола измерений

№ опыта	U, В	I, А	Показания термомпар, °С						t _ж °С
			t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆	
1									
2									
3									

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТОВ

Определяется величина средней температуры по поверхности цилиндра (трубки) \bar{t}_c :

$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^6 t_i}{n}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (5.2)$$

где n - количество измерений.

Тепловой поток, передаваемый трубкой путем конвекции, определяется из равенства

$$Q_K = Q - Q_{\text{изл}}, \quad (5.3)$$

где Q - полный тепловой поток, который передается от нагревателя:

$$Q = U \cdot I, \text{ Вт.} \quad (5.4)$$

$Q_{\text{изл}}$ - поправка на тепловое излучение трубки, определяется по формуле

$$Q_{изл} = \varepsilon C_0 \left[\left(\frac{T_C}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{Ж}}{100} \right)^4 \right] \cdot F, \text{ Вт}, \quad (5.5)$$

где ε - степень черноты поверхности трубки, в диапазоне температуры $t = 40 \div 260$ °С - $\varepsilon = 0.07 \div 0.1$; $C_0 = 5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$ - коэффициент излучения абсолютно черного тела; F - площадь поверхности трубки, м^2 ; $T_{Ж}, T_C$ - абсолютная температура окружающей среды и поверхности трубки соответственно, К.

Результаты экспериментов представляются графически в виде зависимости $\alpha = f(\Delta t)$, где $\Delta t = t_c - t_{жс}$. Полученные результаты можно использовать и для других процессов, но необходимо экспериментальные данные обобщить и представить их в критериальном виде:

$$Nu = f(Ra). \quad (5.6)$$

Обычно это уравнение имеет вид

$$Nu = C \cdot Ra_{Ж}^n, \quad (5.7)$$

где C и n – экспериментальные постоянные;

$$Nu_{Ж} = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda_{Ж}} - \text{критерий Нуссельта};$$

$$Ra_{Ж} = Gr_{Ж} \cdot Pr_{Ж} - \text{критерий Релея};$$

$$Gr_{Ж} = \frac{g \beta_{Ж} \Delta t d^3}{\nu_{Ж}^2} - \text{критерий Грасгофа};$$

$$Pr_{жс} = \frac{\nu_{жс}}{a_{жс}} - \text{критерий Прандтля.}$$

Здесь d - диаметр трубки (определяющий размер), м; $\lambda_{жс}$ - коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К); g - ускорение свободного падения, м/с²; $\beta_{жс} = \frac{1}{273 - t_{жс}}$ - температурный коэффициент объемного расширения воздуха, К⁻¹; $\nu_{жс}$ - коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/с; $a_{жс}$ - коэффициент температуропроводности воздуха, м²/с.

Теплофизические свойства воздуха ($a_{жс}, \lambda_{жс}, \nu_{жс}$) определяются из табл. 5.2 при средней температуре воздуха $t = 0.5(t_{жс} + t_{с}), ^\circ\text{C}$.

Таблица 5.2

Теплофизические свойства сухого воздуха при $p = 0,0981$ МПа

$t, ^\circ\text{C}$	ρ кг/м ³	C_p КДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$ Вт/(м·К)	$a \cdot 10^6$ м ² /с	$\mu \cdot 10^6$ МПа·с	$\nu \cdot 10^6$ м ² /с	Pr
0	1,251	1,00	2,438	19,4	17,19	13,75	0,71
10	1,207	1,00	2,51	20,7	17,19	14,68	0,71
20	1,166	1,00	2,58	22,0	18,19	15,61	0,71
30	1,127	1,00	2,65	23,4	18,68	16,48	0,71
40	1,091	1,00	2,72	24,8	19,16	17,57	0,71
50	1,057	1,00	2,79	26,3	19,63	18,58	0,71
60	1,026	1,01	2,86	27,6	20,10	19,60	0,71
70	0,996	1,01	2,92	28,6	20,56	20,65	0,71
80	0,997	1,01	2,99	30,6	21,02	21,74	0,71

Результаты расчетов вносятся в протокол результатов, табл. 5.3.

