

УДК 536.24 (075.8)

# **ТЕПЛОПЕРЕДАЧА**

## **СБОРНИК ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

Методические указания  
для студентов ФЭН всех форм обучения  
и всех направлений

НОВОСИБИРСК  
2018

Составили: канд. техн. наук, доц. *Ю.И. Шаров*,  
докт. техн. наук, проф. *П.А. Щинников*

Рецензент канд. техн. наук, доц. *О.В. Боруш*

Работа подготовлена на кафедре Тепловых  
электрических станций

© Новосибирский государственный  
технический университет, 2018 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Лабораторная работа № 1	
Определение теплопроводности материала методом цилиндрического слоя ..4	
Лабораторная работа № 2	
Определение степени черноты поверхности методом двух эталонов..... 9	
Лабораторная работа № 3	
Исследование свободно-конвективной теплоотдачи от горизонтального цилиндра к воздуху.....14	
Лабораторная работа № 4	
Исследование теплоотдачи к воздуху при вынужденной конвекции.....21	
Лабораторная работа № 5	
Электротепловая аналогия.....28	
Литература .....34	

## Лабораторная работа № 1

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛА МЕТОДОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СЛОЯ

**Теплопроводность** – это один из способов передачи теплоты от более нагретых элементов тела к менее нагретым. В газах теплопроводность осуществляется путем диффузии молекул и атомов; в жидкостях и твердых диэлектриках – за счет упругих волн; в металлах – путем диффузии свободных электронов.

Опыт показывает, что перенос теплоты зависит от распределения температуры в теле. Совокупность значений температур в объеме тела в данный момент времени определяется уравнением трехмерного температурного поля

$$t = f(x, y, z, \tau), \quad (1.1)$$

где  $x, y, z$  – координаты;  $\tau$  - текущее время.

При стационарном (установившемся) тепловом режиме  $\partial t / \partial \tau = 0$ , тогда для одномерного температурного поля  $\partial t / \partial y = \partial t / \partial z = 0$  и уравнение (1.1) принимает вид:

$$t = f(x). \quad (1.2)$$

**Градиент температуры** – это вектор, нормальный к изотермической поверхности и направленный в сторону возрастания температуры:

$$\frac{\partial t}{\partial n} = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta t}{\Delta n} \right) = \text{grad} t. \quad (1.3)$$

Удельный тепловой поток (плотность теплового потока), Вт/м<sup>2</sup>:

$$q = \frac{Q}{F} = \lambda \frac{\Delta t}{\Delta n}. \quad (1.4)$$

Здесь  $\lambda$  – теплопроводность среды, Вт/(м·К);  $\Delta t$  – падение температуры между изотермическими поверхностями, К;  $\Delta n$  – расстояние между изотермическими поверхностями, м.

Из формулы (1.4) теплопроводность, Вт/(м·К):

$$\lambda = \frac{Q}{F(\Delta t / \Delta n)}, \quad (1.5)$$

то есть, **физический смысл теплопроводности** – это теплота, переданная через единицу поверхности в единицу времени при падении температуры на 1 К на длине в 1 м. Она является физической характеристикой вещества и ее можно найти для конкретных материалов в справочных таблицах.

Теплопроводности разных сред значительно отличаются: для металлов  $\lambda = 10 \dots 400$  Вт/(м·К); для жидкостей –  $\lambda = 0,07 \dots 0,7$  Вт/(м·К); для газов –  $\lambda = 0,006 \dots 0,6$  Вт/(м·К). **Теплоизоляционным** называется материал, для которого  $\lambda \leq 0,25$  Вт/(м·К).

По закону Фурье, Вт/м<sup>2</sup>:

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n}. \quad (1.6)$$

Тепловой поток  $q$  также является векторной величиной. Знак «–» в законе Фурье означает противоположную направленность векторов теплового потока и градиента температуры.

В лабораторной работе теплопроводности материалов определяются методом цилиндрического слоя при стационарном тепловом режиме. Для этого исследуемый материал помещается между двумя металлическими цилиндрами длиной 300 мм и диаметрами  $d_1 = 10$  мм,  $d_2 = 40$  мм. Внутри меньшего цилиндра установлен электронагреватель. В установившемся режиме вся теплота  $Q$  проходит через цилиндрический слой материала, Вт:

$$Q = \frac{2\pi\lambda l(t_{\text{в}} - t_{\text{н}})}{\ln(d_2/d_1)}, \quad (1.7)$$

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Закрепление теоретических знаний по теплопроводности, практическое освоение метода цилиндрического слоя, проведение эксперимента и сопоставление полученных результатов со справочными данными.

## МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### 1.1. СХЕМА ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Схема установки приведена на рис. 1.2. Исследуемый слой материала 8 помещен между двумя коаксиальными металлическими трубами. Во внутренней трубе установлен электрический нагреватель 7, создающий равномерный тепловой поток. Мощность, потребляемая нагревателем, регулируется лабораторным автотрансформатором (ЛАТРом) 12 и определяется по результатам измерения тока амперметром 10 и напряжения вольтметром 11. Показания термопар снимаются по потенциометру 15.

### 1.2. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Предварительно изучив литературу и ознакомившись с устройством лабораторной установки можно приступить к проведению опыта. После установления стационарного режима показания термопар, вольтметра и амперметров заносят в таблицу измерений (табл. 1.1).

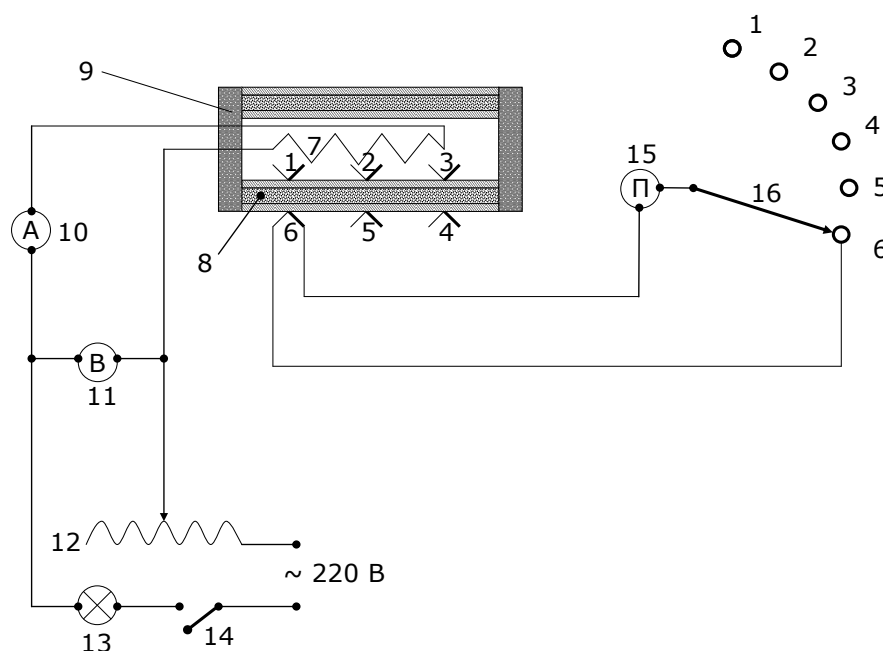


Рис. 1.1. Экспериментальная установка:  
1...3 – внутренние термопары; 4...6 – наружные термопары; 7 – электронагреватель;  
8 – цилиндрический слой исследуемого материала; 9 – теплоизоляция; 10 – амперметр;  
11 – вольтметр; 12 – трансформатор; 13 – сигнальная лампа; 14 – выключатель;  
15 – потенциометр; 16 – переключатель термопар

Таблица измерений								
№ п/п	Термопары						I, А	U, В
	1	2	3	4	5	6		
<b>(<math>\lambda_1</math>) 30 % цемента + 70 % окиси алюминия</b>								
1								
2								
<b>(<math>\lambda_2</math>) шнуровой асбест</b>								
	7	8	9	10	11	12	I, А	U, В
1								
2								
<b>(<math>\lambda_3</math>) шлаковата</b>								
	13	14	15	16	17	18	I, А	U, В
1								
2								

На основании измеренных значений проводят расчеты, результаты которых заносят в табл. 1.2. Теплопроводность материала вычисляется по формуле, полученной из выражения (1.7), а теплота  $Q$  определяется по электрической мощности, потребляемой электронагревателем.

