

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Донецький національний університет економіки і  
торгівлі імені Михайла Туган-Барановського

Кафедра загальноінженерних дисциплін та обладнання

**О.В. Омельченко, Л.О. Цвіркун**

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДЛЯ ВИВЧЕННЯ  
ДИСЦИПЛІНИ**

**Теплотехнічні вимірювання та прилади**

Ступінь: бакалавр

Кривий Ріг  
2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Донецький національний університет економіки і  
торгівлі імені Михайла Туган-Барановського

Кафедра загальноінженерних дисциплін та обладнання

**О.В. Омельченко, Л.О. Цвіркун**

## **МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ**

**Теплотехнічні вимірювання та прилади**

Ступінь: бакалавр

Затверджено на засіданні  
кафедри загальноінженерних дисциплін  
та обладнання  
Протокол № 5  
від «12» листопада 2020 р.

Рекомендовано навчально-  
методичною радою ДонНУЕТ  
Протокол № 4  
від «17» грудня 2020 р.

Кривий Ріг  
2020

**Омельченко О.В. Л.О. Цвіркун**

**О 67** Теплотехнічні вимірювання та прилади [Текст] : метод. рук. до вивч. дисц. / Омельченко О.В., Л.О. Цвіркун; Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського, каф. загальноінженерних дисциплін та обладнання ; О.В.Омельченко – Кривий Ріг : [ДонНУЕТ], 2020. 64 с.

Методичні рекомендації розроблені для надання допомоги студентам спеціальності 142 «Енергетичне машинобудування» у процесі вивчення дисципліни Теплотехнічні вимірювання та прилади». Методичні рекомендації містять перелік питань для підготовки до підсумкового контролю та перелік основної та додаткової літератури.

© Омельченко О.В., Л.О. Цвіркун, 2020  
© Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського, 2020

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП.....</b>	<b>5</b>
<b>ЧАСТИНА 1. МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ З ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ «ТЕПЛОТЕХНІЧНІ ВИМІРЮВАННЯ ТА ПРИЛАДИ»...</b>	<b>6</b>
<b>ЧАСТИНА 2. МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ З ПІДГОТОВКИ ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ.....</b>	<b>11</b>
Змістовий модуль 1. Основи вимірювань та їх похибки .....	12
Змістовий модуль 2. Методи і засоби вимірювання.....	30
<b>ЧАСТИНА 3. МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ З ОРГАНІЗАЦІЇ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТІВ.....</b>	<b>50</b>
Змістовий модуль 1. Основи вимірювань та їх похибки .....	51
Змістовий модуль 2. Методи і засоби вимірювання.....	55

## ВСТУП

Основною метою вивчення дисципліни є формування у студентів теоретичних знань та практичних навичок щодо використання експериментальних методів вимірювання теплотехнічних величин, самостійного аналізу у виборі оптимальних вимірювальних приладів, для конкретних технічних завдань при експлуатації енергетичного обладнання.

Головним завданням навчальної дисципліни є ознайомлення із засобами вимірювання основних термодинамічних і теплофізичних параметрів речовин та параметрів теплообміну; методикою теплотехнічних вимірювань, принципами дії, будовою, призначення та правилами вибору різних технічних засобів контролю та вимірювання.

Предмет: вивчення основних положень щодо теплотехнічних вимірювань та приладів.

**ЧАСТИНА 1.**  
**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ З ВИВЧЕННЯ**  
**ДИСЦИПЛІНИ**

## 1. Опис дисципліни

Найменування показників	Характеристика дисципліни
Обов'язкова (для студентів спеціальності "назва спеціальності") / вибіркова дисципліна	<b>Обов'язкова для студентів спеціальності 142 «Енергетичне машинобудування»</b>
Семестр (осінній / весняний)	<b>осінній</b>
Кількість кредитів	<b>5</b>
Загальна кількість годин	<b>150</b>
Кількість модулів	<b>1</b>
Лекції, годин	<b>42</b>
Практичні / семінарські, годин	<b>20</b>
Лабораторні, годин	<b>8</b>
Самостійна робота, годин	<b>80</b>
Тижневих годин для денної форми навчання:	
аудиторних	<b>5</b>
самостійної роботи студента	<b>6</b>
Вид контролю	<b>залік</b>

## 2. Програма дисципліни

**Ціль** – формування у студентів теоретичних знань та практичних навичок щодо використання експериментальних методів вимірювання теплотехнічних величин, самостійного аналізу у виборі оптимальних вимірювальних приладів, для конкретних технічних завдань при експлуатації енергетичного обладнання.

**Завдання:** ознайомити студентів із засобами вимірювання основних термодинамічних і теплофізичних параметрів речовин та параметрів теплообміну; методикою теплотехнічних вимірювань, принципами дії, будовою, призначення та правилами вибору різних технічних засобів контролю та вимірювання.

**Предмет:** вивчення основних положень щодо теплотехнічних вимірювань та приладів.

### **Зміст дисципліни розкривається в темах:**

1. Загальні відомості про вимірювання.
2. Основні відомості про засоби вимірювань.
3. Результати теплотехнічних вимірювань та їх похибки.
4. Системи передачі вимірювальної інформації.
5. Вимірювання температури.
6. Вимірювання тиску та різниці тисків.
7. Вимірювання витрати газів та рідини.
8. Вимірювання вологості тіл і середовищ.
9. Аналіз складу газів.
10. Аналіз складу рідин.
11. Вимірювання густини.
12. Вимірювання в'язкості.

### 13. Вимірювання коефіцієнта теплопровідності.

## 3. Структура дисципліни

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин (денна форма навчання)				
	усього	у тому числі			
		лекц.	пр./сем.	лаб.	СРС
1	2	3	4	5	6
<b>Змістовий модуль 1. Основи вимірювань та їх похибки</b>					
Тема 1. Загальні відомості про вимірювання.	12	2	-	-	10
Тема 2. Основні відомості про засоби вимірювань.	18	4	2	2	10
Тема 3. Результати теплотехнічних вимірювань та їх похибки.	22	4	4	4	10
Тема 4. Системи передачі вимірювальної інформації.	14	4	-		10
<b>Разом за змістовим модулем 1</b>	<b>66</b>	<b>14</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>40</b>
<b>Змістовий модуль 2. Вимірювання теплотехнічних величин</b>					
Тема 5. Вимірювання температури.	13	4	4	-	5
Тема 6. Вимірювання тиску та різниці тисків.	11	2	2	2	5
Тема 7. Вимірювання витрати газів та рідини.	12	4	4	-	4
Тема 8. Вимірювання вологості тіл і середовищ.	10	2	4	-	4
Тема 9. Аналіз складу газів.	6	2	-	-	4
Тема 10. Аналіз складу рідин.	9	4	-	-	5
Тема 11. Вимірювання густини.	8	4	-	-	4
Тема 12. Вимірювання в'язкості.	7	2	-		5
Тема 13. Вимірювання коефіцієнта теплопровідності.	8	4	-	-	4
<b>Разом за змістовим модулем 2</b>	<b>84</b>	<b>28</b>	<b>14</b>	<b>2</b>	<b>40</b>
<b>Усього годин</b>	<b>150</b>	<b>42</b>	<b>20</b>	<b>8</b>	<b>80</b>

## 4. Теми семінарських/практичних/лабораторних занять

№ з/п	Тема практичного заняття	Кількість годин
<b>Змістовий модуль 1</b>		
1	Практичне заняття 1. Контактні способи вимірювання температури.	2
2	Практичне заняття 2. Безконтактні способи вимірювання температури.	2
3	Практичне заняття 2. Безконтактні способи вимірювання температури.	2
4	Практичне заняття 3. Озайомлення з залежністю питомої теплоємності від температури калориметром із адіабатною оболонкою.	2
5	Практичне заняття 3. Озайомлення з залежністю питомої теплоємності від температури калориметром із адіабатною оболонкою.	2



6	Практичне заняття 4. Ознайомлення з процесами нагріву – охолодження та визначення параметрів теплообміну у стаціонарному режимі.	2
7	Практичне заняття 4. Ознайомлення з процесами нагріву – охолодження та визначення параметрів теплообміну у стаціонарному режимі.	2
8	Практичне заняття 5. Ознайомлення з засобами вимірювання тиску.	2
9	Практичне заняття 6. Ознайомлення з засобами вимірювання рідини.	2
10	Практичне заняття 6. Ознайомлення з засобами вимірювання рідини.	2
<b>Всього</b>		<b>20</b>
1	Лабораторне заняття 1. Дослідження контактних методів теплотехнічних вимірювань.	2
2	Лабораторне заняття 2. Дослідження безконтактних методів теплотехнічних вимірювань.	2
3	Лабораторне заняття 2. Дослідження безконтактних методів теплотехнічних вимірювань.	2
4	Лабораторне заняття 3. Дослідження методів вимірювання тиску.	2
<b>Всього</b>		<b>8</b>

### 5. Розподіл балів, які отримують студенти

Відповідно до системи оцінювання знань студентів ДонНУЕТ, рівень сформованості компетентностей студента оцінюються у випадку проведення заліку: впродовж семестру (100 балів).

### Оцінювання студентів протягом семестру (очна форма навчання)

№ теми практичного/лабораторного заняття	Аудиторна робота					Позааудиторна робота	Сума балів
	Тестові завдання	Ситуаційні завдання, задачі	Обговорення теоретичних питань теми практичного заняття	Захист лабораторних робіт	ПМК	Завдання для самостійного виконання	
<b>Змістовий модуль 1</b>							
Пр.р. 1		4	4	-		4	12
Лаб.р.1		-	-	4		-	4
П.р. 2			4			4	8
П.р. 2		4	-	-		4	8
Лаб.р. 2		-	4	-		-	4
Лаб.р. 2		-	-	6	8	-	14
<b>Разом змістовий</b>		<b>8</b>	<b>12</b>	<b>10</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>50</b>

<b>модуль 1</b>							
<b>Змістовий модуль 2</b>							
П.р. 3		-	2	-		4	6
П.р. 3		4	-			-	4
П.р. 4		-	4	-		4	8
П.р. 4		4				-	4
П.р. 5		4	2			-	6
Лаб.р. 3		-	-	4		-	4
П.р. 6		-	4	-		4	8
П.р. 6		4	-		6	-	10
<b>Разом змістовий модуль 2</b>		<b>16</b>	<b>12</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>12</b>	<b>50</b>
<b>Усього</b>		<b>11</b>	<b>10</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>100</b>

**Оцінювання студентів протягом семестру  
(заочна форма навчання)**

Поточне тестування та самостійна робота			Сума в балах
Змістовий модуль 1	Змістовий модуль 2	Індивідуальне завдання	
35	35	30	100

**Загальне оцінювання результатів вивчення навчальної дисципліни**

<b>Оцінка</b>		
<b>100-бальна шкала</b>	<b>Шкала ECTS</b>	<b>Національна шкала</b>
90-100	A	5, «відмінно»
80-89	B	4, «добре»
75-79	C	
70-74	D	
60-69	E	3, «задовільно»
35-59	FX	2, «незадовільно»
0-34	F	

**ЧАСТИНА 2.  
МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ З ПІДГОТОВКИ  
ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ**

# ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 1. ОСНОВИ ВИМІРЮВАНЬ ТА ЇХ ПОХИБКИ

## Тема 1. Контактні способи вимірювання температури

1. Обговорення основних положень теми та питань самостійного вивчення:

1. Шкали температур, їх взаємозв'язок та одиниці вимірювання температур?

2. Основні способи вимірювання температури, їхні переваги та недоліки?

3. Від чого залежить величина термо-ЕРС термопари, яка підключена безпосередньо до вимірювального приладу?

4. Які схеми підключення термопар існують?

5. Визначення похибки термопари?

6. Визначення похибки рідинного термометра?

7. Систематичні і випадкові похибки вимірювання температури та їх величини?

2. Індивідуальне тестування.

3. Виконання практичної та лабораторних робіт.

3.1. Практичні завдання.

### Приклад розв'язування завдання.

**Приклад.** Температура в термостаті вимірювалася технічним термометром зі шкалою 0-300°C, що має межі допустимої основної похибки +3°C. Показання термометра склали 146°C. Одночасно з технічним термометром в термостат був занурений лабораторний термометр. Показання лабораторного термометра склали 152°C. Визначити, чи виходить за межі допустимої основної похибки дійсне значення похибки показань технічного термометра

### Рішення

Для технічного термометра можна визначити тільки інтервал, в якому знаходиться дійсне значення температури -146+3°C, тобто 143 ... 149°C. Для лабораторного термометра відомі значення поправок, тому за його показниками може бути визначена дійсна температура.

$$t_g = 152 - 1 + 0,5 = 151,5^\circ\text{C}$$

Звідси видно, що дійсна похибка технічного термометра виходить за допустимі межі.

Числові значення вихідних даних для розрахунку наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1.

Найменування даних, одиниця виміру	Вар. № 1, 12	Вар. № 2, 7	Вар. №3, 8	Вар. №4, 9	Вар. №5, 10	Вар. №6, 11
Межі допустимої основної похибки технічного термометра, °С	+2	+4	+5	+7	+6	+1
Показання термометра, °С	123	135	138	128	140	132
Показання лабораторного термометра, °С	130	141	140	140	151	134

Температура є одним з найголовніших параметрів технологічних процесів. Температура – величина, яка характеризує тепловий стан тіла, тобто є мірою нагрітості тіла. Згідно кінетичної теорії температуру можна визначити як міру кінетичної енергії потупального руху молекул. Тому температура не піддається безпосередньому вимірюванню, а про тепловий стан тіла (про значення температури) можна судити за зміною його фізичних властивостей.

Температуру вимірюють або за термодинамічною температурною шкалою, або за міжнародною практичною температурною шкалою. Температури за кожною з них можуть бути визначені в залежності від початку відліку в Кельвінах (К) або в градусах Цельсія (°С). В якості єдиної постійної точки термодинамічної температурної шкали (реперної точки), яку можна відтворити дослідним шляхом, взято потрійну точку води з значенням температури 273,16 К або 0,01 °С [8].

Температуру вимірюють за допомогою пристроїв, які використовують різні термодинамічні властивості рідин, газів і твердих тіл.

Термометром називають пристрій (прилад), що служить для вимірювання температури шляхом перетворення її в покази або сигнал, що є відомою функцією температури. Чутливий елемент термометра (теплоприймач) - це та частина термометра, в якій тепла енергія перетворюється в інший вид енергії для отримання інформації про температуру.

