

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К  
ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО КУРСУ  
«ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ»**

**для студентов специальности 7.090505 «Котлы и реакторы»  
и 7.05020202 «Компьютерно-интегрированные технологические  
процессы и производства»  
всех форм обучения**

**Утверждено  
редакционно-издательским  
советом университета  
Протокол № 1 от 07.06.2013.**

**Харьков  
НТУ „ХПИ”  
2014**

Лабораторные работы по курсу «Теплотехнические измерения» для студентов специальности 7.090505 «Котлы и реакторы» всех форм обучения и для студентов специальности 7.05020202 «Компьютерно-интегрированные технологические процессы и производства» всех форм обучения / сост.: Касилов В. И., Иванова Л. А., Тютюник Л. И.. – Х.: НТУ «ХПИ», 2014. - 32 с.

Составители:                    В. И. Касилов  
    Л. А. Иванова  
    Л. И. Тютюник

Рецензент                        В. М. Кошельник

Кафедра парогенераторостроения

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

## ГРАДУИРОВКА ТЕРМОПАР

### 1.1. Цель работы

1. Ознакомиться с устройством термопары и пирометрического милливольтметра.
2. Ознакомиться с методикой поверки термопары и градуировкой милливольтметра.
3. Произвести поверку термопары и отградуировать к ней милливольтметр.

### 1.2. Общие сведения

Градуировка термопары может производиться:

- 1) по постоянным точкам плавления (затвердевания) и кипения химически чистых веществ;
- 2) сравнением показаний градуируемой термопары с показаниями образцовой термопары.

В обоих случаях градуировка сводится к определению зависимости электродвижущей силы термопары от температуры горячего спая при постоянной температуре холодных спаев.

В данной работе применен второй способ градуировки.

Термопара состоит из двух разнородных проводников-термоэлектродов – положительного и отрицательного, спаянных в одной точке и заключенных в защитный чехол. Место спая термопары называется ее рабочим концом и помещается в среду, где измеряется температура. К свободным концам термопары присоединяется измерительный прибор – милливольтметр или потенциометр, градуированный в единицах температуры или в милливольтгах.

Действие термопары основано на возникновении термоэлектродвижущей силы (термо-э.д.с.) в спае двух разнородных проводников при изменении температуры.

Электродвижущая сила термопары зависит от материала термоэлектродов, температуры ее рабочего и свободных концов. Действительное значение э.д.с. термопары определяется по уравнению:

$$E(t) = E(tt_0) \pm E(t_0), \quad (1.1)$$

где  $E(tt_0)$  – э.д.с., развиваемая термопарой при температуре рабочего конца  $t$  и свободного конца  $t_0$ ;

$E(t)$  – э.д.с., развиваемая термопарой при температуре рабочего конца  $t$  к свободного конца при  $t = 0^\circ\text{C}$ ;

$E(t_0)$  – э.д.с., развиваемая термопарой при температуре свободных концов  $t_0$ .

Знак «+» относится к случаю, когда  $t_0 > 0$  °С, а знак «-», когда  $t_0 < 0$  °С.

В промышленности применяются следующие типы термопар: платино-платинородиевая, гр. ПП (высший предел измерения 1600 °С); хромель-алюмелевая, гр. ХА (высший предел измерения 1200 °С); хромель-копелевая, гр. ХК (высший предел измерения 800 °С).

Зависимость термо-э.д.с. от температуры для различных термопар при температуре свободных концов 0 °С приведена в таблице 1.1.

Градуировка термопары заключается в экспериментальном определении зависимости ее термо-э.д.с. от температуры методом сравнения с показаниями контрольной или образцовой термопары.

Термо-э.д.с. термопары измеряется компенсационным методом при помощи потенциометра. Этот метод заключается в том, что неизвестная термо-э.д.с. термопары уравнивается (компенсируется) падением напряжения на калиброванном сопротивлении расхода от постоянного источника тока. Точное измерение термо-э.д.с. термопары возможно при условии, когда источник питания измерительной схемы будет иметь постоянное значение напряжения, которое уравнивается при напряжении нормального элемента, равного 1,0183 В.

Таблица 1.1. – Градуировочные данные различных термопар при температуре свободного конца 0 °С

Температура, °С	Э.д.с. термопар		
	ПП, мВ	ХА, мВ	ХК, мВ
1	2	3	4
0	0	0	0
10	0,057	0,40	0,65
15	0,086	0,60	0,98
20	0,115	0,80	1,31
25	0,145	1,00	232
30	0,176	1,20	1,98
35	0,206	1,41	2,32
40	0,237	1,61	2,66
45	0,269	1,82	3,00
50	0,301	2,02	3,35
100	0,64	4,10	6,95
150	1,014	6,13	10,69
200	1,421	8,13	14,65
250	1,86	10,15	18,76

Продолжение таблицы 1.1.

300	2,310	12,21	22,90
350	2,772	14,26	27,15
400	3,243	16,39	31,48
450	3,722	18,50	35,81
500	4,210	20,64	40,15
550	4,707	22,77	44,54
600	5,212	24,80	49,00
650	5,726	27,03	53,39
700	6,249	29,14	57,75
750	6,780	31,23	62,09
800	7,320	33,31	66,40
850	7,868	35,35	–
900	8,426	37,36	–
950	8,992	39,35	–
1000	9,566	41,31	–

### **1.3. Схема установки и порядок выполнения работы**

Установка для градуирования термопары (рис. 1) состоит из трубчатой электрической печи для нагревания горячих спаев термопар, образцовой и градуируемой термопар, термостата для поддержания постоянной температуры холодных спаев термометра для замера температуры холодных спаев, гальванометра для измерения электродвижущей силы термопар и переключателя для возможности подключения образцовой и испытуемой термопар к одному гальванометру (в данном случае ПП-63), подводящих проводов для присоединения термопар к переключателю и переключателя к гальванометру, штатива для поддержания термопар в определенном положении и реостата для регулирования температуры в печи.

Градулируемая и образцовая термопары устанавливают в печь так, чтобы спаи их были в зоне одинаковых температур и не касались стенок печи. Холодные спаи присоединяют к подводящим проводам и помещают в пробирки с маслом, находящимися в термостате с тающим льдом, а свободные концы подводящих проводов присоединяют к переключателю, который подключают к гальванометру (переносному потенциометру ПП-63).

Работа выполняется в следующем порядке.

- 1.** Ознакомиться со схемой установки.
- 2.** Подготовить протокол градуировки термопары по такой форме, табл. 1.2.