Средние температуры внутренних поверхностей  $t_a$  вычисляются по показаниям термопар 1...3, 7...9, 13...15, температуры наружных поверхностей  $t_i$  – по показаниям термопар 4...6, 10...12, 16...18. Полученные значения теплопроводностей следует отнести к средним температурам материалов.

Относительная погрешность расчета теплопроводности материала методом цилиндрического слоя определяется как среднеквадратичная величина из соотношения:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \pm \left[ \left( \frac{\Delta Q}{Q} \right)^2 + \left( \frac{\Delta l}{l} \right)^2 + \left( \frac{\Delta t}{t} \right)^2 + \left( \frac{\Delta d}{d} \right)^2 \right]^{0,5}, \quad (1.8)$$

где  $\Delta\lambda$ ,  $\Delta Q$ ,  $\Delta l$ ,  $\Delta t$ ,  $\Delta d$  – абсолютные погрешности измерения отдельных величин, которые можно принять равными  $\Delta Q = 0,5$  Вт,  $\Delta l = 0,25$  мм,  $\Delta t = 0,5$  °С,  $\Delta d = 0,5$  мм.

На основании проведенных расчетов делают вывод о возможности практического применения исследуемых материалов.

Таблица расчетов

Величина	Формула	Размерность	Материал		
			$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$
Тепловой поток	$Q = IU \cos \varphi,$ $\cos \varphi = 0,96$	Вт			
Средняя температура внутренней поверхности слоя	$t_{\text{в}} = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3}$	°С			
Средняя температура наружной поверхности слоя	$t_{\text{н}} = \frac{t_4 + t_5 + t_6}{3}$	°С			
Теплопроводность материала	$\lambda = \frac{Q \ln(d_2/d_1)}{2\pi l(t_{\text{в}} - t_{\text{н}})}$	Вт/(м·К)			
Средняя температура слоя	$t = 0,5(t_{\text{в}} + t_{\text{н}})$	°С			
Относительная погрешность измерения	$\delta\lambda = \left[ \left( \frac{\Delta Q}{Q} \right)^2 + \left( \frac{\Delta l}{l} \right)^2 + \left( \frac{\Delta t}{t} \right)^2 + \left( \frac{\Delta d}{d} \right)^2 \right]^{0,5}$	-			
Абсолютная погрешность	$\Delta\lambda = \lambda\delta\lambda$	Вт/(м·К)			
Теплопроводность	$\lambda_{\text{т}} = \lambda \pm \Delta\lambda$	Вт/(м·К)			

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каков физический смысл теплопроводности?
2. Что означает знак « $\leftrightarrow$ » в законе Фурье?
3. В чем заключается содержание основного закона теплопроводности?
4. Дать определение теплопроводности и указать ее размерность.
5. Привести численные значения теплопроводностей газа, жидкости и твердого тела (изоляционного материала и металла).
6. Сравнить закон Фурье с законом Ома.



## Лабораторная работа № 2

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДОМ ДВУХ ЭТАЛОНОВ

**Лучистый теплообмен** – это передача теплоты между телами с различной температурой, обусловленный процессами излучения, отражения, поглощения и пропускания лучистой энергии, переносимой электромагнитными волнами. В отличие от теплопроводности и конвективного теплообмена лучистый теплообмен между телами может происходить и при отсутствии среды (в вакууме).

Интегральное излучение абсолютно черного тела определяется законом Стефана–Больцмана, Вт/м<sup>2</sup>:

$$E_0 = c_0(T / 100)^4, \quad (2.1)$$

где  $c_0 \approx 5,7$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – коэффициент излучения абсолютно черного тела;  $T$  – температура тела, К.

Твердые и жидкие тела непрозрачны для теплового излучения (видимое, инфракрасное) и поглощение ими лучистой энергии происходит в тонком поверхностном слое.

В природе нет абсолютно черных тел; реальные тела называются серыми. Если предположить, что излучательная способность серых тел также пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры, тогда для них, Вт/м<sup>2</sup>:

$$E = \varepsilon c_0(T / 100)^4. \quad (2.2)$$

Здесь  $\varepsilon$  – степень черноты поверхности. Если поделить (2.2) на (2.1), то:

$$\varepsilon = E / E_0, \quad (2.3)$$

то есть **степень черноты** это отношение излучательных способностей серого и абсолютно черного тел при одинаковой температуре и зависит от материала, температуры и состояния поверхности. Максимальное значение  $\varepsilon = 0,95$  имеют фетр и нефтяная сажа, а минимальное (0,1...0,15) – полированные металлы.

Лучистый теплообмен между параллельными поверхностями, Вт/м<sup>2</sup>:

$$q = \varepsilon_{\text{г}} \delta c_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (2.4)$$

где приведенная степень черноты

$$\varepsilon_{\text{г}} \delta = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}. \quad (2.5)$$

### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Закрепление теоретических знаний при изучении особенностей лучистого теплообмена; экспериментальное определение степени черноты серого тела по двум эталонам.

### МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

#### 2.1. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Установка (рис. 2.1.) состоит из трех одинаковых металлических цилиндров 2.

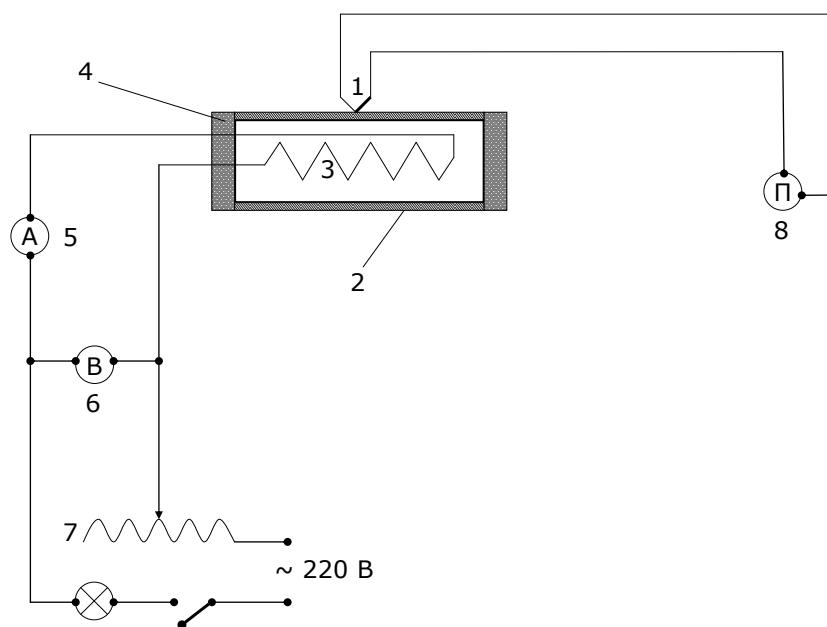


Рис. 2.1. Схема лабораторной установки:

1 – термопара; 2 – цилиндр; 3 – электронагреватель; 4 – теплоизоляция;  
5 – амперметр; 6 – вольтметр; 7 – автотрансформатор; 8 – потенциометр

Поверхность образца, который является серым телом, оставлена в естественном виде. Степень черноты его должна быть определена в ходе эксперимента. Поверхность белого тела (эталоны № 1) никелирована и полирована, степень черноты его известна ( $\varepsilon = 0,15$ ). Поверхность черного тела (эталоны № 2) покрыта нефтяной сажей ( $\varepsilon = 0,95$ ).

Внутри каждого цилиндра установлен электронагреватель, на который подается регулируемое автотрансформаторами 7 напряжение. На торцах цилиндров установлены теплоизоляторы 4. Контроль температуры осуществляют посредством терморезисторов 1 и потенциометров 8, контроль мощности нагрева – амперметрами 5 и вольтметрами 6.

## 2.2. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦА МЕТОДОМ ДВУХ ЭТАЛОНОВ

Каждый цилиндр отдает теплоту окружающей среде излучением и конвекцией. Конвективная составляющая по уравнению Ньютона-Рихмана, Вт:

$$Q_{\text{к}} = \alpha F (t_{\text{н}} - t_{\text{в}}), \quad (2.6)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F$  – поверхность цилиндра, м<sup>2</sup>;  $t_{\text{н}}$  и  $t_{\text{в}}$  – температуры стенки цилиндра и окружающей среды воздуха), °С.

