

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И  
НАУКИ КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ им. И. РАЗЗАКОВА

ТОКМОКСКИЙ ФИЛИАЛ им. академика  
Х. А. РАХМАТУЛИНА

Кафедра «Электроэнергетика»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО КУРСУ  
«Теплоэнергетические установки»

Бишкек-2018

«Рассмотрено»  
на заседании кафедры  
«Электроэнергетика»  
Протокол № 4 от 24.11.2018

«Одобрено»  
Учебно-методическим  
Советом ТФ КГТУ  
Протокол № 3 от 30.11.2018

УДК 621.311  
Составители: ст.преп. Суюнтбекова Н.А.,  
преп. Аширалиева Г.М.

«Теплоэнергетические установки»  
Методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов направления 640200  
«Электроэнергетика» / Кыргызский государственный технический университет. ИЦ «Техник»,  
сост.Суюнтбекова Н.А., Аширалиева Г.М. 2018 г. – 50 стр.

Излагаются задания на лабораторные работы и методика выполнения лабораторных работ с использованием ЭВМ.

Табл. 3. Ил. 13. Библиограф 2.

Рецензент: доц. Осмоналиев К.Б.

# Лабораторная работа № 1

## Определение термических параметров

### Описание работы

Целью настоящей работы является усвоение методов измерений и расчетов термических параметров. Для этого необходимо познакомиться с устройствами по измерениям температуры и давления тел. В итоге определяется взаимосвязь между термическими параметрами состояния.

Параметрами состояния может быть целый ряд величин: удельный объём, давление, температура, внутренняя энергия, энтальпия, энтропия, концентрация и другие.

Однако при отсутствии силовых полей (гравитационного, электромагнитного и др.) состояние однородного тела может быть однозначно определено тремя параметрами - это удельный объём, абсолютная температура и давление.

**Удельный объём**,  $v$  – это объём, занимаемый единицей массы данного вещества, измеряется в  $\text{м}^3 / \text{кг}$

**Давление** – это результат ударов молекул газа, находящихся в непрерывном хаотическом движении, о стенки сосуда, в котором заключен газ и представляет собой нормальную составляющую силы, действующей на единицу поверхности. В системе СИ давление измеряется в  $\text{н}/\text{м}^2$ .

Для измерения давлений применяют барометры и манометры, а для измерения разрежения – вакуумметры. Барометрами измеряют атмосферное давление, а манометрами давление, превышающее атмосферное.

Давление, превышающее атмосферное, называют *избыточным*.

Термодинамическим параметром состояния является только абсолютное давление.

**Абсолютным давлением** называют давление, отсчитываемое от абсолютного нуля давления или от абсолютного вакуума.

При определении абсолютного давления различают два случая:

- 1) Когда давление в сосуде больше атмосферного;
- 2) Когда оно меньше атмосферного.

Если давление в закрытом сосуде больше атмосферного, то оно измеряется манометром и мановакууметром и абсолютное давление в сосуде равно:

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{изб}} + P_{\text{атм}} \quad (1)$$

Во втором случае абсолютное давление измеряется вакууметром или мановакууметром и определяется по формуле:

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{атм}} - P_{\text{изб}} \quad (2)$$

Единицы измерения давления связаны между собой следующим образом:

$$1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па} = 10 \text{ бар} = 7500 \text{ мм.рт.ст.}$$

Техническая атмосфера, ат – сила в один килограмм, действующая по нормали на поверхность площадью  $1 \text{ см}^2$ .

$$1 \text{ ат} = 1 \text{ кг}/\text{см}^2 = 98066 \text{ Па} = 735,55 \text{ мм.рт.ст.}$$

**Температура** – характеризует среднюю интенсивность движения молекул, и чем больше средняя скорость движения молекул, тем выше температура тела.

Параметром состояния является абсолютная температура, измеряемая в градусах Кельвина.

Измерение температур производится как в градусах Кельвина ( $^{\circ}\text{K}$ ), так и в градусах Цельсия ( $^{\circ}\text{C}$ ) в зависимости от принятого начала отсчета (положения нуля) по шкале.

Для определения абсолютной температуры тела,  $T$ , необходимо измерить практическую температуру тела  $t$ .

$$\text{Тогда } T = t + 273,15$$

Для измерения практической температуры тела используются термометры. Если термометр и тело длительное время соприкасаются друг с другом, то их температуры будут одинаковы. Физические свойства термометра зависят от его температуры.

В термометрах расширения с изменением температуры налитых в них ртути, спирта или воды изменяется и их объем. Термометр, электрическое сопротивление которого зависит от температуры, называется термометром сопротивления.

Например, для термометра сопротивления, используемого в лабораторной работе электрическое сопротивление медного провода  $R_t$  зависит от температуры провода  $t$  следующим образом:

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t),$$

где,  $R_0 = 100,00$  Ом – электрическое сопротивление медного провода, когда температура провода ноль градусов Цельсия;

$\alpha = 0,00426$  1/град – температурный коэффициент сопротивления меди.

Для измерения сопротивления термометра сопротивлением потенциометрическим методом, термометр и резистор с известным сопротивлением  $R_N = 100,03$  Ом соединяют последовательно. Проходящий через них электрический ток имеет одинаковую силу

$$i = U_t / R_t = U_N / R_N$$

где  $U_t, U_N$  – падения напряжения на резисторе и термометре сопротивления.

$$\text{Тогда } R_t = R_N (U_t / U_N) \quad (3)$$

$$\text{и далее } t_2 = (R_t - R_0) / R_0 \alpha \quad (4)$$

**Термопара** – два разнородных проводника (сплава), сваренные по концам. Если в местах «холодного» и «горячего» спаев температуры разные, то в термопаре возникает электрический ток.

Если в разрыв одного проводника подключить потенциометр или милливольтметр, то он измерит термоэлектродвижущую (термоЭДС) термопары,  $E_t$ . В лабораториях и в народном хозяйстве используется хромель-копелевые (ХК), хромель-алюмелевые (ХА), медь-константановые (МК), платина – платинародиевые (ППр) термопары.

Если «холодный» спай термопары имеет постоянную температуру (ноль градусов Цельсия), то каждой температуре «горячего» спаивания будет соответствовать определенное значение термоЭДС.

Стандартная градуировочная таблица хромель-копелевой термопары:

Температур раб.конц. °С	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	ТермоЭДС в мВ									
0	0,00	0,07	0,13	0,20	0,26	0,33	0,39	0,46	0,52	
10	0,59	0,65	0,72	0,78	0,85	0,91	0,98	1,05	1,11	
20	1,18	1,24								
30	1,31	1,38	1,44	1,51	1,57	1,64	1,70	1,77	1,84	
	1,91									
	1,96	2,05	2,12	2,18	2,25	2,32	2,38	2,45	2,52	
	2,59									

Газы с малым абсолютным давлением и с абсолютной температурой много больше температуры кипения можно считать идеальным газом. Термические параметры состояния идеального газа связаны между собой уравнением

$$P \cdot v = (R_{\mu} / \mu) \cdot T$$

где  $R_{\mu} = 8314$  Дж/(кмоль·К) – универсальная газовая постоянная;

$\mu = 28,96$  кг / кмоль - молекулярная масса газа, кг/кмоль.

Удельный объём идеального газа может быть рассчитан через найденные значения абсолютного давления и температуры.

Плотность идеального газа связана с его удельным объёмом формулой

$$\rho = 1 / v.$$

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Основная часть экспериментальной установки – баллон из нержавеющей стали I (смотри рисунок). Постоянный объём баллона –  $0,001 \text{ м}^3$ . Баллон, насос 2, манометр М и вакуумметр В соединены трубопроводом. Избыточное давление воздуха в баллоне изменится при помощи насоса. Для поддержания постоянной температуры воздуха в баллоне предусмотрен термостат 3, электронагреватель 4 и холодильный агрегат 5.

Для измерения температуры используются: медный термометр  $R_t$ , хромель – копелевая термопара (ХК), переключатель 7 и потенциометр.

«Холодный» спай термопары помещён в сосуд Дьюара с тающим льдом. Термо ЭДС  $E_t$  хромель – копелевой термопары,  $U_N$  и  $U_t$  измеряются потенциометром при помощи переключателя.

## ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

В начале измерений избыточное давление воздуха больше атмосферного, вентили В1 и В2 закрыты. Тумблер «Электросеть» и «Термостат» включены, тумблер «Насос» выключен. При помощи потенциометра и переключателя измеряются  $E_t$ ,  $U_N$ ,  $U_t$ , записываются показания манометра. После этого, приоткрывая вентиль В1, устанавливают по манометру три промежуточных значения избыточного давления и повторяют при каждом из них измерения  $E_t, U_N, U_t$ .

При нулевом показании манометра вентиль В1 закрывается, В2 открывается. После включения лаборантом тумблера «Насос», при помощи вакуумного насоса в баллоне достигается избыточное давление меньше атмосферного и проводятся заключительные измерения потенциометром  $E_t, U_N, U_t$ .

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Для определения среднего значения практической температуры  $t$  необходимо использовать (4) и градуировочную таблицу хромель-копелевой термопары.

Отчет по выполненной работе должен содержать следующее:

1. Сведения по теории и методу измерений.
2. Таблицу измерений по форме:

$$P_{\text{атм}} = \dots \text{Па} \qquad P_{\text{атм}} = \dots \text{мм.рт.ст.}$$

	I	2	3	4	5
P, МПа					
E, мВ					
$t_1, ^\circ\text{C}$					
R <sub>t</sub> , Ом					
$t_2, ^\circ\text{C}$					

3. Таблица обработанных результатов:

	I	2	3	4	5
$P_{\text{изб}}, \text{кг/см}^2$					
E, мВ					
$U_N, \text{мВ}$					
$U_t, \text{мВ}$					
$\bar{t} = \frac{t_1 + t_2}{2}$					
T, К					
$\mathcal{V}, \text{м}^3/\text{кг}$					
$\rho, \text{кг/м}^3$					

4. Построить и объяснить графики зависимостей  $P=f(v)$ ,  $\rho = \varphi(P)$ ;

### Контрольные вопросы:

1. Какие основные термические параметры вы знаете?
2. Какие виды давлений вы знаете?
3. Какие приборы применяют для измерения давлений?
4. Что характеризует температура?
5. Какой прибор применяют для измерения температуры?
6. Чему равно абсолютное давление в баллоне, если его открыть?
7. Будут ли одинаковыми значения  $t_1$  и  $t_2$ , если в сосуде Дьюара весь лёд растает?
8. Покажите зависимость плотности идеального газа от давления и температуры.
9. Рассчитайте массу воздуха в баллоне в начале и в конце процесса.

## Лабораторная работа №2

### Изохорное нагревание воды и водяного пара

#### Цель работы

Углубление и закрепление знаний студентов по теории термодинамических процессов и парообразования на примере изохорного нагрева воды и водяного пара. Экспериментальное определение зависимости давления, объема, степени сухости насыщенного водяного пара от его температуры. Приобретение навыков использования таблиц и диаграмм термодинамических свойств воды и водяного пара.

#### Краткие теоретические сведения

Все реально существующие в природе тела встречаются в трехфазовом состоянии: твердом, жидком и газообразном (пар). В определенных условиях вещества могут переходить из одного фазового состояния в другое. Возможно способы перехода вещества из одной фазы в другую можно показать на фазовой РТ – диаграмма (рис.1) на примере воды.

Линия 1-4 графически показывает переход воды из твердого состояния (лед) при постоянном давлении нагреванием сначала в жидкость, а затем в газ (пар).

Кривая АВ характеризует переход тела из твердого состояния в жидкое при различных Р и Т. Такой фазовый переход называется плавлением. Фазовый переход тела из жидкого состояния в пар при различных давлениях и температурах называется парообразованием (кипением) и характеризуется АК- кривой парообразования (кипения, насыщения). АС представляет собой кривую сублимации. Сублимацией называется переход тела из твердого состояния, минуя жидкую фазу, сразу в газообразное.

Место пересечения этих трех кривых называется тройной точкой – точкой, в которой вещество находится в трех агрегатных состояниях (твердом, жидком, газообразном). Параметры тройной точки для воды:  $P_A=0,00611\text{бар}$ ,  $V_A=0,001\text{м}^3/\text{кг}$ ,  $T_A=273,16^\circ\text{К}$ , ( $t_A=0,01^\circ\text{С}$ ).

В настоящей работе описывается изохорный нагрев воды и водяного пара. Это означает, что вода и водяной пар нагреваются в закрытом сосуде, следовательно, их объем остается постоянным ( $V=\text{const}$ ), масса воды и пара также постоянна ( $M=\text{const}$ ) и удельный объем постоянен ( $v=V/M=\text{const}$ ).

Необходимо отметить, что первоначально вода в сосуде при комнатной температуре и начальном давлении находится в двухфазном состоянии влажного насыщенного пара.

Влажным насыщенным паром называется пар, полученный из кипящей жидкости и имеющий одинаковую с ней температуру. Другими словами, влажный насыщенный пар – это механическая смесь кипящих капелек жидкости с сухим насыщенным паром, находящихся в термодинамическом равновесии. Пар, не содержащий в своем составе кипящих капелек жидкости, называется сухим насыщенным.

При подводе теплоты к влажному пару в изохорном процессе увеличивается его давление, температура, а также меняется массовое соотношение кипящей воды и образующего пара.

Состояние насыщенного пара (как влажного, так и сухого) определяют температура и давление насыщения (кипения) и степень сухости  $\chi$ .

Под степенью сухости понимают массовую долю сухого пара во влажном паре

$$\chi = M_{\text{с.п.}}/M_{\text{с.п.}}+M_{\text{к.ж.}};$$

где  $M_{\text{с.п.}}$  – масса сухого пара;  $M_{\text{к.ж.}}$  – масса кипящей жидкости.

Степень сухости может принимать значения от 0 до 1. Если  $\chi=0$ , то вода находится в состоянии начала кипения (насыщения) (рис.3, линия АК). Если  $\chi=1$ , то вода находится в состоянии сухого насыщенного пара (линия KB). Если 0

## Лабораторная работа №3

### Экспериментальное исследование изохорного процесса для газа

#### Цель работы

Изучение зависимости давления и температурой в процессе изохорного нагревания газа . Укрепление и закрепление знаний по теории термодинамических процессов , об идеальном и реальном газе . Получение навыков в проведении и обработке эксперимента .

#### Краткие сведения

Состояние любого вещества может быть определено с помощью термодинамических параметров состояния . Различают термические параметры состояния ( абсолютная температура , абсолютное давление , удельный объём ) и калорические параметры ( Энтальпия , внутренняя энергия , энтропия ) .

Наиболее удобными и распространёнными параметрами состояния являются термические параметры  $P, T, \tilde{v}$  . Состояние вещества ( системы ) может быть изменено , если к нему подвести ( либо отвести ) энергию в виде теплоты или работы . В результате измерения вещества измеряется хотя бы один из параметров состояния , т.е. будет происходить термодинамический процесс .

*Термодинамическим процессом* называется последовательность изменяющихся состояний рассматриваемой системы ( вещества ), характеризующихся изменением её термодинамических параметров . Различают равновесные и неравновесные термодинамические процессы .

*Равновесными называют процессы* , представляющие собой непрерывную последовательность равновесных состояний системы ( все части системы имеют одинаковое давление и температуру ) .

*Неравновесными процессами* называются процессы , при протекании которых система не находится в состоянии равновесия ( различные части системы имеют различные давления , температуры ) .

Все реальные процессы являются неравновесными . Однако если скорость протекания неравновесного процесса уменьшить до нуля , то неравновесный процессы иногда называют квазистатическими . Равновесный процесс может быть изобарным (  $P = \text{const}$  ) , изотермический (  $T = \text{const}$  ) , изохорный (  $\tilde{v} = \text{const}$  ) , адиабатный (  $dq = 0$  ) , политропный .

В настоящей работе представляется исследование реального газа в сосуде постоянного объёма . Термодинамический процесс , происходящий при постоянном объёме называется *изохорным* .