Розрізняють рідинні скляні термометри, манометричні термометри, електричні термометри опору, напівпровідникові термометри опору (термістори і терморезистори), термоелектричні термометри (термопари), оптичні пірометри, радіаційні пірометри, фотоелектричні пірометри, колірні пірометри. Практичні межі їх використання наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.2 – Практичні межі застосування термометрів

Термометрична властивість	Найменування пристрою	Межі вимірювання, °С	
		нижня	верхня
Вимірювання об'єму	Рідинні скляні термометри	-190	600

Вимірювання тиску	Манометричні термометри	-160	600
Вимірювання електричного опору	Електричні термометри опору	-200	500
	Напівпровідникові термометри опору (термістори і термо-резистори)	-90	180
Термоелектричні ефекти (термо-ЕДС)	Термоелектричні термометри (термопари) стандартизовані	-50	1600
	Термоелектричні термометри (термопари) спеціальні	1300	2500
Теплове випромінювання	Оптичні пірометри	700	6000
	Радіаційні пірометри	20	3000
	Фотоелектричні пірометри	600	4000
	Колірні пірометри	1400	2800

### 3.2. Лабораторна робота 1 «Дослідження контактних методів теплотехнічних вимірювань».

**Мета роботи:** Вивчення основних методів і приладів для вимірювання температури.

#### Теоретичні відомості

Температура є одним з основних термодинамічних параметрів стану, що входять у загальне рівняння стану системи  $f(p, v, T) = 0$ . Температура, яка визначена в абсолютній шкалі температур (шкалі Кельвіна), тобто в кельвінах (К), однозначно пов'язана із середньою тепловою енергією руху молекул  $E_k$  системи і з її внутрішньою енергією  $U$  та з кількістю ступеней свободи  $i$  молекул речовини. Для моля ідеального газу маємо

$$E_k = U = N_A \frac{i}{2} m v^2 = \frac{i}{2} N_A k_B T = \frac{i}{2} R T$$

У шкалі Кельвіна відлік температури починається з абсолютного нуля температури (0 К). Кельвін є одним з основних одиниць системи СІ. Водночас із цією шкалою в практиці широко розповсюджені й інші температурні шкали, особливо шкала Цельсія, у якій температура вимірюється в градусах Цельсія ( $^{\circ}\text{C}$ ). Масштаб одиниці шкали Кельвіна та Цельсія однаковий, тобто:  $1^{\circ}\text{C} = 1\text{ K}$  [1].

Шкала Цельсія має дві реперні точки:  $0^{\circ}\text{C}$  та  $100^{\circ}\text{C}$ , відповідні до температур замерзання та кипіння води за нормального тиску. Співвідношення між температурою у  $^{\circ}\text{C}$  і у К встановлюється виходячи з того, що  $1^{\circ}\text{C} = 1\text{ K}$  але початки цих шкал різні. Реперна температура потрійної точки води дорівнює  $T_n = 273,160\text{K} = 0,010^{\circ}\text{C}$  (точно), тоді:  $T = 273,15 + t$ . У практичних розрахунках звичайно вважають що  $T = t + 273$ . Різниця температур (зростання температури, температурний напір - у теплопередачі), що знайдена за шкалою Кельвіна ( $\Delta T = T_2 - T_1$ ) або за шкалою Цельсія ( $\Delta t = t_2 - t_1$ ) становить однакову величину,  $\Delta t = \Delta T$ . Поряд зі шкалою Цельсія у зарубіжній літературі зустрічаються також шкали Фаренгейта ( $t [^{\circ}\text{F}] = 32 + 9/5 \cdot t [^{\circ}\text{C}]$ ),  $t$  (людини) =  $10^{\circ}\text{F}$ ,  $\Delta t = 100^{\circ}\text{C} = 180^{\circ}\text{F}$ ), Реомюра та ін.

Для уніфікації результатів вимірів температури різними засобами та методами існують міжнародні температурні шкали (МТШ-27, МПТШ-68, МТШ-90, де цифри вказують на рік їх прийняття), зараз діє міжнародна шкала МТШ-90. У інтервалі температур  $-260\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +600\text{ }^{\circ}\text{C}$  шкали МПТШ-68 та МТШ-90 майже співпадають.

### **Експериментальна частина**

Способи вимірювання температури і прилади для їхньої реалізації - термометри надто різноманітні. В їхній основі лежать відомі з фізики закони зміни з температурою різноманітних фізичних характеристик речовини (термометричного тіла): розмірів, об'єму, термо-ЕРС, електричного опору, інтенсивності теплового випромінювання та інші.

Розрізняють дві групи методів вимірювань: контактні та безконтактні. У безконтактних методах вимірювання проводять за допомогою теплового випромінювання, коли датчики температури знаходяться на відстані від тіла.

За принципом дії засоби вимірювання температури розрізняють залежно від використовуваних ними фізичних властивостей речовин на такі групи з діапазоном вимірювань. Термометри розширення (рідинні або газові) ( $-200 \dots +600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) засновані на властивості тіл змінювати під дією температури свій об'єм [3].

Манометричні термометри ( $-200 \dots +1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) відносяться до термометрів групи розширення і працюють за принципом зміни тиску рідини, газу або пари з рідиною в замкнутому об'ємі під час нагрівання або охолодження цих речовин.

Термометри опору (металеві або напівпровідникові) ( $-260 \dots +1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) засновані на властивості провідників змінювати залежно від нагрівання їхній електричний опір [3].

Термоелектричні термометри (термопари) ( $-200 \dots +2200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) побудовані на властивості різнорідних металів і сплавів утворювати в парі (спаї) термоелектрорушійну силу, що залежить від температури спаю.

Пірометри (безконтактні) ( $-50 \dots +6000\text{ }^{\circ}\text{C}$  й більше) працюють за принципом вимірювання нагрітими тілами енергії випромінювання, що залежить від температури цих тіл [3].

Існують також кварцові термометри, у яких змінюється частота коливань із температурою, та інші вимірники температури. Зараз все більшого розповсюдження набувають різні цифрові електронні термометри, що часто працюють разом із комп'ютерами та системами автоматики.

Прилад як засіб вимірювання температури включає у себе як датчик, так і перетворювач вимірюваного параметра в електричний або інший сигнал [1].

Під час контактного вимірювання температури використовують класичні рідинні термометри, термопари, металеві або напівпровідникові терморезистори (термометри опору), цифрові датчики температури рис. 1.1.

Рисунок 1.1 – Види термометрів: а - рідинний термометр; б - термопара; в – термометр опору; г - цифровий датчик температури DS18B20

Усі відомі способи вимірювання температури засновані на визначенні будь-якого параметра, що змінюється з температурою стабільно, безупинно, однозначно, чим і забезпечується задана точність вимірювань.

*Рідинний термометр.* Принцип дії ряду термометрів, у тому числі рідинного, полягає у тепловому розширенні тіл під час їх нагрівання. Об'єм тіла  $V$  під час підвищення його температури від  $T_0$  до  $T$  зростає приблизно за лінійним законом:

$$V = V_0 [1 + \beta(T - T_0)],$$

де  $\beta$  - коефіцієнт об'ємного теплового розширення [1/К], який найбільший у газах та найменший у твердих тілах.

Якщо рідину (або газ) помістити в трубку з малим поперечним перерізом, то ефект теплового розширення виявлятиметься в збільшенні довжини стовпчика рідини в трубці. Причому це подовження пропорційне збільшенню температури у газах та приблизно пропорційне - у рідинах. Після відповідного градування за виміряним збільшенням стовпчика рідини можна судити про її температуру. Для забезпечення достатньої чутливості засобу рідина повинна розширюватися у дуже тонкій трубці- капілярі, іноді навіть збільшують об'єм всієї рідини  $V_0$  - тоді ціна поділки може сягати 0,1...0,01 °С.

Рідинний термометр - скляний балончик замість більшої частини капіляру, що заповнений термометричною рідиною, до якого приєднано малий капіляр, у якому рідина розширюється. Шкала, градуйована у відповідних одиницях (К або °С), звичайно задається на пластинці, що прикріплена до капіляру [3].

Вибір термометричної рідини визначається заданим температурним інтервалом роботи приладу. Найчастіше використовуються ртутні (інтервал від -38 °С до +500 °С) або спиртові (-80...+100 °С) термометри.

Градування термометра здійснюється за реперними точками або шляхом порівняння зі зразковим термометром; у свою чергу, рідинний термометр може використовуватися для градування термометрів інших типів. Для збільшення інтервалу вимірювання температури над рідиною утворюють додатковий тиск нейтрального газу [3].



Перевагами газових термометрів є лінійність, висока точність вимірювання ( $\pm 0,001$  К.) Недоліками є їхня інерційність та великі габарити.

Перевагами твердотільних термометрів є простота конструкції, надійність у експлуатації і легкість відліку показань. Недоліками є недостатня точність, гістерезис відліку, інерційність і великі габарити.

Перевагами рідинних термометрів є простота конструкції, надійність в експлуатації і легкість відліку показань. Недоліками є їхня інерційність і порівняно великі габарити (для забезпечення широкого діапазону вимірювань), а також необхідність вживання запобіжних заходів через крихкість скла (для ртутних термометрів потрібно зважати на можливість забруднення приміщення ртуттю у випадку їхнього руйнування) [1].

Крім того, рідинні термометри використовуються здебільшого для вимірювання температур рідин і газів, оскільки важко забезпечити щільний тепловий контакт балона термометра з твердою поверхнею.

Для точності вимірювань рідинним термометром, як і іншими термометрами, треба враховувати його інерційність та дотримуватися необхідного часу вимірів для його рівномірного прогріву до температури досліджуваного тіла із заданою точністю. Також вводять різні поправки - на глибину занурення термометра, дані попередніх повірок та ін.

*Термопара.* Від зазначених вище недоліків значною мірою запобігають вільні термопари, принцип дії яких полягає в явищі термоелектрики (ефект Зеєбека). Унаслідок малої маси термопари є найменш інерційними з усіх інших датчиків температури і їх покази встановлюються за найменший час вимірювання. Крім того, під час досліджень можна встановити багато термопар для точного вимірювання поля температур у системі без їх впливу на рух теплоносія біля тіла.

Складемо замкнене коло з двох різнорідних провідників А і В (які утворюють термоелектричну пару - *термопару*), зварених або запаяних у двох точках 1 і 2, що найчастіше зветься «гарячим» (робочим) і «холодним» (вільним) спаєм. У спаю 1 (або 2) між провідниками з'являється контактна різниця потенціалів  $\Delta\varphi$  (або  $\Delta\varphi_0$ ), що залежить від природи матеріалів провідників та температури  $T_i$  спаю (рис. 1.2а).

Для провідників термопари використовують метали, сплави або напівпровідникові матеріали. Якщо температури обох спаїв однакові  $T = T_0$ , то завжди для них  $\Delta\varphi = \Delta\varphi_0$  і вони один одного компенсують. Якщо ж, наприклад, температури  $T \neq T_0$  то й різниці потенціалів  $\Delta\varphi \neq \Delta\varphi_0$ , а різниця електричних потенціалів двох спаїв  $\Delta\varphi - \Delta\varphi_0 = E$  характеризує появу у колі термопари термоелектрорушійну силу - *термо-ЕРС*.

Рисунок 1.2 – Схеми електричного з'єднання мілівольтметра mV із термопарою: а - розривається один із провідників (В), б - розривається спай 2

У замкнутому колі внаслідок дії цієї ЕРС  $E$  виникає термоелектричний струм. Якщо ж коло будь-де розірвати і підключити вимірювач напруги (звичайно мілівольтметр), то можна безпосередньо виміряти величину  $E$ . Згідно з електронною теорією металів і напівпровідників, величина термо-ЕРС характеризується певною (для даної термоелектричної пари) залежністю від температур «гарячого» і «холодного» спайів. Ця залежність  $E$  від  $(T - T_0)$  визначається під час градуювання термопар і подається у вигляді графіка або таблиці. Часто означена залежність на невеликому інтервалі температур  $\Delta T$  близька до лінійної та тоді її можна визначити формулою:

$$E = \gamma(T - T_0),$$

де  $\gamma = dE/dT = \gamma(T)$  - чутливість даної термопар.

Для отримання стандартних градуювань термопар (при  $T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) або під час вимірювань температури застосовують схеми - рис. 1.2а або рис. 1.2б. У випадку (рис. 1.2а) для приєднання вимірювального приладу розривається один з провідників (В), а на рис.1.2б розривається спай 2. Додаткових термо-ЕРС у спаях 2 і 2' не виникає, оскільки вони знаходяться за однакових температур. Висока стабільність температури «холодного» спаю одержується за допомогою нуль-термостата ( $0 \text{ }^\circ\text{C}$  - температурою плавлення льоду), що забезпечує високу точність виміру температури.

Якщо в схему вимірювання потрібно додати додаткові провідники та, відповідно, їх спаї, також слід ретельно слідкувати, щоб вони були з чистої міді та спаї знаходилися за однакових температур. Інакше унаслідок «паразитних» термо-ЕРС під час вимірювань можуть виникати значні похибки у визначенні температури.

*Порядок визначення температури за даними термопар.* Величина термо-ЕРС залежить не тільки від типу і якості термопар, але і від умов вимірювання: від температури термостату  $T_0$ , електричних опорів приладу  $R$  та провідників термопар  $r$ . Під час вимірювань, однак, часто буває відсутнім термостат з  $T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ , і другий спай підключають безпосередньо до вимірювального приладу, що знаходиться за кімнатної температури  $t_K(t_0 = t_K$

- рис. 1.1). Тоді для визначення температури за стандартним градуюванням необхідно врахувати зміщення градуювання термо-ЕРС термопари внаслідок знаходження приладу за кімнатної температури [3]

$$E\Big|_0^t = E\Big|_0^{t_k} + E\Big|_{t_k}^t \quad \text{або} \quad E_c = E_o + E_{\kappa},$$

де  $E\Big|_{t_k}^t = E_o$  - виміряна приладом термо-ЕРС,  $E\Big|_0^{t_k} = E_{\kappa}$  - термо-ЕРС, що відповідає температурі «холодного» спаю (з таблиці градуювання термопари за кімнатної температури  $t_k$ ),  $E\Big|_0^t = E_c$  - сумарна термо-ЕРС, за значенням якої з таблиці градуювання визначається температура робочого спаю  $t$ .