Таким образом, суммарный тепловой поток для образца, Вт:

$$Q_{\text{в}} = Q_{\text{л}} + Q_{\text{к}} = \varepsilon_{\text{в}} c_0 F \left[ \left( \frac{T_{\text{н}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{в}}}{100} \right)^4 \right] + \alpha F (t_{\text{н}} - t_{\text{в}}). \quad (2.7)$$

Если уравнивать температуры поверхностей всех трех цилиндров, то при одинаковых геометрических размерах их конвективные тепловые потоки будут равными и их можно исключить из рассмотрения, Вт:

$$(Q_{\text{л}2} - Q_{\text{в}}) = (\varepsilon_{\text{л}2} - \varepsilon_{\text{в}}) c_0 F \left[ \left( \frac{T_{\text{н}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{в}}}{100} \right)^4 \right];$$

$$(Q_{\dot{1} \dot{a} \dot{\delta}} - Q_{\dot{y}1}) = (\varepsilon_{\dot{1} \dot{a} \dot{\delta}} - \varepsilon_{\dot{y}1}) c_0 F \left[ \left( \frac{T_{\dot{n}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\dot{x}}}{100} \right)^4 \right].$$

Разделив эти два выражения и считая, что лучистые тепловые потоки цилиндров пропорциональны электрическим мощностям их нагревателей, получим:

$$\frac{Q_{\dot{y}2} - Q_{\dot{1} \dot{a} \dot{\delta}}}{Q_{\dot{1} \dot{a} \dot{\delta}} - Q_{\dot{y}1}} = \frac{W_{\dot{y}2} - W_{\dot{1} \dot{a} \dot{\delta}}}{W_{\dot{1} \dot{a} \dot{\delta}} - W_{\dot{y}1}} = \frac{\varepsilon_{\dot{y}2} - \varepsilon_{\dot{1} \dot{a} \dot{\delta}}}{\varepsilon_{\dot{1} \dot{a} \dot{\delta}} - \varepsilon_{\dot{y}1}} = C, \quad (2.8)$$

откуда искомая степень черноты образца:

$$\varepsilon_{\dot{1} \dot{a} \dot{\delta}} = \frac{\tilde{N} \varepsilon_{\dot{y}1} + \varepsilon_{\dot{y}2}}{\tilde{N} + 1}, \quad (2.9)$$

где константа  $C$  определяется из формулы (2.8) по электрическим мощностям нагревателей  $W_{\dot{1} \dot{a} \dot{\delta}}$ ,  $W_{\dot{y}1}$ ,  $W_{\dot{y}2}$ .

### 2.3. ГРАФИЧЕСКИЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ

В лабораторной работе степень черноты образца можно также определить графически. При одинаковых температурах поверхностей цилиндров их конвективная теплоотдача будет одинаковой. Примем следующее обозначение для постоянной величины при  $t_c = idem$ :

$$c_0 F \left[ \left( \frac{T_{\dot{n}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\dot{x}}}{100} \right)^4 \right] = \hat{A},$$

тогда лучистая теплоотдача будет прямо пропорциональна степени черноты тела, и суммарный тепловой поток запишется в виде:

$$Q = W = Q_{\dot{e}} + Q_{\dot{\varepsilon}} = Q_{\dot{e}} + B\varepsilon. \quad (2.10)$$

Эта линейная зависимость (2.10) представлена на рис. 2.2.

Установив на эталоне и образцах стационарный режим при  $t_{\dot{1} \dot{a} \dot{\delta}} = t_{\dot{y}1} = t_{\dot{y}2}$  для измеренных мощностей  $W_{\dot{y}1}$  и  $W_{\dot{y}2}$  наносим точки  $A$  и  $B$  на график. Соединим прямой линией эти точки, затем по известной мощности образца  $W_{\dot{1} \dot{a} \dot{\delta}}$  определяем неизвестную степень черноты образца  $\varepsilon_{\dot{1} \dot{a} \dot{\delta}}$ . Затем

находим из графика лучистую  $Q_{\epsilon}$  и конвективную  $Q_{\hat{\epsilon}}$  составляющие теплового потока, продолжив прямую  $AB$  до пересечения с осью абсцисс и получив точку  $K$ , для которой  $\epsilon = 0$ .

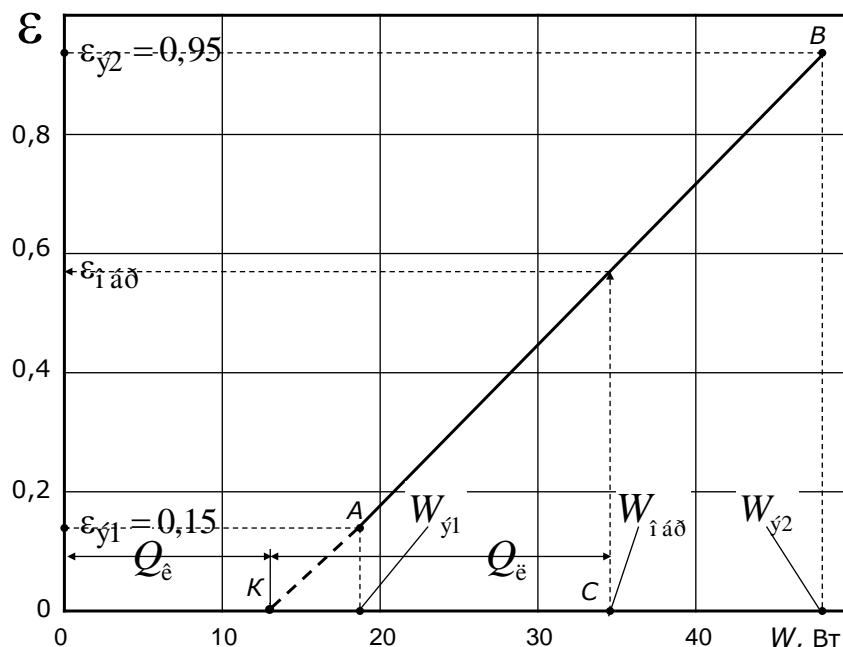


Рис. 2.2. Графическое определение степени черноты, лучистого и конвективного тепловых потоков образца

## 2.4. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Уравняв температуры поверхностей трех цилиндров и дождавшись установления стационарного теплового режима, определяем рассеиваемые мощности, Вт:

$$Q = W = IU \cos \varphi, \quad (2.11)$$

где  $\cos \varphi = 0,96$ .

Результаты измерений заносятся в таблицу измерений (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Таблица измерений

Цилиндр	Изменяемые величины				Тепловой поток $W$ , Вт
	$t$ , °C	$I$ , А	$U$ , В	$\epsilon$	
Образец					$Q_{\hat{\epsilon}} = W_{\hat{\epsilon}} =$
Эталон 1				0,15	$Q_{\gamma_1} = W_{\gamma_1} =$
Эталон 2				0,95	$Q_{\gamma_2} = W_{\gamma_2} =$

По данным табл. 2.1 строится прямая  $AB$ , как показано на рис. 2.2. По графику определяются степень черноты образца  $\varepsilon_{\text{а\delta}}$ , лучистая  $Q_{\varepsilon}$  и конвективная  $Q_{\varepsilon}$  составляющие теплового потока. Данные, полученные из графика, а также расчетное значение степени черноты по формуле (2.9) заносятся в табл. 2.2.

Таблица 2.2

**Таблица результатов расчетов**

Степень черноты образца		Лучистая составляющая теплового потока образца, Вт	Конвективная составляющая теплового потока, Вт
из графика	расчетное		
$\varepsilon_{\text{а\delta}} =$	$\varepsilon_{\text{р\delta}} =$	$Q_{\varepsilon} =$	$Q_{\varepsilon} =$

Находится относительная погрешность определения степени черноты, %:

$$\delta\varepsilon = 100(\varepsilon_{\text{р\delta}} - \varepsilon_{\text{а\delta}}) / \varepsilon_{\text{р\delta}} \quad (2.12)$$

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое степень черноты?
2. Для чего нужно знать степень черноты поверхности?
3. От каких факторов зависит степень черноты поверхности?
4. В каких пределах может меняться степень черноты для различных тел?
5. Объясните сущность определения степени черноты образца методом двух эталонов.
6. Для чего цилиндры взяты одинаковых геометрических размеров?
7. Почему температуры образца и эталонов должны быть одинаковыми?
8. Чем объясняется наличие (отсутствие) относительной погрешности при определении степени черноты разными методами?