Таблица 1.2. - Протокол градуировки термопары

Контрольная термопара, гр. ХА					Градулируемая термопара		
Время замера э.д.с., мин	Измеренное значение э.д.с. термопары $E_{тн}$ , мВ	Температура свободного конца термопары, °С	э.д.с. свободного конца термопары $E_{тн}$ , мВ	Истинная температура в печи, °С	Измеренное значение э.д.с. термопары $E_{тн}$ , мВ	Температура свободного конца термопары, °С	э.д.с. термопары при температуре рабочего конца $t_n$ свободного конца $t_0=0$ °С

3. Подготовить к работе лабораторный потенциометр ПП-63. (рисунок 1.2.).

В измерительную цепь потенциометра включены источник питания – батарея сухих элементов – напряжением 1,3 В; переменное сопротивление  $R_{\delta}$ ; сопротивление нормального элемента  $R_{нз}$ , сопротивление реохорда  $R_p$ ; термопара Т и нуль-гальванометр НГ.

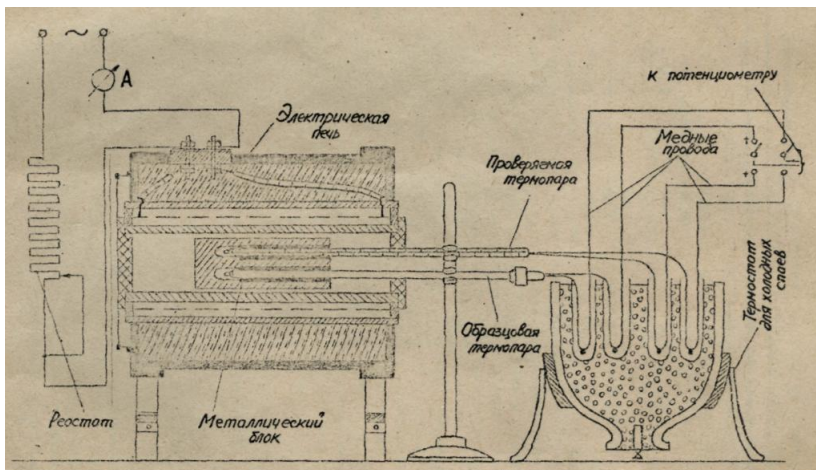


Рисунок 1.1 – Электрическая трубчатая печь для градуировки (поверки) термопар путем сравнения их показаний с показаниями образцовой термопары

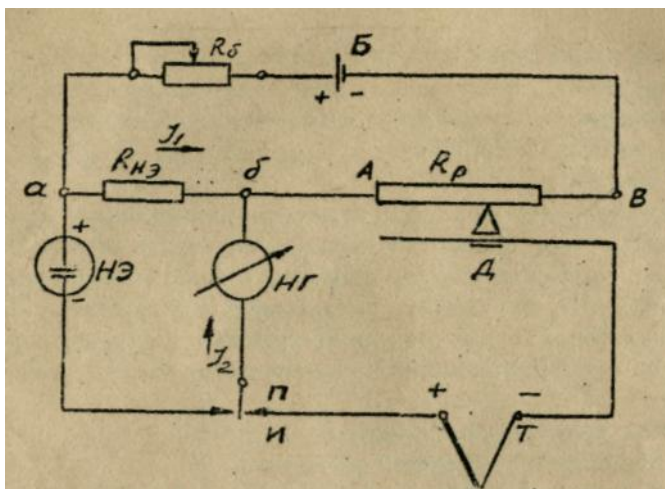


Рисунок 1.2 – Схема потенциометра ПП-63

Электродвижущая сила батареи с течением времени уменьшается, а следовательно, меняется и ток в цепи расхода. Чтобы исключить погрешность измерения тока вследствие изменения э.д.с. батареи, величина рабочего тока в измерительной цепи потенциометра периодически устанавливается по нормальному элементу, э.д.с. которого при 20 °С равна 1,0183 В. Для настройки рабочего тока потенциометра переключатель «П» ставится в положение «К» (контроль). Перемещая движок сопротивления  $R_{\delta}$ , добиваются такого его положения, при котором стрелка нуль-гальванометра установится на нулевой отметке. В этом случае падение напряжения на сопротивление  $R_{нэ}$  от тока нормального элемента и от тока батареи будут равны. После настройки рабочего тока переключатель "П" устанавливают в положение "И" (измерение). Этим самым отключается нормальный элемент и в измерительную цепь включаются батарея и термопара. Передвигая движок реохорда по сопротивлению  $R_p$ , устанавливают стрелку нуль-гальванометра на нулевой отметке. Величину измеренной э.д.с. термопары в мВ отсчитывают на шкале реохорда по положению его движка. При этом

$$E_{ТП} = J_2(R_{АД} + R_{КП}) + J_1R_{АД} \quad (1.2)$$

В момент компенсации ток  $J_2 = 0$ . Тогда

$$E_{ТП} = J_1R_{АД}, \quad (1.3)$$

т.е. наступила компенсация э.д.с. термопары по данному напряжению от

тока батареи  $J_1$  на участке сопротивления реохорда АД.

4. Включить печь при помощи реостата.

5. Через равные интервалы времени (3–5 мкс) измерять потенциометром э.д.с. контрольной и градуируемой термопар. Одновременно измеряют температуру свободных концов термопар. Данные записать в протокол градуировки.

6. По градуировочной таблице построить график зависимости э.д.с. от температуры для контрольной термопары, откладывая по оси координат э.д.с. (мВ), а на оси абсцисс – температуру ( $^{\circ}\text{C}$ ).

7. Для определения истинной температуры в печи на температурной оси отложить температуру свободного конца контрольной термопары и из этой точки провести прямую, параллельную первоначальной прямой. Полученная прямая представляет собой зависимость э.д.с. контрольной термопары от температуры в печи с учетом температуры свободного конца термопары ( $E_{\text{т}}$ , мВ). Отложить на оси ординат измеренные значения э.д.с. контрольной термопары и спроектировать их на градуировочную прямую, определить истинную температуру в печи. Найденные значения температуры записать в протокол.

8. На этом же графике построить зависимости э.д.с. от температуры для градуируемой термопары при фактической температуре свободного конца и при температуре свободного конца, равной  $^{\circ}\text{C}$ .

#### **1.4. Отчет о работе**

Отчет должен содержать краткое описание методики градуировки термопары и милливольтметра, схему установки, протокол градуировки и графики.

#### **1.5. Контрольные вопросы**

1. Какие источники погрешностей возникают при изменении температуры термопары?
2. Как подготовить контрольный потенциометр к работе?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2 ПОВЕРКА ПИРОМЕТРИЧЕСКОГО МИЛЛИВОЛЬТМЕТРА

### 2.1. Цель работы

Ознакомиться с принципом действия и устройством пирометрического милливольтметра и произвести его поверку.