Уравнение изохорного процесса является уравнением вида

$$\tilde{v} = \text{const}, P = \text{const} \text{ и } V = M\tilde{v} = \text{const} . \quad (1)$$

При проводе ( или отводе ) теплоты в изохорном процессе изменяется внутренняя энергия газа , т. е. ( сжатие ) равно нулю (  $d\tilde{l} = P d\tilde{v} = 0$  ). Количество это может быть выражено из первого закона термодинамики по формуле :

$$dq_v = du , \quad (2)$$

где  $-dq_v$  – бесконечно малое количество теплоты , подведённое ( отведённое ) в процессе  $\tilde{v} = \text{const}$  ;  $d\tilde{u}$  – бесконечно малое измерение внутренней энергии .

При подводе теплоты к газу в изохорном процессе увеличивается температура . Что приводит к возрастанию давления и внутренней энергии газа . Отвод теплоты сопровождается снижением температуры и давления , уменьшением внутренней энергии газа .

В настоящей работе процесс нагрева осуществляется достаточно медленно , поэтому скорость протекания процесса мала . При таких условиях отклонения системы от состояния равновесия могут быть малы .

Следовательно , с достаточной степенью точности данный процесс можно считать равномерным , представляющим собой непрерывную последовательность равновесных состояний системы .

Для равновесного состояния реального газа справедливо уравнение  
$$P\check{v} = ZRT, \quad (3)$$

Для идеального газа справедливо уравнение

$$P\check{v} = RT, \quad (4)$$

Где – абсолютное давление, Па; T – абсолютная температура, К;  $\check{v}$  – удельный объем, м<sup>3</sup>/кг; R – частная газовая постоянная, Дж/кг К; Z – коэффициент сжимаемости.

Коэффициент сжимаемости учитывает отклонение поведения реального газа он может быть равным, больше или меньше единицы в зависимости от состояния системы.

Для идеального газа коэффициент сжимаемости равен единице (Z=1).

Взаимная связь термических параметров для идеального и реального газа в изохорном процессе может быть получена из совместного рассмотрения формул (1), (3), (4) и имеет следующий вид:

$$P_1/P_1 Z_1 = P_2/P_2 Z_2 = \dots = P_n/P_n Z_n = R/\check{v} = \text{const}; \quad (5)$$

для идеального газа

$$P_1/P_1 = P_2/P_2 = \dots = P_n/P_n = R/\check{v} = \text{const}. \quad (6)$$

При нагреве любых тел происходит изменение их размеров сосуда, т.е. происходит барическая деформация.

Изменение объема сосуда (пъезометра) вследствие его деформации приводит к изменению удельного объема газа, находящегося в пьезометре, а вызывает непостоянство взаимной связи параметров в уравнение (5), которое может быть устроено введением поправочных коэффициентов на деформацию пьезометра.

В настоящей работе барической деформацией пренебрегаем, так как  $\Delta P < 10$  бар. Поправочный коэффициент на температурную деформацию определяется по уравнению:

$$A_n = V_n / V_1 = \check{v}_n / \check{v}_1 = [1 + 3\alpha(t_n - t_1)], \quad (7)$$

Где V<sub>1</sub>, V<sub>n</sub> – объем сосуда (пъезометра) соответственно при температуре t<sub>1</sub>, t<sub>n</sub>;  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения материала пьезометра.  $\alpha = 16 \cdot 10^{-3} \cdot 1 / \text{град}$ . Введение в уравнение (5) поправочных коэффициентов устраняет непостоянство взаимной связи параметров.

Уравнение (5) с учетом последнего примет вид

$$P_1 A_1 / P_1 Z_1 = P_2 A_2 / P_2 Z_2 = \dots = P_n A_n / P_n Z_n = R/\check{v} = \text{const} \quad (8)$$

### Экспериментальная установка

На стенде собраны две экспериментальные установки. Конструкция установок одинакова (рис. 1). Исследуемый газ заполняет толстостенный сосуд (пъезометр) 1. Сосуд 1 обогревается с помощью электрического нагревателя, выполненного из нихромовой проволоки 4. Нагреватель помещен в керамические бусы для изоляции его корпуса пьезометра. Пъезометр 1 вместе с электрическим нагревателем 4 покрыт сверху тепловой изоляцией из асбестового шнура. Для измерения температуры газа в пьезометре предусмотрена хромель-копелевая термопара 2, которая через уплотнение помещена внутри пьезометра.

Термопара одной из установок подключается через тумблер к потенциометру 6 марки КВП1-503, шкала которого отградуирована в градусах Цельсия.

Для измерения давления газа внутри пьезометра в схеме предусмотрен образцовый манометр 3, соединенный через капилляр с внутренним объемом пьезометра 1. Заполнение пьезометра газом осуществляется через вентиль 5. Установки имеют одинаковые электрические схемы. Включение установки осуществляется с помощью тумблера. Для контроля напряжения, поданного на нагреватель, в схеме предусмотрена контрольная лампочка.

### Проведение эксперимента

После ознакомления со схемой установки и подготовки таблицы для записи наблюдения (табл. 1) включается нагреватель установки с помощью тумблера. При этом должна загореться контрольная лампочка. Осуществляется медленный непрерывный нагрев сосуда. Для

заданных преподавателем значений температур фиксируют значения давления по манометру . измерение температуры и давления следует производить одновременно . В ходе проведения эксперимента снимают показания давления и температуры для шести различных состояний газа . Результаты записываются в табл . 1 . После окончания измерений нагреватель отключается . Барометром измеряется атмосферное давление .

### Обработка результатов

По результатам измерений определяется абсолютное давление и температуры по уравнению  $P_a = P_i + P_{атм}$  , МПа ,  $T = t + 273$  ; К .

Для каждого состояния, кроме начального , определяется поправочный коэффициент  $A_n$  , учитывающий деформацию пьезометра по формуле ( 7 ) . По графику , приведенному на стене , или по табличным данным ( табл .3) определяется значение коэффициента сжимаемости  $Z$  для газа .

Определяются отношения абсолютных давлений и температур для экспериментальных точек по уравнению ( 6 ) . Строится график зависимости давления  $P_n$  от температуры  $T_n$  в изохорном процессе . Затем рассчитываются отношение давлений и температур по соотношению ( 8 ) . Строится график  $P_n A_n / Z_n T_n$  .

### Оформление отчёта

Отчёт о выполненной работе должен содержать :

1.Принципиальную схему экспериментальной установки ( рис.1 ) .

2.Результаты наблюдений .

Атмосферное давление  $P_{атм} = \dots$  Па ( мм. рт. ст. )

Таблица 1

№ изм.	Ед . изм.	1	2	3	4	5	6
Давление избыточное	Деление						
	МПа						
Температура	С						

3.Результаты обработки эксперимента

Таблица 2

№ изм.	1	2	3	4	5	6
Абсолютное Давление, МПа						
Абсолютная температура, К						
Коэффициент сжимаемости $Z_n$						
Поправка на температурную деформацию, $A_n$						
Отношение $P_n/T_n, Па/К$						
Отношение $P_n$						

An/Zn Тп, Па/К						
----------------	--	--	--	--	--	--

4.Графики зависимостей давлений до температуры  $P_n = f(T_n)$  и  $P_n An/Zn = f(T_n)$  .

### Контрольные вопросы

1. Что понимается под идеальным и реальным газом ?
2. Что такое термодинамический процесс?
3. Что представляет собой равновесный и неравновесный процессы ?
4. Что называется изохорным , изобарным , изотермическим , адиабатным процессами ?
5. Как определить абсолютное давление газа в сосуде ?
6. Почему происходит изменение объема сосуда при проведении эксперимента на данной установке ?
7. В каком случае отношение параметров состояния в изохорном процессе будет постоянной величиной ?
8. Объясните уравнение первого закона термодинамики для изохорного процесса.

Т, К	Р, МПа							
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0
290	0,99958	0,99916	0,99874	0,99833	0,99791	0,99750	0,99668	0,99584
300	0,99972	0,99942	0,99912	0,99883	0,99853	0,99823	0,99762	0,99704
310	0,99980	0,99960	0,99939	0,99918	0,99898	0,99878	0,99837	0,99794
320	0,99985	0,99970	0,99957	0,99942	0,99928	0,99914	0,99886	0,99857
330	0,99991	0,99981	0,99972	0,99963	0,99954	0,99944	0,99927	0,99909
340	0,99998	0,99996	0,99994	0,99992	0,99992	0,99987	0,99985	0,99980
350	1,00001	1,00002	1,00003	1,00004	1,00005	1,00006	1,00007	1,00008
375	1,00011	1,00024	1,00036	1,00048	1,00060	1,00072	1,00096	1,00120
400	1,00017	1,00034	1,00052	1,00070	1,00090	1,00108	1,00146	1,00162
425	1,00020	1,00043	1,00064	1,00087	1,00109	1,00132	1,00166	1,00220
450	1,00026	1,00057	1,00086	1,00114	1,00144	1,00163	1,00230	1,00288

### Литература

- 1.Техническая термодинамика . Крутов В.И. , Исаев С .И ., Кожинов И.А. и др. 3-е изд. Перер. и доп. –М .: Высш. Шк., 1991. -384с.
- 2 Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача: Учебное пособие для вузов.– М.: Высш. Шк., 1980.-469с.
- 3 Зубарев В.Н., Александров А.А. Практикум по технической термодинамике.–М.: Энергия, 1971.

### Лабораторная работа №4

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗОБАРНОЙ ОБЪЕМНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОЗДУХА

#### Цель работы

Усвоить понятие теплоемкости тела, уяснить взаимосвязь между различными видами теплоемкости. Уметь использовать теплоемкости тела для расчета количества тепла.

#### Краткие теоретические сведения

**Теплоемкость тела** – физическое свойство тела, его способность изменять свою температуру при подводе или отводе тепла.

Численные значения теплоемкости тел при различных температурах и давлениях тела приводятся в таблицах физических (теплофизических) свойств.

Тело изменяет температуру при подводе или отводе тепла в изобарном, изохорном и политропном процессах. Для этих процессов при расчете количества тепла используются соответственно изобарные ( $C_p, C_{\mu}, C'_p$ ), изохорные ( $C_v, C_{\mu v}, C'_v$ ) и теплоемкости тела в политропном процессе ( $C_n, C_{\mu n}, C'_n$ ).

Численное значение теплоемкости тела равно количеству тепла, которое необходимо для изменения его температуры на один градус (Цельсия или Кельвина).

$$C_x = \frac{dQ_x}{dt}$$

Это количество тепла разное для различных процессов подвода или отвода и для разного количества массы тела.

В тепловых расчетах обычно используют удельную теплоемкость, представляющую собой теплоемкость единицы количества вещества.

Различают три вида удельной теплоемкости  
**Удельные массовые теплоемкости** ( $C_p, C_v, C_n$ ), Дж/(кг·К) определяются по формуле:

$$C = \frac{Q_{1-2}}{G(T_2 - T_1)}$$

**Удельные молярные теплоемкости** ( $C_{\mu p}, C_{\mu v}, C_{\mu n}$ ), Дж/(к моль·К)

$$C_{\mu} = \frac{Q_{1-2}}{M(T_2 - T_1)}$$

**Удельные объемные теплоемкости** ( $C'_p, C'_v, C'_n$ ), Дж/(м<sup>3</sup>·К)

$$C' = \frac{Q_{1-2}}{V_H(T_2 - T_1)}. \quad (1)$$

В этих формулах  $Q_{1-2}$ –количество тепла, подводимое к телу в процессе 1-2(изобарном, изохорном или политропном),  $G$  - масса тела в кг,  $T_2-T_1$ -температуры тела в конце и начале процесса 1-2,  $M$ - число киломолей тела,  $V_H$ – объем, занимаемый телом при нормальных условиях

( $P_H=101325$  Па,  $T_H=273,15$  К).С учетом зависимостей  $G=M \cdot \mu = \rho_H \cdot V_H$ , где  $\mu$ - молекулярная масса,  $\rho_H$ - плотность газа при нормальных условиях, приходим к соотношениям

$$C_p = \frac{C_{\mu}}{\mu} = \frac{C'}{\rho_H}. \quad (2)$$

Для теплоемкости идеальных газов и их смесей справедливо уравнение Майера

$$\begin{aligned} C_p - C_v &= R; \\ C_{\mu} - C_{\mu v} &= R_{\mu} = 8314; \quad (3) \\ C'_p - C'_v &= R \cdot \rho_n; \end{aligned}$$

где  $R = R_{\mu} / \mu$ - газовая постоянная идеального газа или смеси идеальных газов.

Экспериментально проще определять изобарные теплоемкости, изохорные рассчитывать через (3), а теплоемкости тела в политропном процессе рассчитываются по формулам:

$$C_n = \frac{C_v(n-K)}{n-1}, C_{\mu n} = C_{\mu v} \frac{(n-K)}{n-1}, C'_n = C'_v \frac{(n-K)}{n-1}, \quad (4)$$

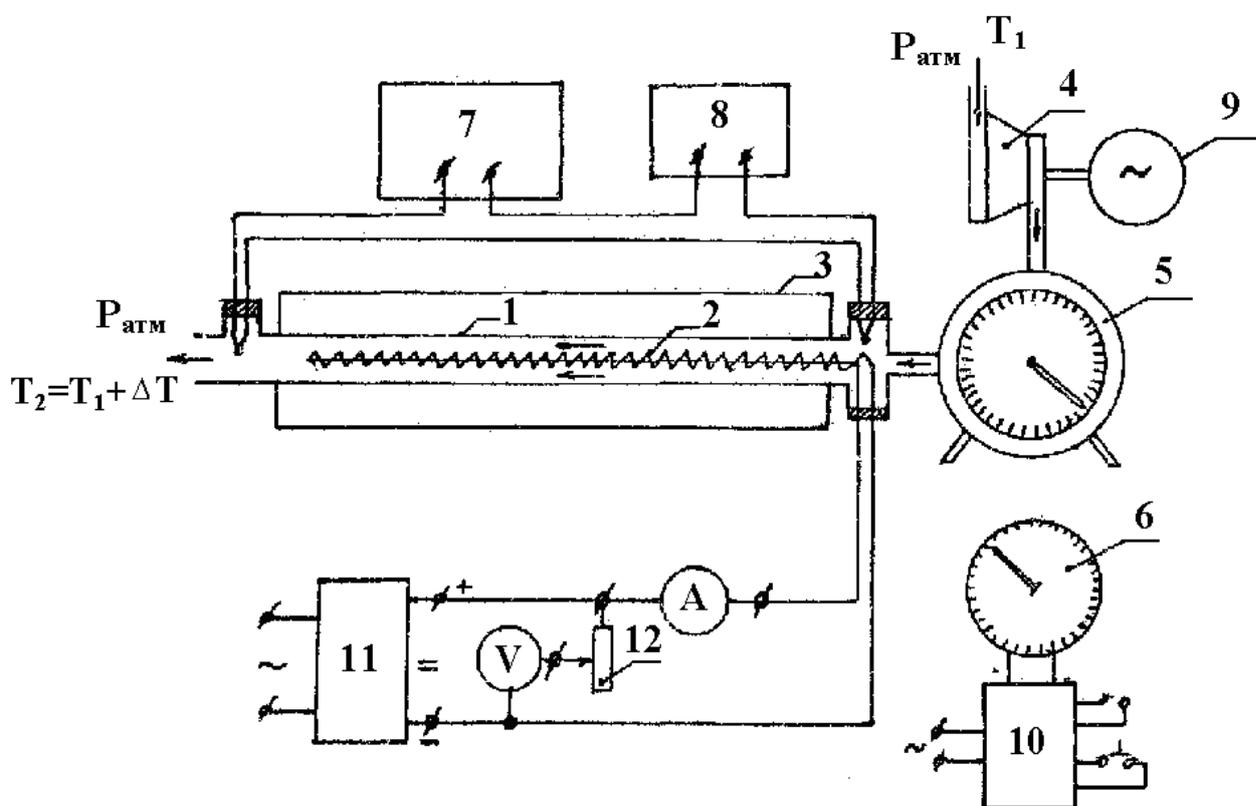
где  $n$ -показатель политропы,  $K = C_p / C_v = C_{\mu p} / C_{\mu v} = C'_p / C'_v$ - показатель адиабаты тела.

Для расчета количества тепла, подводимого к телу, необходимо использовать соответствующую теплоемкость тела. Например, количество тепла, подводимое  $M$  молям идеального газа в изохорном процессе, чтобы увеличить его температуру от  $T_1$  до  $T_2$ , определяется по формуле

$$Q_v = M \cdot C_{mv}(T_2 - T_1).$$

В лабораторной работе для определения изобарной объемной теплоемкости воздуха используется уравнение (1), в котором  $Q_{1-2}$  – теплота, подводимая к воздуху при постоянном его давлении в течение секунды,  $V_n$  – объем воздуха, проходящий через калориметр за одну секунду и приведенный к нормальным условиям.