### Лабораторная работа № 3

#### ИССЛЕДОВАНИЕ СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНОЙ ТЕПЛОТДАЧИ ОТ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЦИЛИНДРА К ВОЗДУХУ

**Конвекция** – это передача теплоты от более нагретых слоев жидкости к менее нагретым (под жидкостями подразумеваются также газы и

расплавленные металлы). Различают свободную (естественную) конвекцию и вынужденную.

**Свободная конвекция** есть движение жидкости за счет разности плотностей нагретых и холодных ее слоев. Интенсивность движения возрастает с увеличением разности температур между ними.

Совместный перенос теплоты конвекцией и теплопроводностью между стенкой и воздухом называется **конвективной теплоотдачей**. Теплота, отдаваемая от стенки к жидкости (воздуху) определяется по уравнению Ньютона – Рихмана, Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$Q = \alpha F(t_{\text{н}} - t_{\text{ж}}), \quad (3.1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F$  – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>;  $t_{\text{н}}$  – температура стенки, °С;  $t_{\text{ж}}$  – температура жидкости, °С.

Из (3.1) коэффициент конвективной теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{Q}{F(t_{\text{н}} - t_{\text{ж}})}. \quad (3.2)$$

Формула (3.2) проста, но требует наличия экспериментальных данных. Теоретически конвективный теплообмен описывается системой дифференциальных уравнений с условиями однозначности [1, 2, 3]. С применением теории подобия физических явлений математическое описание приводится к безразмерному виду и решение, общее для ряда подобных между собой явлений конвективной теплоотдачи, находится в виде зависимости между числами подобия (критериями подобия):

$$Nu = c(Gr Pr)^n, \quad (3.3)$$

где  $c$  и  $n$  – константы, определяемые из опыта.

Физический смысл числа подобия Нуссельта – соотношение конвективной теплоотдачи и теплопроводности:

$$Nu = \alpha d / \lambda. \quad (3.4)$$

Здесь  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м·К);  $d$  – диаметр горизонтальной трубы, м.

Число подобия Грасгофа представляет собой соотношение подъемных и вязкостных сил:

$$Gr = g\beta\Delta t d^3 / \nu^2, \quad (3.5)$$

где  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;  $\beta$  – коэффициент объемного температурного расширения жидкости, 1/К;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м<sup>2</sup>/с. Для газов:

$$\beta = \frac{1}{T_{\text{ж}}} = \frac{1}{t_{\text{ж}} + 273}. \quad (3.6)$$

Число подобия Прандтля:

$$Pr = \nu / a \quad (3.7)$$

характеризует физические свойства жидкости. Здесь  $a$  – коэффициент температуропроводности жидкости, м<sup>2</sup>/с.

При теплоотдаче к воздуху число Прандтля можно принять равным 0,7. В этом случае уравнение (3.3) примет более простой вид:

$$Nu = cGr^n. \quad (3.8)$$

Константы  $c$  и  $n$  находятся из эксперимента (см. рис. 3.2) и зависят от режима движения жидкости (табл. 3.1):

Таблица 3.1

<b>Константы <math>c</math> и <math>n</math></b>			
Режим	$Gr$	$c$	$n$
Ламинарный	$10^{-3} \dots 5 \cdot 10^2$	1,13	0,125
Переходный	$5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^7$	0,49	0,250
Турбулентный	$> 2 \cdot 10^7$	0,12	0,333

### Цель работы

- изучение закономерностей свободно-конвективной теплоотдачи от горизонтального цилиндра к воздуху;
- практическое освоение методов исследования теплообмена с применением теории подобия;



- экспериментальное и теоретическое (по уравнению подобия) определение коэффициента теплоотдачи. Сравнение полученных результатов.

## МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### 3.1. СХЕМА ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Принципиальная схема установки для исследования теплоотдачи при свободной конвекции показана на рис. 3.1.

На стенде установлены два цилиндра 8 разных диаметров. Внутри каждого цилиндра установлен электронагреватель 7, на который подается напряжение через лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) 12. С торцов цилиндры изолированы пробками 9, поэтому теплоотдача происходит от их горизонтальной части.

На рабочем участке цилиндра  $l_0$  установлены хромель-копелевые термопары 1...6, которые через переключатель 16 подключаются к потенциометру 15, шкала которого проградуирована в  $^{\circ}\text{C}$ .

Установка имеет общий выключатель 14 и сигнальную лампу 13. Рабочий участок  $l_0$ , на котором установлены термопары, меньше полной длины цилиндра  $l$ . Это позволяет не учитывать стоки теплоты с торцов.

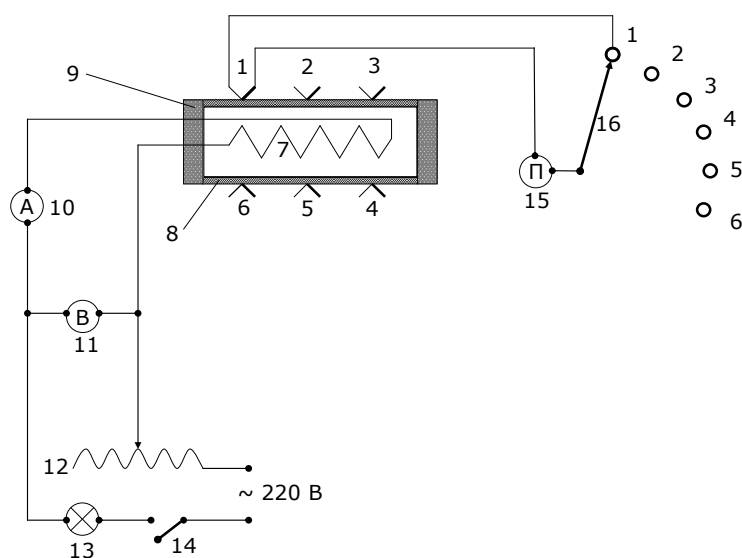


Рис. 3.1. Схема экспериментальной установки:

1...6 – термопары; 7 – электронагреватель; 8 – цилиндр; 9 – теплоизоляция;  
 10 – амперметр; 11 – вольтметр; 12 – трансформатор; 13 – сигнальная лампа;  
 14 – выключатель; 15 – потенциометр; 16 – переключатель термопар

### 3.2. ГРАФИЧЕСКОЕ ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Если зависимость (3.8) прологарифмировать, то в логарифмических координатах она будет представлять уравнение прямой линии (см. рис. 3.2):

$$\lg Nu = \lg c + n \lg Gr. \quad (3.9)$$

Логарифм константы  $c$  отсекается в начале координат прямой  $AC$ , а показатель степени  $n$  находится из прямоугольного треугольника  $ABC$ , с учетом масштабов по осям координат:

$$n = \operatorname{tg} \gamma = AB / BC.$$

### 3.3. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Подается напряжение на электронагреватели горизонтальных цилиндров и с помощью трансформаторов устанавливается режим нагрева. Измерения выполняются после прогрева установки и установления стационарного

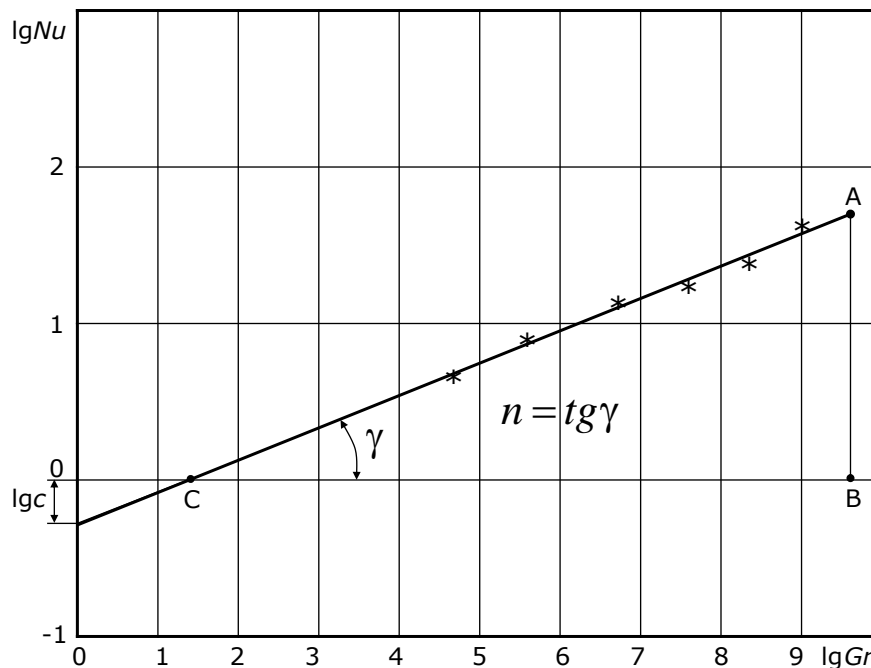


Рис. 3.2. Графическое обобщение экспериментальных данных режима, когда показания термопар становятся постоянными во времени. Снимаются показания термопар 1...6 на поверхностях цилиндров, температура среды, ток и напряжение. Экспериментальные данные заносятся в табл. 3.2.