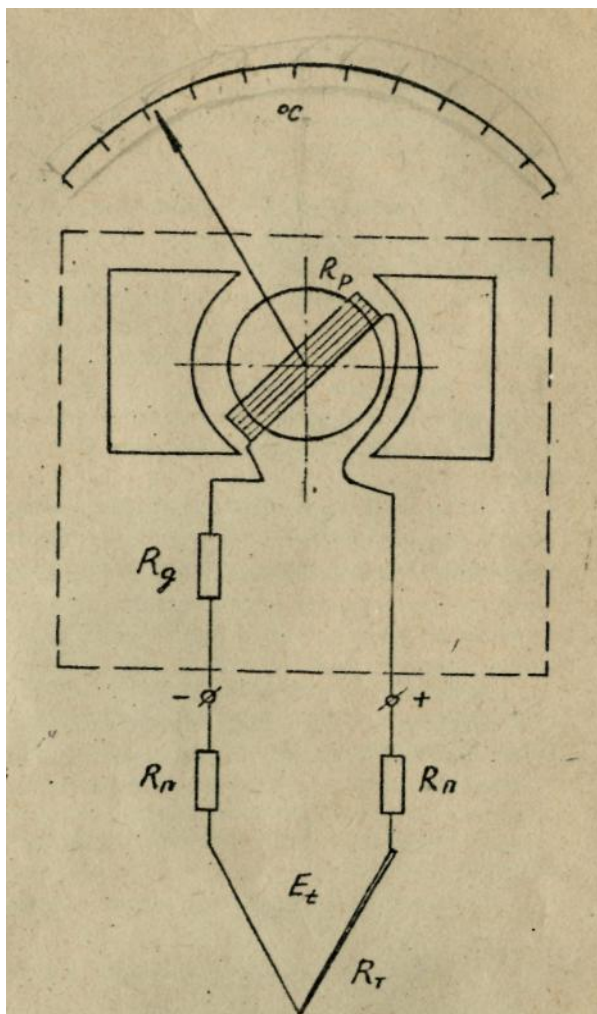


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема пирометрического милливольтметра

## 2.2. Назначение и устройство пирометрического милливольтметра

Пирометрический милливольтметр представляет собой щитовой профильный прибор магнитоэлектрической системы. Приборы предназначаются для измерения температуры в комплекте с термопарами одной из стандартных градуировок ПП, ПР, ХА, ХК, НС.

Подвижная система милливольтметра (рисунок 2.1) состоит из медной проволочной, рамки расположенной в зазоре между полюсами постоянного магнита, создающего поток  $\Phi$ . При протекании тока  $i$  рамка (установленная на кернах) поворачивается под влиянием момента

$$M_{KP} = ki\phi \quad (2.1)$$

который уравнивается двумя (токоведущими) спиральными пружинками, создающими противодействующий момент

$$M_{IP} = c\varphi$$

где  $\varphi$  – угол закручивания (поворота) рамки;

где в формуле  $K$  и  $C$  – постоянные коэффициенты (для данного прибора).

Пружинки связаны с рычагом корректора нуля, что позволяет устанавливать стрелку прибора в требуемое начальное положение. Ток, проходящий по рамке прибора,

$$i = \frac{U}{R_M} = \frac{E_T}{R_M + R_{BH}}, \quad (2.2)$$

откуда

$$E_T = U \left( 1 + \frac{R_{BH}}{R_M} \right), \quad (2.3)$$

где  $U$  – напряжение на клеммах милливольтметра;

$R_M = R_P + R_g$  – сопротивление милливольтметра;

$R_{BH} = R_T + R_{II}$  – сопротивление внешней цепи;

$R_P$ ,  $R_g$  – сопротивление рамки и добавочное сопротивление милливольтметра соответственно;

$R_T$ ,  $R_g$  – сопротивление термопары и соединенных проводов соответственно.

В свою очередь, э.д.с. термопары

$$E_T = E(t) - E(t_0) \quad (2.4)$$

откуда э.д.с. термопары, соответствующая искомой (измеряемой) температуре по уравнению (2.4),

$$E(t) = E_T + E(t_0) \quad (2.5)$$

где  $t$  и  $t_0$  – температура рабочего и свободного конца термопары соответственно.

Из рис. 2.1 следует, что результат измерения зависит от сопротивления внешней цепи  $R_{BH}$ , поэтому она подгоняется до номинального значения (0,6; 5; 10 Ом), указанного по шкале прибора. С этой целью приборы снабжаются подгоночной катушкой из манганиновой проволоки.

Поскольку результат измерения зависит также от соотношения между величинами  $R_{BH}$  и  $R_M$ , которое может изменяться под влиянием изменения температуры окружающей среды, величину  $R_M$  увеличивают с помощью добавочного сопротивления настолько, чтобы соотношение  $R_{BH} / R_M = 0.05 - 0.06$ .

Учитывая формулу (2.5), можно сделать вывод, что для исключения влияния температуры свободных концов термопары достаточно стрелку прибора отвести с помощью корректора на отметку, соответствующую  $t_0$ . Однако этот способ пригоден для случая, когда указанная температура остается постоянной.

### **2.3. Содержание работы**

Произвести поверку вторичного прибора – милливольтметра на всех оцифрованных отметках шкалы с помощью образцового потенциометра. По результатам поверки определить абсолютную погрешность, вариации и соответствие прибора по классу точности.

Поверка заключается в том, что на зажимы поверяемого прибора вместо э.д.с. и термопары подается э.д.с. от источника тока ПП-63.

Величина подаваемого напряжения измеряется переносным потенциометром. При помощи реостатов устанавливается э.д.с. согласно градуировочной таблице. Установленное напряжение подается на зажимы поверяемого милливольтметра.

Сопротивление линии от ПП-63 до милливольтметра равно величине, указанной на шкале милливольтметра. Величина поправок не должна превышать допустимой погрешности. Величина допустимой погрешности, выраженная в процентах максимального значения шкалы, равна классу точности прибора.

### **2.4. Порядок проведения работы**

1. Изучить инструкцию по работе с ПП-63.
2. Собрать схему (рис. 2.2).
3. При включении напряжения установить стрелку поверяемого милливольтметра на нулевую отметку при помощи рычага-корректора, находящегося внутри корпуса прибора.

4. Проверить правильность присоединения к ПП-63 поверяемого милливольтметра.

5. Составить протокол поверки, заполнить необходимые данные, руководствуясь надписями на шкале прибора, потенциометра и соответствующей градуировочной таблицы.