### Экспериментальная установка



Основная часть калориметра – стальная труба 1 (см. рисунок), внутри которой закреплен электронагреватель воздуха 2. Теплота, выделяющаяся на электронагревателе за 1 секунду и отдаваемая воздуху, определяется по формуле:

$$Q_{1-2} = I \cdot U,$$

где  $I$  – электрический ток, протекающий по электронагревателю и измеряемый амперметром  $A$ ;  $U$  – напряжение на электронагревателе, измеряемое (вольтметром),  $V$ .

Отвакуумированный металлический кожух 3 устраняет тепловые потери в окружающую среду. Воздух атмосферного давления и начальной температуры  $T_1$  проходит через газовый счетчик 5 (для измерения объема воздуха) и трубу 1 при помощи вентилятора 4. Электросекундомером 6 измеряется время прохождения воздуха через трубу. На входе и на выходе трубы 1 укреплены два спая дифференциальной термопары. При помощи микровольтметра 7 и нуль – компенсатора 8 измеряется изменение термоЭДС термопары  $\Delta E$ , которое пропорционально изменению температуры воздуха  $\Delta T = T_2 - T_1$

Вспомогательные устройства: электродвигатель 9, устройство 10 для останова и приведения к нулю электросекундомера, 11- выпрямитель, 12 – делитель напряжения.

### Проведение измерений

Атмосферное давление  $P$  и температуру воздуха в лаборатории  $T_1$  измеряют барометром и ртутным термометром. После включения лаборантом установки снимаются показания амперметра  $I$  и действительного значения напряжения вольтметра  $U_B$  на электронагревателе

$$m = 9; U = U_B \cdot m,$$

где  $m$  – приведенное на стенде значение коэффициента делителя напряжения.

При прохождении стрелки секундомера через нулевую отметку снимается показание газового счетчика  $V_0$ . Через время  $\tau = 60$  секунд вновь записывается показание счетчика  $V_{60}$ . Разница этих значений дает объем воздуха (в литрах), прошедший через трубу 1 за одну минуту. В последнюю очередь снимается установившееся показание микровольтметра  $\Delta E$ .

### Обработка измерений

Объем воздуха, прошедший через трубку за одну секунду (объемный расход),  $m^3/c$  определяется по формуле,

$$V = \frac{V_{60} - V_0}{60}.$$

Для того, чтобы привести этот объем к нормальному давлению и температуре, используется формула,  $m^3/c$

$$V_H = V \cdot \frac{P_{атм}}{P_H} \cdot \frac{T_H}{T_1}.$$

Изменение температуры воздуха в трубе при проводе тепла  $Q_{1-2}$

$$\Delta T = T_2 - T_1 = \Delta E / 65,$$

где 65-стандартная термоЭДС хромель-копелевой термопары.

Средняя в интервале температур от  $T_1$  до  $T_2$  объемная изобарная теплоемкость воздуха определяется в  $Дж/м^3 \cdot К$  по формуле

$$C'_{pm} = \frac{I \cdot U}{V_H (T_2 - T_1)}.$$

Остальные изобарные и изохорные теплоемкости воздуха необходимо рассчитать, используя выражения (2) и(3). Плотность воздуха при нормальных условиях  $\rho_H = P_H / RT_H$ , молекулярная масса воздуха  $\mu = 28,96$  кг/кмоль.

### СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Краткие теоретические сведения и описание экспериментальной установки.
2. Таблица измерений (табл. 1)

Таблица 1

$P_{атм}$	$T_1$	$I$	$U_B$	$V_0$	$V_{60}$	$\Delta E$

Па	К	А	В	м <sup>3</sup>	м <sup>3</sup>	мкВ

### 3. Таблица обработка измерений (табл. 2)

Таблица 2

U	V	V <sub>H</sub>	T <sub>2</sub> -T <sub>1</sub>	C <sub>Pm</sub> <sup>I</sup>
В	м <sup>3</sup> /с	м <sup>3</sup> н/с	К	Дж/(м <sup>3</sup> нК)

### 4. Таблица расчетных величин (табл. 3)

Таблица 3

$\rho_H$ кг / м <sup>3</sup> <sub>H</sub>	C <sub>P</sub> Дж / кгК	C <sub>μP</sub> Дж / кмольК	C <sub>V</sub> Дж / кгК	C <sub>V</sub> <sup>I</sup> Дж / м <sup>3</sup> К	C <sub>μV</sub> Дж / кмольК	К

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему нельзя определить экспериментально теплоемкость тела в изотермическом и адиабатном процессах?
2. Объясните уравнение Майера.
3. Что называется теплоемкостью тела, чему она численно равна?
4. Почему численные значения теплоемкости тела в политропном процессе могут быть отрицательными?
5. В каком процессе теплоемкость тела равна нулю и почему?
6. Что больше по численному значению массовая изобарная теплоемкость или мольная изохорная теплоемкость одного и того же газа?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кириллин В.А. и др. Техническая термодинамика М.; Энергия,1974.
2. Нащекин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача М.: Высшая школа

## Лабораторная работа №5

Определение коэффициента теплоотдачи при продольном обтекании пластины

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Лабораторная работа проводится с целью углубления знаний по теории процессов теплоотдачи при естественном движении среды и для ознакомления с методикой экспериментального изучения процессов конвективного теплообмена.

В результате работы должны быть усвоены: причины естественного движения среды и условия конвективного теплообмена, зависимость коэффициента теплоотдачи от толщины пограничного слоя, закон Ньютона - Рихмана.

## КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Совместный процесс конвекции и теплопроводности называется конвективным теплообменом.

Теплопроводность – процесс переноса тепла в сплошной неподвижной среде (твёрдое тело, жидкость, газ) при наличии разности температур в отдельных ее точках или между ее отдельными частями. Теплопроводность обусловлено движением микрочастиц тела.

Под конвекцией тепла понимают процесс переноса тепла при перемещении микрочастиц подвижной среды (жидкости или газа) в пространстве из области с одной температурой в область другой температуры. При этом перенос тепла неразрывно связан с переносом массы среды в пространстве.

При движении жидкости или газа неизбежно соприкосновение отдельных микрочастиц, имеющих различные температуры, поэтому конвекция тепла всегда сопровождается теплопроводностью.

Конвективный теплообмен между поверхностью твёрдого тела и движущейся средой называется конвективной теплоотдачей или теплоотдачей.

В зависимости от причины возникновения движения подвижной среды различают вынужденную и естественную конвекцию. В случае вынужденной конвекции движение среды происходит за счет внешних сил, создаваемых посторонним возбудителем, например, насосом, вентилятором, дымососом и т.д. При естественной (свободной) конвекции движение жидкости или газа происходит вследствие действия подъемной силы, возникающей в самой среде, из-за разности плотностей нагретых и холодных частиц подвижной среды.

При соприкосновении, например, воздуха с нагретым твёрдым телом более близкие слои воздуха, быстрее прогреваясь, вследствие теплопроводности, будут иметь большую температуру, чем более удаленные слои. Возникает разность температур более или менее удаленных частей воздуха, приводящая к возникновению разности плотностей воздуха в различных ее областях. Более нагретые слои воздуха поднимаются вверх, ввиду их малой плотности холодные слои движутся вниз. Чем больше разница температур, тем больше скорость естественного движения.

По характеру движения среды различают два режима течения: ламинарный и турбулентный, которые имеют место, как при естественной, так и при вынужденной конвекции. При ламинарном режиме течение отдельные слои подвижной среды движутся параллельно, не перемешиваясь. При турбулентном режиме течения слои движутся (газа или жидкости) хаотически, перемешиваются друг с другом, но на поверхности твёрдого тела в тонком вязком подслое среды всегда имеет место ламинарный режим движения. При движении среды вдоль поверхности твёрдого тела в тонком образуется, так называемый, пограничный слой, в пределах которого температура среды изменяется от температуры, равной температуре поверхности тела до температуры среды вне пограничного слоя.

В пределах пограничного слоя скорость движения среды изменяется от нуля, на поверхности тела (вследствие прилипания), до максимума на некотором расстоянии, а на расстоянии от поверхности тела, равном толщине пограничного слоя (п.с) снова равно нулю (рис. 1).

Так как резкого перехода от пограничного слоя к неподвижной внешней среде нет, то под толщиной пограничного слоя понимается расстояние от поверхности твёрдого тела, на котором скорость движения и температура среды в пограничном слое отличаются от температуры и скорости движения неподвижной среды на определённую малую величину (например, 1 %). В начале обтекания твёрдого тела толщина пограничного слоя мала и течение среды в нём имеет струйчатый, ламинарный характер. По направлению движения среды толщина пограничного слоя увеличивается и при определённом её значении течение среды становится неустойчивым, происходит разрушение ламинарного слоя, увеличивается пограничный слой. После неустойчивого переходного режима движения имеет место турбулентное течение среды в пограничном слое.

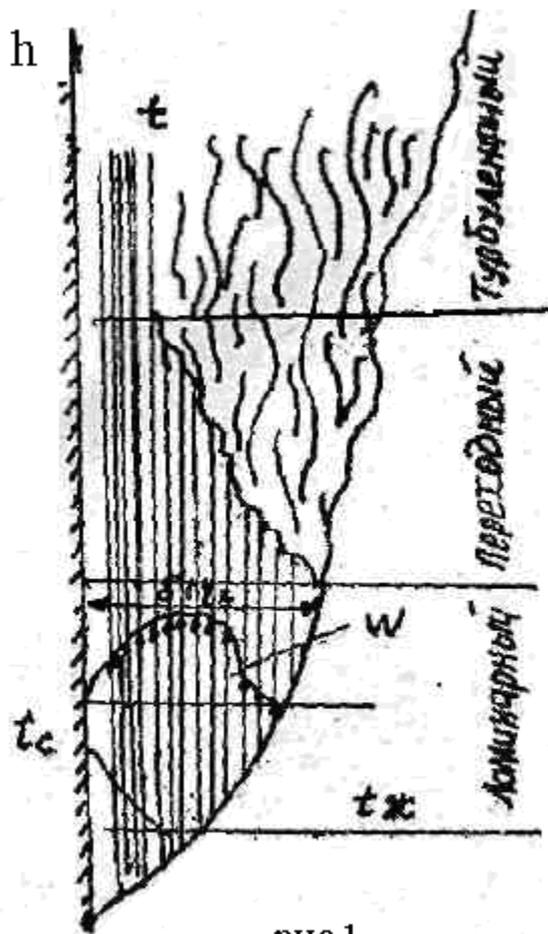


рис.1

Для ламинарного пограничного слоя и вязкого подслоя турбулентного пограничного слоя, согласно гипотезе Прандтля, перенос тела в среде в направлении, перпендикулярном движению среды, происходит путем теплопроводности и может быть описан законом Фурье:

$$q = \frac{\lambda_{жс}}{\delta_{н.с}} (t_c - t_{жс})$$

где  $q$  – плотность теплового потока, количества тепла, переданное в единицу времени через единицу изотермической поверхности движущейся среды,  $Вт / м^2$  ;

$\lambda_{жс}$  – коэффициент теплопроводности среды, характеризует способность среды проводить тепло через себя,  $Вт / м \cdot К$  .

Одновременно, независимо от вида конвекции и режима движения среды в пограничном слое, процесс переноса тепла между поверхностью твёрдого тела и подвижной средой описывается законом Ньютона – Рихмана:

$$q = \alpha / (t_{жс} - t_c) \quad (2)$$

где  $\alpha$ ,  $Вт / м^2 \cdot К$  – коэффициент теплоотдачи, характеризующий интенсивность теплообмена между поверхностью твердого тела и жидкостью.

Численное значение  $\alpha$  равно количеству, передаваемого от единицы поверхности твёрдого тела к подвижной среде в единицу времени,  $\tau$  при разности температур поверхности тела и подвижной среды в один градус.

Для установившегося процесса конвективной теплоотдачи количество тепла, отдаваемого от поверхности твёрдого тела в подвижную среду, равно количеству тепла, передаваемого через пограничный слой вследствие теплопроводности.

Поэтому из выражений (1) и (2) следует

$$\alpha = \frac{\lambda_{жс}}{\delta_{н.с}} \quad (3)$$

Изменение толщины пограничного слоя отражается на интенсивности процесса теплоотдачи, что приводит к изменению температуры поверхности твёрдого тела при условии постоянства на ней плотности теплового потока и неизменности температуры подвижной среды вдали от твёрдого тела.

Выражение (3) не может быть использовано для определения  $\alpha$ , так как толщина пограничного слоя есть величина условная, зависящая от многих факторов, таких, как скорость движения среды  $W$ , разность температур  $(t_c - t_{жс})$ , кинематическая вязкость среды  $\nu$ , коэффициент температуропроводности  $a$ , коэффициент объёмного расширения  $\beta$ , состояния поверхности твёрдого тела, его размеры  $l$ , форма расположения твёрдого тела в пространстве.

Таким образом, коэффициент теплоотдачи является сложной функцией различных факторов

$$\alpha = f(\lambda_{жс}, W, t_c, t_{жс}, \nu, a, \beta, l, \dots) \quad (4)$$

Попытки аналитического определения зависимости (4) наталкиваются на серьёзные трудности. Поэтому при изучении процессов теплоотдачи большое значение приобретает эксперимент. Для обобщения опытных данных они представляются в критериальной форме, с использованием теорий подобия для определения свободной конвекции приводится к критериальной зависимости вида:

$$Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)$$

$$Nu = \frac{\alpha \cdot \ell}{\lambda_{жс}} - \text{критерий Нуссельта};$$

где  $Nu$  – критерий Нуссельта, определяется с помощью критериальных уравнений;

а) при ламинарном режиме движения воздуха вдоль вертикальной пластины

$$(10^3 < Gr_{hжс} \cdot Pr_{жс} < 10^9)$$

$$Nu = 0,76(Gr_{hжс} \cdot Pr_{жс})^{0,25}; \quad (5)$$

б) при турбулентном режиме движения воздуха

$$Gr_{hжс} \cdot Pr_{жс} > 10^9$$

$$Nu_{hжс} = 0,76(Gr_{hжс} \cdot Pr_{жс})^{0,33}; \quad (6)$$

В уравнениях (5), (6) критерий Грасгофа  $Gr_{hжс}$  определяется как

$$Gr = \frac{q \cdot \beta(t_c - t_{жс}) \cdot h^3}{\nu^2}, \quad (7)$$

где  $g = 9,81 м/с^2$  – ускорение свободного падения;  $\beta = 1/T_{опр}$  – температурный коэффициент объёмного расширения воздуха,  $1/К$ ;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха,  $м^2/с$ .

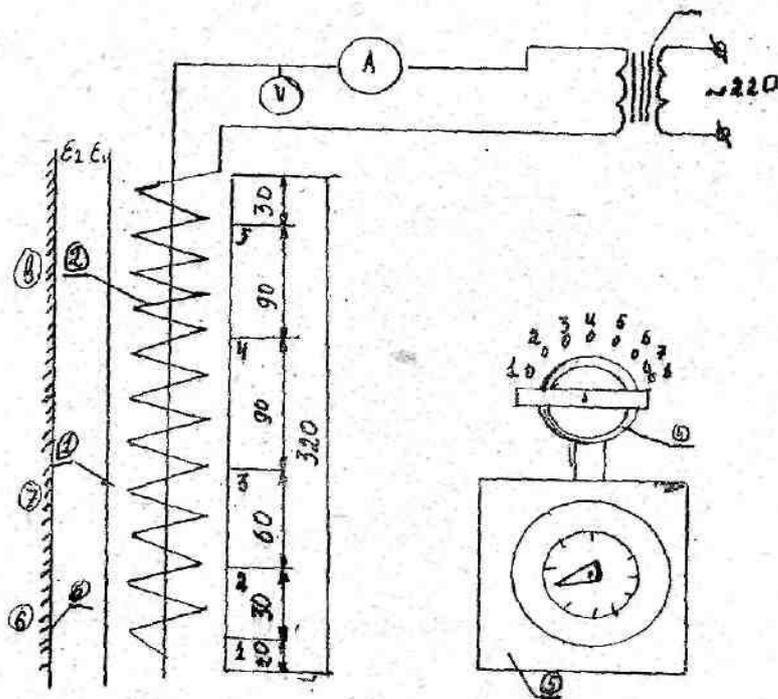
Физические величины  $\nu$ ,  $\lambda$  и критерий Прандтля  $Pr_{жс}$  выбираются из таблиц физических свойств по определяющей температуре, равной температуре воздуха вдали от поверхности тела.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Коэффициент теплоотдачи определяется для случая естественного движения воздуха вдоль вертикально расположенной пластины. Пластины состоят из двух латунных листов 1 высотой  $h = 0,32 м$  и шириной  $b = 0,3 м$  между которыми равномерно расположен электрический нагреватель 2 (рис.2).