Таблица измерений

Цилиндр	Режим	Температура стенки цилиндра $t_{ci}$ , °C						$t_{ж}$ , °C	I, А	U, В	d, м	l, м	$l_p$ , м
		1	2	3	4	5	6						
I	1												
	2												
II	1												
	2												

Степень черноты поверхности цилиндров для гладкой окисленной поверхности алюминия можно принять равной  $\varepsilon = 0,2$ .

### 3.4. РАСЧЕТЫ

При измеренной температуре окружающего воздуха находятся его физические параметры из табл. 3.3. Все расчеты сводятся в табл. 3.4. и по их результатам строится график  $\lg Nu = f(\lg Gr)$ , рис. 3.2. По графической зависимости определяются константы  $c$  и  $n$  в уравнении (3.9).

Таблица 3.3

Физические параметры воздуха при  $B = 760$  мм рт. ст.

$t$ , °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_p$ , Дж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$ , Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	Pr
0	1,293	1005	2,44	13,3	0,707
5	1,269	1005	2,47	13,7	0,706
10	1,247	1005	2,51	14,2	0,705
15	1,226	1005	2,56	14,6	0,704
20	1,205	1006	2,60	15,1	0,703
25	1,180	1006	2,64	15,5	0,702
30	1,165	1006	2,68	16,0	0,701
35	1,147	1006	2,72	16,5	0,700
40	1,128	1007	2,76	17,0	0,699
45	1,111	1007	2,79	17,5	0,699
50	1,093	1007	2,83	18,0	0,698
55	1,078	1007	2,87	18,5	0,697
60	1,060	1007	2,90	19,0	0,696

Таблица 3.4

Таблица расчетов

№	Величина	Формула или источник	Цилиндр 12, 14 мм		Цилиндр 80 мм	
			Режим		Режим	
			1	2	1	2
1	Средняя температура поверхности, °С	$t_{\bar{n}} = \sum_1^6 \frac{t_{\bar{n}i}}{6}$				
2	Тепловой поток, Вт	$Q = IU \cos \varphi,$ $\cos \varphi = 0,96$				
3	Тепловой поток с рабочего участка, Вт	$Q_p = Q \frac{l_p}{l}$				
4	Поверхность рабочего участка, м <sup>2</sup>	$F = \pi d l_p$				
5	Лучистый тепловой поток, Вт	$Q_{\varepsilon} = 5,7\varepsilon F \left[ \left( \frac{T_{\bar{n}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\varepsilon}}{100} \right)^4 \right]$				
6	Конвективный тепловой поток, Вт	$Q_{\varepsilon} = Q_{\delta} - Q_{\varepsilon}$				
7	Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$\alpha = \frac{Q_{\varepsilon}}{F(t_{\bar{n}} - t_{\varepsilon})}$				
8	Теплопроводность воздуха, Вт/(м·К)	$\lambda$ (см. табл. 3.3, при температуре среды $t_{\varepsilon}$ )				
9	Число Нуссельта	$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}$				
10	Коэффициент объемного расширения воздуха, 1/К	$\beta = \frac{1}{t_{\varepsilon} + 273}$				
11	Разность температур, К	$\Delta t = t_{\bar{n}} - t_{\varepsilon}$				
12	Кинематическая вязкость воздуха, м <sup>2</sup> /с	$\nu$ (см. табл. 3.3, при температуре среды $t_{\varepsilon}$ )				
13	Число Грасгофа	$Gr = g\beta\Delta t \frac{d^3}{\nu^2}$				
14	Логарифм числа Нуссельта	$\lg Nu$				
15	Логарифм числа Грасгофа	$\lg Gr$				
16	Расчетное значение числа Нуссельта	$Nu_p = cGr^n,$ ( $c$ и $n$ взять из табл. 3.1)				
17	Расчетное значение коэффициента теплоотдачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$\alpha_p = \lambda Nu_p / d$				
18	Относительная погрешность эксперимента, %	$\delta\alpha = 100(\alpha_p - \alpha) / \alpha_p$				

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните природу свободного движения жидкости.
2. Изложите механизм теплообмена при свободной конвекции.
3. Запишите формулу для расчета теплового потока при конвективной теплоотдаче.
4. Укажите размерность коэффициента теплоотдачи.
5. Каков общий вид уравнения подобия для теплоотдачи при свободной конвекции?
6. Объясните методику определения коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции.
7. Как определяется конвективный тепловой поток в эксперименте?

### Лабораторная работа № 4

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ К ВОЗДУХУ ПРИ ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

**Вынужденная конвекция** – это перемещение жидкости за счет внешних источников (насоса, вентилятора, компрессора). Теплота, отдаваемая при конвективном теплообмене, определяется по формуле, Вт:

$$Q = \alpha F \Delta t, \quad (4.1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F$  – поверхность теплообмена, м<sup>2</sup>;  $\Delta t$  – средняя логарифмическая разность температур между стенкой и воздухом, К:

$$\Delta t = \frac{t'' - t'}{\ln \frac{t_c - t'}{t_c - t''}}. \quad (4.2)$$

Здесь  $t'$  и  $t''$  – температуры воздуха на входе и выходе из трубы, °С;  $t_c$  – температура стенки трубы, °С.

Из (4.1) следует, что **коэффициент теплоотдачи** – это тепловой поток через единицу поверхности в единицу времени при  $\Delta t = 1$  К, Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$\alpha = Q / (F \Delta t). \quad (4.3)$$

Величина коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  зависит от многих факторов: формы и размеров поверхности теплоотдачи, режима течения жидкости и ее физических параметров.

Теплота, воспринятая воздухом, рассчитывается по формуле, Вт:

$$Q = mc_p(t'' - t'), \quad (4.4)$$

Здесь  $m$  – массовый расход воздуха, кг/с;  $c_p$  – средняя изобарная массовая теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К).

Поверхность теплообмена, м<sup>2</sup>:

$$F = \pi dl. \quad (4.5)$$

где  $d$  – внутренний диаметр трубы, м;  $l$  – длина трубы, м.

### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- изучение закономерности теплоотдачи при вынужденной конвекции на примере теплоотдачи от стенки трубы к движущемуся внутри нее воздуху;
- практическое освоение методов исследования теплообмена с применением теории подобия;
- экспериментальное определение коэффициента теплоотдачи при продольном обтекании трубы и обработка результатов опытов в безразмерной форме.

### МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

#### 4.1. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Схема установки показана на рис. 4.1.

Установка имеет латунную тонкостенную трубу 2, погруженную в резервуар с кипящей водой 14, которая доводится до кипения электронагревателем 15. Изменением числа оборотов вентилятора 1 обеспечивается необходимый расход воздуха внутри трубы. Температура кипения воды при атмосферном давлении 100 °С, что обеспечивает температуру теплоотдающей поверхности трубы  $t_c$  порядка 99,5 °С.