Таблица 5.3

Форма протокола результатов

№ п/ п	$t_c,$ °C	$t_{жс},$ °C	$\Delta t = t_c - t_{жс},$ К	$Nu_{жс}$	$Ra_{жс}$	$\ln Nu_{жс}$	$\ln Ra_{жс}$
1							
2							
3							

Для определения постоянных коэффициентов C и n следует прологарифмировать критериальное уравнение (5.7);

$$\ln Nu_{жс} = \ln C + n \ln Ra_{жс} \quad (5.8)$$

По вычисленным значениям $\ln Nu_{жс}$ и $\ln Ra_{жс}$ строится зависимость $\ln Nu_{жс} = f(\ln Ra_{жс})$, которая в случае $C = const$ и $n = const$ является линейной.

Показатель степени n определяется как тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс; $n = \operatorname{tg} \omega = \Delta \ln Nu_{жс} / \Delta \ln Ra_{жс}$.

Константа C , для каждого опыта определяется из выражения

$$C = \frac{Nu_{жс}}{Ra_{жс}^n} \quad (5.9)$$

За окончательное значение коэффициента C принимается среднеарифметическое значение по результатам всех опытов.

Работа заканчивается построением критериального уравнения

$$Nu_{жс} = C \cdot Ra_{жс}^n. \quad (5.10)$$

ОТЧЕТ О РАБОТЕ ДОЛЖЕН СОДЕРЖАТЬ

1. Принципиальную схему установки.
2. Протокол измерений (табл. 5.1).
3. Обработку результатов эксперимента (табл. 5.2).
4. Графики зависимостей:

$$\alpha = f_1(\Delta t);$$

$$Nu_{жс} = f_2(Ra_{жс});$$

$$q = f_3(\Delta t).$$

5. Критериальное уравнение $Nu_{жс} = C \cdot Ra_{жс}^n$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое свободное движение?
2. Дать определение естественной конвекции?
3. От чего зависит количество теплоты, переносимое при естественной конвекции?
4. Физический смысл критерия Nu ?
5. Физический смысл критерия Gr ?
6. Физический смысл критерия Pr ?
7. Коэффициент теплоотдачи, физический смысл, формула, размерность?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОСТИ В ТРУБЕ

Цель работы: углубление знаний по теории теплоотдачи при течении жидкости в трубе, ознакомление с методикой экспериментального исследования процесса и получения навыков в проведении эксперимента.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Ламинарный режим течения в прямых трубах круглого поперечного сечения наблюдается при

$$Re = \frac{wd}{\nu} < 2300,$$

где w - скорость движения жидкости, м/с; d - внутренний диаметр трубы, м; ν - кинематический коэффициент вязкости жидкости, м²/с.

Режим развитого турбулентного течения устанавливается при $Re > 10^4$. Значение числа Рейнольдса в пределах от 2300 до 10000 соответствует переходному режиму течения.

На входе в трубу профили скорости и температуры жидкости изменяются: происходит формирование гидродинамического и теплового пограничных слоев. Эти участки трубы называют соответственно динамическим и тепловым начальными участками.

При ламинарном режиме течения длина начальных участков значительна, а при турбулентном - не превышает значения $5d$.

На начальном участке теплоотдача уменьшается по длине трубы, и $Nu_{жс} = \frac{\alpha d}{\lambda_{жс}}$ уменьшается (α - коэффициент теплоотдачи, $\lambda_{жс}$ - коэффициент теплопроводности жидкости).

Для очень длинных труб ($\frac{l}{d} > 50$ при турбулентном течении жидкости) влиянием начального участка на теплоотдачу можно пренебречь.

Наиболее точные значения среднего коэффициента теплоотдачи при турбулентном режиме течения могут быть получены по формуле

$$Nu_{жс} = \frac{\xi}{8} \cdot \frac{Re \cdot Pr_{жс} \cdot \psi}{1 + \frac{900}{Re} + 12,7 \left(Pr_{жс}^{2/3} - 1 \right) \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8}}}, \quad (6.1)$$

где $\xi = (1,82 \lg Re - 1,64)^{-2}$ - коэффициент сопротивления трению; $Pr_{жс}$ - критерий Прандтля жидкости; ψ - коэффициент, учитывающий влияние изменения свойств жидкости.