Для определения тепла, выделяющегося на нагревателе в единицу времени, используются показания амперметра А и вольтметра (V). Питание электрического нагревателя осуществляется от лабораторного автотрансформатора 3.

Температура наружной поверхности 1 измеряется пятью хромель – копелевыми термопарами, расположенными на одной линии по высоте пластины. Расстояние между местами закладки термопар приведены на рис.2. Для учёта тепла, теряемого пластиной в единицу времени вследствие лучистого теплообмена, параллельно пластине 1 расположена вспомогательная пластина б, температура поверхности которой определяется с помощью трёх термопар 6, 7, 8.



Термопары поочередно подсоединяются при помощи переключателя 4 к потенциометру 5 со шкалой в градусах Цельсия.

Температура неподвижного воздуха пограничного слоя определяется по показанию ртутного термометра, закреплённого на коже из оргстекла, который устраняет влияние случайных колебаний воздуха на процесс естественной конвекции. Высота пластины позволяет получить на ее поверхности только ламинарный режим естественного движения в пограничном слое.

### ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

При неизменной мощности электронагревателя производится измерение температур поверхности пластины пятью термопарами при помощи потенциометра. Измерения повторяются через каждые 15 минут и заносятся в таблицу наблюдений до тех пор, пока распределение температуры на поверхности пластины не станет постоянным во времени. При достижении стационарного режима в таблицу наблюдений записываются установившиеся значения  $t_{ci}$  кроме того, показания амперметра, вольтметра, ртутного термометра, термопар 6,7,8.

### ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Для обработки данных используются результаты последнего измерения. Тепло, выделяющееся в единицу времени на электронагревателе  $Q_{э.н.}$  определяется

$$Q_{э.н.} = I \cdot U, \text{ Вт}$$

Это тепло отдается от обеих поверхностей пластины в окружающую среду как тепловым излучением, так и конвективной теплоотдачей.

Тепловой поток вследствие лучистого теплообмена между поверхностями пластины, имеющей степень черноты  $\varepsilon_1$ , и вспомогательной пластины со степенью черноты  $\varepsilon_2$ , рассчитывается

$$Q_{\lambda} = C_0 \cdot \varepsilon_{np} \cdot F \left[ \left( \frac{T_{c_1}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{c_2}}{100} \right)^4 \right] \text{Вт};$$

где  $C_0$  – коэффициент излучения абсолютно чёрного тела;

$\varepsilon_{np}$  – приведения степень черноты системы двух параллельных поверхностей;

$F = \nu \cdot h$  – поверхность пластины,  $\text{м}^2$ ;

$\bar{T}_{c_1} = \bar{t}_{01} + 273,15$  – абсолютная температура поверхности пластины, К;

$\bar{T}_{c_2} = \bar{t}_{02} + 273,15$  – абсолютная температура поверхности вспомогательной пластины, К.

Приведённая степень черноты рассматривается для двух параллельных поверхностей

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\left( \frac{1}{\varepsilon_1} \right) + \left( \frac{1}{\varepsilon_2} \right) - 1},$$

для серой пластины  $\varepsilon_1 = 0,3$ ;  $\varepsilon_2 = 0,2$ ;  $K = 0,4$ .

для черной пластины:  $\varepsilon_1 = 0,3$ ;  $\varepsilon_2 = 0,95$ ;  $K = 0,6$ .

Средняя температура пластины  $\bar{t}_{c_1}$  определяется усреднением последних показаний пяти термопар. Средняя температура вспомогательной пластины  $\bar{t}_{c_2}$  определяется усреднением показаний термопар 6, 7, 8.

Тепловой поток от поверхности пластины к воздуху от вследствие конвективной теплоотдачи определяется:

$$Q_{\tau} = Q_{\text{э.н.}} \cdot K - Q_K, \text{ Вт},$$

где  $K$  – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения тепла, выделяющегося на электронагревателе к обоим поверхностям пластины, указан на стенде.

Для стационарного процесса теплоотдачи плотность теплового потока между поверхностью пластины и воздухом будет величиной неизменной по высоте пластины и равной

$$2) \alpha_i = \frac{q}{t_{ci} - t_{ж}}$$

Согласно закону Ньютона – Рихмана местные значения коэффициента теплоотдачи (т. е. в местах закладки термопар 1,2,3,4,5)

$$1) q = \frac{Q_k}{F}.$$

По результатам измерения  $t_{ci}$  и расчёт  $\alpha_i$  строятся графики распределения по высоте пластины  $t_{ci} = f(h)$ ,  $\alpha_i = f(h)$ .

## ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчёт о лабораторной работе должен включать:

1. Краткие теоретические сведения.
2. Принципиальная схема установки.
3. Таблица наблюдений по форме.

Таблица 1

Измерения	Номер термопар								$t_{ж}$ С <sup>0</sup>	I А	U В
	1	2	3	4	5	6	7	8			
1											
2											
3											

#### 4. Таблица наблюдений по форме:

Таблица 2

$h$ , мм					
$t_{ci}$ , °С					
$\alpha_i$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)					

5. Графики распределения по высоте коэффициента теплоотдачи  $\alpha_i = f(h)$  температуры поверхности пластины  $t_{ci} = f(h)$ .

#### Контрольные вопросы

1. Что называют теплоотдачей?
2. Что называют конвекцией?
3. Что называется естественной конвекцией?
4. Что определяет толщина пограничного слоя?
5. Как меняется толщина пограничного слоя по высоте пластины?
6. Напишите закон Фурье применительно к процессу теплопроводности через ламинарный пограничный слой.
7. Что называется плотностью теплового потока?
8. Что характеризует коэффициент теплоотдачи?
9. Напишите закон Ньютона – Рихмана и объясните его физический смысл и объясните его физический смысл.
10. Объясните изменение  $\alpha$  и  $t_c$  по высоте  $h$  пластины.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Исаченко В. П. и др. Теплопередача . М.А. : Энергия , 1975 . г . С. 232 – 237 .  
Михеев М.А., Михеев И. М. Основы теплоотдачи . М. : Энергия , 1977 .

#### Лабораторная работа №6

##### Зависимость коэффициента теплоотдачи при естественной конвекции от толщины пограничного слоя

##### Цель работы

Лабораторная работа проводится для углубления знаний по теории процессов конвективной теплоотдачи при свободном движении среды и ознакомлении с методикой экспериментального изучения процессов теплообмена.

В результате работы должны быть усвоены понятия свободного движения среды, конвективного теплообмена и коэффициента теплоотдачи, зависимость коэффициента теплоотдачи от толщины пограничного слоя.

##### Краткие теоретические сведения

Совместный процесс конвекции и теплопроводности называется конвективным теплообменом.

Теплопроводность – процесс переноса тепла при наличии разности температур в отдельных точках сплошной неподвижной среды (твердое тело, жидкость, газ) или между ее отдельными частями. Теплопроводность обусловлено движением микрочастиц тела.

Под конвекцией тепла понимают процесс переноса тепла при перемещении микрочастиц подвижной среды (жидкости или газа) в пространстве, из области с одной температурой в область с другой температурой. При этом перенос тепла неразрывно связан с переносом самой среды.

При движении жидкости или газа неизбежно соприкосновение отдельных микрочастиц, имеющих различные температуры, поэтому конвекция тепла всегда сопровождается теплопроводностью.

Конвективный теплообмен между поверхностью твердого тела и движущейся средой называется конвективной теплоотдачей или теплоотдачей.

В зависимости от причины возникновения движения подвижной среды различают вынужденную и естественную конвекцию. В случае вынужденной конвекции движения среды осуществляется за счет внешних сил, создаваемых посторонним возбудителем, например, насосом, вентилятором, дымососом и т.д. При естественной (свободной) конвекции движение жидкости или газа начинается вследствие действия подъемной силы, возникающей в самой среде из-за разности плотности нагретых и холодных частиц подвижной среды.

При соприкосновении, например, воздуха с нагретым твердым телом более близкие слои воздуха, быстрее нагреваясь вследствие теплопроводности, будут иметь большую температуру, чем более удаленные слои. Возникает разность температур отдельных частей воздуха, приводящая к разности плотностей воздуха в различных ее областях. Более нагретые слои воздуха поднимаются вверх ввиду их малой плотности, холодные слои движутся вниз. Чем больше разница температур, тем больше скорость естественного движения.

По характеру движения среды различают два режима течения: ламинарный и турбулентный, которые имеют место как при естественной, так и при вынужденной конвекции. При ламинарном режиме течения отдельные слои подвижной среды движутся параллельно, не перемешиваются. При турбулентном режиме течения слои газа или жидкости хаотически перемешиваются друг с другом, но на поверхности твердого всегда имеет место ламинарный режим движения в тонком вязком подслое. При движении среды вдоль поверхности твердого тела образуется так называемый пограничный слой, в пределах которого температура среды изменяется от температуры, равной температуре поверхности тела  $t_c$ , до температуры среды вдали от тела  $t_{ж}$ . В пределах пограничного слоя скорость движения среды изменяется от нуля на поверхности тела (вследствие прилипания) до максимума на некотором расстоянии, а на большом удалении от поверхности тела снова равна нулю (рис.1).

Так как резкого перехода от пограничного слоя к неподвижной внешней среде нет, то под толщиной пограничного слоя  $\delta_{п.с.}$  понимается расстояния от поверхности твердого тела, на котором скорость движения и температура среды в пограничном слое отличаются от температуры и скорости движения неподвижной среды на определенную малую величину (например, 1%). Вначале толщина пограничного слоя мала и течение среды в нем имеет струйчатый ламинарный характер. По направлению движения среды толщина пограничного слоя увеличивается и при определенном ее значении течение среды становится неустойчивым, происходит разрушение ламинарного пограничного слоя. После неустойчивого переходного режима движения имеет место турбулентное течение среды в пограничном слое.

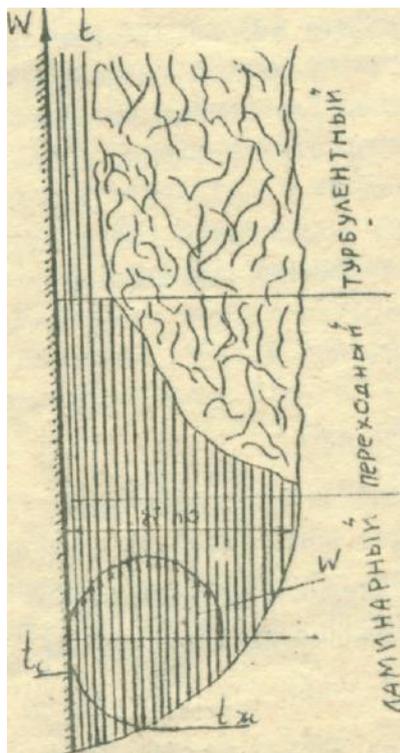
Для ламинарного пограничного слоя и вязкого подслоя турбулентного пограничного слоя согласно гипотезе Прандтля перенос тепла в направлении, перпендикулярном движению среды, происходит путем теплопроводности и может быть описан законом Фурье  $q = \lambda_{ж} / \delta_{п.с.} (t_c - t_{ж})$  (1)

где  $q$  - плотность теплового потока, количество тепла, переданное в единицу времени через единицу изотермической поверхности движущейся среды, Вт/м<sup>2</sup>;  $\lambda_{ж}$  - коэффициент теплопроводности среды, характеризует способность среды проводить тепло, Вт/м·К.

Одновременно независимо от вида конвекции - режима движения среды в пограничном слое процесс переноса тепла от поверхности твердого тела к движущейся среде описывается законом Ньютона - Рихмана

$$q = \alpha_k (t_c - t_{ж}). \quad (2)$$

где  $\alpha_k$  - коэффициент теплоотдачи, характеризующий интенсивность теплообмена на границе



твердое тело- подвижная среда.

Численное значение  $\alpha_k$  равно количеству тепла, передаваемого от единицы поверхности твердого тела к подвижной среде в единицу времени при разности температур поверхности тела и подвижной среды в  $1^\circ$ .

Для установившегося процесса конвективного теплообмена количество тепла, отдаваемого от поверхности твердого тела в подвижную среду, равно количеству тепла, передаваемого пограничный слой вследствие теплопроводности. Поэтому из выражений (1) и (2) следует  $\alpha_k = \lambda_{ж} / \delta_{п.с.}$

Изменение толщины пограничного слоя отражается на интенсивности процесса теплоотдачи, что приводит к неравномерному распределению температуры поверхности твердого тела при условии постоянства плотности теплового потока и неизменности температуры среды вдали от твердого тела.

Выражение (3) не может быть использовано для определения  $\lambda_k$ , так как толщина пограничного слоя есть величина условная и зависящая от многих факторов, таких как скорость движения среды  $W$  разность температур ( $t_c - t_{ж}$ ), кинематическая вязкость среды  $\nu$ , коэффициент температуропроводности  $\alpha$ , коэффициент объемного расширения  $\beta$ , состояние твердого тела, его размеры  $L$ , форма и расположение в пространстве.

Таким образом, коэффициент теплоотдачи является сложной функцией различных факторов  $L_k = f(W, t_c, t_{ж}, \nu, \alpha, \beta, \delta_{п.с.}, \lambda_{ж}, L, \dots)$  (4)

Попытки аналитического решения зависимости (4) наталкивают на серьезные трудности. Поэтому при изучении процессов теплоотдачи огромное значение приобретает эксперимент. Для обобщения опытных данных они представляют обычно в критериальной форме, основанной на теории подобия.

Математическое описание функциональной зависимости (4) с помощью теории подобия для случая свободной конвекции приводит к критериальной зависимости вида:

$$Nu = C(GrPr)^n ;$$

где  $Nu = \alpha_k L / \lambda_{ж}$  - критерий Нуссельта; (5)

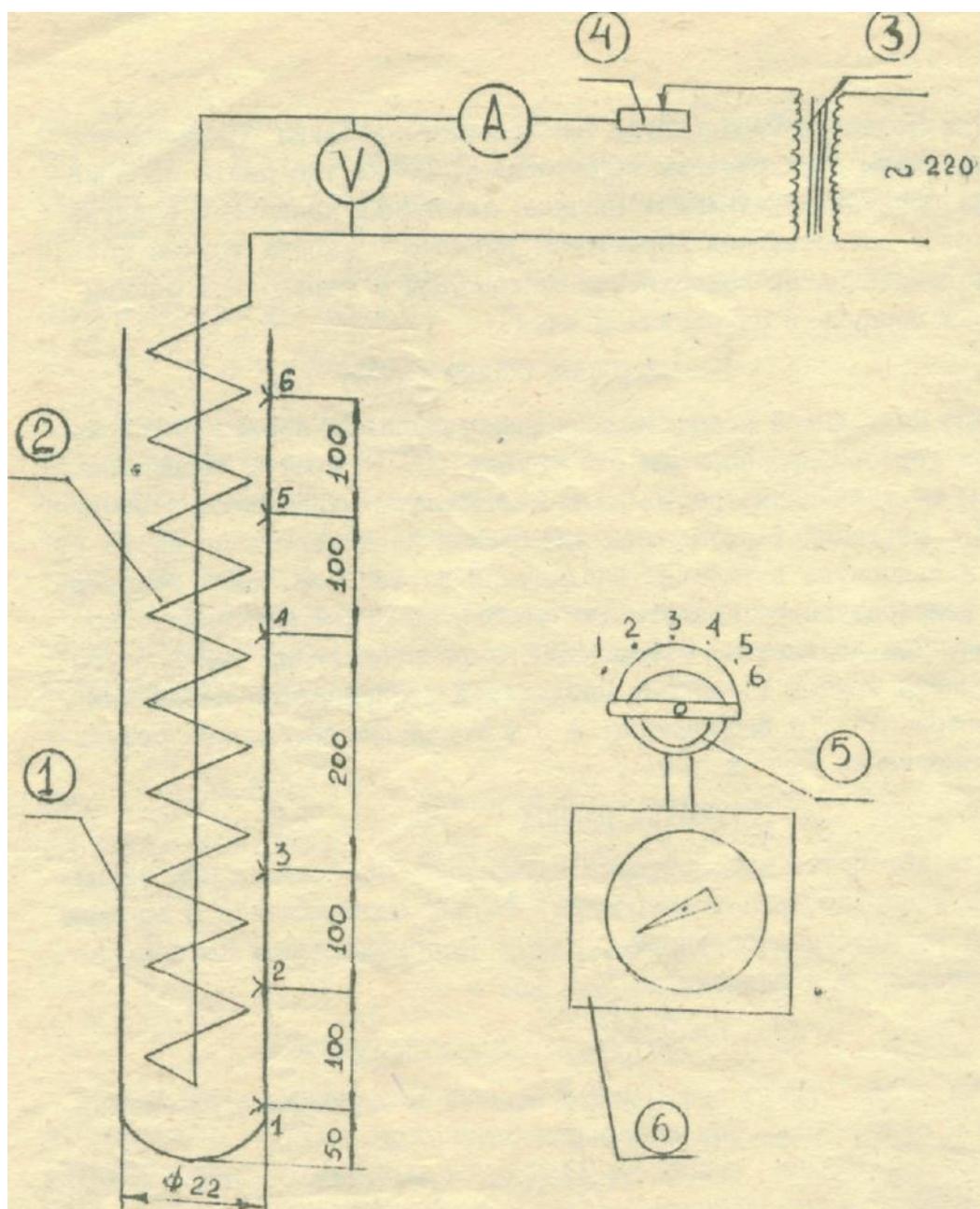
$Gr = \frac{g \beta \Delta t L^3}{\nu^2}$  - критерий Грасгофа;

$Pr = \nu / \alpha$  - критерий Прандтля;

$C, n$  - постоянные, определяемые экспериментально и зависящие от режима движения среды.