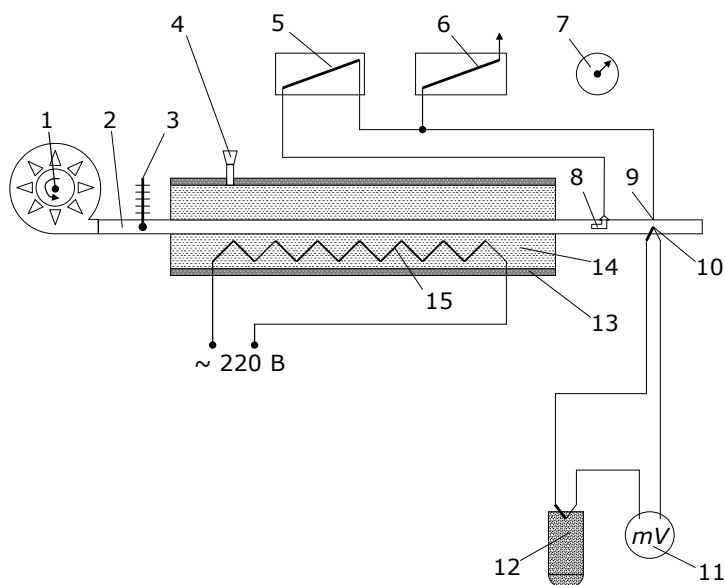


Рис. 4.1. Схема установки:

1 – вентилятор; 2 – труба; 3 – термометр; 4 – воронка для залива воды и выхода пара; 5 – микроманометр динамического напора воздуха; 6 – микроманометр избыточного статического давления воздуха; 7 – барометр; 8 – трубка полного напора воздуха; 9 – отбор избыточного статического давления; 10 – термопара; 11 – милливольтметр; 12 – сосуд Дьюара с тающим льдом; 13 – теплоизоляция; 14 – кипящая вода; 15 – трубчатый электронагреватель

На выходе из трубы находятся отбор избыточного статического давления 9, которое измеряется микроманометром 6, и трубка полного напора 8. Разность полного напора воздуха и его избыточного статического давления – это динамический напор воздуха  $h_{\text{д}}$ , измеряемый микроманометром 5. По динамическому напору определяется скорость воздуха  $w$ , а по известному сечению трубы  $f$  и скорости потока – объемный расход воздуха  $V$ . В выходном сечении также расположена термопара 10, подключенная к потенциометру 11, а на входе воздуха в трубу установлен термометр 3. Они предназначены соответственно для измерения температур воздуха на выходе из трубы  $t''$  и на входе в нее  $t'$ .

#### 4.2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Чтобы результаты эксперимента могли быть распространены на все подобные явления, их необходимо обработать в безразмерной форме. Уравнение подобия для вынужденной конвекции воздуха в трубе имеет вид:

$$Nu = c Re^n, \quad (4.6)$$

где  $c$  и  $n$  – константы, которые определяются из опыта;  $Nu = \alpha d / \lambda$  – число Нуссельта, определяющее соотношение теплопроводности  $\lambda$ , Вт/(м·К) внутри пограничного слоя жидкости и конвективной теплоотдачи  $\alpha$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К) на его границе;  $Re = wd / \nu$  – число Рейнольдса, характеризующее режим вынужденного движения жидкости;  $w$  – средняя скорость воздуха в трубе, м/с;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха, м<sup>2</sup>/с.

Если зависимость (4.6) прологарифмировать, то в логарифмических координатах она будет представлять уравнение прямой линии (см. рис. 4.2):

$$\lg Nu = \lg c + n \lg Re. \quad (4.7)$$

Логарифм константы  $c$  отсекается в начале координат прямой  $AC$ , а показатель степени  $n$  находится из прямоугольного треугольника  $ABC$ , с учетом масштабов по осям координат:

$$n = \operatorname{tg} \gamma = AB / BC.$$

Методика обработки экспериментальных данных:

- по опытным данным определяются коэффициенты теплоотдачи  $\alpha$ ;
- рассчитываются числа подобия Нуссельта (теплопроводность воздуха  $\lambda$  брать по рис. 4.4 слева);
- находятся числа подобия Рейнольдса (коэффициенты кинематической вязкости воздуха  $\nu$  взять по рис. 4.4 справа);
- по результатам расчета строится в логарифмических координатах прямолинейная зависимость (см. рис. 4.2);
- из графика находятся константы  $c$  и  $n$ ;
- с учетом найденных значений констант записывается уравнение подобия  $Nu = c Re^n$ , которое справедливо для подобных явлений теплоотдачи при вынужденном движении воздуха внутри труб.



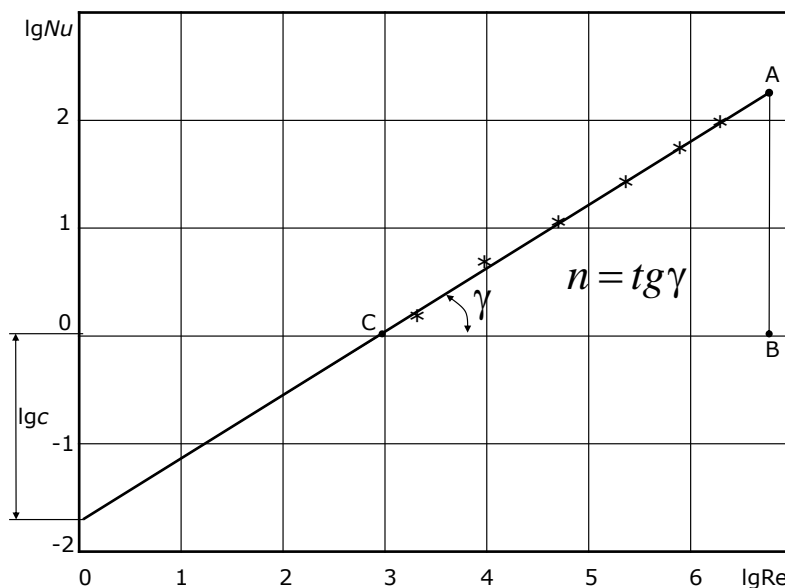


Рис. 4.2. Графическое обобщение экспериментальных данных

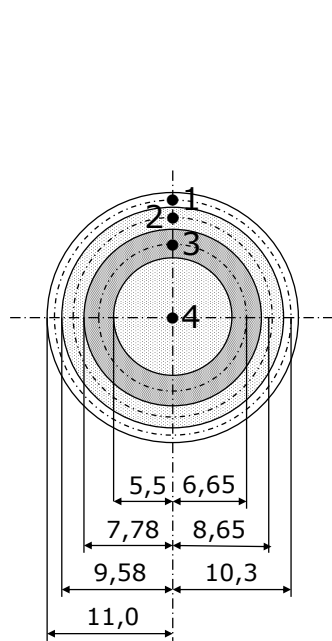


Рис. 4.3. Точки 1...4 измерений динамических напоров  $h_{\dot{a}i}$  в равновеликих сечениях

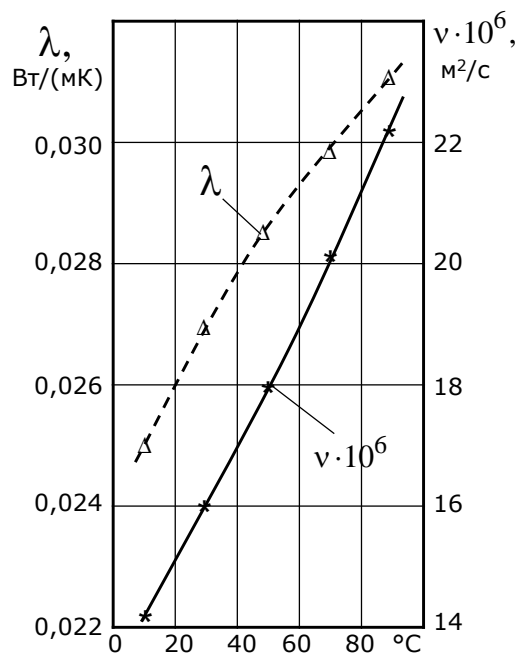


Рис. 4.4. Физические свойства воздуха

### 4.3. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Преподавателем задаются 2, 3 режима течения жидкости (воздуха). Для каждого режима определяются температуры воздуха на входе в трубу  $t'$  и выходе из нее  $t''$ , динамический напор в четырех равновеликих сечениях

трубы  $h_{\text{ai}}$  (рис. 4.3), статический напор в выходном сечении и барометрическое давление.

Все экспериментальные данные заносятся в таблицу измерений (табл. 4.1).

На основании измерений выполняются расчеты необходимых величин. Результаты расчетов сводятся в таблицу расчетов (табл. 4.2).