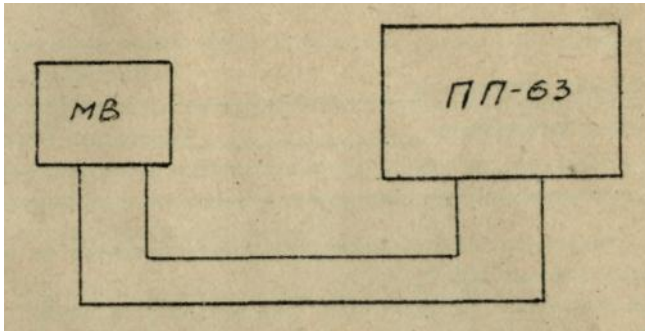


Рисунок 2.2 – Схема поверки пирометрического милливольтметра

### ПРОТОКОЛ ПОВЕРКИ

Милливольтметр типа \_\_\_\_\_  
 градуировки \_\_\_\_\_  
 № \_\_\_\_\_  
 со шкалой \_\_\_\_\_  
 цена деления \_\_\_\_\_  
 класс точности \_\_\_\_\_  
 внешнее сопротивление \_\_\_\_\_  
 проверяется контрольным прибором \_\_\_\_\_  
 типа \_\_\_\_\_  
 № \_\_\_\_\_  
 с верхним диапазоном измерения \_\_\_\_\_  
 класс точности \_\_\_\_\_  
 цена деления \_\_\_\_\_

№ п/п	Поверяемая отметка	Табличное значение термо-э.д.с. по потенциометру	Показание милливольтметра	Абсолютная погрешность		Вариация
				ход вверх	ход вниз	

Максимальная погрешность \_\_\_\_\_  
 Допустимая погрешность \_\_\_\_\_  
 Выводы \_\_\_\_\_

6. Произвести поверку показаний милливольтметра на всех точках шкалы, кратных 100 °С.

При положении переключателя «род работы», «поверка» установить при помощи реохорда и секционного переключателя для поверяемой точки 100 °С соответствующее число милливольт по данным градуировочной таблицы.

Установить переключатель ПП в положение «И», не передвигая реохорда и секционного переключателя, добиться установки на нуль стрелки нулевого гальванометра передвижением движков реостата «напряжение» (сначала производится грубая подгонка верхним реостатом, затем точная - нижним реостатом).

После успокоения стрелки нулевого гальванометра ПП производится отсчет по шкале поверяемого милливольтметра и запись в протокол поверки. После поверки всей шкалы вычислить величину погрешностей для каждой точки в градусах и процентах максимального значения шкалы.

Перед началом поверки следует обратить внимание на следующее. Если стрелка милливольтметра установлена на нулевой отметке, то при поверке на его вход следует подавать напряжение, соответствующее градуировочным значениям для поверяемой отметки шкалы.

Если стрелка прибора установлена не на нулевой отметке, т.е. введена поправка на температуру холодных спаев, то следует предварительно рассчитать величину выходного напряжения образцового потенциометра  $U_{II}$  по формуле:

$$U_{II} = E(t) - E(t_x)$$

где  $t$  – значение температуры на поверяемой отметке шкалы;

$t_x$  – значение температуры холодного спаев, соответствующее начальному положению стрелки милливольтметра.

## 2.5. Контрольные вопросы

1. Какое назначение имеют спиральные пружины в подвижной системе милливольтметра?
2. Как осуществляется компенсация изменения температуры холодных спаев термопары?
3. Чем отличаются милливольтметры различных градуировок?
4. Причины погрешностей, возникающих при измерении термо-э.д.с. термопары милливольтметром.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3 ГРАДУИРОВКА ТЕРМОМЕТРА СОПРОТИВЛЕНИЯ

### 3.1. Цель работы

1. Ознакомиться с принципом действия, устройством и методикой градуировки термометра сопротивления.
2. Проградуировать термометр сопротивления.

### 3.2. Принцип действия и устройство термометра сопротивления

Измерение температуры термометрами сопротивления основано на свойстве веществ изменять свое электрическое сопротивление в зависимости от температуры.

Располагая зависимостью сопротивления вещества от температуры и определяя это сопротивление при помощи электроизмерительного прибора, можно судить о температуре этого вещества.

В качестве вторичных приборов, работающих с термометрами сопротивления, применяются уравновешенные измерительные мосты и логометры.

У большинства металлов нагрев увеличивает электрическое сопротивление. Материалами, из которых изготавливаются металлические сопротивления, служат платина и медь. Платина имеет нелинейную зависимость сопротивления от температуры, а медь – линейную. Основные технические данные некоторых выпускаемых термометров сопротивления приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Технические данные металлических термометров сопротивления

Тип термометра	Характеристика	Пределы измерения, °С	Инерционность, мин
ТСП-1 ТСП-Ш	Платиновый, одинарный, градуировка гр. 21 ( $R_0 = 46 \text{ Ом}$ )	$0 \div +500$	до 4
ТСМ-Х ТСМ-Х1У	Медный, одинарный, градуировка гр. 23 ( $R_0 = 53 \text{ Ом}$ )	$-50 \div +100$	до 4

В зависимости от величины электрического сопротивления  $R_0$  при  $t = 0^\circ\text{C}$  термометры сопротивления делятся на градуировочные группы: платиновые - гр. 21 ( $R_0 = 46 \text{ Ом}$ ), гр.22 ( $R_0 = 100 \text{ Ом}$ ), гр. 20 ( $R_0 = 10 \text{ Ом}$ ); медные – гр. 23 ( $R_0 = 53 \text{ Ом}$ ); гр. 24 ( $R_0 = 100 \text{ Ом}$ ). Градуировочные

характеристики их строятся в соответствии с ГОСТ 6651-59.

Платиновые термометры сопротивления выполняются из платиновой проволоки диаметром 0,07 мм, бифилярно намотанной на слюдяную пластинку с зубчатыми краями. В прорезях пластинки укреплены концы серебряных выводов, к которым припаяны концы проволоки элемента сопротивления. Платиновая проволока, намотанная на слюдяную пластинку, изолирована с двух сторон слюдяными накладками, скрепленными обмоткой из серебряной ленты. Элемент сопротивления помещен в защитную трубку из нержавеющей стали. Алюминиевые вкладыши заполняют сечение трубки с обеих сторон изолированного чувствительного элемента. Выводы проводов изолированы фарфором. Арматура термометра состоит из трубы с заваренным дном, гайки и головки. Минимальная глубина погружения – 150 мм.

Для уменьшения инерционности выпускают лепестковые термометры. В них вместо вкладышей используются лепестки из дюраля толщиной  $0.07 \div 0.1$  мм, создающие хороший тепловой контакт между чувствительным элементом и арматурой.

Медные термометры сопротивления имеют обмотку чувствительного элемента из медной эмалированной проволоки диаметром 0,1 мм. Чувствительный элемент заключен в защитную латунную трубку с обжатым концом.