Для приближенных расчетов можно также воспользоваться уравнением

$$Nu_{жс} = 0,021 Re^{0,8} Pr_{жс}^{0,43} \psi, \quad (6.2)$$

При течении в трубе газообразного теплоносителя можно принять

$$\psi \approx 1.$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка (рис. 6.1) состоит из рабочего узла 1, газового счетчика 2, вентилятора 3 и электродвигателя 4.

Рабочий узел представляет собой трубу длиной $l = 1$ м внутренним диаметром $d_в = 18$ мм и наружным диаметром $d_н = 50$ мм, выполненную из материала с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 0,63 \frac{Вт}{м \cdot К}$ (строительный цементный раствор после затвердевания и длительной осушки). Снаружи на рабочий узел намотан электронагреватель 5 из нихромовой проволоки. Температура наружно поверхности трубы измеряется термопарами t_1 , t_2 и t_3 , температура внутренней поверхности - термопарами t_4 , t_5 и t_6 .

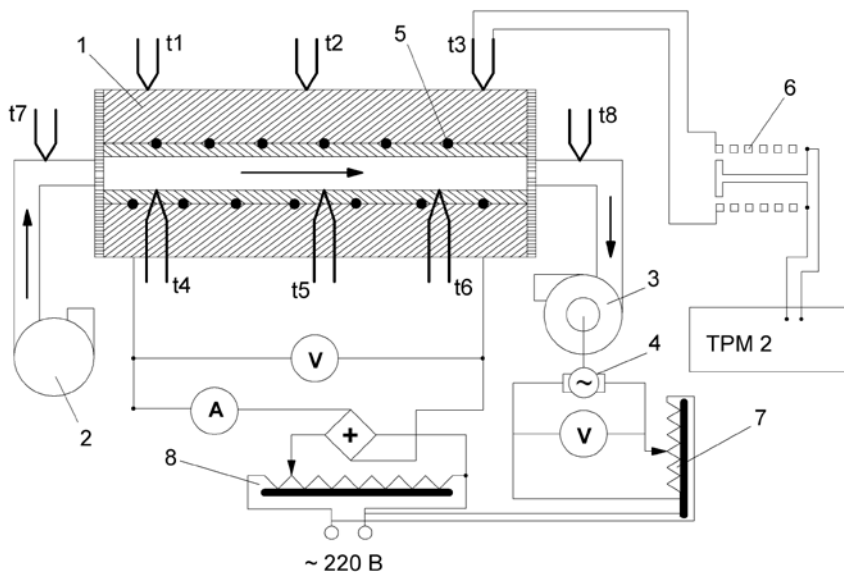


Рис. 6.1. Схема экспериментальной установки

Температура воздуха на входе в рабочий узел измеряется термопарой t_7 , на выходе – t_8 . Все термопары хромель-копелевые, подключены к цифровому прибору ТРМ 2 через многоточечный переключатель термопар 6.

Регулирование расхода воздуха через рабочий узел осуществляется изменением с помощью ЛАТРа 7 напряжения на клеммах электродвигателя 4 вентилятора 3. Аналогично ЛАТР 8 предназначен для регулирования мощности нагревателя 5.

ПРОВЕДЕНИЕ ОПЫТОВ

После ознакомления с описанием опытной установки, необходимо подготовить протокол для записи наблюдений, проверить правильность включения измерительных приборов и наличие льда в сосуде с холодными спаями термопар.

Затем производится включение установки. Вначале подается напряжение на клеммы электродвигателя, а после его запуска - на клеммы нагревателя.

Запись показаний приборов производится после выхода установки на стационарный режим (ориентировочное время прогрева рабочего узла - 1 час). Для определения расхода воздуха через рабочий узел определяется с помощью секундомера и газового счетчика время τ прокачки некоторого стандартного объема воздуха (рекомендуется $0,5 \text{ м}^3$).

В первом опыте рекомендуется подать на клеммы вентилятора напряжение 50 - 60 В, во втором - 80 - 90 В. Напряжение на клеммах нагревателя не должно превышать 200 В.

В конце каждого опыта необходимо провести измерение величины атмосферного давления P .