Таблица 4.1

**Таблица измерений**

№ п/п	Наименование величины	Режимы			
		I	II	III	IV
1	Температура воздуха на входе $t'$ , °C				
2	Температура воздуха на выходе $t''_i$ , °C	1) 2) 3) 4)			
3	Динамический напор воздуха $h_{\text{ai}}$ , мм. вод. ст.	1) 2) 3) 4)			
4	Избыточное статическое давление воздуха $p_{\text{нб}}$ , мм. вод. ст.				
5	Барометрическое давление $B$ , мм. рт. ст.				
6	Температура стенки трубы $t_{\text{н}}$ , °C	99,5			
7	Внутренний диаметр трубы $d$ , м	0,022			
8	Длина трубы в зоне теплообмена $l$ , м	1,505			

Таблица 4.2

**Таблица расчетов**

№ п/п	Величина	Формула	Режимы			
			I	II	III	IV
1	Динамический напор воздуха, Н/м <sup>2</sup>	$p_{\text{ai}} = 9,81h_{\text{ai}}^2$	1) 2) 3) 4)			
2	Средняя температура воздуха на выходе, °C	$t'' = \sum(t''_i / 4)$				
3	Плотность воздуха в выходном сечении, кг/м <sup>3</sup>	$\rho = \rho_0 \frac{273}{273+t''} \frac{B+p_{\text{нб}}/13,6}{760}$ здесь $\rho_0 = 1,293$ кг/м <sup>3</sup> – плотность воздуха при нормальных условиях				
4	Скорости потока в выходном сечении по точкам измерений, м/с	$w_i = (2p_{\text{ai}} / \rho)^{0,5}$	1) 2) 3)			

			4)			
5	Средняя скорость воздуха, м/с	$w_{\text{ср}} = \sum (w_i / 4)$				
6	Массовый расход воздуха, кг/с	$m = w_{\text{ср}} \rho \pi d^2 / 4$				
7	Средняя температура воздуха в трубе, °С	$t = (t' + t'') / 2$				
8	Средняя массовая изобарная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К)	$\tilde{n}_p = 1003 + 0,027t$				
9	Теплота, воспринятая воздухом, Вт	$Q = mc_p (t'' - t')$				
10	Поверхность теплоотдачи, м <sup>2</sup>	$F = \pi dl$				
11	Средне логарифмический температурный напор, °С	$\Delta t = \frac{t'' - t'}{\ln \frac{t_{\text{н}} - t'}{t_{\text{н}} - t''}}$				
12	Экспериментальный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$\alpha = \frac{Q}{F \cdot \Delta t}$				
13	Теплопроводность воздуха $\lambda$ , Вт/(м·К)	Определяется по рис. 4.4 при средней температуре $t$				
14	Число Нуссельта	$Nu = \alpha d / \lambda$				
15	Кинематическая вязкость воздуха $\nu$ , м <sup>2</sup> /с	Определяется по рис. 4.4 при средней температуре $t$				
16	Число Рейнольдса	$Re = wd / \nu$				
17	Логарифм числа Нуссельта	$\lg Nu$	Строится зависимость $\lg Nu = f(\lg Re)$			
18	Логарифм числа Рейнольдса	$\lg Re$				
19	Логарифм константы $c$	По графику (см. рис. 4.2)				
20	Константа $c$	$c = 10^{\lg c}$				
21	Константа $n$	$n = tg \gamma = AB / BC$ (см. рис. 4.2)				
22	Уравнение подобия теплоотдачи	$Nu_{\delta} = c Re^n$				
23	Расчетный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$\alpha_p = \lambda Nu_p / d$				
24	Относительная погрешность эксперимента, %	$\delta \alpha = 100(\alpha_p - \alpha) / \alpha_p$				

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что значит вынужденное течение жидкости? Привести примеры.
2. Изложите механизм теплообмена при вынужденной конвекции. В чем отличие от теплообмена при свободной конвекции? Поясните на примерах.

3. Каков вид уравнения подобия для теплоотдачи при вынужденной конвекции?
4. В чем отличие между уравнениями подобия для теплоотдачи при вынужденной и свободной конвекции?
5. Как определяется коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции?
6. От каких величин зависит коэффициент теплоотдачи в эксперименте?
7. Как находятся константы  $c$  и  $n$  в уравнении подобия?
8. Можно ли утверждать, что полученное уравнение подобия будет справедливо для любого вынужденного течения жидкости?
9. Как объясняется наличие (отсутствие) относительной погрешности при определении коэффициента теплоотдачи?

### Лабораторная работа № 5

#### ЭЛЕКТРОТЕПЛОВАЯ АНАЛОГИЯ

Теплопроводность в твердых телах без внутренних источников теплоты описывается дифференциальным уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t, \quad (5.1)$$

где  $a = \lambda / c\rho$  – коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\lambda$  – теплопроводность,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $c$  – теплоемкость,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $\rho$  – плотность,

$\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}$  – оператор Лапласа.

При стационарном процессе  $\partial t / \partial \tau = 0$ , тогда:  $a \nabla^2 t = 0$ . Но физическая характеристика тела  $a \neq 0$ , следовательно  $\nabla^2 t = 0$ , или:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0. \quad (5.2)$$

Пусть однородное и изотропное тело бесконечно вдоль оси  $z$  (рис. 5.1). Тогда температура вдоль оси  $z$  не изменяется и распределение электрических потенциалов и температур описываются уравнениями Лапласа:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = 0; \quad \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \quad (5.3)$$

и граничными условиями:

- на нижних поверхностях  $t = t_1 = const$ ;  $u = u_1 = const$ ;
- на верхних поверхностях  $t = t_2 = const$ ;  $u = u_2 = const$ .

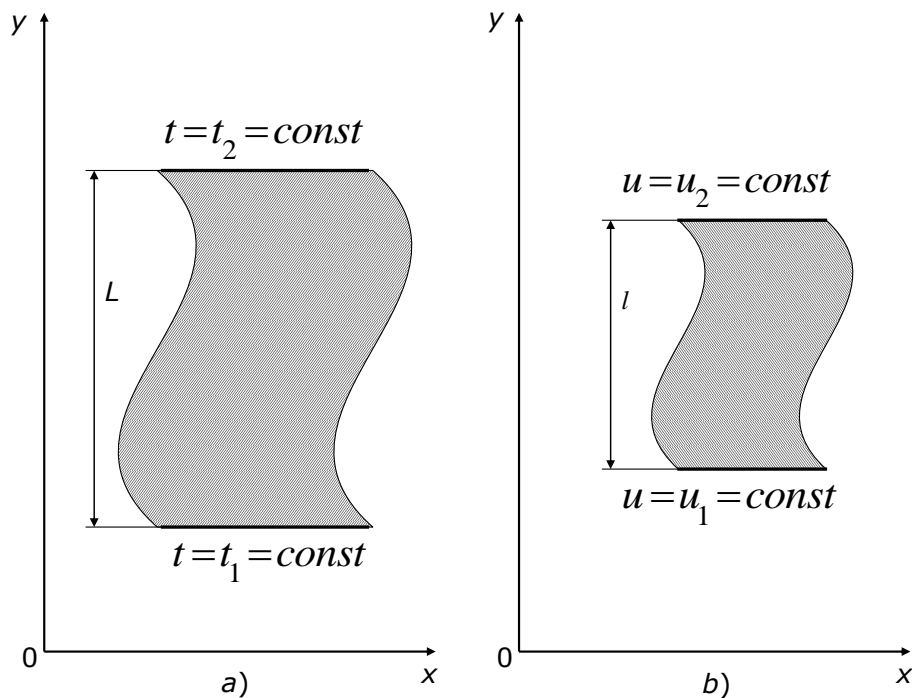


Рис. 5.1. а) изучаемое тело; б) лист электропроводящей бумаги

Итак, процессы электропроводности и теплопроводности описываются одинаковыми по форме уравнениями (5.3), то есть имеет место так называемая **электротепловая аналогия (ЭТА)**.