### 3.3. Методика выполнения работы

1. Для градуировки термометра сопротивления необходимо собрать схему, состоящую из следующих элементов:

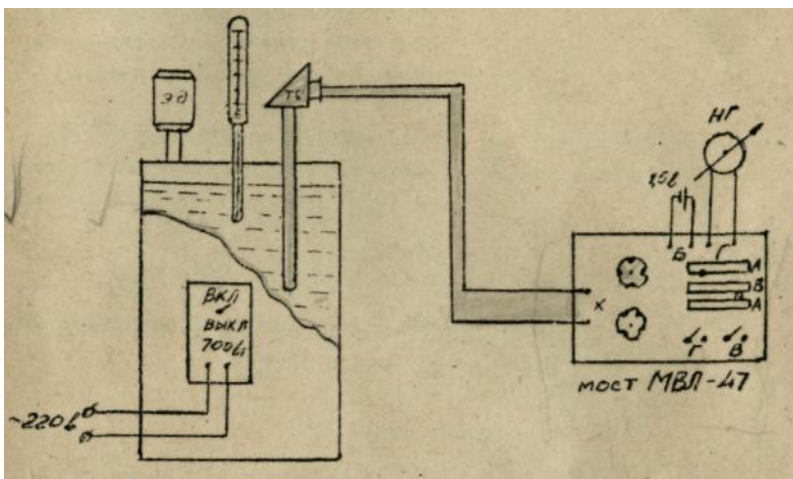


Рисунок 3.1 – Схема для градуировки термометра сопротивления

а) нагревателя, в который помещен термометр сопротивления (рис. 3.1). В качестве нагревателя применяется термостат типа ТС-16А, позволяющий регулировать температуру от 30 до 99 °С – для воды и от 100 до 200 °С – для масла, с точностью  $\pm 0,25$  °С;

б) уравновешенного измерительного моста постоянного тока или вольтметра универсального цифрового В7-27, обеспечивающего измерение сопротивления постоянному току в диапазоне от 0,01 до 20 Ом;

в) источника стабилизированного питания напряжением 1,5 В.

2. Ознакомиться с устройством измерительного моста и подготовить его к работе.

Принципиальная схема измерительного моста показана на рис. 3.2. Он представляет собой цепь, состоящую из двух параллельно включенных ветвей. Каждая ветвь состоит из двух плеч  $R_A$  и  $R_X$ ,  $R_B$  и  $R_P$ . В противоположные вершины моста включаются источник питания и нуль-гальванометр.

Измерение искомого сопротивления  $R_X$  сводится к нахождению такого соотношения между сопротивлениями плеч  $R_A$ ,  $R_B$  и  $R_P$ , при котором отсутствовало бы напряжение в измерительной диагонали. При этом стрелка нуль-гальванометра должна установиться на нулевой отметке при замыкании ключа «1».

Искомое, сопротивление  $R_X$  находится из уравнения равновесия моста:

$$R_A \cdot R_P = R_B \cdot R_X,$$

откуда

$$R_X = \frac{R_A}{R_B} \cdot R_P,$$

где  $R_P$  – сопротивление реохорды.

3. Подготовить таблицу результатов измерения по форме:

Номер измерения	Температура, °С	Сопротивление термометра, Ом

4. К зажимам «Х» измерительного моста присоединить градуируемый термометр сопротивления и уравновесить мост (измерить сопротивление прибором В7-27).

5. Измерить сопротивление термометра при 20, 50 и 100 °С

6. Данные измерений занести в таблицу и построить график  $R_X = f(t)$ , откладывая на оси абсцисс температуру, а на оси ординат – сопротивление.

### 3.4. Отчет о работе

Отчет о работе должен содержать краткое описание методики градуировки термометра сопротивления, схему установки, таблицы и график результатов градуировки.

### 3.5. Контрольные вопросы

1. Назовите основные методики градуировки термометра сопротивления.
2. Какие вторичные приборы могут работать с термометрами сопротивления?

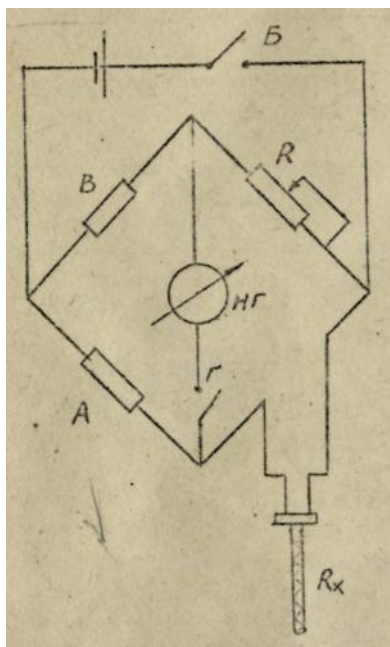


Рисунок 3.2 – Принципиальная схема измерительного моста

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4 ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОПТИЧЕСКИМИ И РАДИАЦИОННЫМИ ПИРОМЕТРАМИ

### 4.1. Цель работы

1. Ознакомиться с принципом действия, устройством и методикой измерения температуры оптическим и радиационным пирометром.
2. Произвести измерение температуры с помощью оптического и радиационного пирометров.

### 4.2. Принцип действия и устройство оптического пирометра

Оптические и радиационные пирометры относятся к пирометрам излучения, работа которых основана на излучении лучистой энергии, испускаемой нагретым телом.

Лучистая энергия выделяется нагретым телом в виде волн различной длины. Вначале нагретое тело испускает невидимые инфракрасные тепловые волны большой длины. По мере повышения температуры появляются более короткие волны. Одновременно с повышением температуры тела и изменением его цвета быстро возрастает интенсивность монохроматического излучения.

Оптические пирометры предназначены для измерения температуры в диапазоне от 700 до 3000 °С.

Большое распространение получили оптические пирометры с исчезающей нитью. В таких пирометрах интенсивность излучения тела на длинах волн  $\lambda_{эфф} = 0,65$  мк сравнивается с интенсивностью излучения нити электрической (пирометрической) лампы накаливания на тех же длинах волн.

Схематически оптический пирометр с исчезающей нитью переменного накала показан на рис. 4.1. Пирометрическая (фотометрическая) лампа 3 питается током от батареи Б. Сила питающего тока определяется по милливольтметру mA, шкала которого обычно градуируется в соответствующих градусах яркостей температуры.

Сила тока в лампе регулируется реостатом R с помощью поворотного кольца б. Для фокусирования изображения измеряемого раскаленного тела с плоскостью нити лампы служит объектив I. Окуляр 4 предназначается для корректирования изображения нити по глазу наблюдателя. Красный светофильтр 5 включается к моменту отсчета, при предварительной наводке он может быть выключен. Красный светофильтр применяется при измерении температур от 750 до 1400 °С. При измерении температур от 1400 до 3000 °С вместе с красным светофильтром вводят дымчатый.

Вращая рукоятку реостата, изменяют яркость свечения нити накаливания пирометрической лампы. При этом могут быть следующие случаи.