## Экспериментальная установка

Для определения коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  при свободном движении воздуха вдоль вертикальной поверхности используется металлическая трубка 1 (рис.2). Диаметр трубки - 22 мм, общая высота - 700 мм. Для создания теплового потока от поверхности трубы к воздуху внутри нее расположен электрический нагреватель 2. Для определения тепла, выделяется на нагревателе в единицу времени, используются показания амперметра А и вольтметра V. Мощность электрического нагревателя может быть изменена при помощи лабораторного автотрансформатора 3 и реостата 4. Температура наружной поверхности трубки измеряется шестью хромель-копелевыми термопарами, расположенными по высоте по высоте трубки по высоте трубки на одной образующей. Расстояния между местами закладки термопара приведены на (рис.2). Термопары поочередно подсоединяется при помощи переключателя 5 автоматического потенциометра КСП-3.6 со шкалой в градус Цельсия. Температура неподвижного воздуха определяется по показаниям других ртутных термометров. Кожух (на рис.2 не показан) из оргстекла устраняет влияние случайных колебаний воздуха на процесс естественной конвекции. Диаметр и высота трубки позволяют получить на ее поверхности ламинарный и переходный режимы движения воздуха в пограничном слое.



### Проведение эксперимента

При постоянной мощности электронагревателя проводится изменение температуры поверхности трубки  $t_{с1}$  шестью термопарами при помощи потенциометра КСП -3 и температуры неподвижного воздуха  $t_{в1}$  ртутными термопарами. Измерения повторяются через 10 мин. И заносятся в табл. наблюдения до тех пор, пока распределение температуры на поверхности трубки не будет постоянным во времени. При достижении стационарного распределения температуры поверхности трубки в таблицу наблюдений записываются показания вольтметра  $V$  и амперметра  $A$ , а также окончательные результаты измерения  $t_{с1}$  и  $t_{в1}$ .

## Обработка данных

Для обработки используются измерения, полученные при стационарном распределении температуры. Тепло, выделяющееся в единицу времени на электронагревателе. Тепло выделяющееся по показаниям амперметра и вольтметра

$$Q_{Э.Н} = J \cdot u.$$

Это тепло отдает поверхность трубки в окружающую среду как тепловым излучением, так и конвекцией.

Для определения теплового потока от поверхности трубки вследствие лучистого теплообмена,  $Q_L$ , с окружающей средой используется выражение

$$Q_L = C_0 \epsilon_{пр} F [(T_c)^4 / 100 - (T_v)^4 / 100], \quad (6)$$

где  $C_0$  - коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный  $5,67 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ ;

$\epsilon_{пр}$  - приведенная степень черноты системы трубка - окружающая среда (кожух);

$F$  - боковая поверхность трубки,  $\text{м}^2$ ;

$T_c = t_c + 273,15$  - абсолютная температура поверхности трубки,  $\text{К}$ ;

Среднее значение температуры поверхности трубки  $\epsilon_c$  определяется усреднением показаний шести термопар, а среднее значение температуры неподвижного воздуха  $t_v$  - по показаниям двух ртутных термометров.

Приведенная степень черноты системы трубка - кожух  $\epsilon_{пр}$  определяется выражением

$$\epsilon_{пр} = 1 / (1 / \epsilon_c + 1 / \epsilon_k), \quad (7)$$

Где  $\epsilon_c$  - степень черноты поверхности (серой - 0,5; черной - 0,95);

$\epsilon_k$  - степень черноты материала кожуха, равна 0,2.

Тепловой поток от поверхности трубки вследствие конвективной теплоотдачи определяется как

$$Q_k = Q_{Э.Н} - Q_L.$$

При постоянной мощности электронагревателя, температурах поверхности трубки и воздуха плотность теплового потока есть величина постоянная

$$q = Q_k / F,$$

Согласно закону Ньютона-Рихмана местный коэффициент теплоотдачи определяется выражением

$$\alpha_k = q / (t_c - t_{ж})$$

По измеренным значениям температуры поверхности трубки и рассчитанным значениям местного коэффициента теплоотдачи строятся графики изменения температуры поверхности трубки и местного коэффициента теплоотдачи по высоте трубки  $h$ .

### Оформление отчета

Отчет по лабораторной работе должен включать:

- 1) краткие теоретические сведения по теории теплоотдачи;
- 2) таблицу наблюдений по следующей форме:

№ измерения	№ термопары									
	tc1	tc2	tc3	tc4	tc5	tc6	tv1	tv2	J	v
1										
2										
3										
4										

- 3) таблицу результатов по следующей формуле:

h, мм					
t <sub>c</sub> , °C					
α <sub>к</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К					

4) графики зависимости  $\alpha_k = f_c = f(h)$ ,  $t_c = f(h)$ .

### Контрольные вопросы

1. Что называется теплоотдачей?
2. Что называется конвекцией?
3. Что называется естественной конвекцией?
4. Как определяется толщина пограничного слоя?
5. Как меняется толщина пограничного слоя по высоте трубки?
6. Напишите закон Фурье применительно к ламинарному пограничному слою.
7. Что называется плотностью теплового потока?
8. Что характеризует коэффициент теплоотдачи?
9. Напишите закон Ньютона-Рихмана и объясните его физический смысл.
10. Объясните изменение  $\alpha_k$  и  $t_c$  по высоте трубки.

### Библиографический список

- Исаченко В.П. и др. Теплопередача. М.: Энергия, 1975. С.237.
- Михеев М.А., Михеев И.М Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. С. 94-96.

### Лабораторная работа №7

#### Определение коэффициента излучения твердых тел

##### Цель работы

Лабораторная работа выполняется студентами с целью углубления знаний по лучистому теплообмену. В результате выполнения лабораторной работы студенты должны усвоить основные понятия лучистого теплообмена, ознакомиться с методикой проведения теплофизического эксперимента, обработки и анализа экспериментальных данных, экспериментально определить коэффициент излучения твердых тел.

##### Краткие теоретические сведения

Нагретое тело, находящееся в газообразной среде, отдает тепло в окружающее его пространство вследствие совместного протекания процессов теплоотдачи и теплового излучения.

Согласно закону сохранения энергии количество тепла, выделяющееся за единицу времени в теле  $Q_0$ , равно количеству тепла, отдаваемого за единицу времени в окружающее пространство вследствие конвективной теплоотдачи  $Q_k$  и лучистого теплообмена

$$Q_0 = Q_k + Q_l, \text{ Вт.} \quad (1)$$

Конвективная теплоотдача-процесс переноса тепла между поверхностью твердого тела и подвижной средой (жидкость, газ).

Тепловой поток между поверхностью твердого тела и подвижной средой определяется по уравнению Ньютона-Рихмана:

$$Q_k = \alpha_k F(t_c - t_{ж}), \text{ Вт.} \quad (2)$$

$F$ - Поверхность твердого тела,  $m^2$ ;

$t_c, t_{ж}$ - температуры поверхности твердого тела и подвижной среды,  $^{\circ}C$ .

$\alpha_k$  - коэффициент теплоотдачи, характеризует интенсивность теплообмена на границе «твердое тело подвижная среда»  $\text{Вт}/m^2 \cdot K$ .

Численное значение  $\alpha_k$  - равно количеству тепла, передаваемого от единицы поверхности твердого тела к подвижной среде в единицу времени при разности температур поверхности тела и подвижной среды в один градус.

В условиях настоящей лабораторной работы конвективная теплоотдача происходит при свободном движении воздуха вдоль вертикальной пластины.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_k$  зависит от многих факторов и при известных значениях температур воздуха и поверхности пластины может быть определен как

$$\alpha = \frac{Nu\lambda}{h}, \quad (3)$$

где  $h$ - определяющий размер, м;

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности воздуха  $\text{Вт}/m \cdot K$ ;

$Nu$ - критерий Нуссельта, определяется с помощью критериальных уравнений:

а) при ламинарном режиме движения воздуха вдоль вертикальной пластины

$$\left(10^3 \leq Gr_{hж} Pr_{ж} \leq 10^9\right)$$

$$Nu = 0,76(Gr_{hж} Pr_{ж})^{0,25}; \quad (4)$$

б) при турбулентном режиме движения воздуха  $Gr_{hж} Pr_{ж} > 10^9$

$$Nu_{hж} = 0,76(Gr_{hж} Pr_{ж})^{0,33}; \quad (5)$$

В уравнениях (4),(5) критерий Грасгофа  $Gr_{hж}$  определяется как

$$Gr_{hж} = g\beta(t_c - t_{ж})h^3 / \nu^2, \quad (6)$$

где  $g=9,81 \text{ м}/c^2$ - ускорение свободного падения;  $\beta= 1/T_{опр}$ —температурный коэффициент объемного расширения воздуха,  $1/K$ ;  $\nu$ -коэффициент кинематической вязкости воздуха,  $m^2/c$ .

Физические величины  $\nu$ ,  $\lambda$  и критерий Прандтля  $Pr_{ж}$  выбираются из таблиц физических свойств по определяющей температуре, равной температуре воздуха  $t_{ж}$  вдали от поверхности тела.

Тепловое излучение представляет собой процесс распространения внутренней энергии излучающего тела путем электромагнитных волн с длиной волны от 0,8 до 800 микрон.

Каждое тело не только непрерывно излучает, но и непрерывно поглощает лучистую энергию. В результате двойного взаимного превращения энергии (тепловая-лучистая-тепловая) осуществляется процесс лучистого теплообмена.

Следовательно, лучистый теплообмен является сложным процессом испускания, переноса в пространстве и поглощения энергии электромагнитных волн, зависящий от абсолютных температур, оптических свойств, размеров, формы и взаимного расположения тел в пространстве.

Тепловое излучение описывается следующими законами:

### 1. Закон Планка:

Интенсивность излучения абсолютно черного тела и любого реального тела зависит от температуры и длины волны:

$$E_{\lambda 0} = C_1 \lambda^{-5} / (e^{c/\lambda T} - 1),$$

где  $e$  - основание натурального логарифма;  $C_1 = 3,74 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{ м}^2$  - первая постоянная Планка;  $C_2 = 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{ К}$  - вторая постоянная Планка;  $\lambda$  - длина волны, м;  $T$  - абсолютная температура излучающего тела, К.

### 2. Закон Вина:

Максимальное значение интенсивности излучения соответствует длине волны, определяемой по формуле:

$$\lambda_{\max} = \frac{2,9}{T}.$$

### 3. Закон Стефана-Больцмана:

Поток излучения абсолютно черного тела пропорционален четвертой степени его абсолютной температуры:

$$E_0 = C_0 (T/100)^4,$$

где  $C_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{ К}^4$  - коэффициент излучения абсолютно черного тела.

### 4. Закон Ламберта:

Максимальное излучение  $E_n$  имеет место в направлении нормали к поверхности.

$$E_{\phi} = E_n \cdot \cos \phi$$

Количество энергии, передаваемое от одного тела к другому в единицу времени, называется потоком результирующего излучения  $Q_l$  и может быть определено как разность энергий, излучаемых и поглощаемых этими телами.

В лабораторной работе рассматривается лучистый теплообмен в системе тел с равными плоскопараллельными поверхностями ( $F_1 = F_2$ ), но различными коэффициентами излучения.

Результирующее излучение между двумя параллельными пластинами может быть определено по уравнению

$$Q_l = C_{\text{пр}} F \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \text{ Вт}, \quad (7)$$

где  $T_1, T_2$  - абсолютные температуры пластин, К;  $F$  - поверхность пластин ( $F_1 = F_2 = F$ ),  $\text{ м}^2$ ;  $C_{\text{пр}}$  - приведенный коэффициент излучения, определяется по формуле:

$$C_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_0}}, \frac{\text{ Вт}}{\text{ м}^2 \cdot \text{ К}^4}, \quad (8)$$

$C_1, C_2$  - коэффициенты излучения параллельных пластин;

$C_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{ К}^4$  - коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Таким образом, зная количество тепла, выделяющееся в теле за единицу времени  $Q_0$ , и тепловой поток вследствие конвективной теплоотдачи  $Q_k$ , можно определить поток результирующего теплового излучения как

$$Q_l = Q_0 - Q_k$$

и рассчитать приведенный коэффициент излучения по уравнению

Для пластин I и II

$$C_{\text{пр}1-2} = \frac{Q_{l1-2}}{F \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}; \quad (9)$$

$Q_{l1-2}$  - потоки результирующего излучения для первой пары пластины (I - серая, II - серая);  $T_1$  и  $T_2$  - абсолютные температуры первой и второй пластины.

Для пластин III-IV

$$C_{\text{пр}3-4} = \frac{Q_{\text{л}3-4}}{F \left[ \left( \frac{T_3}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_4}{100} \right)^4 \right]} \quad (10)$$

где  $Q_{\text{л}3-4}$ - потоки результирующего излучения для второй пары пластины (3-серая, 4-черная).  
 $T_3, T_4$ - абсолютные температуры третьей и четвертой пластины.

$$C_{\text{пр}} = \frac{Q_{\text{л}}}{F \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]} \cdot \frac{Вт}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}. \quad (11)$$

Коэффициенты излучения пластин определяют из уравнения.

### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Вертикально расположенные пластины I, II, III, IV (см. рис.1) (I, II, III-серые пластины, IV- черная пластина) имеют одинаковые размеры: ширина 0,3м, высота 0,32 м.

На поверхности II и IV пластин расположено по 3 термодпары, а на поверхности I и III пластин-по 5 термодпар. Термодпары поочередно подключаются через переключатель III и тумблер Т к потенциометру КСП со шкалой в градусах Цельсия.

Между пластинами I, III расположен электрический нагреватель V, питание которого осуществляется от сети через трансформатор (Тр); ток и падение напряжения определяется ртутным термометром (на схеме не показан).