Для точності визначення термо-ЕРС  $E_o$  необхідно також врахувати електричні параметри кола вимірювання. Унаслідок наявності опорів термопари  $r$ , приладу  $R$  та струму  $I$  в електричному колі термопари, на клеммах приладу маємо напругу

$$E = IR = E_o - I r = E_o (1 - r/(R+r)).$$

Звідки

$$E_o = E / (1 - r/(R+r)) = E (1 + r/R) \quad (1.4)$$

Щоб знехтувати другим членом у формулі (1.4) за точності 0,1% необхідно щоб  $R/r > 1000$  (звичайно  $r = 0,1 \dots 20$  Ом).

Тому найкращими вимірювачами термо-ЕРС є цифрові прилади (з опором приладу  $R > 1$  МОм) та потенціометри, у яких здійснюється повна компенсація ЕРС, тобто  $I \rightarrow 0$ , а  $R \rightarrow \infty$  та  $E_o = E$ .

*Термометр опору.* Принцип дії термометра опору ґрунтується на залежності питомого електричного опору  $\rho$  металів і напівпровідників від їхньої температури: для металів  $\rho$  зростає з підвищенням температури, для напівпровідників - зменшується. Для провідників - чистих металів [платини (ТСП), міді (ТСМ) та інших] залежність  $\rho(T)$  є практично лінійною у широкому інтервалі температур [2]:

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha (T - T_0)]$$

де  $\alpha$  - температурний коефіцієнт опору металу,  $\rho_0$  - питоме значення опору при температурі  $T_0$ , звичайно  $0$  °С (звернути увагу на формальну схожість формул (1.1) і (1.5)). Величина  $\alpha$  вважається відомою і складає для чистої платини  $0,0039$  1/К, для чистої міді  $0,0043$  1/К, є допуски для цих значень. Опір провідника  $R$  термоопору довжиною  $l$  з поперечним перерізом  $S$ , що використовується для вимірювання температури, зважаючи на відоме співвідношення  $R = \rho l/S$ , змінюється з температурою також пропорційно  $\rho$ , відповідно до формули (1.5). У напівпровідниках температурна залежність більш складна, нелінійна та температурний коефіцієнт опору від'ємний.

Для вимірювання опору  $R$  існують різноманітні прилади, найбільш точними з яких є вимірювальні мости різноманітних типів.

## Тема 2. Безконтактні способи вимірювання температури.

1. Обговорення основних положень теми та питань самостійного вивчення:

1. Основні характеристики теплового випромінювання?

2. Чи є скло прозорим для ІЧ-випромінювання? Чи можна визначити температуру за закритим вікном?
3. Поняття про яскравісну, радіаційну та колірну температури?
4. Чому виміряна температура залежить від способу вимірювання?
5. Чому виміряна температура залежить від ступеня чорноти тіла, яка розраховує ступінь чорноти тіла приладу?
6. Чому виміряна температура скла залежить від покриття?
7. Чи можна виявити людину в темній кімнаті за допомогою пірометра?

3. Виконання практичної та лабораторних робіт.

3.1. Практичні завдання.

### Приклад розв'язування завдання.

Лабораторний скляний термометр, заповнений ртуттю показує за шкалою 120°C. Термометр занурений в вимірювану середу до позначки 50°C. Температура виступаючого стовпчика становить 20°C. Коефіцієнт видимого об'ємного теплового розширення ртуті в склі  $\alpha_v = 0,00018\text{K}$ . Визначте дійсне значення температури.

#### Рішення

Показання термометра відрізняються від дійсної температури за допомогою виступаючого стовпчика. Поправка на виступаючий стовпчик підраховується за формулою

$$\Delta t = \alpha_v (t - t_{v.c.}) n,$$

де  $\alpha_v$  - коефіцієнт видимого об'ємного теплового розширення ртуті в склі;

$t$  – температура, яке показується термометром, °C;

$t_{v.c.}$  – температура виступаючого стовпчика, °C;

$n$  – число градусів у виступаючому стовпчику.

Отже

$$\Delta t = 120 + 1,26 = 121,26 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Вихідні дані для розрахунку наведені в таблиці 2.1

Таблиця 2.1

Найменування даних, одиниця виміру	Вар. № 1, 12	Вар. № 2, 7	Вар. № 3, 8	Вар. № 4, 9	Вар. № 5, 10	Вар. № 6, 11
Показання лабораторного скляного термометра, °C	130	115	120	120	140	100
Занурення до позначки, °C	55	60	45	60	70	60
Температура виступаючого стовпчика, °C	25	15	30	30	50	15

Вимірювання температури за допомогою безконтактних засобів покликане необхідністю вимірювання великих та надвеликих температур, які властиві ряду виробництв у різних галузях промисловості. Прилади для

безконтактного вимірювання температури також застосовуються у котельних установках та інших енергогенеруючих об'єктах. Значне використання ці прилади отримали після створення та впровадження у виробництво комплексних систем автоматизованого управління об'єктами та технологічними процесами [3].

Теоретичною основою для створення безконтактних засобів вимірювання температури стало відкриття М.Планком, В.Віном, Л.Больцманом та іншими видатними вченими основних законів теплового радіаційного випромінювання, введення ними таких понять як «спектр» та «абсолютно чорне тіло» тощо, які лягли в основу принципу дії сучасних приладів із безконтактного вимірювання температури - пірометрів різних типів.

Розглянуті в лабораторній роботі *ТВП-1* термометри для вимірювання температури (термометри розширення, термоелектричні і опору) передбачають безпосередній контакт між чутливим елементом термометра і вимірюваним середовищем. Верхня межа вимірювання таких методів, які називають контактними, обмежується температурою 1500...2000 °С.

В промисловості і при дослідженнях часто виникає необхідність вимірювання більш високих температур. Крім того, часто недопустимий безпосередній контакт термометра з вимірюваним тілом або середовищем. У цих випадках застосовуються безконтактні засоби визначення температури, які вимірюють температуру тіла за його тепловим випромінюванням. Такі засоби вимірювання називаються пірометрами (від грецького руг - вогонь). Пірометри, які серійно випускаються, дозволяють контролювати температуру від 0 °С до 6000 °С Однією з головних переваг даних пристроїв є відсутність впливу вимірника на температурні поля нагрітого тіла, оскільки в процесі вимірювання вони не вступають у безпосередній контакт один з одним.

### *3.2. Лабораторна робота 2 «Дослідження безконтактних методів теплотехнічних вимірювань».*

**Мета роботи:** Вивчення безконтактних методів і приладів теплотехнічних вимірювань.

#### **Теоретичні відомості**

Безконтактні методи вимірювання температури теоретично не мають верхньої межі вимірювання, і можливості їх використання визначаються відповідністю спектра випромінювання вимірюваних тіл або середовищ і спектральних характеристик пірометрів. Якщо для яких-небудь умов можуть бути використані і контактні, і безконтактні методи вимірювання температури, то перевагу необхідно віддавати контактним, оскільки вони дозволяють забезпечити більш високу точність вимірювання [3].

Усі тіла випромінюють електромагнітні хвилі різної довжини  $\lambda$  в інтервалі від  $\lambda=0$  до  $\lambda=\infty$ . Більшість твердих і рідких тіл мають безперервний спектр випромінювання, тобто випромінюють хвилі усіх довжин. Інші тіла (чисті метали і гази) володіють селективним спектром випромінювання,

тобто випромінюють хвилі тільки на певних ділянках спектра. Ділянка, починаючи від хвиль завдовжки  $\lambda=0,38$  мкм до  $\lambda=0,76$  мкм, відповідає видимому спектру. Хвилі з довжиною  $\lambda>0,76$  мкм відносяться до невидимого інфрачервоного (ІЧ/ИК) випромінювання.

Сумарне випромінювання тіла всіма довжинами хвиль і за всіма напрямками півсферичного простору називають інтегральним (повним) променистим потоком  $Q$ , а випромінювання, віднесене до одиниці поверхні тіла  $F$ ,  $E$  - густиною інтегрального півсферичного випромінювання, або випромінювальною здатністю тіла, Вт/м<sup>2</sup> [2]:

$$E = dQ / dF .$$

Очевидно, що інтегральний променистий потік, Вт:

$$Q = \int_F E dF$$

Випромінювання, що відноситься до вузького інтервалу зміни довжини хвилі від  $\lambda$  до  $\lambda + d\lambda$ , називають потоком монохроматичного випромінювання  $Q_\lambda$ . Відповідно густина монохроматичного півсферичного випромінювання при сталій довжині хвилі, Вт/м<sup>3</sup>:

$$E_\lambda = dQ_\lambda / dF.$$

Якщо віднести густину монохроматичного випромінювання  $E_\lambda$  до величини інтервалу довжин хвиль, то отримують монохроматичну, або спектральну інтенсивність випромінювання:

$$I_\lambda = dE_\lambda / d\lambda.$$

Одним із основних законів випромінювання є закон Планка, який встановлює залежність спектральної інтенсивності випромінювання абсолютно чорного тіла (АЧТ) від температури:

$$I_\lambda = C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot [e^{C_2/(\lambda T)} - 1]^{-1},$$

де  $\lambda$ - довжина хвилі, м;  $T$  - температура, К;  $C_1$ , і  $C_2$  - постійні випромінювання.

Для ділянки видимого спектра випромінювання рівняння Планка можна спростити і одержати закон випромінювання Віна:

$$I_\lambda = C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot e^{C_2/(\lambda T)}$$

Для  $\lambda T < 0,002$  м·К похибка не перевищуватиме 0,1% порівняно із законом Планка.

Густина інтегрального півсферичного випромінювання  $E$  визначається як сумарна енергія випромінювання тіла по всіх довжинах хвиль (закон Стефана- Больцмана):

$$E = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} I_\lambda d\lambda = C_1 \cdot \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} \lambda^{-5} \cdot [e^{C_2/(\lambda T)} - 1]^{-1} d\lambda .$$

Після інтегрування отримаємо:

$$E = \sigma \cdot T^4 \text{ або } E = C_0 \cdot (T/100)^4, \text{ Вт/м}^2,$$

де  $C_0 = 5,67$  Вт/м<sup>2</sup> К<sup>4</sup> - коефіцієнт випромінювання АЧТ.

Різні тіла мають неоднакову випромінювальну здатність. Найбільша випромінювальна здатність в абсолютно чорного тіла, якому відповідає

безперервний спектр випромінювання. АЧТ є математичною абстракцією, оскільки в природі таких тіл практично немає.

Вимірювання температури тіл за їх випромінювання можна проводити різними методами. Частіше за все користуються такими трьома методами [3].

1. яскравістю (квазімонохроматичні пірометри, зі світлофільтрами) - за спектральною інтенсивністю випромінювання тіла проміння певної довжини хвилі - за величиною  $I_\lambda$  у монохроматичному світлі;

2. радіаційним (пірометри повного випромінювання) - за густиною інтегрального випромінювання - за величиною випромінювальної здатності тіла  $E$ ;

3. колірним (пірометри спектрального відношення) - за відношенням спектральної інтенсивності випромінювання тілом проміння двох певних довжин хвиль  $I_{\lambda/1,2}$  [3].

Яскравісний метод вимірювання, що обмежується тільки видимою областю спектра та візуальними спостереженнями для температур тіл вищих за 800 °С, також називають оптичним. Існує суб'єктивність цього методу вимірювання та його похибка, унаслідок різної яскравісної та спектральної чутливості очей спостерігачів. Для спостережень у інших діапазонах хвиль застосовуються різні фотодатчики, підсилювачі сигналу та різні електронні схеми для вимірювань та обробки результатів.

*Еквівалентною* температурою називають таку температуру чорного тіла, за якої одна з характеристик його випромінювання співпадає з аналогічною характеристикою реального тіла при його істинній температурі.

Оскільки теплове випромінювання реальних тіл за однакової температури виходить неоднаковим, то доводиться всі вимірювальні пристрої градувати на температуру, відповідну випромінюванню АЧТ [3].

Під час вимірювання температури реальних тіл пірометри, відградувані по АЧТ, показують якусь умовну еквівалентну псевдотемпературу, причому відмінність цієї температури від дійсної тим більша, чим більше відрізняються випромінювальні здібності реального тіла з власною ступеню чорноти  $\varepsilon$ , що ще може змінюватися для різних довжин хвиль, та від випромінювальних властивостей АЧТ. Для переходу від умовної еквівалентної температури до дійсної у показники пірометрів вводяться відповідні поправки.

Залежно від типу пірометра розрізняють три види еквівалентних температур *радіаційну, яскравісну та колірну температури*.

*Радіаційною температурою* реального тіла  $T_p$  називають температуру, за якої *повна потужність АЧТ* дорівнює повній енергії випромінювання даного тіла за дійсної істинної температури  $T$ . Із закону Стефана-Больцмана маємо [3]

$$\sigma_0 T_p^4 = \varepsilon \sigma_0 T^4, \text{ звідки } T = T_p \sqrt[4]{1/\varepsilon}$$

Різниця між дійсною і радіаційною температурами складе

$$\Delta T = T_p (\sqrt[4]{1/\varepsilon} - 1)$$

Для реальних тіл інтегральний ступінь чорноти  $\epsilon < 1$ , тому радіаційна температура завжди менше дійсної температури об'єкта вимірювання.

Недоліками радіаційного пірометра для дослідження температури є:

1. Коефіцієнт поглинання пластинки залежить від способу її виготовлення і змінюється від температури випромінювача. При вимірюванні температури від 1000 °С до 2500 °С похибка вимірювання складає 0,6%.

2. Відсутня чітка пропорційність між відхиленням гальванометра та чисельністю поглинутої енергії, що надійшла на термоелемент пірометра. Існує невраховуване поглинання потоку випромінювання газами CO<sub>2</sub> і CO, а також парами води, що знаходиться у повітрі між випромінювачем і приймачем [3].

3. Наявність лінзи вносить похибку, тому що коефіцієнт поглинання її зростає з підвищенням температури випромінювання.

4. За використання радіаційного пірометра слід пам'ятати про його значну інерційність, що складає близько 7...15 хв [3].

*Яскравішою температурою* реального тіла  $T_J$  називають температуру, за якої густина потоку спектрального випромінювання АЧТ дорівнює густині потоку спектрального випромінювання реального тіла для тієї ж довжини хвилі (або вузького інтервалу спектра) за дійсної температури  $T$ . Співвідношення між даними температурами записується в такому вигляді [1]

$$1/T_J - 1/T = (\lambda/C_2) \cdot \ln(1/\epsilon_\lambda).$$

Оскільки коефіцієнт спектрального випромінювання  $\epsilon_\lambda < 1$ , то і яскравіша температура завжди нижче дійсної, причому вона розрізняється сильніше за меншого значення  $\epsilon_\lambda$ .