Согласно закону Вина температура тел одинакова, если их яркости равны.

Измерения производят на расстоянии 0,5–5 м. На шкале милливольтметра отсчитывают кажущуюся температуру.

Истинная температура нагретого тела (град. Кельвина) определяется по формуле:

$$T = \frac{1}{\frac{1}{T_K} - \frac{\lambda}{C_2} \ln \frac{1}{\varepsilon_\lambda}},$$

где  $T_K$  - кажущаяся температура тела, К, измеренная оптическим пирометром;  $\lambda$  - длина волны, мк (0,7 м);

$C_2$  - постоянная, равная  $1.43B \cdot 10^{-2}$ ;

$\varepsilon_\lambda$  - коэффициент лучеиспускания тела для данной длины волны (табл. 4.1).

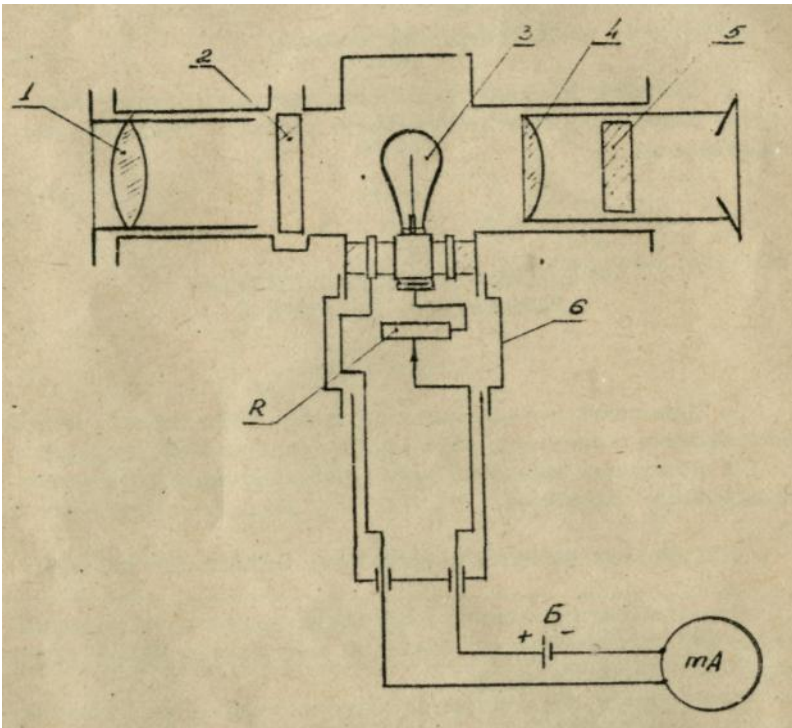


Рисунок 4.1 – Схема оптического пирометра

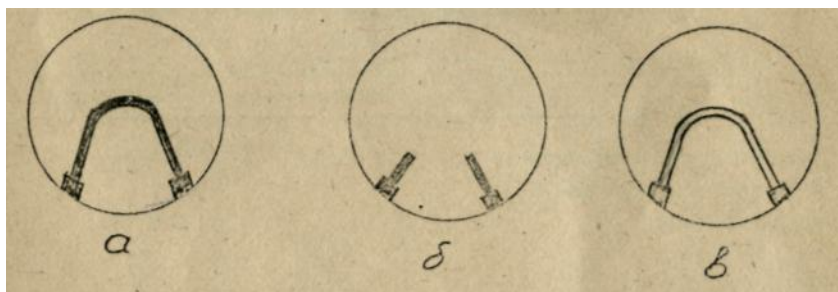


Рисунок 4.2 – Изменение яркости свечения нити накаливания

а) нить, нагретая меньше чем раскаленное тело, будет казаться темной на светлом фоне (рис.4.2 а);

б) при равенстве яркостных температур нити и тела средняя часть нити исчезнет на фоне раскаленного тела (рис. 4.2 б).

в) нить, нагретая более чем раскаленное тело, будет казаться светлее фона (рис.4.2 в);

Таблица 4.1 – Монохроматический коэффициент черноты излучения  $\lambda = 0.65$  мк

Материал	Коэффициент черноты $\varepsilon_\lambda$ для поверхности	
	окисленной	неокисленной
Сталь твердая, углеродистая	0,44	0,80
Сталь твердая хромовая и хромоникелевая	–	0,85
Сталь жидкая	0,37	–
Чугун твердый	0,37	–
Чугун жидкий (1815К)	0,40	0,70
Железо твердое (1300К)	0,39	–
Железо жидкое (1800К)	0,36	–
Медь твердая	0,11	0,70
Медь жидкая	0,15	–
Никель твердый	0,35	0,90
Никель жидкий	0,37	–
Платина твердая (1750К)	0,33	–
Платина жидкая	0,38	–
Серебро твердое и жидкое	0,07	–
Алюмель твердый	0,37	0,87

Продолжение табл.4.1.

Хромель твердый	0,35	0,78
Константан твердый	0,35	0,84
Вольфрам твердый (2400К)	0,425	–
Вольфрам твердый (1800К)	0,437	–
Уголь и графит (3300К)	0,81	
Уголь и графит (1300К)	0,90	–
Шлаки жидкие	0,65	–
Шамот	0,70-0,80	–

Измерить температуру оптическим пирометром и результаты измерения занести в табл. 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты измерений температуры оптическим пирометром

Номер измерения	Кажущаяся температура, К	Истинная температура, К	Относительная погрешность, %

### 4.3. Принцип действия и устройство радиационного пирометра

Для измерения радиационных температур нагретых тел в промышленных и лабораторных условиях применяют пирометры полного излучения (радиационные пирометры).

Применяемые в настоящее время пирометры полного излучения позволяют измерять температуру в диапазоне от 400 до 3500 °С.

Количество выделившейся энергии определяется путем измерения температуры черного тела термобатарей.