Приведем уравнения (5.3) и граничные условия к безразмерному виду, выбрав в качестве масштабов отнесения  $L$  и  $l$  для координат;  $t_1 - t_2$  и  $u_1 - u_2$  для падений температур и потенциалов. Тогда по условиям геометрического подобия тел «а» и «б» безразмерные координаты сходственных точек будут одинаковыми:

$$X = \frac{x_a}{L} = \frac{x_b}{l} = idem; \quad Y = \frac{y_a}{L} = \frac{y_b}{l} = idem,$$

а безразмерные падения температур и потенциалов:

$$\Theta = \frac{t-t_2}{t_1-t_2}; \quad U = \frac{u-u_2}{u_1-u_2}.$$

Итак, безразмерные уравнения Лапласа:

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial Y^2} = 0; \quad \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} = 0 \quad (5.4)$$

и граничные условия:

- на нижних поверхностях  $\Theta_1 = \frac{t_1-t_2}{t_1-t_2} = 1; U_1 = \frac{u_1-u_2}{u_1-u_2} = 1;$  (5.5)

- на верхних поверхностях  $\Theta_2 = \frac{t_2-t_2}{t_1-t_2} = 0; U_2 = \frac{u_2-u_2}{u_1-u_2} = 0.$  (5.6)

Следовательно, тождественность граничных условий первого рода:

$$\Theta_1 \equiv U_1 \equiv 1; \quad \Theta_2 \equiv U_2 \equiv 0 \quad (5.7)$$

и решения уравнений Лапласа (5.4) при граничных условиях (5.7) будут тождественно одинаковы для сходственных точек тела и его электрической модели:

$$\Theta(X_\delta, Y_\delta) \equiv U(X_\gamma, Y_\gamma). \quad (5.8)$$

Итак, температуры  $t$  по измеренным значениям потенциалов  $u$  в различных точках модели определяются из соотношения:

$$\frac{t-t_2}{t_1-t_2} = \frac{u-u_2}{u_1-u_2}. \quad (5.9)$$

Исходя из закона Фурье для теплопроводности тепловой поток через поперечное сечение тела  $F = \delta B$ , Вт:

$$Q = \lambda B \Phi (t_1 - t_2), \quad (5.10)$$

где  $B$  – длина тела, м;  $\lambda$  – теплопроводность тела, Вт/(м·К);  $\Phi$  – коэффициент формы.

По закону Ома ток через лист электропроводящей бумаги толщиной  $\delta$ , А:

$$I = \frac{\delta}{\rho} \Phi(u_1 - u_2). \quad (5.11)$$

Здесь  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление листа электропроводящей бумаги;  $\Phi$  – коэффициент формы.

Вследствие тождественности полей температур  $\Theta$  в исследуемом теле и полей потенциалов  $U$  (5.8), коэффициенты формы в уравнениях (5.10) и (5.11) численно равны.

Если известно  $\delta/\rho$ , то из формулы (5.11) можно найти коэффициент формы  $\Phi$ , подставить его в уравнение (5.10) и с учетом выражения (5.9) найти температуры и тепловой поток через исследуемое тело.

**Метод электротепловой аналогии (ЭТА)** позволяет заменить измерение температур и тепловых потоков в исследуемом теле измерением электрических величин в модели. Они определяются проще и точнее по сравнению с тепловыми величинами для реального тела.

### ПРОВЕДЕНИЕ ОПЫТОВ

Принципиальная схема установки показана на рис. 5.2.

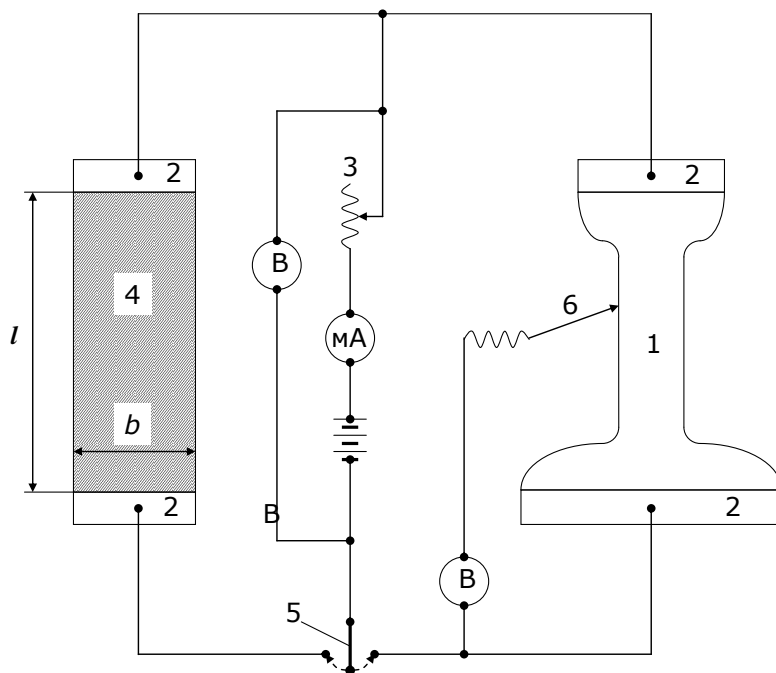


Рис. 5.2. Схема установки

Электрическая модель 1, геометрически подобная исследуемому телу (образцу), изготовлена из электропроводящей бумаги. На верхней и нижней границе модели укреплены контактные шины 2, к которым подводится постоянный ток от выпрямителя. Напряжение измеряется вольтметром, а ток – миллиамперметром. Для определения отношения  $\delta/\rho$  переключателем 5 источник тока подключается сначала к модели 4 с прямоугольным листом электропроводящей бумаги. Затем реостатом 3 устанавливается заданный ток  $I_0$  и измеряется падение напряжения  $u_0$ . Тогда электрическое сопротивление прямоугольной модели:

$$R_0 = u_0 / I_0. \quad (5.12)$$

Поскольку  $R = \rho l / \delta b$ , измеряется расстояние между шинами  $l$ , ширина прямоугольного листа  $b$  и находится искомая величина:

$$\rho / \delta = R_0 b / l. \quad (5.13)$$

Для увеличения точности расчетов эксперимент повторяется 3...4 раза и находится среднее значение отношения  $\rho/\delta$ . Затем источник тока переключается на исследуемую модель 1, измеряются ток  $I_1$  и потенциалы  $u_1$  между шинами. Тогда из формулы (5.11) можно найти коэффициент формы модели:

$$\Phi = \frac{l_1}{u_1} \frac{\rho}{\delta}. \quad (5.14)$$

Таблица 5.1

**Таблица измерений и расчетов**

№ опыта	Прямоугольный лист				Модель		
	$I_0$	$u_0$	$R_0$	$\rho/\delta$	$I_1$	$u_1$	$\Phi$
1							
2							
3							
4							
Среднее							



По 3...4 экспериментам находится среднее значение коэффициента формы и определяется по формуле (5.10) удельный тепловой поток на единицу длины модели: стальной  $\lambda = 50$  Вт/(м·К); латунной  $\lambda = 100$  Вт/(м·К); алюминиевой  $\lambda = 200$  Вт/(м·К); медной  $\lambda = 390$  Вт/(м·К), Вт/м:

$$q_B = Q / B = \lambda \Phi (t_1 - t_2). \quad (5.15)$$

С помощью зондирующей иглы 6 измеряются напряжения для фиксированных точек модели  $u_i$  и, исходя из тождественности решений (5.8), из формулы (5.9) вычисляются температуры, °С:

$$t_i = \frac{u_i - u_2}{u_1 - u_2} (t_1 - t_2) + t_2. \quad (5.16)$$

Результаты измерений и расчетов вносятся в табл. 5.2.

Таблица 5.2

**Таблица измерений и расчетов поля температур**

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$u_i$													
$t_i$													
№	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
$u_i$													
$t_i$													

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. На чем основано применение метода ЭТА для исследования тепловых процессов?
2. Какая электрическая величина является аналогом температуры?
3. Назовите электрический аналог плотности теплового потока!
4. Каков тепловой аналог падения напряжения?
5. Что является аналогом термического сопротивления?

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Шаров Ю.И.* Основы теплотехники и перенос энергии и массы : учебное пособие в форме слайд-конспекта лекций : ФГУП НТЦ «ИНФОРМРЕГИСТР» № государственной регистрации обязательного экземпляра электронного издания – 0321502355 / Ю.И. Шаров. – Новосибирск: Изд-во ВГБОУ ВПО НГТУ. 2015.
2. Шаров Ю.И. Теплопередача. Ч. 1. Основы теории теплопередачи; Ч. 2. Упражнения и задачи / В.С. Чередниченко, А.И. Алиферов, Ю.И. Шаров и др. – Новосибирск: НГТУ. – 2008. – 232 с.; – 2010. – 379 с.
3. *Исаченко, В.П.* Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергоиздат. – 1987. – 416 с.
4. *Краснощеков, В.А.* Задачник по теплопередаче / В.А. Краснощеков, А.С. Сукомел. – М.: Энергия. – 1981. – 264 с.