*Колірною температурою* реального тіла  $T_K$  називають температуру, за якої відношення густини потоків випромінювання АЧТ для двох довжин хвиль  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  дорівнює відношенню густини потоків випромінювань реального тіла для тих же довжин хвиль за дійсної температури  $T$ . Зв'язок між даними температурами записується у вигляді такого виразу [1].

$$1/T - 1/T_K = \ln(\epsilon_{\lambda 1} / \epsilon_{\lambda 2}) / [T(1/\lambda_1 - 1/\lambda_2)].$$

Для фізичних об'єктів, у яких спектральний ступінь довжини хвилі зростає колірною температурою зменшується й навпаки. Для ділянок, які характеризуються рівною величиною ступеня чорноти (АЧТ, сіре тіло)  $T = T_K$ .

Таким чином, яскравісні вимірювання відрізняються високою чутливістю, радіаційні мають дещо меншу чутливість, проте здійснити їх технічно простіше. Колірні вимірювання також не мають високої чутливості, проте в цьому випадку поправки на температуру реальних тіл значно менші, ніж для інших методів вимірювання.

Досить часто є задачі, коли не треба знати точну температуру, але треба розрізнити її розподіл з точністю до 0,1...0,2°С відносно зовнішнього фону. Це прилади нічного бачення, тепловізори та прилади для контролю тепловтрат від будівель, теплового обладнання і машин тощо. Ці яскравісні прилади часто мають охолоджені чутливі датчики ПЧ-діапазону, міцні підсилювачі сигналу. Для більшої наочності в тепловізорах величину яскравості сигналу показано як зміна його кольору, що набагато краще



розрізняє температури. Тим більш, що поряд наводиться температурна шкала за цими кольорами.

*Яскравий оптичний пірометр.* Розглянемо докладніше схему оптичного пірометра. «Дія оптичного пірометра заснована на використанні залежності густини потоку випромінювання від температури (закон Планка). У пірометрі використано принцип зрівнювання яскравості зображення об'єкта з яскравістю нитки пірометричної лампи. Рівність яскравостей сприймається спостерігачем як зникнення нитки лампи на фоні зображення об'єкта. Дослідження проводяться в повному потоку (радіаційні) або в монохроматичному випромінюванні (яскравісні) за наявності світлофільтра [3].

Схема оптичного пірометра «Промінь» подана на рис. 1. Випромінювання від об'єкта вимірювання 1 проходить через об'єктив 2 і фокусується в площині А. У цій же площині розміщена нитка пірометричної лампи 3.

#### Рисунок 2.1 - Принципова схема квазімонохроматичного пірометра

Зображення об'єкта вимірювання і нитки пірометричної лампи може бути розглянуто спостерігачем 5 (пірометристом) через окуляр 4. Між ниткою пірометричної лампи й окуляром розміщується червоний світлофільтр 6. Між об'єктивом і ниткою пірометричної лампи може вводиться поглинаюче скло 7. Для зміни напруження нитки застосовується реостат 8, який змінює струм, що проходить через нитку пірометричної лампи від джерела живлення 9. Значення струму вимірюється приладом 10, що відградуваний у значеннях яскравісної температури.

Контроль за розрядом батареї живлення здійснюється компаратором напруги. Компаратор порівнює стабільну напругу  $U = 5$  В із напругою живлення пірометра. Під час розряду елемента живлення нижче 5 В за допомогою компаратора на лицьовій панелі приладу спалахує світлодіодний індикатор.

Діапазон вимірюваних температур від 800 °С до 5000 °С розділений на три піддіапазони: 800°С...1400°С; 1200 °С...2000°С; 1800 °С...5000 °С. Ефективна довжина хвилі пірометра у всьому діапазоні вимірюваних температур у межах  $(0,656 \pm 0,008)$  мкм. Основна допустима похибка вимірювання при температурі навколишнього повітря  $(20 \pm 5)$  °С, відносній

вологості 80% і відсутності зовнішнього магнітного поля, окрім земного, для першого піддіапазону становить  $\pm 14^{\circ}\text{C}$ , для другого -  $\pm 20^{\circ}\text{C}$  і для третього -  $\pm 150^{\circ}\text{C}$  [3].

Зміна значень пірометра, викликана зміною температури навколишнього повітря від  $(20\pm 5)^{\circ}\text{C}$  не перевищує половини основної допустимої похибки пірометра на кожні  $10^{\circ}\text{C}$  зміни температури.

Об'єкт вимірювання температури - це ніхромовий дріт із наведеним ступенем чорноти  $\epsilon_{\lambda}=0,6\dots 0,9$ , що натягнутий у скляній камері. Ступінь чорноти  $\epsilon_{\lambda}$ , залежить від строку експлуатації матеріалу, його виду і якості обробки тощо. Нагрів дроту здійснюється від мережі через автотрансформатор [3].

Для зменшення похибки від впливу стороннього випромінювання скляна камера закрита поліетиленовим чохлам.

*Радіаційний пірометр.* Зараз на ринку з'явилося багато простих та достатньо дешевих радіаційних пірометрів із непоганими характеристиками.

Безконтактний радіаційний термометр вловлює інфрачервоні хвилі, що випромінюються об'єктом. Прилад фокусує випромінювання об'єкта через лінзу на датчик, перетворює температуру поверхні в електричний сигнал, а мікрокомп'ютер обчислює і виводить на дисплей виміряне значення температури. Цей спосіб дозволяє вимірювати температуру об'єкта без безпосереднього контакту з його поверхнею. Лазер використовується виключно для наведення приладу на об'єкт. На рис. 2 показано загальний вигляд радіаційного пірометра типа MS-6530 та його основні елементи:

1. Рідкокристалічний дисплей.
2. Кнопка включення лазерного цілеуказника.
3. Кнопка перемикання режимів.
4. Кнопка включення підсвічування.
5. Кнопка перемикання температурних шкал ( $^{\circ}\text{Q}^{\circ}\text{F}$ ).
6. Кнопка запуску вимірювань.
7. Кришка батарейного відсіку.
8. Опора підставки-триноги.
9. Приціл.
10. Вихідний отвір лазерного пучка.
11. Отвір термодатчика.

Більшість органічних матеріалів, а також окислені металеві поверхні мають коефіцієнт випромінювання між 0,85 і 0,98. Термометр розрахований на середній коефіцієнт випромінювання 0,95. Тому якщо коефіцієнт випромінювання об'єкта менше 0,95, виміряна температура виявляється нижчою від дійсної і навпаки. Блискучий метал і поліровані об'єкти мають низький коефіцієнт випромінювання, тому враховуйте вплив коефіцієнта випромінювання об'єкта на результат.

## Рисунок 2.2 - Загальний вигляд радіаційного пірометра MS-6530

Рідкокристалічний дисплей пірометра MS-6530 показано на рисунку 3:

12. Індикатор лазерного випромінювання.
13. Індикатор фіксації даних.
14. Основний температурний дисплей.
15. Індикатор середнього значення.
16. Індикатор розрядженої батареї.
17. Індикатор максимального і мінімального значень (MAX/MIN).
18. Індикатор вимірювань.
19. Значення коефіцієнта випромінювання.
20. градус за Цельсієм (°C).
21. градус за Фаренгейтом (°F).
22. Додатковий температурний дисплей.

## Рисунок 2.3 - Вигляд рідкокристалічного дисплея пірометра MS-6530

Відношення D:S плями огляду пірометра (рис.2.4). Термометр має певний кут огляду і розмір плями огляду, що характеризується : відношенням розмірів D:S (див. за ТХ паспорта приладу). Переконайтеся, що розмір об'єкта більше, ніж розмір плями огляду. Чим менше мішень, тим ближче до неї повинен знаходитися прилад. Відношення між відстанню до об'єкта і розміром плями складає 12:1, як показано на малюнку:

Рисунок 2.4 - Кут огляду пірометра: D - відстань до об'єкта, S - розмір плями

Таблиця 2.2 - Технічні характеристики пірометра ms-6530

Дисплей	4-розрядний рідкокристалічний дисплей із двома індикаторами
Відношення відстані до об'єкта до розміру плями D:S	1:12
Коефіцієнт випромінювання	0,95
Спектральний діапазон	8-14 мкм
Діапазон вимірюваних температур	-20 °C...537 °C или -4 F...999 °F
Діапазон вимірюваних температур	-20 °C...50 °C: ±2,5 °C 51 °C...537 °C: ±(1,5%+1 °C)
Час відгуку	0,5 секунд
Потужність лазерного	Менше ніж 1 мВт
Автовідключення	Через 10 секунд після припинення
Підсвічування	Kelly
Умови навколишнього середовища	0 °C...40 °C за вологості 10-90%
Температура зберігання	-10°C...60°C за вологості <75%
Батарея	На 9 В, тип 6F22 («Крона»)
Розміри	162 мм x 56 мм x 90 мм
Маса	Приблизно 267 г (з урахуванням
Приналежності	Батарея на 9 В, інструкція з
Максимальна відстань до об'єкта, що обстежується	12 метрів

Щоб встановити розташування найбільш гарячої або холодної точки, направте термометр за межі досліджуваної області. Потім повільно скануйте обстежувану область рухами вгору і вниз, поки не виявите розташування найбільш гарячої або холодної точки поверхні.

#### *Методика вимірювань пірометром*

1. Для вимірювання температури об'єкта наведіть на нього прилад, натисніть і утримуйте кнопку запуску вимірювань, при цьому температура вимірюється безперервно. Після того як кнопка відпущена, результат вимірювання фіксується на дисплеї. На основному температурному дисплеї відображається поточне значення вимірюваної температури, на додатковому температурному дисплеї - обчислене значення. Прилад вимикається автоматично через 10 секунд після того, як відпущена кнопка запуску вимірів [3].

2. Для отримання найбільш точного результату вимірювання переконайтеся, що обстежуваний об'єкт більше, ніж розмір плями. Чим менше об'єкт, тим ближче до нього повинен розташовуватися термометр. Рекомендована відстань (з відношення D:S) - не більше ніж 75% від розрахункового максимального значення.

3. Якщо об'єкт знаходиться на значній відстані від приладу, натисканням кнопки включення лазера можна включити лазерний покажчик і з його допомогою точно навести прилад на об'єкт [3].

4. Для виконання вимірювань вночі й у разі недостатньої видимості можна включити підсвічування дисплея.

5. За допомогою кнопки перемикачів режимів MODE на додатковому температурному дисплеї можна послідовно відобразити середнє (AVG), максимальна (MAX) і мінімальне (MIN) значення температури, а також різницю між максимальним і мінімальним значеннями (MAX-MIN).

6. За допомогою кнопки °C/°F можна перемикатися між температурними шкалами Цельсія (°C) і Фаренгейта (°F) [3].

## ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 2 МЕТОДИ І ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ

### Тема 3. Ознайомлення з залежністю питомої теплоємності від температури калориметром із адіабатною оболонкою

1. Обговорення основних положень теми та питань самостійного вивчення:

1. Призначення калориметрів.
2. Принцип дії адіабатного калориметра. Теплова схема роботи приладу.
3. Адіабатна оболонка та її призначення.
4. Що таке час запізнювання, чому він спостерігається, як він вимірюється?
5. Що характеризує час запізнювання  $\tau_0$ , як його визначити ?
6. Що таке теплоємність?
7. Як залежить теплоємність від стану речовини?

2. Опитування.

3. Практичні завдання.

#### Приклад розв'язування завдання.

Мідний термометр опору при 20°C має опір  $R_{20}=1,75$  Ом. Визначте його опір при 100 и 150 °C. Температурний коефіцієнт  $a= 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$

#### Рішення

Опір  $R_t$  мідного термометра при температурі  $t, ^\circ\text{C}$ , визначається за формулою

$$R_t = R_0 (1 + at),$$

де  $R_0$  - опір при 0 °C;

$a$  - температурний коефіцієнт,  $\text{K}^{-1}$ ;

$t$  - температура, °C.

Якщо відомо опір  $R_{t_1}$  при температурі  $t_1$ , то для визначення опору  $R_{t_2}$  при температурі  $t_2$  потрібно попередньо визначити  $R_0$ , а потім по знайденому  $R_0$  визначити  $R_{t_2}$ :

$$R_{t_2} = R_0(1 + at_2),$$

де  $R_0 = R_{t_1}/(1 + at_1)$

Для нашого випадку  $R_{100} = 2,3$  Ом,  $R_{150} = 2,64$  Ом.

Вихідні дані для розрахунку наведені в таблиці 3.1

Таблиця 3.1 – Варіанти завдань

Найменування даних, одиниця виміру	Вар. № 1, 12	Вар. № 2, 7	Вар. №3, 8	Вар. №4, 9	Вар. №5, 10	Вар. №6, 11
Температура вимірювань, °C	20	25	15	30	20	25

Опір при температурі вимірювання, Ом	1,55	1,6	1,65	1,7	1,5	1,75
Температура $t_1$ , °C	110	90	120	105	115	95
Температура $t_2$ , °C	140	130	140	135	150	128

Усі фізичні, хімічні та біологічні процеси проходять із поглинанням або виділенням теплоти, тобто супроводжуються *тепловими* ефектами. До таких процесів також належать фазові перетворення, хімічні реакції, нагрів тіл та ін. Сукупність засобів вимірювання цих ефектів зветься калориметрією, а вимірювання проводяться з допомогою спеціальних приладів - калориметрів різноманітних конструкцій. Сучасні калориметри являють собою складні технічні прилади, які працюють у широкому діапазоні температур (від 0,1 до 4000 К) і мають високу точність (від декілька % і краще). Дані калориметричних вимірювань широко використовуються в наукових дослідженнях та в інженерній практиці [3].

Важливо вміти створити у вимірювальній системі контрольовану кількість теплоти або контрольований тепловий потік. При цьому неможливе ці величини вимірювати безпосередньо, а лише за тепловими ефектами, що супроводжують цей процес. При цьому треба пам'ятати, щоб під час вимірювань у нас не порушувалися умови теплового процесу та не було впливу від датчиків на виміряні величини.

Теплота в калориметрах, з урахуванням тепловтрат, вимірюється:

- за величиною нагріву  $\Delta T$  робочих тіл із відомими параметрами;
- за потужності електричних джерел теплоти та часу їх роботи;
- за величині усталеного температурного (теплового) напору  $\Delta T_0$  на контрольних елементах системи та часу їх роботи [1].