Упрощенная схема радиационного пирометра представлена на рис. 4.3. Пирометр состоит из первичного преобразователя (телескопа) с рефракторной оптической системой и измерительного прибора ИП (милливольтметра). Изображение объекта, температура которого измеряется, создается в телескопе с помощью линзы объектива 1 в плоскости, лежащей за диафрагмой 2. В этой плоскости расположена термобатарея 3, являющаяся приемником лучистой энергии, а вместе с тем и преобразователем ее в термо-э.д.с. Лучи, выходящие из различных точек поверхности объектива и попадающие в линзу объектива, концентрируются на рабочей поверхности термобатарей, ограниченной отверстием диафрагмы 2. Термо-э.д.с. термобатарей, устанавливающаяся в результате воздействия на нее потока лучистой энергии и теплообмена с окружающими деталями, измеряется



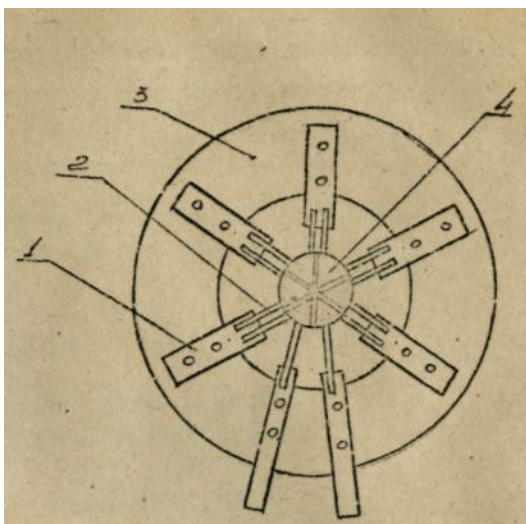


Рисунок 4.4 – Термобатарея преобразователя

#### 4.4. Методика измерения температуры радиационным пирометром

1. Включить в сеть автотрансформатор.
2. Увеличивая напряжение лампы накаливания (объект измерения), измерить ее температуру.
3. Рассчитать истинную температуру по формуле:

$$T = T_k \sqrt[4]{\frac{1}{C}}$$

где  $T$  – кажущаяся температура тела,  $K$ , измеренная радиационным пирометром;

$C$  – коэффициент излучения, равный  $4,9 \text{ ккал/м}^2$ .

4. Полученные данные занести в таблицу результатов измерения:

Номер измерения	Кажущаяся температура, измеренная радиационным пирометром, $K$	Истинная температура, $K$	Приведенная погрешность

#### **4.5. Отчет о работе**

Отчет о работе должен содержать: краткое описание методик измерения температуры оптическим и радиационным пирометром, схемы, устройства пирометров, таблицы результатов измерений.

#### **4.6. Контрольные вопросы**

1. Что такое кажущаяся температура тела?
2. Источники погрешности при измерении температуры пирометрами излучения.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5 ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА ЖИДКОСТИ ПНЕВМОМЕТРИЧЕСКИМИ ТРУБКАМИ

### 5.1. Цель работы

1. Ознакомиться с пневмометрическими трубками для измерения характеристик потока.
2. Изучить методику определения расхода жидкости пневмометрическими зондами.
3. Определить скоростной напор в различных точках поперечного сечения трубопровода.
4. Определить расход воздуха.
5. Построить эпюру скоростей по сечению трубопровода.

### 5.2. Пневмометрические трубки

Пневмометрические зонды применяются для исследования потоков в проточной части турбомашин, компрессоров, для измерения скорости и давления в трубопроводах, а также для измерения скоростей в пограничных слоях при экспериментальных исследованиях как в лабораториях, так и в производственных условиях.

Зонды бывают одноканальные – для измерения полных напоров  $P_n$  и статического давления  $P_{ст}$ ; и многоканальные (комбинированные) – для измерения  $P_n$  и  $P_{ст}$  (трубка Пито); для измерения полного напора  $P_n$ , статического давления  $P_{ст}$  и направления потока. Эти зонды могут иметь от трех до пяти каналов. Наиболее широко применяются зонды с приемной частью Г-образной и шаровой формы. В промышленных условиях, как и в лабораториях, для измерения расходов применяется трубка Пито с полусферической головкой наконечника (рис. 5.1). Она состоит из внутренней трубки 1 для измерения полного напора  $P_n$  и наружной трубки 2 – для измерения статического давления  $P_{ст}$ .

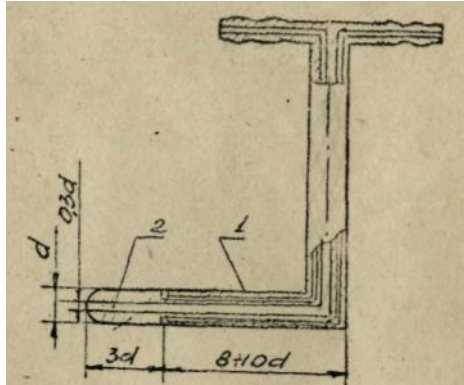


Рисунок 5.1 – Трубка Пито

Наружная трубка имеет прорези на определенном расстоянии от среза. Трубка Пито устанавливается вдоль оси потока.

Измерение расхода зондами основано на зависимости динамического давления  $P_{дин}$  от скорости потока измеряемой среды. При протекании жидкости по трубопроводу полное давление в ней складывается из суммы статистического  $P_{ст}$  и динамического давления  $P_{дин}$ , т.е.

$$P_n = P_{ст} + P_{дин}$$

По разности полного и статистического давления можно определить динамическое давление (скоростной напор).

Если при определении расхода жидкости в трубопроводе применялись отдельные трубки ( $P_n$  и  $P_{ст}$ ), то замеряются отдельно полный напор и статистическое давление, а

$$P_{дин} = P_n - P_{ст}$$

При применении трубки Пито оба канала присоединяются к одному дифференциальному манометру, показывающему величину динамического давления, кг/м<sup>2</sup>

$$P_{дин} = P_n - P_{ст} = \frac{\rho \cdot w^2}{2g}$$

Из этого уравнения определяется скорость потока в данном сечении трубы

$$W = \sqrt{\frac{2gP_{дин}}{\rho}}$$

где  $\rho$  - плотность измеряемой среды, кг/м<sup>3</sup> (для воздуха при

нормальных условиях  $\rho = 1.26 \text{ кг/м}^3$ ;

$g$  - ускорение силы тяжести,  $\text{м/сек}^2$ . Расход измеряемого потока определяется по зависимости:

$$Q = 3600 \cdot W_{cp} \cdot F \quad \text{м}^3/\text{ч}$$

где  $F$  - площадь поперечного сечения трубы,  $\text{м}^2$ ;

$W_{cp}$  - средняя скорость потока в трубе,  $\text{м/с}$ .

### 5.3. Описание установки и методика выполнения работы

Схема установки показана на рис. 5.2. В трубопровод 1 вентилятором 2 нагнетается воздух, Количество подаваемого воздуха можно регулировать заслонкой 3. Внутри трубопровода установлена пневмометрическая трубка 4. Перепад давления измеряется дифференциальным манометром 5.