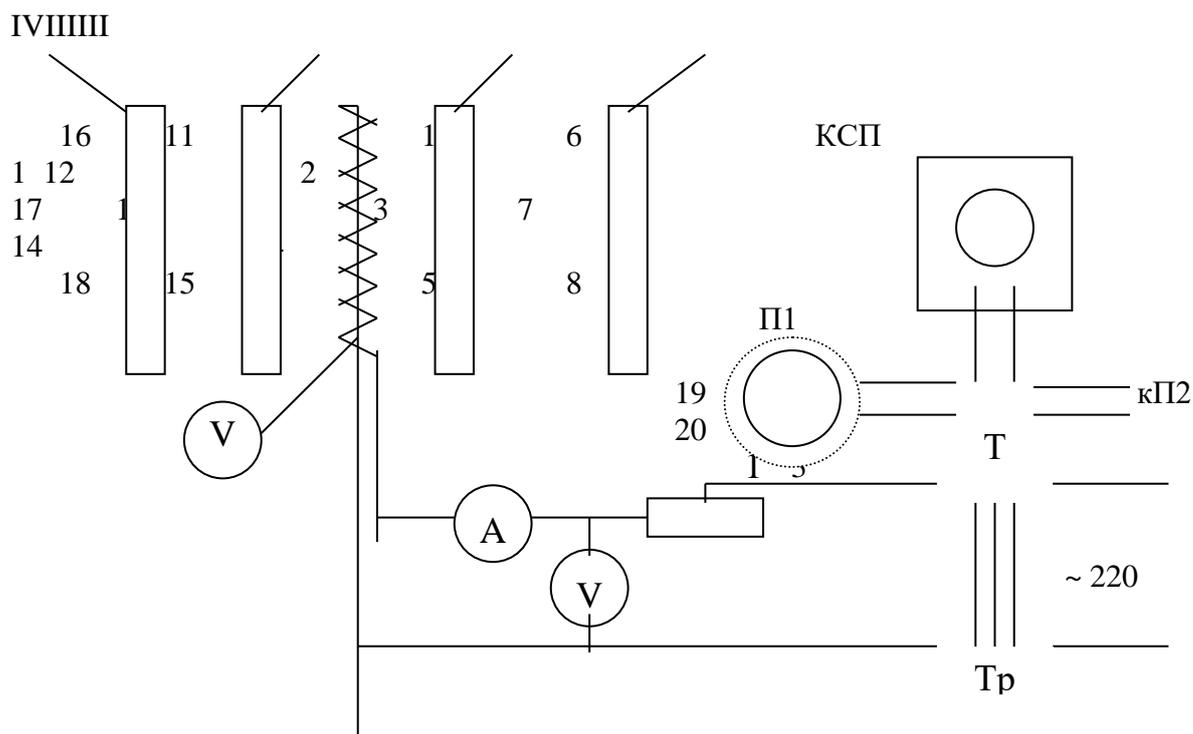


Рис. 1

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

При постоянной мощности электронагревателя  $Q_{\text{эл}}$  производится измерения температуры поверхностей пластин соответствующими термодпарами (1-5 термодпары- I пластина; 3-8- II пластина; 11-15- III пластина; 16-18- IV пластина), температуры воздуха вне пограничного

слоя-ртутным термометром, снимаются показания амперметра и вольтметра. Измерения повторяются через 10 минут до достижения стационарного температурного поля. Результаты измерений записываются в протокол наблюдений (см. табл.1).

Так как тепловое излучение происходит между двумя парами плоскопараллельных пластин, имеющих разные приведенные коэффициенты излучения, то в результате опыта будет установлено, что средние температуры поверхностей I и III пластин не равны между собой.

### ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для обработки используются результаты последних измерений, полученные при стационарном распределении температуры. Тепло, выделяющееся в единицу времени на электронагревателе  $Q_{эн}$ , определяется по показаниям амперметра и вольтметра:

$$Q_0 = Q_{эн} = I \cdot U, \text{Вт. 12)}$$

Это тепло передается с поверхности пластин I, III тепловым излучением и конвекцией.

Экспериментально установлено, что потоки результирующего излучения для первой пары пластин  $Q_{л-I-II}$  (I-серая, II-серая) и для второй пары пластин  $Q_{л-III-IV}$  (III-серая, IV- черная) не равны между собой вследствие разных коэффициентов излучения и распределяются следующим образом:

$$Q_{л-I-II} = 0,4Q_{эн} - Q_k \quad (13)$$

$$Q_{л-III-IV} = 0,6Q_{эн} - Q_k \quad (14)$$

Исходя из уравнений для определения  $Q_l$  необходимо выполнить расчеты по уравнениям (2)-(6), для этого:

1) по определяющей температуре  $t_{ж}$  из приложения I выбираются физические свойства жидкостей и критерий Прандтля;

2) находятся

а) критерий Грасгофа по (6);

б) режим естественной конвекции по произведению ( $Gr_{лж} \cdot Pr_{ж}$ );

в) вид критериального уравнения (4) или (5) и число Нуссельта Nu;

г) коэффициент теплоотдачи по уравнению (3);

д) количество тепла, переданного посредством конвективного теплообмена  $Q_k$  по уравнению (2);

После определения потока результирующего излучения  $Q_l$ , рассчитываются приведенные коэффициенты излучения для каждой пары пластин по уравнений (10). Коэффициенты излучения серых пластин определяются из уравнения (8). Считая известным коэффициент излучения для черной пластины  $C_4 = 0,95 \cdot 5,67 = 5,387 \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ , коэффициент излучения серой пластины III определяется как

$$C_3 = \frac{1}{\frac{1}{C_{пр I-II}} + \frac{1}{C_0} - \frac{1}{C_4}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}. \quad (15)$$

Вследствие малой разности температур пластин I, III можно пренебречь температурной зависимостью коэффициента излучения и написать равенство  $C_1 = C_3$ , тогда коэффициент излучения  $C_2$  определяется по формуле

$$C_2 = \frac{1}{\frac{1}{C_{пр I-II}} + \frac{1}{C_0} - \frac{1}{C_1}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}. \quad (16)$$

Результаты расчетов сводятся в табл.2.

### ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- 1) краткие теоретические сведения;
- 2) принципиальную схему установки;

3) таблицу измерений по форме (см. табл.1);

Таблица 1

Номер измерения	I=					U=			W=					t <sub>в</sub> =			
	Термопары																
	I пластина					II пластина			III пластина					IV пластина			
	1	2	3	4	5	6	7	8	11	12	13	14	15	16	17	18	
1																	
2																	
3																	
4																	

- 1) использование для расчетов формулы;
- 2) таблицу результатов расчета по форме (см. табл.2).

Таблица 2

Номер пластины	t <sub>c</sub>	Q <sub>эн</sub>	Pr <sub>ж</sub>	Gr	Nu	$\bar{\alpha}_k$ Вт м <sup>2</sup> ·К	Q <sub>к</sub> , Вт	Q <sub>л</sub> , Вт	C <sub>пр</sub> , Вт м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup>
I									
III									

Коэффициенты излучения C<sub>2</sub>=  
C<sub>3</sub>=C<sub>1</sub>

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется тепловым излучением, лучистым теплообменом?
2. Дайте определение потока результирующего излучения, напишите единицу измерения.
3. Как определяется результирующее излучение при плоскопараллельном расположении поверхностей при F<sub>1</sub>=F<sub>2</sub> и в случае, если при F<sub>1</sub> < F<sub>2</sub>?
4. Единицы измерения и физический смысл коэффициента излучения серого тела.
5. Чему равен приведенный коэффициент излучения при плоскопараллельном расположении пластин, если одна из пластин приближается к абсолютно черному телу?
6. Как определяется приведенный коэффициент излучения при F<sub>1</sub>=F<sub>2</sub> и при F<sub>1</sub> < F<sub>2</sub>?
7. Сформулируйте законы Стефана-Больцмана, Планка, Кирхгофа.
8. От каких факторов зависит коэффициент излучения?

### ЛИТЕРАТУРА

1. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. С.34-38, 94-101, 160-182.
2. Исаченко В.П. и др. Теплопередача. М.: Энергия, 1975. С. 125-140, 231-239, 361-385.

Приложение 1

Физические свойства сухого воздуха  
(P<sub>в</sub> = 760ммрт.ст. = 1,01 · 10<sup>5</sup> Па)

$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^2$ Вт/(м· $^\circ\text{C}$ )	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	Pr
1	2	3	4
0	2,44	13,28	0,707
10	2,51	14,16	0,705
20	2,59	15,06	0,703
30	2,67	16,00	0,701
40	2,76	16,96	0,699
50	2,83	17,95	0,698
60	2,90	18,97	0,696
70	2,96	20,02	0,694
80	3,05	21,09	0,692
90	3,13	22,10	0,690
100	3,21	23,13	0,688
120	3,34	25,45	0,686
140	3,49	27,80	0,684
160	3,64	30,09	0,682
180	3,78	32,49	0,681
200	3,93	34,85	0,680
250	4,27	40,61	0,677
300	4,60	48,33	0,674
350	4,91	55,46	0,676
400	5,21	63,09	0,678

### Лабораторная работа №8

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ БЕТОНА МЕТОДОМ ЦИЛИНДРА

### Цель работы

Лабораторная работа выполняется студентами с целью усвоения основных понятий теории теплопроводности и приобретения навыков определения расчетным путем: теплового потока, плотности теплового потока, температурного поля, коэффициента теплопроводности тела и его зависимость от температуры.

### Краткие теоретические сведения

**Теплопроводность** – это процесс переноса тепла микрочастицами (молекулами, атомами, ионами и электронами) при их соприкосновениях и соударениях при наличии разности температур. Механизм теплопроводности заключается в том, что более нагретые микрочастицы, т.е. обладающие большей энергией, в момент соприкосновения и соударения передают избыток энергии микрочастицам с меньшей энергией, т.е. менее нагретым. Причем, чем больше разность температур, тем интенсивнее идет процесс теплопроводности. Теплопроводностью тепло передается во всех телах, любого агрегатного состояния. В газах и жидкостях теплопроводность сопровождается конвекцией, но только в твердых телах тепло передается только теплопроводностью, т.е. микрочастицами.

Процесс распространения теплоты теплопроводностью сопровождается изменением температуры  $t$  как в пространстве, так и во времени. Поэтому прежде всего необходимо понять и установить что такое температурное поле и градиент температуры.

**1. Температурное поле** – это совокупность мгновенных значений температуры во всех точках рассматриваемого тела в данный момент времени. Математическое выражение температурного поля связывает температуру  $t$  с пространственными координатами любой точки  $x, y, z$  в данный момент времени  $\tau$  и имеет вид:

$$t = f(x, y, z, \tau). \quad (1)$$

Если температура тела не изменяется с течением времени, то температурное поле стационарное:

$$t = f(x, y, z); \partial t / \partial \tau = 0.$$

Если температура тела изменяется с течением времени, то такое температурное поле называется нестационарным:

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

Температура в теле может меняться в одном, двух и трех направлениях, т.е. быть функцией одной, двух и трех координат. Соответственно этому температурное поле называется одно-, двух- и трехмерным. Например, уравнение одномерного стационарного температурного поля наиболее простое и имеет вид:

$$t = f(x); \partial t / \partial \tau = 0; \partial t / \partial y = \partial t / \partial z = 0, \quad \text{или можно просто написать: } t = f(x).$$

**2. Градиент температуры.** При любом температурном поле в теле всегда имеются точки с одинаковой температурой. Если соединить все точки тела с одинаковой температурой, то получится поверхность равных температур, которая называется **изотермической**. Так как в одной и той же точке не может быть двух различных температур, то изотермические поверхности не могут пересекаться и они замыкаются на себя, располагаясь внутри тела или на границах его.

Если взять две близко расположенные друг к другу изотермические поверхности (рис. 1) с температурами  $t$  и  $t + \Delta t$ , то распространение теплоты в теле будет происходить от одной изотермической поверхности к другой только в сторону понижения температуры. Кратчайший путь распространения теплоты в теле, а, следовательно, наибольшее изменение температуры тела приходящееся на единицу длины будет в направлении нормали  $n$  к изотермическим поверхностям.

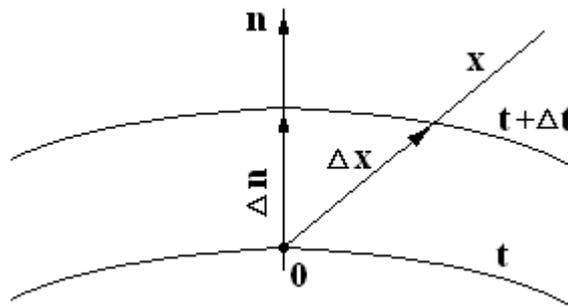


Рис. 1. К определению градиента температуры.

Предел отношения изменения температуры  $\Delta t$  к расстоянию между изотермами по нормали  $\Delta n$  в сторону возрастания температуры называется *градиентом температуры*:

$$\mathbf{grad}t = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta t}{\Delta n} \right) = \frac{\partial t}{\partial n}, \text{ (град/м)}. \quad (2)$$

Градиент температуры это вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону возрастания температуры и численно равный частной производной от температуры по этому направлению. Градиент температуры показывает, насколько интенсивно (резко) меняется температура в толще тела и является важной величиной, определяющей многие физические явления (появление трещин в хрупком теле от неравномерного нагрева, термические деформации и т.д.).

В случае цилиндрической поверхности градиент температуры для трехмерного температурного поля по координатам:  $r$ ,  $\varphi$  и  $Z$  имеет вид:

$$\mathbf{grad}t = \frac{\partial t}{\partial r} \cdot \vec{l}_r + \frac{\partial t}{\partial \varphi} \cdot \vec{l}_\varphi + \frac{\partial t}{\partial z} \cdot \vec{l}_z, \left( \frac{\text{град}}{\text{м}} \right), \quad (3)$$

где  $\vec{l}_r$ ,  $\vec{l}_\varphi$  и  $\vec{l}_z$  — единичные векторы цилиндрической системы координат.

Внешняя и внутренняя поверхности прямой цилиндрической трубы поддерживаются при постоянных температурах  $t_H$  и  $t_B$ . Толщина цилиндрической стенки ( $r_H - r_B$ ) много меньше ее длины. Изотермические поверхности будут цилиндрическими поверхностями, имеющими общую ось  $Z$  с трубой.

Температура меняется только в направлении радиуса, поэтому и поток теплоты будет также радиальным (рис. 2). Температурное поле в этом случае одномерное  $t = f(r)$ ; где  $r$  — текущая цилиндрическая координата.

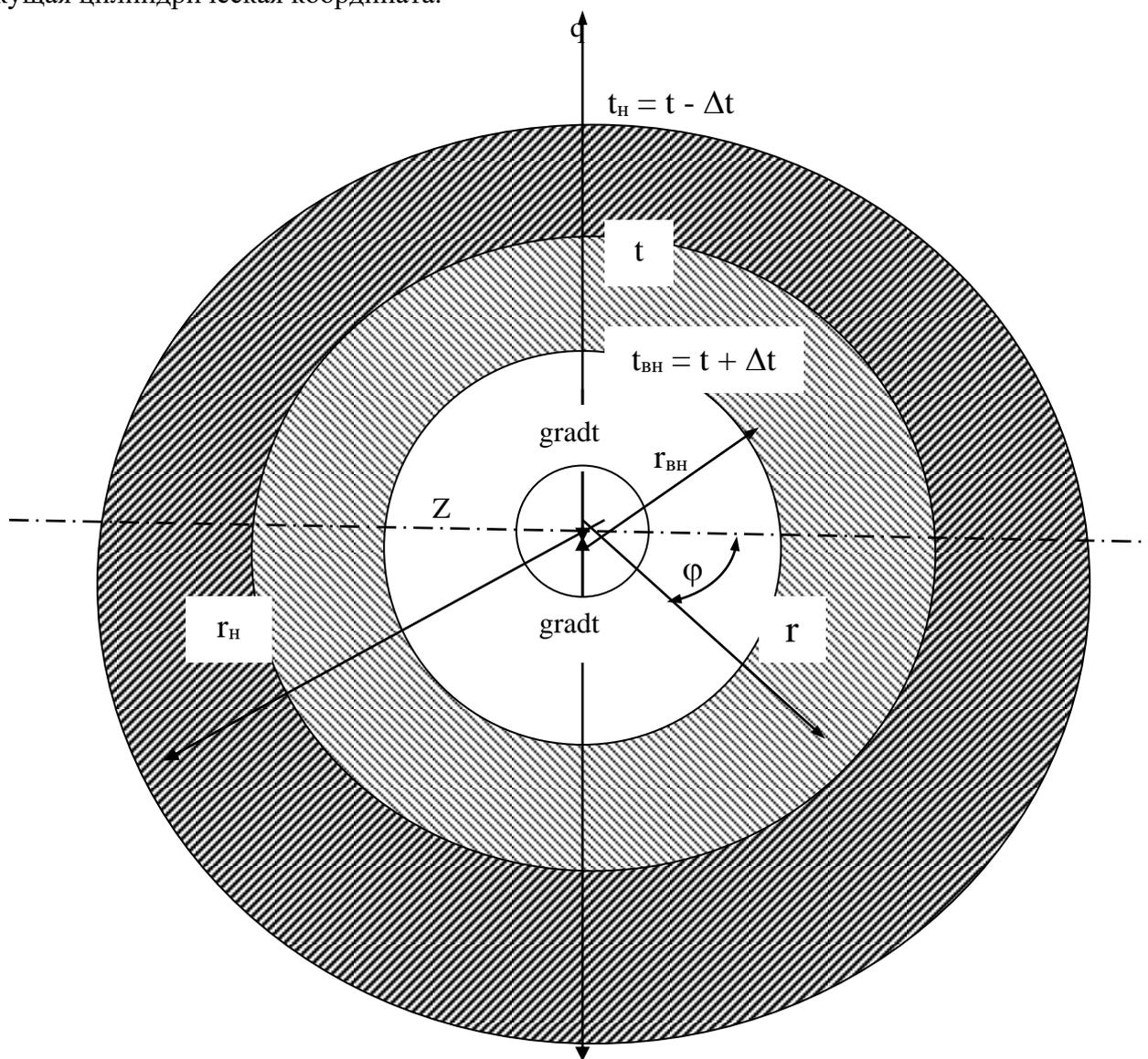


Рис. 2.