У цій роботі в приладі ИТ-С-400 електронний регулятор підтримує стабільний тепловий потік  $Q$  до ампули зі зразком, стабілізуючи величину теплового напору  $\Delta T_0$  на тепломірі з відомими тепловими параметрами.

Особливе значення для теплотехніки мають калоричні вимірювання теплофізичних властивостей тіл, і по-перше, теплоємностей різноманітних речовин. Загальний принцип дії всіх калориметрів полягає у тому, що у його вимірювальну частину (калориметричну систему) вводиться деяка кількість теплоти, що викликає контрольовану зміну температури системи (такі прилади зветься калориметрами зі змінною температурою, калориметри з постійною температурою та за іншим принципом дії зрідка застосовуються у інженерній практиці). Взаємозв'язок між цими параметрами встановлюється у спеціальних дослідах під час градування калориметра. Калориметрична система звичайно знаходиться в оболонці, температура якої контролюється.

У калориметрах з *ізотермічною оболонкою* її температура підтримується сталою з дуже високою точністю ( $\pm 0,01$  К і вище), при цьому врахування теплообміну зразка з навколишнім середовищем здійснюється дуже точно. Великий термічний опір оболонки дозволяє знехтувати нелінійними внесками у теплообмін від теплового випромінювання та конвекції. Такі прилади звичайно застосовують для дослідження теплових ефектів за порівняно швидких процесів (наприклад, горіння) [2].

У калориметрах з *адіабатною оболонкою* температура оболонки підтримується якомога більш близькою до температури калориметричної системи (зразка, що досліджується). Це дозволяє різко зменшити теплообмін із навколишнім середовищем (хоча врахування остаточного теплообміну в цих приладах здійснюються зі значно меншою точністю, ніж у калориметрах з ізотермічною оболонкою). «Тому такі калориметри можуть застосовуватися для вивчення як швидких, так і повільних процесів, наприклад, для вимірювання теплоємності у широкому інтервалі температур (таке вимірювання може тривати декілька годин). Підтримання адіабатних умов під час роботи калориметра здійснюється автоматично за допомогою датчиків температури (як правило, диференційних термопар) та електронних схем [3].

Під час інженерних розрахунків багатьох технологічних процесів, що пов'язані з передачею або відведенням теплоти, необхідне знання теплоємностей продуктів - твердих, рідких і газоподібних речовин, у тому числі, харчових продуктів. Тому інженери та фахівці, що спеціалізуються у галузі харчових виробництв, повинні володіти теоретичними основами і практичними навичками у проведенні вимірювань теплоємності та інтерпретації отриманих результатів.

*Теплоємністю тіла  $C$*  називається кількість теплоти, яку необхідно підвести до *тіла* для підвищення його температури на 1 К. Якщо у інтервалі зміни температури  $\Delta T$  кількість теплоти, що підводиться дорівнює  $Q$ , то згідно з визначенням *повна середня* (на інтервалі  $\Delta T$ ) теплоємність дорівнює

$$C = Q/\Delta T \text{ [Дж/К]}.$$

*Істинною* теплоємністю, що відповідає даній температурі ( $\Delta T \rightarrow 0$ ), називається похідна  $C = dQ/dT$  і визначається математично [1].

Величина теплоємності залежить від багатьох чинників.

Теплоємність тіла передусім залежить від *кількості* речовини, що міститься в ньому. Залежно від одиниці, що використовується для вимірювання цієї кількості розрізняють *питому* (або масову) теплоємність  $c$  [Дж/(кг К)] (це теплоємність 1 кг речовини), *мольну* (або молярну) теплоємність  $\mu c$  [Дж/(моль К)] (теплоємність 1 моля речовини; до речі в літературі з теплотехніки поняття «моль» часто відповідає кілограм-молю речовини), яка дорівнює  $\mu c = c_\mu = c_m$ , де  $\mu$  - молярна маса речовини, *об'ємну* теплоємність  $c'$  [Дж/(м<sup>3</sup>К)] (теплоємність 1 м<sup>3</sup> речовини), яка дорівнює  $c' = \rho c$  ( $\rho$  - густина речовини). В інженерній практиці найчастіше використовується питома теплоємність  $c$ . Кількість теплоти, що необхідна для нагрівання тіла масою  $m$  на  $dT$ , дорівнює  $dQ = m c dT$ , а для 1 кг речовини  $dq = c dT$ .

Питома теплоємність речовини залежить від її фізичної природи і внутрішньої структури. Тому знання теплоємності речовини важливе не лише для інженерної практики, але і під час різноманітних наукових досліджень, пов'язаних зі з'ясуванням фізичних процесів, що протікають на атомномолекулярному рівні. Теплоємність газів згідно з теорією ідеального газу пов'язана зі збільшенням кінетичної енергії молекул за підвищення температури. Теплоємність твердих тіл пов'язане зі збільшенням енергії теплових коливань атомів або іонів у вузлах кристалічної решітки під час нагрівання тіла. У металах істотний вклад в теплоємність, поряд із



кристалічною решіткою вносять вільні електрони (електронний газ) [3].

Вода відрізняється від інших рідин цілою низкою аномалій фізичних властивостей, у тому числі теплоємності: питома теплоємність води більша ніж у інших речовин, зростає майже вдвічі відносно льоду і складає близько 4200 Дж/(кг К) за кімнатної температури. Саме значним вмістом води з її високим значенням теплоємності с пояснюється висока теплоємність багатьох харчових продуктів (особливо м'ясних, рибних продуктів, овочів) [2]. Під час теплової обробки їхній вологовміст зменшується, і питома теплоємність відповідно значно спадає. Це слід ураховувати під час розробки і розрахунку технологічних процесів у харчовому виробництві. Також вода стабілізує температуру навколишнього середовища біля озер та моря.

Із проведеного стислого огляду видно, що вимірювання теплоємності є важливим засобом вивчення фазових і структурних перетворень речовини в наукових і технологічних дослідженнях.

Кількість теплоти  $dq$ , що необхідна для нагрівання 1 кг речовини на  $dT$ , та питома теплоємність  $c$  залежать також від умов нагрівання речовини (або від шляху теплового процесу). Ця залежність особливо помітно виявляється для газів. Так питома теплоємність газу, що зміряна за сталого об'єму,  $c_v$  менша за питому теплоємність за сталого тиску  $c_p$ , причому для ідеального газу, згідно із формулою Майєра,  $c_p = c_v + R$  ( $R = R_\mu/\mu$  - питома газова стала). Ця різниця пов'язана із роботою розширення газу за сталого тиску. Для рідких і твердих речовин при наближених розрахунках вважають  $c_v \approx c_p = c$ .

Нарешті, питома теплоємність усіх реальних речовин тією чи іншою мірою залежить і від температури. Ця залежність буде відсутня тільки для ідеального газу, теплоємність якого розраховується на основі молекулярно - кінетичної теорії. Згідно з цією теорією, молярна теплоємність  $\mu c_v = (i/2)R_\mu$ , де  $i$  - кількість ступенів свободи молекули газу,  $R_\mu = 8314$  Дж/(кмоль К) - універсальна газова стала. Кількість ступенів свободи ідеального газу залежить від числа поступальних  $i_n$  та обертальних  $i_{об}$  ступенів свободи молекули, коливальні ступені свободи не враховуються. Для одноатомних газів  $i = i_n = 3$ , для двоатомних  $i = 3 + 2 = 5$  та для багатоатомних  $i = i_n + i_{об} = 3 + 3 = 6$ .

Для реальних газів теплоємність зростає також з температурою і може бути подана формулою вигляду  $c = c_o + at + bt^2 + \dots$ , де  $a, b$  - коефіцієнти, що визначаються дослідним шляхом,  $c_o$  - значення  $c$  при  $t = 0$  °С. За технічних розрахунків звичайно вважають  $c = c_o + at$ . Тоді для питомої теплоємності, що усереднена на інтервалі температур  $t_1 \dots t_2$ ,  $c_m \approx c_o + a(t_2 + t_1)/2$ . За наближених розрахунків часто можна взагалі не враховувати залежність  $c$  від  $t$  і застосовувати наведені вище формули ідеального газу. Так, для повітря ( $\mu \approx 29$  кг/кмоль) знаходимо  $c_v = 717$  Дж/(кг К),  $c_p = 717 + 287 = 1004$  Дж/(кг К).

Для рідин і твердих тіл залежність  $c(t)$  може мати складний вигляд, що погано піддається теоретичному розгляду. Для багатьох простих твердих тіл (Cu, Fe та ін.) з достатньою точністю виконується закон Дюлонга і Пті, згідно з яким атомна теплоємність дорівнює  $\mu c = 3R_\mu \approx 25$  кДж/(кг-атом К) (роль «моля» при цьому виконує кілограм-атом речовини). Наприклад, для міді ( $\mu$

= 64 кг/кг-атом)  $c = 25000/64 = 400$  Дж/(кг К), що добре погоджується з даними експерименту. Однак для більшості складних твердих тіл, наприклад сплавів, спостерігаються значні відхилення від закону Дюлонга і Пті .

Таким чином, питома теплоємність реальних речовин мало піддається теоретичному розрахунку і залежить від багатьох чинників, які часто невідомі. Тому значно надійнішим способом визначення теплоємності є застосування одного з численних експериментальних способів, що входять у спеціальну галузь науки і техніки - калориметрію.

Для вимірювання питомої теплоємності звичайно застосовують калориметри з адіабатною оболонкою, у яких вимірювальна частина (калорична система) знаходиться в оболонці, температура якої автоматично підтримується якомога ближче до температури вимірювальної частини (зразка). Це дозволяє спростити розрахунки, максимально зменшити тепловтрати в навколишнє середовище і завдяки цьому проводити тривалі дослідження питомої теплоємності у широкому інтервалі температур [3].

Типовим представником калориметрів цього виду є вимірник теплоємності «ИТ-С-400». Він призначений для проведення масових досліджень питомої теплоємності твердих, сипких і рідких речовин у виробничих і лабораторних умовах в інтервалі температур від  $-100$  °С (при застосуванні рідкого азоту) до  $+400$  °С і з точністю не нижче ніж 10% [1].

В основу роботи приладу покладено порівняльний спосіб динамічного калориметра з *тепломіром і адіабатною оболонкою*, спрощена теплова схема способу подана на рис. 3.1. Зразок матеріалу, що досліджується 1 розміщується у металевій ампулі 2 з кришкою 3. Через тепломір 4 до ампули безупинно надходить тепловий потік  $Q$  від основи 5, у якій змонтовано нагрівач. Відкриті краї ампули ізольовано від навколишнього середовища адіабатною оболонкою 6 (охоронним ковпаком), що нагрівається до температури ампули. Температури  $t_1$  і  $t_2$  та їх перепад ( $\Delta T = t_1 - t_2$ ) на тепломірі вимірюється хромель - алюмелієвими термопарами 7.

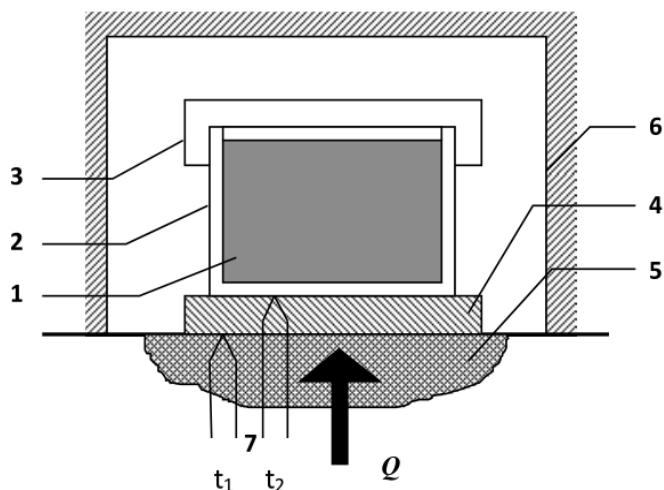


Рисунок 3.1 - Теплова схема калориметра

Принцип дії приладу полягає у тому, що до зразка у вимірювальному блоці через тепломір від нагрівача безупинно надходить керований сталий тепловий потік  $Q$  [Вт], що йде на нагрівання контейнера (ампули) разом зі

зразком (рис. 3.1). За час  $\tau$  зразок одержує теплоту  $Q_\tau$  [Дж]:

$$Q_\tau = Q_{o\tau} + Q_{a\tau} = (C m + C_a) \Delta T = (c m + C_a) b \tau,$$

та одержимо тепловий потік  $Q$ :

$$Q = Q_\tau / \tau = Q_o + Q_a = (C m + C_a) b,$$

де  $c$  - питома теплоємність матеріалу зразка, Дж / (кг К);

$m$  - маса зразка, кг;

$C_a$  - повна теплоємність ампули, Дж/К

$b$  - швидкість нагріву ампули зі зразком із часом  $\tau$ , ( $b = dT/d\tau \approx 0,1$

К/с).

З іншого боку, для  $Q$  можна записати (закон Фур'є теплопровідності):

$$Q = (\lambda_o / \delta_o) F_o \Delta T_o = K_m \Delta T_o,$$

де  $\lambda_o$ ,  $\delta_o$ ,  $F_o$  - коефіцієнт теплопровідності, товщина та робоча площа поверхні тепломіру,  $K_m = K_m(t)$  - стала приладу, яка залежить від температури та тепловтрат, що можуть бути в приладу, і підлягає визначенню під час його калібрування. За малою величиною перепаду температури  $\Delta T_o$  на тепломірі та сталому темпі нагрівання  $b$  його можна зв'язати з часом запізнювання  $\tau$  температури зразка під час нагріву відносно температури основи співвідношенням

$$\Delta T_o = \Delta T = t_1 - t_2 = b \tau$$

Причому величина  $\tau$  може бути виміряна секундоміром безпосередньо. За порожньої ампули час запізнювання дорівнює  $\tau_o$ , ця величина також є сталою приладу, що вимірюється безпосередньо секундоміром. Таким чином, основною метою градування приладу є визначення залежності сталої  $K_m(t)$ . Із формул (3.2) - (3.4) отримуємо розрахункову формулу для питомої теплоємності зразка  $c$ :

$$c = K_m (\tau - \tau_o) / m,$$

де  $\tau_o = C_a / K_m$  відповідає часу запізнювання при порожній ампулі. Величини  $K_m$  і  $\tau_o$  є сталими приладу і визначаються у процесі його градування.