Таблица 6.1

Форма протокола эксперимента

№ опыта	P	τ	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8
	Па	с	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
1										
2										
3										

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТОВ

Вначале определяется режим движения газа

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

где ν - кинематический коэффициент вязкости воздуха при средней температуре

$$\bar{t} = \frac{t_7 + t_8}{2}, \text{ } ^\circ\text{C}$$

$W = \frac{4V}{\pi d_g^2}$ - скорость движения воздуха, м/с,

$V = \frac{0,5}{\tau} \left(\frac{\bar{t} + 273}{t_7 + 273} \right)$ - объемный расход воздуха, м³/с.

Массовый расход воздуха, кг/с,

$$G = V \cdot \rho,$$

где $\rho = \frac{P}{R(\bar{t} + 273)}$ - средняя плотность воздуха, кг/м³,

$R = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ - газовая постоянная воздуха.

Количество переданной воздуху теплоты, Вт,

$$Q = \frac{\pi(\bar{t}_n - \bar{t}_g) \cdot l}{\frac{1}{2\lambda_m} \cdot \ln \frac{d_n}{d_g}},$$

где $\bar{t}_n = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3}$ - средняя температура наружной стенки

трубы, °С,

$\bar{t}_g = \frac{t_4 + t_5 + t_6}{3}$ - средняя температура внутренней стенки

трубы, °С,

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \frac{Q}{(\bar{t}_g - \bar{t}) \pi d_g l}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Безразмерный коэффициент теплоотдачи

$$Nu_{жс} = \frac{\alpha d_g}{\lambda_{жс}},$$

где $\lambda_{ж}$ - коэффициент теплопроводности воздуха при температуре \bar{t} .

Все результаты расчетов заносятся в протокол (табл. 6.2).

Таблица 6.2

Форма протокола результатов

№ опыта	\bar{t}	$\bar{t}_в$	$\bar{t}_н$	G	W	Q	Re	α	$Nu_{ж}$		
	°C	°C	°C	кг/с	м/с	Вт		Вт/м ² К	По рез. опыта	формуле (6.1)	формуле (6.2)
1											
2											

В протокол результатов заносятся также результаты расчетов по формулам (6.1) и (6.2)

В завершение проводится проверка (расчет по уравнению теплового баланса)

$$Q = Gc_p(t_8 - t_7), \text{ Вт,}$$

где $c_p = 1005 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ - теплоемкость воздуха.

ОТЧЕТ О РАБОТЕ ДОЛЖЕН СОДЕРЖАТЬ

1. Принципиальную схему установки.
2. Протокол записи показаний приборов.
3. Протокол результатов опыта.
4. Сравнение результатов опыта с литературными данными.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Коэффициент теплоотдачи, его физический смысл и размерность?
2. Что такое безразмерный коэффициент теплоотдачи?
3. Дать определение гидродинамического пограничного слоя.
4. Дать определение теплового пограничного слоя.
5. От чего зависит количество теплоты, передаваемое при вынужденном движении жидкости (газа) в трубах?

Библиографический список.

1. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике. Под ред. проф. В. К. Кошкина. — М: Машгиз, 1975.

2. Экспериментальные исследования процессов теплообмена. Под ред. проф. В.К. Кошкина и доц. И.Н. Кутьрина. — М.: Учебное пособие МАИ, 1979.

3. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М., 1981.

Содержание

Введение

1. Лабораторная работа № 1. Определение коэффициента теплопроводности латуни методом стержня	2
2. Лабораторная работа № 2. Определение коэффициента температуропроводности твердых тел методом регулярного режима	14
3. Лабораторная работа № 3. Определение коэффициента излучения поверхности нихромовой пластины в условиях сложного теплообмена	32
4. Лабораторная работа № 4. Экспериментальное определение теплопроводности теплоизоляционных материалов методом цилиндрического слоя	60
5. Лабораторная работа № 5. Изучение теплоотдачи горизонтального цилиндра при свободной конвекции в неограниченном объёме	69
6. Лабораторная работа № 6. Исследование теплоотдачи при течении жидкости в трубе	77
7. Библиографический список	85

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине
«Теплопередача» по специальности 160700.65, 24.05.02
«Проектирование авиационных и ракетных двигателей» очной
формы обучения.

Составители: Шматов Дмитрий Павлович
Дахин Сергей Викторович
Тимошинова Татьяна Сергеевна

В авторской редакции

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический
университет»
394026 Воронеж, Московский пр., 14