Для одномерного цилиндрического температурного поля градиент температуры имеет вид:

$$\mathbf{grad}t = \partial t / \partial r \cdot \vec{1}_r, \left( \frac{\text{град}}{\text{м}} \right).$$

Теплота самопроизвольно переносится только в сторону уменьшения температуры. Интенсивность переноса теплоты характеризуется тепловым потоком ( $Q_\tau$ ) и плотностью теплового потока ( $q$ ).

### 3. Тепловой поток

Количество тепла передаваемого за единицу времени через произвольную поверхность называется тепловым потоком  $Q_\tau$ :

$$Q_\tau = \frac{Q}{\tau}, \left( \frac{\text{Дж}}{\text{сек}} = \text{Вт} \right). \quad (4)$$

Количество тепла передаваемого за единицу времени через единицу изотермической поверхности называется **поверхностной плотностью теплового потока  $q$** :

$$q = \frac{Q}{\tau \cdot F} = \frac{Q_\tau}{F}, \left( \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right). \quad (5)$$

Поверхностная плотность теплового потока для цилиндрических поверхностей трубы неодинакова из-за неравенства площадей внутренней и внешней ее сторон:

$$q_1 = \frac{Q_\tau}{F_1} = \frac{Q_\tau}{\pi d_{\text{вн}} \cdot L_{\text{тр}}}; \quad (6)$$

$$q_2 = \frac{Q_\tau}{F_2} = \frac{Q_\tau}{\pi d_{\text{н}} \cdot L_{\text{тр}}}; \quad (7)$$

где  $d_1$  и  $d_2$  – внутренний и наружный диаметры трубы;  $F_1 = \pi d_{\text{вн}} \cdot L_{\text{тр}}$  и  $F_2 = \pi d_{\text{н}} \cdot L_{\text{тр}}$  – площади внутренней и наружной поверхностей трубы, следовательно,  $q_1 > q_2$ , т.к.  $F_2 > F_1$ .

Поэтому для труб определяется **также линейная плотность теплового потока**, которая представляет собой – количество тепла передаваемого за единицу времени единицей длины трубы:

$$q_l = \frac{Q_\tau}{L_{\text{тр}}}, \left( \frac{\text{Вт}}{\text{м}} \right). \quad (8)$$

### 4. Закон Фурье

Основной закон теплопроводности – закон Фурье устанавливает взаимосвязь между плотностью теплового потока и градиентом температуры и формулируется следующим образом:

плотность теплового потока пропорциональна градиенту температуры:

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \mathbf{grad}t = -\lambda \frac{dt}{dn}. \quad (9)$$

Общее количество тепла, переданное теплопроводностью через тело поверхностью  $F$  за время  $\tau$  составит:

$$\vec{Q} = q \cdot F \cdot \tau = -\lambda \text{grad}t \cdot F \cdot \tau = -\lambda \frac{dt}{dn} \cdot F \cdot \tau.$$

Знак минус показывает на противоположное направление векторов теплового потока и градиента температуры. Так как теплота распространяется в сторону убывания температуры, следовательно, вектор теплового потока направлен в сторону падения температуры, а вектор градиента температуры направлен в сторону возрастания температуры (рис. 3).

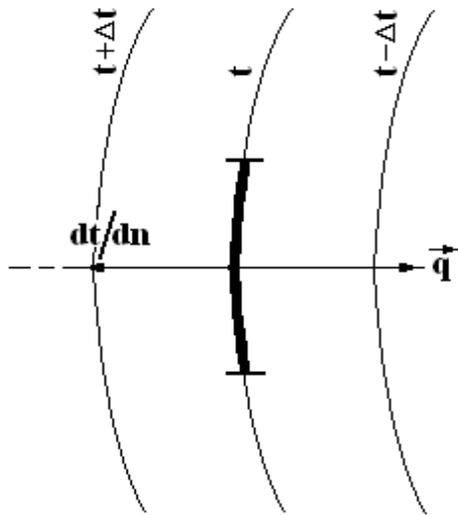


Рис. 3. Закон Фурье

### 5. Коэффициент теплопроводности

Коэффициент пропорциональности  $\lambda$  в уравнении закона Фурье называется коэффициентом теплопроводности.

Коэффициент теплопроводности – это физическое свойство тела, характеризующее его способность проводить тепло и определяется из уравнения:

$$\lambda = \frac{|\vec{q}|}{\text{grad}t}, \left( \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \right). \quad (10)$$

Численно  $\lambda$  равен количеству тепла передаваемого в теле за единицу времени на единицу расстояния при наличии разности температур в один градус.

$\lambda$  зависит от природы тела, его строения, структуры и агрегатного состояния, а также от температуры и в меньшей степени от давления. Тела обладающие высоким  $\lambda$  называются теплопроводниками, к ним относятся, например, чистые металлы, в которых теплота передается свободными электронами. Коэффициент теплопроводности металлов лежит в пределах 20-400 Вт/м·К. Самым теплопроводным металлом является серебро ( $\lambda \approx 410$ ), затем медь ( $\lambda \approx 395$ ), золото ( $\lambda \approx 300$ ), алюминий ( $\lambda \approx 210$ ). Для большинства металлов с повышением температуры  $\lambda$  убывает. У сплавов металлов  $\lambda$  на один порядок меньше чем у чистых металлов и возрастанием температуры  $\lambda$  сплавов увеличивается.

К телам обладающими низкой теплопроводностью относятся газы,  $\lambda$  для которых колеблется в пределах 0,006÷0,6 Вт/м·К. Для строительных материалов  $\lambda = 0,16 \div 1,4$  Вт/м·К. Пористые материалы, плохо проводящие тепло называются теплоизоляторами и для них значения  $\lambda$  находятся в пределах от 0,02 до 0,23 Вт/м·К. К этим материалам относятся шлаковата, минеральная шерсть, асбест и др. Чем более порист материал, тем меньше его плотность тем менее он теплопроводен. Для различных тел при различных давлениях и температурах значение коэффициента теплопроводности  $\lambda$  приведены в таблицах теплофизических свойств веществ.

Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  не зависит от величины теплового потока и градиента температуры.

Тепловой поток, проходящий через изотермическую цилиндрическую поверхность определяется по формуле:

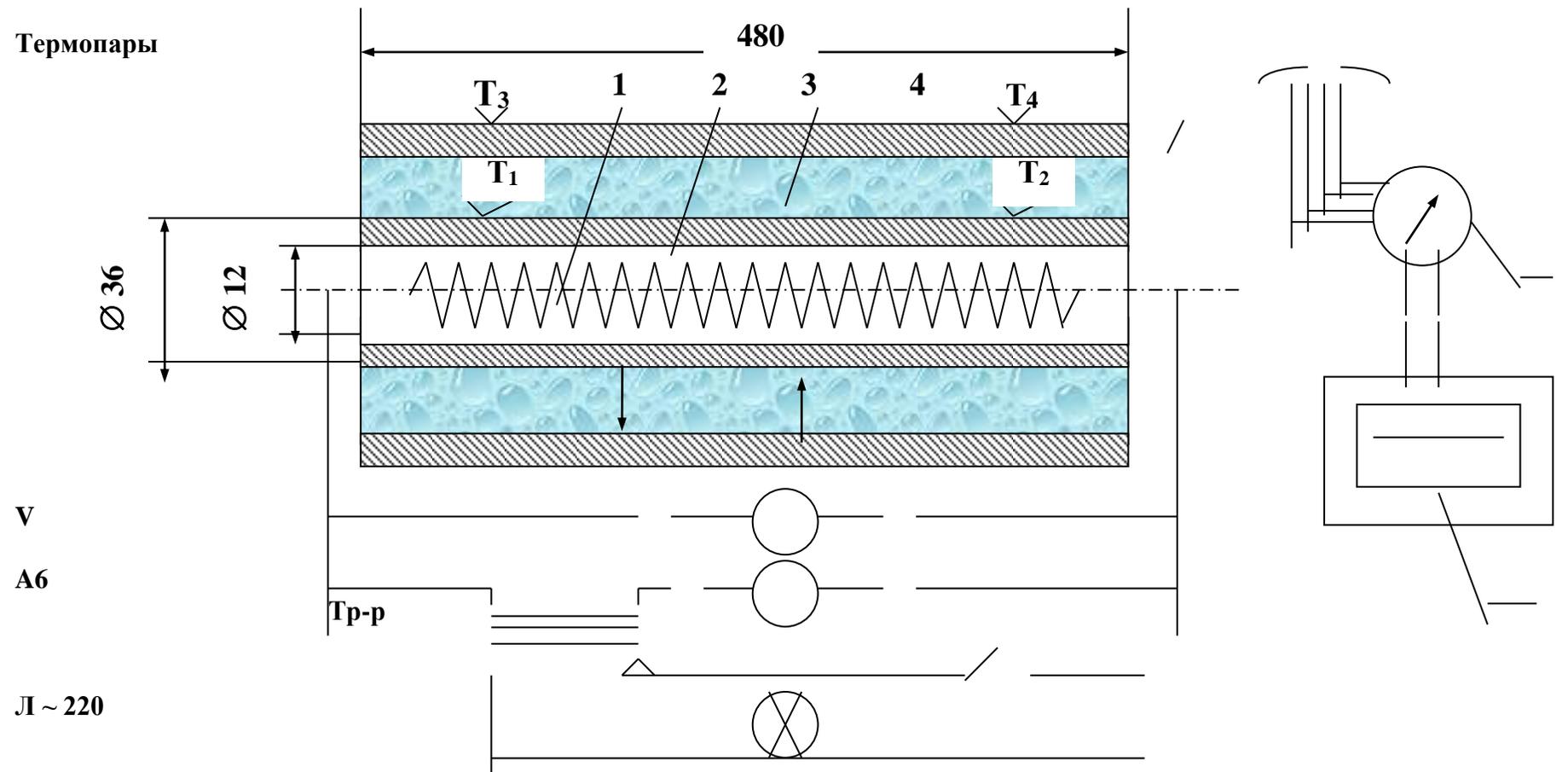
$$Q_{\tau} = \frac{2\pi\lambda L_{mp}(t_{вн} - t_{н})}{\ln r_{н} / r_{вн}}. \quad (11)$$

Для определения коэффициента теплопроводности материала цилиндрической стенки (бетона), имеющего размеры:  $r_{н}, r_{вн}, L_{mp}$ , необходимо создать тепловой поток  $Q_{\tau}$  через него и измерить температуры на наружной  $t_{н}$  и внутренней  $t_{вн}$  поверхностях стенки.

#### Экспериментальная установка

Исследуемый материал 3 – бетон (см. рис. 4) расположен между двумя стальными трубками 2 и 4 длиной 480 мм.

Внутри трубки 2 расположен электронагреватель 1 для создания теплового потока через бетон. Питание электронагревателя осуществляется через трансформатор (Тр-р) при включении тумблера В. Количество тепла, выделяющееся на электронагревателе и проходящее через бетон за одну секунду определяется по показаниям амперметра (А) и вольтметра (V). Для определения температуры бетона на наружной и внутренней трубках заложены по две термопары. На внутренней поверхности трубки 2 диаметром 12 мм расположены термопары Т1 и Т2, на наружной поверхности трубки 4 диаметром 36 мм расположены термопары Т3 и Т4. Все термопары через переключатель 5 подсоединяются к потенциометру 6 со шкалой в градусах Цельсия.



### Методика проведения измерений

При неизменной мощности электронагревателя необходимо некоторое время для прогрева бетона, т. е. до такого состояния, когда изменение температуры бетона по его толщине не будет меняться во времени. Поэтому измерение температуры в местах закладки четырех термопар продолжают до тех пор, пока температурное поле не станет стационарным, не зависящим от времени.

В таблицу измерений записываются показания  $T_1, T_2, T_3, T_4$ . Измерения проводятся не менее трех раз через 10 минут, до совпадения результатов последующего измерения с результатами предыдущего измерения. После чего записываются показания амперметра и вольтметра.

По указанию преподавателя мощность электронагревателя изменяется. До наступления нового стационарного распределения температуры бетона по его толщине. Измерения температур повторяются в такой же последовательности, как и при первой мощности электронагревателя. Записываются показания амперметра, вольтметра.

### Обработка измерений

Результаты обработки заносятся в таблицу обработки данных (табл.2.).

1. По показаниям амперметра и вольтметра определяется тепловой поток  $Q_{\tau_i}$  для первой мощности электронагревателя

$$Q_{\tau_i} = U_i \cdot I_i$$

2. По последним, установившимся показаниям термопар при первой и второй мощности электронагревателя определяется температура:

$t_{н1}$  – на наружной поверхности бетонного слоя;

$t_{в1}$  на внутренней поверхности бетонного слоя

$$t_{н_i} = \frac{t_3 + t_4}{2}, \quad t_{в_i} = \frac{t_1 + t_2}{2}.$$

3. По формулам /6, 7, 8 и 9/ определить:  $q_1; q_2; q_\ell$  и градт.

4. Рассчитывается коэффициент теплопроводности по формуле:

$$\lambda_{1=} = \frac{Q_{\tau_1} \cdot \ln(r_H / r_B)}{2\pi \cdot L_1 \cdot (t_{в1} - t_{н1})}$$

5. Определяется средняя температура бетонного слоя при первой мощности электронагревателя

$$\bar{t}_1 = \frac{t_{н1} + t_{в1}}{2}.$$

6. В такой же последовательности рассчитывается  $\lambda_2$  и  $\bar{t}_2$  для случая второй мощности электронагревателя.

## Оформление отчета

Отчет по выполненной работе должен содержать:

1. Принципиальную схему установки и описание принципа ее работы.
2. Краткие теоретические сведения по теплопроводности и методу определения коэффициента теплопроводности в объеме, необходимом для защиты (см. контрольные вопросы).
3. Таблицу результатов измерений по форме

**Таблица 1**

Номер измерения		$I_1 = \dots A, U_1 = \dots B$					$I_2 = \dots A, U_2 = \dots B$				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Показание термопар	$t_1$										
	$t_2$										
	$t_3$										
	$t_4$										

4. Таблицу обработки измерений по форме

**Таблица 2**

№ режима	$Q_{\tau},$ Вт	$q_1,$ Вт/м <sup>2</sup>	$q_2,$ Вт/м <sup>2</sup>	$q_{\ell},$ Вт/м	градт, град/м	$t_{вн},$ °С	$t_{н},$ °С	$-t,$ °С	$\lambda,$ Вт/м·К
1									
2									

## **Контрольные вопросы**

1. Дайте определение теплопроводности, коэффициента теплопроводности, градиента температуры, теплового потока, плотности теплового потока и их единицы измерения.
  1. Закон Фурье, его физический смысл и величин входящих в него.
  3. Определение стационарного, нестационарного, одномерного, двухмерного, трехмерного температурных полей.
  4. Каков вид температурного поля образца в момент последнего измерения температур?
  5. Объяснить зависимость коэффициента теплопроводности образца от средней по толщине температуры образца.
  6. Каков механизм переноса тепла через неподвижный газ, жидкость, металл?
  7. Возможен ли перенос тепла в теле вдоль изотермической поверхности?
  8. Почему для определения  $t_n$  и  $t_b$  недостаточно двух термопар?