Структурно прилад «ИТ-С-400» складається з таких блоків:

- вимірювального блока, що містить блок зі зразком, адіабатну оболонку і вимірювальні термоміри;
- блока живлення і регулювання (нижнього блока), схему живлення, що містить системи керування нагрівачем (електронні регулятори), які забезпечують заданий темп нагріву - тепловий потік  $Q$  до ампули зі зразком та автоматичне регулювання температури адіабатної оболонки  $t_a = t_2$ , тобто підтримання адіабатних умов під час роботи приладу [3].

Крім того, невід'ємними частинами вимірювальної установки є:

- мікровольтнаоамперметр Ф-136, що підключений до вимірювального блока приладу «ИТ-С-400» як нуль - прилад, який фіксує момент проходження температури блока через задане її значення [ $t_1(0) = t_2(\tau)$ ];

- електричний секундомір для вимірювання часу запізнювання  $\tau$ .

Під час подачі живлення на нагрівач ядро вимірювального блока зі зразком починає монотонно нагріватися зі сталою швидкістю, приблизно 0,1

К/с. «Водночас із цим допоміжний нагрівач у адіабатній оболонці підтримує нульову різницю температур між ампулою зі зразком і оболонкою (адіабатні умови). Унаслідок нагрівання світловий показчик приладу Ф-136 починає рівномірно переміщатися по шкалі справа наліво. У момент його проходження через нуль температура на тепломірі ( $t_1$  або  $t_2$ ) відповідає встановленій на перемикачі «ТЕМПЕРАТУРА, °С [3]. За допомогою перемикача «ИЗМЕРЕНИЕ» і секундоміра вимірюється час запізнювання  $\tau$  температури ампули з зразком ( $t_2$ ) у порівнянні з температурою основи ( $t_1$ ) - за сталої температури вимірювання

$$t_{вим} = t_1 (\tau = 0) = t_2(\tau).$$

Можна також сказати, що за час запізнювання  $\tau$  зразок нагрівається за температурою на величину температурного напору на тепломірі  $\Delta T_o = t_1 - t_2$ .

#### **Тема 4. Озайомлення з процесами нагріву – охолодження та визначення параметрів теплообміну у стаціонарному режимі.**

1. *Обговорення основних положень теми та питань самостійного вивчення:*

1. Конвекція (вільна, вимушена)
2. Тепловіддача. Коефіцієнт тепловіддачі. Основний закон тепловіддачі
3. Критеріальне рівняння для вільної конвекції. Критерії подібності, їх фізичний сенс.
4. Експериментальний та теоретичний розрахунок коефіцієнта тепловіддачі.

2. *Опитування.*

3. *Практичні завдання.*

#### **Приклад розв'язування завдання.**

Визначте показання манометричного ртутного термометра, якщо під час градування термобаллон і показуючий прилад знаходилися на одному рівні, а в реальних умовах показує прилад розташований на 7,37 м вище, ніж термобаллон. Шкала термометра 0-500°С. При зміні температури от 0 до 500°С тиск в системі змінюється от 4,47 до 14,28 МПа. Щільність ртуті  $\rho = 13595 \text{ кг/м}^3$ .

#### **Рішення**

Тиск, що підводиться до показуючи приладу, буде визначатися як тиск в термобалоні мінус тиск стовпа рідини, що визначається різницею рівнів розташування термобаллона і показує приладу:

$$\Delta p = \rho g \Delta H = 7,37 \cdot 13595 \cdot 9,81 = 0,98 \text{ МПа}$$

Таким чином, показання приладу будуть занижені на 0,98 МПа щодо дійсного значення в термобалоні. Визначимо чутливість манометричного термометра:

$$S = \frac{p_k - p_n}{t_k - t_n} = \frac{14,28 - 4,47}{500 - 0} = 0,0196$$

Визначимо зміну показань манометра, викликане відмінністю у взаємному розташуванні термобаллона і вимірювального приладу:

$$\Delta t = \frac{\Delta p}{S} = \frac{0,98}{0,0196} = 50^\circ\text{C}.$$

Значить, свідчення манометричного термометра будуть занижені на  $50^\circ\text{C}$ .

Вихідні дані для розрахунку наведені в таблиці 4.1

Таблиця 4.1 – Варіанти завдань

Найменування даних, одиниця виміру	Вар. № 1, 12	Вар. № 2, 7	Вар. №3, 8	Вар. №4, 9	Вар. №5, 10	Вар. №6, 11
Показання розташування приладу, м	5,45	5,78	6,23	6,54	7,07	7,52
Шкала термометра, $^\circ\text{C}$	0-420	0-450	0-440	0-465	0-470	0- 510
Зміна тиску в системі при зміні температури, $^\circ\text{C}$	3,98- 15,09	4,18- 14,72	4,52- 14,06	4,35- 14,39	4,54- 14,63	4,76- 13,89

Процеси нагріву - охолодження продуктів є невід'ємною частиною багатьох технологічних процесів. Цей процес звичайно закінчується виходом температур на робочі, стаціонарні значення, які далі вже не змінюються. Такий режим роботи зветься стаціонарним і має велике значення для проходження процесу та спрощення розрахунку цього технологічного процесу. Нам треба вивчити особливості виходу нашої системи на цей режим [3].

Тепловий потік  $Q$ , що підводиться до системи, розподіляється на її нагрівання  $Q_H$  та на тепловтрати з її поверхні - теплопровідністю  $Q_m$ , конвекцією  $Q_K$  та випромінюванням  $Q_e$ :

$$Q = Q_H + Q_m + Q_K + Q_e.$$

Ці складові можна описати через теплофізичні параметри:

$$Q = C_H \frac{dt}{d\tau} - \lambda \cdot F \cdot grad \cdot t + \alpha \cdot \Delta t \cdot F + \varepsilon_{зв} \cdot C_o \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F$$

Із найменшою точністю нам відомо про теплоту, що йде на нагрівання, бо часто невідоме значення теплоємності системи  $C_H$  та значення середньої

швидкості нагрівання або охолодження системи з часом  $\frac{dt}{d\tau}$ , яка до того ж часто дуже неоднорідна і сильно змінюється по величині в об'ємі системи.

Тому щоб вимкнути ці невідомі значення параметрів нагрівання або охолодження, виміри здійснюються у *стаціонарному режимі*, коли  $t(\tau) =$

$\frac{dt}{d\tau} = 0$ , і розрахунок  $Q$  значно спрощується. Тоді  $Q_H = 0$  та за умови малості внеску теплопровідності  $Q_m = 0$ , що

виконується для більшої частини випадків розрахунку, маємо значно більш простіше співвідношення для розрахунків:

$$Q = Q_K + Q_B = \alpha \cdot \Delta t \cdot F + \varepsilon_{\text{зв}} \cdot C_o \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F$$

Тому при вимірах теплових параметрів системи ( $T$ ,  $\alpha$ ,  $\lambda$ ,  $\varepsilon$ ) у лабораторних роботах з теплообміну треба дочекатися виходу системи на стаціонарний режим. Для цього треба щоб за 5 хвилин температура системи змінилась менш, ніж на 1 °С, що в одиницях термо-ЕРС термопар складає приблизно 0,05 мВ й менше. Невиконання цієї умови призводить до великих похибок у визначенні значень теплових параметрів системи під час розрахунку результатів роботи [1].

Однак треба відзначити, що вихід системи на стаціонарний режим може бути досить довгим (десятки хвилин або навіть години) унаслідок великої маси та розмірів системи та малості теплообміну між елементами системи внаслідок малої теплопровідності її елементів - повітря, рідини, теплоізоляції.

Але за допомогою математичної обробки результатів зміни температури системи поблизу стаціонарного режиму можна визначити стаціонарну температуру, на яку система вийде через деякий час, чим значно прискорити процес виміру та визначення всіх необхідних теплових параметрів системи у стаціонарному режимі.

Для цього ми використовуємо те, що поблизу виходу на стаціонарний режим параметри теплообміну змінюються мало. Унаслідок цього вихід на стаціонарну температуру можна описати експоненціальною залежністю виду:

$$t = t_0 - A e^{-kt} = t_0 - A \exp(-kt),$$

де параметри рівняння є сталими:  $A$  - початкова величина відхилення від стаціонарної температури  $t_0$ ,  $k$  - темп виходу за часом  $\tau$ .

Розглянемо процес виходу на стаціонарний режим під час виконання лабораторної роботи з визначення коефіцієнта тепловіддачі при вільній конвекції. Звичайно для виходу на стаціонарний тепловий режим системі потрібно не менш 1 години. Спробуємо зменшити цей час у 2-3 рази, а величину стаціонарної температури  $t_0$  одержати більш точною.

*Конвекція* - це передача теплоти шляхом руху та переміщення в просторі нерівномірно нагрітих об'ємів рідин чи газів під дією масових сил (вільна конвекція) або під дією сторонніх сил, роботи обладнання - насоса, вентилятора (вимушена конвекція) [1].

Конвекційний теплообмін між рідиною (або газом) та твердою стінкою зветься *тепловіддачею*. Згідно із законом *Ньютона-Ріхмана* тепловий струм у процесі тепловіддачі пропорційний площі поверхні теплообміну  $F$  та різниці температур поверхні стінки  $t_c$  і рідини (газу)  $t_p$  [3].

$$Q = \alpha F (t_c - t_p)$$

Коефіцієнт пропорційності  $\alpha$  зветься *коефіцієнтом тепловіддачі*; одиниця його виміру Вт/(м<sup>2</sup> К). Він характеризує інтенсивність процесу тепловіддачі. Чисельне значення його дорівнює тепловому потоку від

одиночної поверхні теплообміну при різниці температур поверхні та рідини в 1К [1].

Коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  визначають експериментально, вимірюючи тепловий потік  $Q$  та різницю температур  $\Delta t = t_c - t_p$  у процесі тепловіддачі від поверхні відомої площі  $F$ :

$$\alpha = \frac{Q}{F(t_c - t_p)}$$

Величина  $\alpha$  залежить від багатьох факторів - теплофізичних властивостей теплоносія (теплопровідності  $\lambda$ , в'язкості  $\mu$  або  $\nu = \mu / \rho$ , густини  $\rho$ , коефіцієнта об'ємного розширення  $\beta$ , питомої теплоємності  $C_p$ ), геометрії поверхні теплообміну (форми та розмірів), швидкості течії теплоносія  $w$ , температур теплоносія і поверхні  $t_p$  і  $t_c$  та інших.

Залежність  $\alpha$  від великої кількості параметрів створює значні ускладнення під час дослідження конвективного теплообміну. Тут допомагає теорія подібності, що дозволяє на основі окремих досліджень або чисельних розрахунків одержати узагальнену залежність та дає можливість вивчення робочих процесів у теплотехнічних приладах, зокрема явища теплопередачі, на спеціальних «моделях», в яких ці процеси утворюються таким же чином, як і в «натуральному» приладі [3].

Згідно з основною теоремою подібності, фізичні явища подібні, якщо для них однакові безрозмірні комплекси - числа (критерії) подібності.

Для теорії тепловіддачі основними є такі числа подібності

	$R_e = \frac{\omega \cdot l}{\nu}$		$N_u = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$
Рейнольдса		, Нусельта	
	$G_r = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \beta \cdot \Delta t$		$P_r = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda}$
Грасгофа		Прандтля	
	$G_a = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2}$		$K_u = \frac{r}{C_p \cdot \Delta t}$
Галілея		Кутателадзе	

де  $w$  - швидкість течії, м/с;

$l$  - визначальний розмір (для горизонтально розташованого циліндра - діаметр, для вертикально розташованого - висота), м;

$\mu$ ,  $\nu$  - коефіцієнти динамічної (Па с) та кінематичної ( $\text{м}^2 / \text{с}$ ) в'язкості ( $\mu = \nu \rho$ );

$\rho$  - густина теплоносія,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$g$  - прискорення вільного падіння,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;

$\alpha$  - коефіцієнт тепловіддачі,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ ;

$\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності,  $\text{Вт}/(\text{м К})$ ;

$$\beta = \frac{1}{T_{cp}} = \frac{1}{t_{cp} + 273}$$

$\beta$  - коефіцієнт об'ємного розширення,  $\text{К}^{-1}$  (для газів:);

$C_p$  - питома теплоємність при сталому тиску,  $\text{Дж}/(\text{кг К})$ ;

$\Delta t = t_c - t_p$  - температурний напір,  $\text{К}$ ;

$r$  - питома теплота випаровування, Дж/кг.

Усі значення теплофізичних параметрів, що входять до складу критеріїв подібності, визначаються при характерній (визначальній) температурі. Для вільної конвекції - це середня температура пристінного шару:  $t_{cp} = 0,5 (t_c + t_p)$ , для вимушеної конвекції - температура рухомого середовища  $t_p$ , для тепловіддачі при конденсації - температура насичення  $t_H$ .

Використовуючи подані вище критерії подібності, можна надати результати експериментальних досліджень тепловіддачі у вигляді критеріальних рівнянь [1].

Універсальне критеріальне рівняння для вільної конвекції (рівняння Михеєва) має вигляд:

$$Nu = C (GrPr)^n = CR_a^n.$$

## Тема 5. Ознайомлення з засобами вимірювання тиску

1. *Обговорення основних положень теми та питань самостійного вивчення:*

1. Види вимірюваного тиску.
  2. Класифікація засобів вимірювання за видом вимірюваного тиску.
  3. Класифікація засобів вимірювання тиску за принципом дії.
  4. Основні форми чутливих елементів деформаційних засобів для вимірювання тиску.
  5. Конструктивна схема манометра з трубкою бурдона.
  6. Конструкція трубчастої пружини для вимірювання високого тиску.
  7. Конструктивна схема сильфонного манометра.
  8. Конструктивна схема манометра з мембранним чутливим елементом.
  9. Визначення відносної похибки при вимірюванні тиску манометром.
2. *Опитування.*

3. *Виконання практичної та лабораторних робіт.*

3.1. *Практичні завдання.*

### Приклад розв'язування завдання.

Чутливим елементом манометра є сильфон. Урівноваження тиску (різниці тисків) здійснюється за рахунок пружної протидії сильфона і пружини, ефективна площа сильфона  $S_{ef} = 31,5 \text{ мм}^2$ , жорсткість пружини  $K_n = 9,20 \text{ Н/мм}$ , жорсткість одного гофра сильфона до впливу осьового зусилля  $K_c = 0,25 \text{ Н/мм}$ , число гофр 8. При переміщенні стрілки манометра від початку до кінця шкали денце сильфона переміщається на  $h = 4,5 \text{ мм}$ . Визначте межі вимірювання манометра.