1. Так как скорость потока по трубопроводу неравномерна, то для определения средней скорости потока необходимо произвести ряд замеров в разных точках поперечного сечения трубопровода. Поперечное сечение трубопровода условно делится на ряд равновеликих кольцевых площадок I, II, III (рис. 5.3). Каждая кольцевая площадка, в свою очередь, делится окружностью на две равные части. Точки 1,2,3,4, отмеченные на этих окружностях, и будут искомыми, обозначим их  $X$ . Координаты этих точек определим по формуле:

$$X = \frac{D}{2} \left( 1 + \sqrt{\frac{2n-1}{2N}} \right),$$

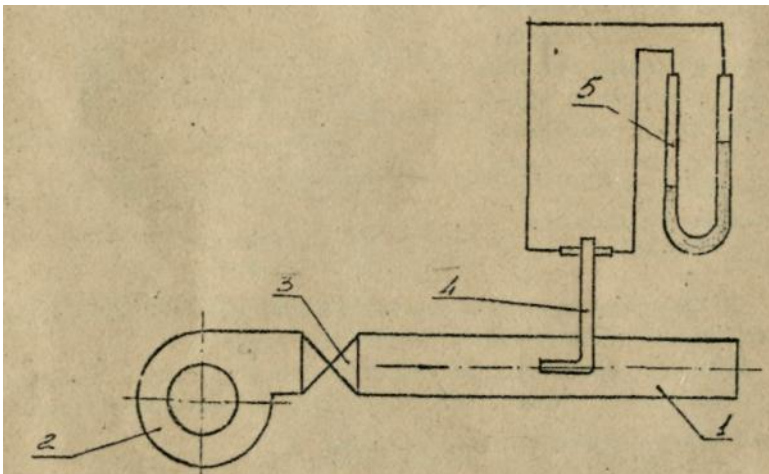


Рисунок 5.2 – Схема лабораторной установки

где  $D$  – диаметр трубопровода, мм;  
 $N$  – число кольцевых площадок;  
 $n$  – номера окружностей, делящих пополам кольцевые площадки (считая от центра трубопровода).

Эта операция выполняется путем вычерчивания в масштабе поперечного разреза трубопровода и нанесением всех необходимых построений.

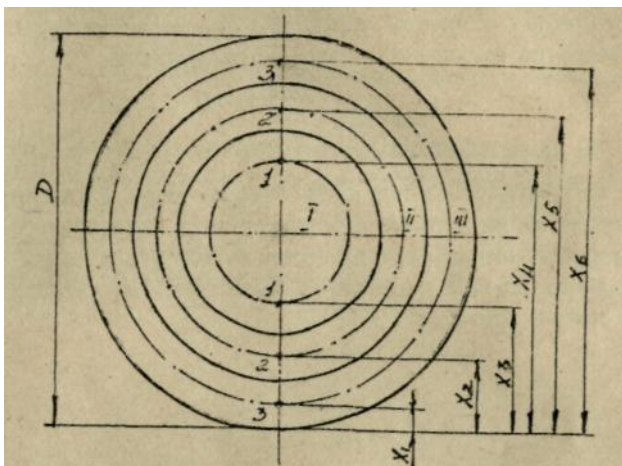


Рисунок 5.3 – Схема для определения стадии скорости потока

2. Составить таблицу результатов эксперимента по форме:

Номер кольцевой площадки	Координаты $X$ , мм	Динамическое давление $P_{дин}$ , кг/м <sup>2</sup>	Скорость потока $W$ , м/с	Расход $Q$ , м <sup>3</sup> /ч
1				
2				
3				

3. Включить установку в работу и произвести измерение  $P_{дин}$  в заданных точках  $X$  трубопровода.

4. Определить среднюю скорость потока.

Средняя скорость потока м/с определяется как среднеарифметическое из полученных скоростей по формуле:

$$W_{cp} = \frac{\sum W_{1-6}}{6}$$

5. По средней скорости потока вычислить расход воздуха.

6. Построить эпюру скоростей потока в трубопроводе. Для этого на миллиметровке вычерчивается в масштабе продольный разрез трубопровода, откладываются по вертикали точки замера  $X$  и наносятся векторы скоростей. Концы векторов соединяются плавной кривой (рис. 5.4).

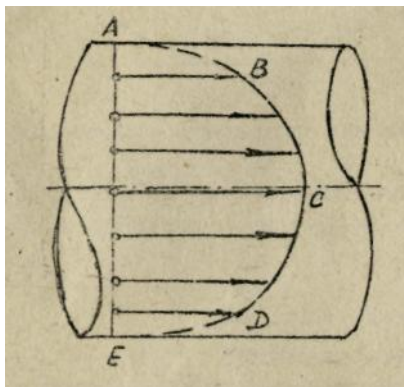


Рисунок 5. 4 – Эпюра скорости потока

#### 5.4. Отчет о работе

Отчет должен содержать: краткое описание методики эксперимента, схему установки, необходимые графические построения и таблицы измеренных и рассчитанных величин.

#### 5.5. Контрольные вопросы

1. Как устроена пневмометрическая трубка?
2. Как определяется расход потока при помощи пневмометрической трубки?

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Преображенский В. П. Технологические измерения и приборы / В. П. Преображенский – М. : Энергия, 1978. – 704 с.
2. Чистяков С.Ф. Теплотехнические измерения и приборы. / С. Ф. Чистяков, Д. В. Радун – М. : Высш. школа, 1972. – 392 с.
3. Правила 28-64 измерения расхода жидкостей, газов и паров стандартными диафрагмами и соплами, с приложением альбома графиков. – М. : Стандартгиз, 1964. – 110 с.
4. Казаков А. В. Основы автоматики и автоматизации химических производств / А. В. Казаков, М. Б. Кулаков, Ю. К. Мелюшев – М. : Машиностроение, 1970. – 278 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа 1 «Градуировка термопар»	3
Лабораторная работа 2 «Поверка пирометрического милливольтметра»	9
Лабораторная работа 3 «Градуировка термометра сопротивления»	14
Лабораторная работа 4 «Измерение температуры оптическими и радиационными пирометрами»	18
Лабораторная работа 5 «Измерение расхода жидкости пневмометрическими трубками»	25
Список литературы	30

Навчальне видання

Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу «Теплотехнічні вимірювання» для студентів спеціальності 7.090505 «Котли та реактори» усіх форм навчання та для студентів спеціальності 7.05020202 «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва» усіх форм навчання

Російською мовою

Укладачі: КАСІЛОВ Віктор Йосипович  
ІВАНОВА Лідія Анатоліївна  
ТЮТЮНИК Лариса Іванівна

Відповідальний за випуск О.В. Єфімов  
Роботу до друку рекомендував Е.Г. Братуга

В авторській редакції

Підписано до друку 04.09.2014 р.  
Формат 60x84/16. Папір офсетний. Друк цифровий.  
Гарнітура Georgia. Ум. друк. арк. 1,86.  
Наклад 50 прим. Зам. № 20952

Віддруковано в ТОВ «ДРУКАРНЯ МАДРИД»  
61024, м. Харків, вул. Ольмінського, 11  
Тел.: (057) 756-53-25  
www.madrid.in.ua e-mail: info@madrid.in.ua