## **Библиографический список**

1. Исаченко В.П. и др. Теплопередача. М.: Энергия, 1975. С. 7-24, 33-30.
2. Михеев М.А., Михеева Н.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. С.8-12, 19-

## Лабораторная работа №9

### ЛУЧИСТЫЙ ТЕПЛООБМЕН МЕЖДУ ТЕЛАМИ В ЗАМКНУТОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Методические указания к лабораторной работе № 14  
по дисциплине «Теплотехника» для студентов всех специальностей.

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Лабораторная работа выполняется студентами с целью усвоения основных понятий лучистого теплообмена и развития навыков по расчету количества тепла, передаваемого вследствие лучистого теплообмена между телами.

#### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Тепловое излучение или радиация – это процесс распространения тепла, т.е. части внутренней энергии тела, электромагнитными волнами.

Тепловое излучение свойственно всем телам и каждое из них излучает и поглощает энергию непрерывно, если температура его не равна 0 °К.

При одинаковых или различных температурах теплообмен излучением происходит непрерывно между телами произвольно расположенными в пространстве и в отличие от теплопроводности и конвекции не требует непосредственного контакта тел.

Теплообмен излучением происходит в три стадии: превращение части внутренней энергии тела в энергию электромагнитных волн (т.е. в энергию излучения), распространения электромагнитных волн в пространстве, поглощение энергии излучения и преобразование ее во внутреннюю энергию другого тела.

Совокупность процессов испускания, переноса, поглощения, отражения и пропускания теплового излучения называется лучистым теплообменом.

Лучеиспускание – процесс превращения внутренней энергии тела в лучистую энергию т.е. в энергию электромагнитных волн. Все виды электромагнитного излучения (космическое,  $\gamma$ -излучение, рентгеновское, ультрафиолетовое, световое (видимое), инфракрасное (тепловое) и радиоизлучение) имеют одинаковую природу и различаются лишь длиной волны  $\lambda$ . Область длин волн от  $\lambda=0,4$  мкм до  $\lambda=0,8$  мкм соответствует видимому (световому) излучению. Тепловое или инфракрасное излучение характеризуется длинами волн от 0,8 до 800 мкм.

Процесс распространения инфракрасных и световых лучей называется тепловым излучением или радиацией.

Поглощение – процесс превращения части лучистой энергии во внутреннюю энергию

тела.

Отражение – лучистой энергии от поверхности тела может быть диффузным (равномерным по всем направлениям) и зеркальным (по законам геометрической оптики).

*Количество лучистой энергии, испускаемой телом в единицу времени называется лучистым потоком  $Q_\tau$ , Вт.*

$$Q_\tau = \frac{Q}{\tau}, \left( \frac{\text{Дж}}{\text{сек}} = \text{Вт} \right).$$

*Поток излучения  $Q_\tau$ , проходящий через единицу поверхности, называется поверхностной плотностью потока излучения:*

$$E = \frac{dQ_\tau}{dF}, \left( \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right),$$

где  $dF$  – единица поверхности излучения,  $\text{м}^2$ .

Излучение в узком интервале длин волн называется монохроматическим излучением  $Q_\lambda$ . Интегральное излучение – это суммарное излучение (во всем диапазоне длин волн  $\lambda=0 \div \infty$ ).

*Количество энергии излучения, которое зависит от физических свойств и температуры излучающего тела, называется собственным излучением.*

Излучение, которое тело получает от внешнего источника, называют падающим потоком излучения -  $E_{\text{пад}}$ .

Поток излучения, падающий на какую либо поверхность тела  $E_{\text{пад}}$ , частично им поглощается  $E_A$ , частично отражается  $E_R$  и частично проходит сквозь тело  $E_D$ .

Закон сохранения энергии для падающего потока излучения имеет вид:

$$E_{\text{пад}} = E_A + E_R + E_D.$$

Если это соотношение разделить на  $E_{\text{пад}}$  получим:

$$\frac{E_{\text{пад}}}{E_{\text{пад}}} = \frac{E_A}{E_{\text{пад}}} + \frac{E_R}{E_{\text{пад}}} + \frac{E_D}{E_{\text{пад}}} = 1 = A + R + D,$$

где  $A = \frac{E_A}{E_{\text{пад}}}$  - коэффициент поглощения;  $R = \frac{E_R}{E_{\text{пад}}}$  - коэффициент отражения;  $D = \frac{E_D}{E_{\text{пад}}}$  -

коэффициент пропускания.

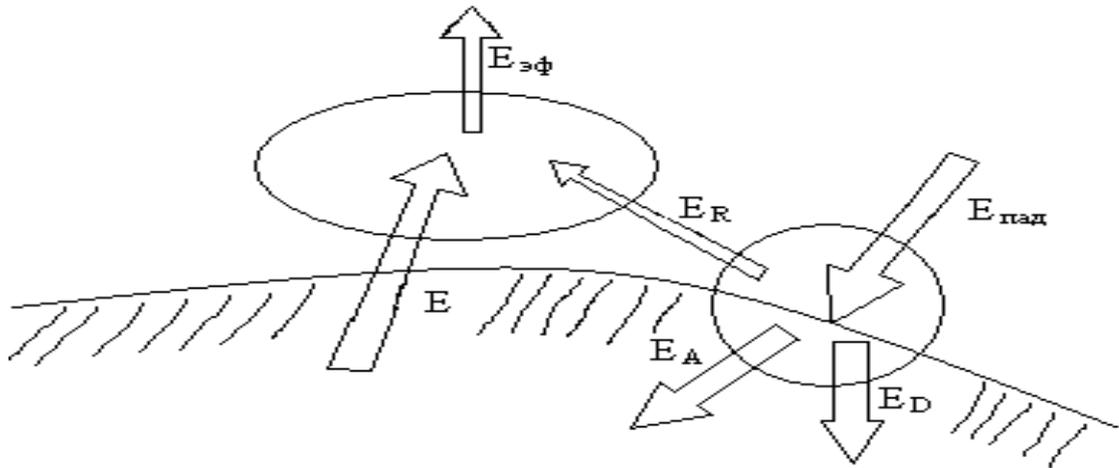


Рис. 1.

Эти коэффициенты характеризуют способность тела поглощать, отражать или пропускать тепловое излучение.

Если тело полностью поглощает падающую на его поверхность энергию излучения  $A=1$ ;  $R=0$ ;  $D=0$  оно называется абсолютно черным (а.ч.т). Абсолютно черное тело – модель реальных тел, имеющая следующие свойства: а) полностью поглощать все падающее на нее тепло; б) при данной температуре излучать максимально возможное количество тепла по сравнению с другими телами.

Тело, которое отражает всю падающую энергию на его поверхность  $R=1$ ;  $A=0$ ;  $D=0$  называется абсолютно белым телом.

Если тело полностью пропускает через себя падающую энергию излучения  $D=1$ ;  $A=0$ ;  $R=0$ , оно называется абсолютно прозрачным.

В природе не существуют абсолютно черных, белых и прозрачных тел. Все существующие реальные тела называются серыми телами. Они частично поглощают, отражают и пропускают (если это газ) падающую энергию излучения.

При теплообмене излучением в замкнутом пространстве, когда один цилиндр 1 находится внутри другого цилиндра 2 с боковыми поверхностями  $F_1$  и  $F_2$  (причем  $F_1 < F_2$ ), температурами  $T_1$  и  $T_2$  (при  $T_1 > T_2$ ) и степенями черноты  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  количество тепла передаваемого за одну секунду определяется по формуле:

$$Q_{л} = \epsilon_{пр} \cdot C_0 \cdot F_1 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (1)$$

где  $C_0 = 5,67 \frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$  - коэффициент излучения абсолютно черного тела;  $F_1$  и  $F_2$  – боковые

поверхности цилиндров;  $T_1$  и  $T_2$  – абсолютные температуры цилиндров;

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} - \text{приведенная степень черноты системы 2-х тел (одно выпуклое тело}$$

находится внутри другого вогнутого).

Степенью черноты  $\varepsilon$  называется отношение плотности потока излучения  $E_{\text{тела}}$  серого тела к плотности потока излучения  $E_0$  абсолютно черного тела при одной и той же температуре:

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0}.$$

Одновременно с лучистым теплообменом в рассматриваемой системе двух цилиндров с воздушным зазором между ними происходит перенос тепла вследствие конвекции воздуха и теплопроводности через воздух.

*Конвекция* - перенос тепла вместе с движущейся массой воздуха.

Одновременно с конвекцией происходит перенос тепла в воздухе вследствие хаотического движения и столкновения молекул воздуха, то есть теплопроводность. Совместный процесс конвекции и теплопроводности называется конвективным теплообменом. Если расстояние между поверхностями (с разной температурой), ограничивающими воздух, достаточно мало, то воздух можно считать неподвижным с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_{\text{в}}$ . Незначительное влияние движения воздуха на теплопроводность в зазоре между цилиндрами (рис. 3) учитывается поправочным коэффициентом  $E_{\text{к}}$ , зависящим от критериев Грасгофа и Прандтля:

$$E_{\text{к}} = f(\text{Gr} \cdot \text{Pr}).$$

$$\text{Если } \text{Gr}_{\text{в}} \cdot \text{Pr}_{\text{в}} = \frac{g\beta(T_1 - T_2)\delta^3 \cdot \text{Pr}_{\text{в}}}{\nu_{\text{в}}^2} \leq 10^3 \text{ то } E_{\text{к}} = 1.$$

В этом случае эквивалентный коэффициент теплопроводности  $\lambda_{\text{экв}} = \lambda_{\text{в}}$ . Если  $\text{Gr}_{\text{в}} \cdot \text{Pr}_{\text{в}} > 10^3$ , то  $E_{\text{к}} = 0,105(\text{Gr}_{\text{в}} \cdot \text{Pr}_{\text{в}})^{0,3}$  и  $\lambda_{\text{экв}} = \lambda_{\text{в}} \cdot E_{\text{к}}$ .

В приведенных выражениях  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;

$$\beta = \frac{1}{0,5(T_1 + T_2)} - \text{коэффициент объемного расширения газов; } \delta - \text{толщина воздушного зазо-}$$

ра;  $\nu_{\text{в}}$  - коэффициент кинематической вязкости воздуха.

Количество тепла, передаваемое через воздушный зазор вследствие теплопроводности, при учете движения воздуха

$$Q_{\lambda_{\text{экв}}} = \frac{2\pi \cdot \lambda_{\text{экв}} \cdot L(T_1 - T_2)}{\ln \frac{d_2}{d_1}}, \quad (2)$$

где  $L$  – длина цилиндров;  $d_2, d_1$  – соответственно диаметры наружного и внутреннего цилиндров.

Тепло, выделяющееся за одну секунду на электронагревателе  $Q_{\text{ЭН}}$ , помещенном внутри внутреннего цилиндра (в цилиндре 1), равно количеству тепла, передаваемому за одну секунду между двумя цилиндрами:

$$Q_{\text{ЭН}} = Q_{\lambda_{\text{экв}}} + Q_{\text{Л}}. \quad (3)$$

Считая степень черноты материала цилиндров одинаковой (при небольшой разнице температур  $T_1$  и  $T_2$ ), можно определить степень черноты цилиндров по формуле:

$$\varepsilon = \frac{1 + \frac{F_1}{F_2}}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{пр}}} + \frac{F_1}{F_2}}. \quad (4)$$

Приведенная степень черноты системы двух цилиндров определяется по формуле (1).

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Поверхность внутреннего цилиндра имеет более высокую температуру, чем поверхность внешнего цилиндра ( $T_1 > T_2$ ), т. к. внутри него находят электронагреватель, питающийся от сети через трансформатор  $\text{Тр}$ . Ток и напряжение в цепи электронагревателя измеряются амперметром  $\text{А}$  и вольтметром  $\text{В}$ . Температуры  $T_1$  и  $T_2$  определяются усреднением показаний соответственно термопар 3, 4 и 5, 6, которые подключаются через переключатель  $\text{П}$  к потенциометру  $\text{КСП}$ . Размеры цилиндров приведены на рис. 4.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

При постоянной мощности электронагревателя  $Q_{\text{ЭН}} = I \cdot U$  производится измерение температуры поверхностей цилиндров термопарами 3, 4, 5, 6 до тех пор, пока не наступает стационарное состояние. При стационарном поле значения температур на цилиндрах различны, но не изменяются во времени. Измерения показаний термопар повторяют через 10 минут. При установлении постоянства температур снимают показания амперметра и вольтметра. Все измерения заносят в протокол наблюдений.

## ОБРАБОТКА ИЗМЕРЕНИЙ

Для обработки используются только последние значения температур стационарного температурного поля. Обработка производится в следующем порядке.

1. Находят  $T_1$  и  $T_2$  усреднением последних показаний 3, 4 и 5, 6 термопар.
2. Рассчитывают толщину воздушного зазора  $\delta$  и определяющую температуру  $T_{\text{опр}} = 0,5(T_1 + T_2)$ .
3. Из таблицы (см. приложение), используя  $T_{\text{опр}}$ , находят  $\lambda_{\text{в}}$ ,  $\nu_{\text{в}}$ ,  $\text{Pr}_{\text{в}}$ , рассчитывают

$$\beta = \frac{1}{T_{\text{опр}}}.$$

4. Рассчитывается критерий  $\text{Gr}$  и по значению произведения  $\text{Gr} \cdot \text{Pr}$  – поправочный коэффициент  $E_{\text{к}}$ .

5. По формуле (2) определяется  $Q_{\lambda_{\text{экв}}}$ .

6. Находят  $Q_{л} = Q_{эн} - Q_{экв}$ .
7. По формуле (1) рассчитывается  $\epsilon_{пр}$ .
8. По формуле (3) определяется  $\epsilon$ .

### ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- 1) теоретические сведения по лучистому теплообмену в объеме определяемых перечнем контрольных вопросов;
- 2) принципиальную схему установки;
- 3) протокол наблюдений по форме (см. ниже);
- 4) использованные для расчетов формулы и результаты промежуточных расчетов.

Номер измерений	номер термопар				I	U
	3	4	5	6		
1					A	B
2						
3						
4						

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие три вида (процесса) переноса тепла в пространстве вы знаете?
2. Приведите пример лучистого или конвективного теплообмена.
3. Какие виды излучения Вы знаете?
4. Какое излучение называется собственным, падающим и эффективным?
5. Каков физический смысл степени черноты тела; приведенной степени черноты системы двух тел?
6. Чему равняется  $\epsilon_{пр}$ , если  $F_2 \gg F_1$  или  $F_2 \cong F_1$ ?
7. Как будет двигаться воздух в зазоре, если  $T_1 < T_2$ ?
8. Что изменится в процессе передачи тепла между цилиндрами, если между ними будет не воздух, а вода?
9. Почему для расчета  $Q_{л}$  используется  $F_1$ , а не  $F_2$ ?

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. –М.: Энергия, 1977. С. 34-38, 94-101, 160-182.
2. Теплопередача: Учебник для вузов/ В. П. Исаченко и др; В. П. Исаченко и др; В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. -4-е изд., перераб. и доп. -М.: Энергоиздат, 1981.- 416 с.
3. Теплотехника: Учебник для вузов/ М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др. ; Под ред. В.Н. Луканина. -2-е изд., перераб.. -М.: Высшая школа, 2000.-672 с

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО КУРСУ  
«Теплоэнергетические установки»**

Составитель: Суюнтбекова Н.А., Аширалиева Г.М.

Корректор Эркинбек к. Ж.

Редактор Турдукулова А. К.

Тех. редактор Кочоров А. Д.

---

Подписано к печати 12.12.2018 г. Формат бумаги 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>

Бумага офс. Печать офс. Объем 1.5 п. л. Тираж 200 экз. Заказ 586

---

Бишкек, ул. Сухомлинова, 20. ИЦ «Техник» КГТУ, т.:42-14-55, 54-29-43

E-mail: [ict@ktu.aknet.kg](mailto:ict@ktu.aknet.kg), [teknik@netbox.ru](mailto:teknik@netbox.ru)