### Рішення

Сумарна жорсткість пружини і сильфона

$$K_m = K_n + K_c n = 9,20 + 0,25 \cdot 8 = 11,2 \text{ Н}$$

де  $n$  - число гофр.



Протидіє зусилля, створюване пружиною і сільфоном при стисненні їх на  $h = 4,5$  мм,

$$F_{np} = K_M h = 11,2 \cdot 4,5 = 50,4 \text{ Н}$$

Визначимо, який тиск на сільфон потрібно, щоб мати силу, рівну протидію:

$$p = F_{np} / S_{\phi} = \frac{50,4}{31,5 \cdot 10^{-6}} = 1,6 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Отже, межі вимірювання манометра 0-1,6 МПа.

Вихідні дані для розрахунку наведені в таблиці 5.1

Таблиця 5.1- Вихідні дані для розрахунку

Найменування даних, одиниця виміру	Вар. № 1, 12	Вар. № 2, 7	Вар. №3, 8	Вар. №4, 9	Вар. №5, 10	Вар. №6, 11
Ефективна площа сільфона $S_{ef}$ , мм	28,8	30,2	31	31,25	32	32,2
Жорсткість пружини $K_n$ , мм	8,9	8,75	9,1	9,25	9,3	8,7
Жорсткість одного гофра сільфона $K_c$ , мм	0,2	0,18	0,23	0,22	0,28	0,3
Число гофр	6	7	8	9	10	7
Переміщення денця сільфона $h$ , мм	4,4	4,6	4,7	4,1	4,2	4,3

Тиск характеризується силою, рівномірно розподіленою на поверхні і діючою по нормалі до неї. В якості одиниці тиску прийнятий тиск, що викликається силою в один ньютон, рівномірно розподілений по поверхні площею  $1 \text{ м}^2$ . Ця одиниця називається “Паскаль”. З іншими несистемними одиницями вона пов’язана співвідношеннями:

$$1 \text{ мм.рт.ст.} = 133,3 \text{ Па;}$$

$$1 \text{ кгс/ см}^2 = 9,81 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$1 \text{ мм.вод.ст.} = 9,81 \text{ Па;}$$

$$1 \text{ кгс./ м}^2 = 9,81 \text{ Па}$$

$$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па;}$$

Розрізняють абсолютний  $p$ , манометричний (надлишко-вий)  $p_m$ , вакуумметричний  $p_v$  і барометричний (атмосферний)  $p_b$  тиски.

Абсолютний тиск - повний тиск. Він є параметром стану і його необхідно знати в тих випадках, коли впливом атмосферного тиску не можна нехтувати.

Визначається абсолютний тиск за формулами:

$$p = p_b + p_m,$$

$$p = p_b - p_v.$$

За принципом дії пристрої (прилади) для вимірювання тиску поділяються на рідинні, в яких вимірюваний тиск зрівноважується тиском стовпа рідини відповідної висоти; деформаційні, в яких вимірюваний тиск визначається за величиною деформації різних пружних чутливих елементів або за силою, яка ними розвивається; вантажопоршневі, в яких вимірюваний тиск зрівноважується тиском, що створюється масою поршня і вантажів; електричні, дія яких побудована на залежності електричних параметрів

манометричного перетворювача від тиску [8].

За призначенням вони поділяються на: манометри, барометри, вакуумметри, мановакуумметри, диференційні манометри. Якщо вказані прилади служать для вимірювання невеликих тисків (до 40 кПа), то їх називають напоромірами, тягомірами або диференційними тягонапоромірами.

Точність вимірювання тиску залежить від вибраного методу вимірювання, від метрологічних характеристик засобів вимірювання, від умов вимірювання та ряду інших причин. При виборі засобів вимірювання необхідно враховувати не ту точність, яка властива при роботі в нормальних умовах, а ту точність, яку прилади можуть забезпечити в даних експлуатаційних умовах [8]. Одночасно важливим є вибір шкали приладу. Необхідно пам'ятати, що допустимі похибки приладів, виражені у виді приведених похибок у відсотках від діапазону виміру. Тому для першої половини шкали приладу похибки виміру більші, ніж для другої.

Необхідно враховувати вплив зовнішніх умов на точність вимірювання.

Місце встановлення приладу повинне бути зручним для обслуговування і спостереження. Довжина з'єднувальних ліній не повинна перевищувати 50 м.

Таблиця 5.2 – Практичні межі застосування пристроїв для вимірювання тиску

Принцип дії пристрою	Найменування пристрою	Клас точності	Межі вимірювання, Па	
			нижня	верхня
Вимірюваний тиск врівноважується тиском стовпа рідини відповідної висоти	Манометри скляні рідинні U - подібні	0,2÷2	0	1-10·10 <sup>3</sup>
Вимірюваний тиск визначається за величиною деформації різних пружних чутливих елементів	Манометри трубчаті пружинні	0,6÷4	0	0,06-1000·10 <sup>6</sup>
	Деформаційні самописні манометри, вакуумметри,	1,0;1,6	0	0,1-160·10 <sup>6</sup>
	мановакуумметри	1,5	0	0,16-40·10 <sup>3</sup>
	Мембранні напороміри і тягоміри Тягонапороміри	2,5	±80	±20·10 <sup>3</sup>

3.2. *Лабораторна робота 3 «Дослідження методів вимірювання тиску».*

**Мета роботи:** Вивчення основних методів і приладів для вимірювання.

### Теоретична частина

Тиск є найбільш розповсюдженою вимірюваною фізичною величиною. Контроль за протіканням більшості технологічних процесів у тепловій та

атомній енергетиці, металургії, хімії пов'язаний з вимірюванням тиску чи різниці тисків газових та рідинних середовищ.

У сучасній вимірювальній техніці існує велика кількість видів засобів для вимірювання тиску, а саме: рідинні, поршневі, деформаційні, іонізаційні, теплові та ін. Найбільше розповсюдження отримали пружинні (деформаційні) прилади завдяки їх надійності, прості виготовлення та експлуатації, низькій вартості, порівняно високій точності, тривалому ресурсу роботи та іншим перевагам.

Засоби вимірювання тиску класифікують за видом вимірюваного тиску і принципом дії. За видом вимірюваного тиску засоби вимірювань поділяють на:

- манометри надлишкового тиску - для вимірювання надлишкового тиску;
- манометри абсолютного тиску - для вимірювання тиску, відліченого від абсолютного нуля;
- барометри - для вимірювання атмосферного тиску;
- вакуумметри - для вимірювання вакууму (розрідження);
- мановакуумметри - для вимірювання надлишкового тиску і вакууму [2];
- «напороміри - манометри малого надлишкового тиску (до 40  $kPa$ );
- тягоміри - вакуумметри з верхньою межею вимірювання не більше ніж 40  $kPa$ ;
- тягонапороміри - мановакуумметри з діапазоном вимірювань +20...-20  $kPa$ ;
- вакуумметри залишкового тиску - вакуумметри, призначені для вимірювання глибокого вакууму або залишкового тиску, тобто абсолютного тиску менше ніж 200  $Pa$ ;
- диференціальні манометри - засоби вимірювань різниці тисків [3].

За принципом дії засоби вимірювань тиску поділяють на:

- рідинні;
- деформаційні (пружинні);
- поршневі;
- теплові;
- електричні.

Вентилятор - пристрій для переміщення повітря або газів по трубопроводам, каналам тощо. Вентилятори можуть створювати надлишковий тиск до 1000-1500 мм вод.ст. Розрізняють два типи вентиляторів: відцентрові та осьові. В осьовому вентиляторі газ переміщається уздовж осі робочого колеса. У відцентровому вентиляторі переміщення газу відбувається під дією відцентрових сил, що виникають при обертанні робочого колеса. Більше розповсюдження мають відцентрові вентилятори [1].

## Експериментальна частина

Конструкція відцентрового вентилятора показана на рисунку 5.1. Вентилятор складається з наступних елементів: 1 - робоче колесо, що включає два диски, між якими рівномірно розміщено ряд лопаток; 2 - завитокообразний кожух (корпус); 3 - електродвигун, вал якого жорстко пов'язано з віссю робочого колеса вентилятора. Між робочим колесом та кожухом є зазор для вільного обертання колеса. Кожух має два осьових отвори: через менший проходить вал до електродвигуна, а через більший відбувається забір навколишнього повітря. Більший отвір закритий металевою сіткою [3].

Рисунок 5.1 – Схема експериментальної установки: 1 – вентилятор, 2 – анемометр, 3 – витратомір

Кожний вентилятор, що виготовляється на заводі, забезпечується характеристикою. Однак у процесі експлуатації або при індивідуальному виготовленні вентилятора доводиться знімати характеристику вентилятора самостійно.

Основними характеристиками при виборі вентилятора є:

- надлишковий повний тиск на вихлопі  $\Delta P_{пов}$ ;
- продуктивність вентилятору  $V$ .

Допоміжними характеристиками, що дозволяють точніше підібрати вентилятор для конкретних умов, є:

- робоча потужність -  $N_{роб}$ ;
- число обертів робочого колеса -  $n$ ;
- повний коефіцієнт корисної дії вентилятору (без електродвигуна) -  $\eta_{пов}$ . [2].

У відмінності від напору, який створюють насоси, що вимірюється в метрах водного стовпа, (в системі СІ Па) і являє собою питому енергію, що витрачається на одиницю маси рідини, тиск вентилятора являє собою питому енергію, що витрачається на кожний м<sup>3</sup> повітря (газу).

Вентиляторна установка звичайно складається з вентилятора із приєднаними до нього всмоктувальними й нагнітальними патрубками. Тому тиск, що створюється вентилятором, витрачається на подолання опору всмоктувальних і нагнітальних патрубків і створення динамічного тиску на виході нагнітального трубопроводу [3].

$$P = \Delta P_{вс.} + \Delta P_{нагн.} + \frac{\rho U_{вих}^2}{2} + (P_{вих} - P_{вх}),$$

де  $\Delta P_{вс}$  ,  $\Delta P_{нагн}$  - втрати тиску на тертя й у місцевих опорах всмоктування та нагнітання;

$(P_{вих} - P_{вх})$  - різниця тисків перед виходом і перед входом у вентиляторну мережу, або гідростатична складова;

$\frac{\rho U_{вих}^2}{2}$  - динамічний тиск на виході з нагнітальної труби.

Для вентиляторних установок гідростатичну складову враховують за умов природної тяги та при створенні підпору (наприклад при розрахунку димососа), але у більшості випадків нею нехтують.

Тиск, який створює вентилятором, визначається рівнянням Л. Ейлера:

$$P = \psi \rho U^2,$$

де  $\psi$  - коефіцієнт тиску;

$\rho$  - масова густина;

$U$  - окружна швидкість на кінцях лопатів.

Із рівняння Ейлера видно, що тиск вентилятора залежить від щільності повітря, тобто від атмосферного тиску й абсолютної температури повітря. Густина  $\rho$  розраховується за формулою:

$$\rho = \rho_0 \frac{P_{ат} T_0}{P_{ам}^0 T},$$

де  $\rho_0, P_{ам}^0, T_0$  - параметри атмосфери за звичайних умов.

Об'ємна витрата або подача  $L$  вентилятора не залежить від густини газу. Тому у випадку зміни густини буде відповідно змінюватися масова кількість газу, що перекачується, масова подача  $M$

$$M = \rho L$$

Під час зміни режимів роботи, які характеризуються подобою трикутників швидкостей, подача вентилятора змінюється прямо пропорційно зміні частоти обертання  $n(\omega)$

$$\frac{L}{L_0} = \frac{n}{n_0} = \frac{\omega}{\omega_0}$$

де  $\omega$  - кутова швидкість обертання,  $n$  - кількість обертів за хвилину.

При цьому тиск, який створює вентилятор у мережі, пропорційний квадрату частоти обертання

$$\frac{P}{P_0} = \frac{n^2}{n_0^2} = \frac{\omega^2}{\omega_0^2}$$

Питома корисна потужність вентилятора дорівнює

$$N_{кор} = PL,$$

де  $P$  - повний тиск, Па;

$L$  - подача, м<sup>3</sup>/с.

Загальна потужність, що споживається вентилятором, з урахуванням всіх видів втрат у ньому визначається:

$$N_e = \frac{N_{пов}}{\eta} = \frac{P \cdot L}{\eta}$$

де  $\eta$  - коефіцієнт корисної дії вентилятора.

Під час зміни частоти обертів вентилятора спожита потужність змінюється за формулою:

$$\frac{N}{N_0} = \left(\frac{n}{n_0}\right)^3 = \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^3$$

Тому постійна масова витрата газу, за умов підвищення температури спожита потужність вентилятора буде зростати внаслідок збільшення об'ємної подачі  $L$ .

## Тема 6. Ознайомлення з засобами вимірювання рідини

1. Обговорення основних положень теми та питань самостійного вивчення:

1. Що таке число Рейнольдса та про що свідчить його значення.
2. Описати роботу витратоміру Піто. З чим пов'язано відношення  $v_B/v_{ВП}$ ?
3. Описати роботу витратоміру Вентурі.
4. Вкажіть можливі причини розбіжностей між швидкостями, що визначені різними засобами.
5. Якому витратоміру слід давати перевагу та коли і чому.

2. Опитування.

3. Практичні завдання.

### Приклад розв'язування завдання.

В U-образному манометрі з водяним заповненням внутрішні діаметри трубок відповідно рівні 8 і 8,3 мм. При вимірі тиску рівень в першій трубці перемістився на 204 мм. Вимірюється тиск вважалось рівним 4 кПа. Оцініть похибку, викликану неврахуванням реального рівня в другій трубці.

### Рішення

При зміні рівня в першій трубці на  $h_1$  - 204 мм з першої трубки в другу перетікає води (в об'ємних одиницях)

$$V = \frac{\pi d_1^2}{4} h_1$$

Визначимо, наскільки перемістився рівень води в другій трубці:

$$h_2 = h_1 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 = 204 \left(\frac{8}{8,3}\right)^2 = 189,5 \text{ мм.}$$

Отже, дійсне вимірюється тиск

$$p_d = (h_1 + h_2) \rho g = 3,859 \text{ кПа.}$$

Похибка вимірювання тиску за рахунок неоднакової зміни рівня в першій і другій трубках

$$\delta p = \frac{p - p_d}{p_d} = \frac{4,0 - 3,859}{3,859} \cdot 100\% = 3,65\%$$

Вихідні дані для розрахунку наведені в таблиці 6.1

Таблиця 6.1

Найменування даних, одиниця виміру	Вар. № 1, 12	Вар. № 2, 7	Вар. №3, 8	Вар. №4, 9	Вар. №5, 10	Вар. №6, 11
Внутрішній діаметр трубки $d_1$ , мм	7,5	8	7,9	8,2	8,3	8,1
Внутрішній діаметр трубки $d_2$ , мм	7,7	8,4	8,2	8,45	8,6	8,45
Зміна рівня в першій трубці $h_1$ , мм	193	198	185	209	213	208
Тиск, кПа	3,8	3,5	3	5	4,5	4,3

Для усталеної течії ідеальної рідини у трубі тиск та швидкість в кожній точці в нутрі рідини не залежить від часу та радіальної координати. У трубі змінного перерізу швидкість змінюється вздовж труби згідно рівнянню нерозривності

$$vS = \text{const} \quad \text{або} \quad v_1 S_1 = v_2 S_2.$$

Тиск та швидкість течії рідини у трубі задовільняє рівняння Бернуллі

$$p + \rho gh + \frac{\rho v^2}{2} = \text{const}$$

Для горизонтально розташованої труби рівняння спрощується

$$p + \frac{\rho v^2}{2} = \text{const} \quad \text{або} \quad p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2}$$

Рівняння Бернуллі може бути записано в одиницях напору:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + h_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + h_2$$

де  $\Delta h = h_1 - h_2$  - геометричний напір,  $\alpha$  - коефіцієнт Коріоліса, що залежить від режиму течії рідини ( $\alpha_{\text{лам}} = 2$ ,  $\alpha_{\text{турб}} \approx 1$ ).

Рівняння Бернуллі було написано для ідеальної рідини: нев'язкої ( $\mu = 0$ ) та нестисливої. Оскільки реальні рідини мають в'язкість, то це призводить до змінення швидкості рідини в перерізі труби, тому треба перевірити виконання даного співвідношення експериментально. Для цієї мети використовують витратоміри різних конструкцій, наприклад, витратоміри Піто та Вентурі [3].

«Схема витратоміра Піто показана на рис.1. Він представляє собою дві манометричні трубки: п'езометра та трубки Піто, кінець якої повернутий назустріч потоку рідини та повинен бути значно меншого діаметру ніж у труби, щоб уникнути збурень потоку. У відкритого кінця трубки Піто рідина нерухома, тоді як біля п'езометра вона рухається практично без збурень [1]:

$$p_1 = p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2}$$

звідси отримаємо для витратоміра Піто

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} = \sqrt{2g(h_1 - h_2)}$$

$\Delta h = h_2 - h_1$  - вимірюється за допомогою шкали.

### Рисунок 6.1 - Витратомір Піто

Схема *витратоміра Вентурі* показана на рис.6.2. Він складається з двох трубок різного перерізу ( $S_1$  та  $S_2$ ), до яких приєднано п'єзометри або U-подібна трубка манометру, яка також вимірює різницю рівнів  $\Delta h$ , яка пов'язана з різницею тисків  $\Delta p = p_2 - p_1 = \rho g \Delta h$  [2].

Знаходимо для витратоміра Вентурі

$$v = \frac{\sqrt{2(p_1 - p_2)}}{\sqrt{\rho \left( \frac{S_1^2}{S_2^2} - 1 \right)}} = \frac{\sqrt{2g(h_1 - h_2)}}{\sqrt{\left( \frac{S_1^2}{S_2^2} - 1 \right)}}$$

### Рисунок 6.2 - Витратомір Вентурі

Якщо рідина близька за своїми властивостями до ідеальної, то обидві формули дадуть однаковий результат. Однак при цьому потрібно, щоб вимірювана швидкість співпадала з середньою швидкістю  $v_2$ , яка визначається по витраті рідини (наприклад, по проходженні через трубу деякого об'єму рідини  $V$  за одиницю часу)

$$v_2 = \frac{V}{S_2 t}$$

Для ідеальної рідини  $v_2$  співпадає з реальною швидкістю улюб'ячій точці перерізу. При врахуванні сил в'язкості ми маємо розподіл швидкостей у перерізі (нуль біля стінки та максимум по центру труби), тому показ витратоміру Піто буде залежати від місця розташування його входу у трубі [3]. Таким чином, визначення швидкості витікання рідини з труби всіма ціми методами дозволяє досліджувати можливість застосування



наведених формул для ідеальної рідини для розрахунку течії реальної рідини.

*Гідравлічні втрати.* Гідравлічні втрати пов'язані з наявністю внутрішнього тертя (в'язкості) у рідині. При врахуванні сил в'язкості у перерізі потоку існує розподіл швидкостей (нуль біля стінки та максимум у центрі труби). В ламінарному режимі розподіл швидкостей є параболічним, в турбулентному - приблизно трапецеїдальний, що пов'язано з наявністю тонкого ламінарного пристінного шару, який зменшується з зростанням числа Рейнольдса [3]. Унаслідок тертя зменшується загальна енергія потоку рідини. Оскільки внаслідок виконання рівняння нерозривності при сталому перерізі зберігається величина швидкості, буде зменшуватись потенціальна енергія потоку, тобто величина тиску, який вимірюється п'езометрами в одиницях напору.

Рівняння Бернуллі для реальної рідини має вигляд:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + h_w$$

де:  $h_w = h_T + h_m$  - гідравлічні втрати напору, які бувають двох видів: втрат напору на тертя  $h_T$  та місцеві  $h_m$ . Величина втрат напору на тертя у трубі довжиною  $l$  та діаметром  $d$  розраховується за формулою Дарсі-Вейсбаха:

$$h_T = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

де  $\lambda$  - коефіцієнт гідравлічного тертя (коефіцієнт Дарсі), який визначається

для ламінарної течії:  $\lambda = 64 / Re$ ,

для турбулентної течії (формула Альтшуля):

$$\lambda = 0.11 \left( \frac{\Delta_e}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0.25}$$

де  $\Delta_e$  - шорсткість труб,  $\Delta_e / d$  - відносна шорсткість труб.

Окремі випадки: формула Блазіуса:

$$\lambda = \frac{0.316}{Re^{0.25}} - \text{для гідравлічногладких труб,}$$

формула Шифрінсона:

$$\lambda = 0.11 \left( \frac{\Delta_e}{d} \right)^{0.25} - \text{для шорстких труб.}$$

Гідравлічні втрати напору на місцевих опорах розраховуються за формулою Вейсбаха ( $\zeta$  - коефіцієнт місцевих втрат):

$$h_M = \zeta \frac{v^2}{2g}$$

Розрахунок втрат для раптового розширення трубопроводу за формулою Борда (переріз  $S_1 \rightarrow S_2$ ) [1]:

$$h_{pp} = h_M = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g} \quad \text{або} \quad \zeta = \left( \frac{S_2}{S_1} - 1 \right)^2$$

**ЧАСТИНА 3.  
МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ З ОРГАНІЗАЦІЇ САМОСТІЙНОЇ  
РОБОТИ СТУДЕНТІВ**

# ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 1. ОСНОВИ ВИМІРЮВАНЬ ТА ЇХ ПОХИБКИ

## Тема 1. Контактні способи вимірювання температури

**Форми контролю:** опитування, перевірка задач.

**Завдання для самостійної роботи:**

1. Опрацюйте конспект лекцій та рекомендовану літературу для обговорення теоретичних питань теми на практичному занятті.
2. Розв'яжіть тестові завдання.

**Види вимірювальних приладів**

- A. аналогові й цифрові
- B. стислі
- C. деформуючі
- D. наведені

**Інтегруючі вимірювальні прилади**

- A. дають інтегральне значення вимірюваної величини
- B. допускають відлічування показань за допомогою відлікових пристроїв
- C. виробляють сигнали вимірювальної інформації
- D. дискретні сигнали, що автоматично виробляються

**Вид параметричних датчиків**

- A. трансформаторні
- B. індукційні
- C. п'єзоелектричні
- D. радіаційні

**Класифікація датчиків**

- A. по виду контрольованої величини
- B. залежить від місця розташування
- C. по конструкції
- D. по функціоналу

**Перехідний сигнал**

- A. від перетворювача до вторинного приладу
- B. від датчика до первинного приладу
- C. на вимірювальну частину приладу
- D. з підсилювача у вимірювальну схему

### **Клас точності приладу**

- A. максимальна погрішність, віднесена до межі виміру виражена у відсотках
- B. відносна погрішність, віднесена до межі виміру виражена у відсотках
- C. наведена погрішність, віднесена до межі виміру виражена у відсотках
- D. абсолютна погрішність, віднесена до межі виміру виражена у відсотках

### **Перевірка приладів**

- A. періодичне зіставлення показань зразкових приладів і тих, що поверяються
- B. тарировка шкали зразкового приладу
- C. визначення похибки зразкового приладу за допомогою поверяемого
- D. визначення похибки приладу, що поверяється, за допомогою аналогового

### **Градуіровка приладу**

- A. розподілам шкали приладу надають значення, виражені у встановлених одиницях
- B. визначають дійсне значення шкали
- C. наносять на шкалу зразкові позначення вимірюваного середовища в одиницях
- D. наносять зразкове значення шкали

### **Клас точності приладу**

- A. максимальна похибка, віднесена до межі вимірювання виражена у відсотках
- B. відносна похибка, віднесена до межі вимірювання виражена у відсотках
- C. приведена похибка, віднесена до межі вимірювання виражена у відсотках
- D. мінімальна похибка, віднесена до межі вимірювання виражена у відсотках

### **Клас точності зразкових приладів**

- A. 0,02; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,3; 0,4
- B. 0,02; 0,08; 1,0; 2,5; 1,5; 0,4
- C. 0,02; 0,09; 2,0; 2,5; 3,5; 0,4
- D. 0,02; 0,06; 0,7; 1,0; 2,5; 1,5; 4,0

### **3. Задачі для самостійного розв'язування.**

1. Визначте абсолютні і відносні зміни показань манометричного термометра, викликане зміною барометричного тиску від 100,45 до 96,45

кПа. Шкала приладу 0-100°C, що відповідає зміні тиску від 0,67 до 0,92 МПа. Прилад показує температуру 80°C. Шкала приладу рівномірна.

2. Визначте допустиму абсолютну похибку вимірювання комплекту, що включає термоелектричний термометр, нормуючий перетворювач і самописний прилад. Причому, що допускається абсолютна похибка термоелектричного термометра дорівнює 2,0°C. Нормуючий перетворювач має клас точності 0,5, самописний прилад - клас точності 1,0. Діапазон вимірювання комплекту 200 - 600°C. Прийняти, що похибки незалежні і носять випадковий характер.

3. Визначте межі довірчого інтервалу похибки вимірювання температури з ймовірністю 0,95, якщо  $m_t = 900^\circ\text{C}$ , а дисперсія  $D_t = 49 (\text{°C})^2$ .

### **Рекомендована література:**

1. Денісов А.К. Теплотехнічні вимірювання та прилади: навч. посіб. / А.К. Денісов, С.А. Денісов. – Рівне : НУВГП, 2013. – 184 с.

2. Співак О.Ю. Теплотехнічні вимірювання та прилади: навч. посіб. / О.Ю. Співак – Вінниця: ВНТУ, 2014. – 137 с.

3. Курилов А.Ф. Теплотехнічні вимірювання і прилади: навч. пос. / А.Ф. Курилов, В.М. Козін – Суми: Сумський державний університет, 2015. – 189 с.

### **Тема 2. Безконтактні способи вимірювання температури**

**Форми контролю:** розв'язування задач.

#### **Завдання для самостійної роботи:**

1. Опрацюйте конспект лекцій та рекомендовану літературу для обговорення теоретичних питань теми на практичному занятті.

2. Розв'яжіть тестові завдання.

#### **Похибка вимірювання**

А. відхилення результату від істинного значення вимірюваної величини

В. результат вимірювання

С. різниця показань приладу в одиницю часу

Д. сумарне значення зведеної похибки

#### **Абсолютна похибка вимірювального приладу**

А. різниця між показанням приладу і справжнім значенням величини

В. відношення похибки приладу до нормуючого значення

С. сума відносної і допустимої похибки

Д. різниця показань приладу в одиницю часу

**Похибка спрацьовування відремонтованих приладів становить**

- A. 2-5
- B. 5-50
- C. 30
- D. 10

**Ціна поділу**

- A. значення вимірюваної величини на одному розподілі шкали
- B. кутове переміщення вказівника
- C. лінійне переміщення вказівника
- D. зміна вимірюваної величини в одиницю часу

**Сигнал, що надходить від чутливого елемента до перетворювача**

- A. вхідний
- B. зворотний
- C. регульований
- D. вихідний

**Призначення нормуючих вимірювальних перетворювачів**

- A. для перетворення нестандартного сигналу в стандартний сигнал
- B. для перетворення постійного струму в змінний
- C. для перетворення цифрового коду в постійний струм
- D. для перетворення змінного струму в постійний

**Яка фізична величина діє на вході феродинамічного перетворювача**

- A. кутове переміщення
- B. кутова швидкість
- C. лінійна швидкість
- D. кутове прискорення

3. Задачі для самостійного розв'язування.

1. Температура газоходу  $t = 1100^{\circ}\text{C}$  вимірюється трьома пірометрами яскравим, радіаційним і колірним. При цьому для яскравого пірометра  $\varepsilon_{\lambda} = 0,75$  при  $\lambda = 0,55$  мкм, радіаційного пірометра  $\varepsilon_m = 0,38$ , а для колірного пірометра  $\varepsilon_{\lambda} = 0,358$  ( $\lambda = 0,65$  мкм),  $\varepsilon_{\lambda_2} = 0,39$  ( $\lambda_2 = 0,45$  мкм). Що покаже кожен з пірометрів?

**Рекомендована література:**

1. Денісов А.К. Теплотехнічні вимірювання та прилади: навч. посіб. / А.К. Денісов, С.А. Денісов. – Рівне : НУВГП, 2013. – 184 с.

2. Співак О.Ю. Теплотехнічні вимірювання та прилади: навч. посіб. / О.Ю. Співак – Вінниця: ВНТУ, 2014. – 137 с.

3. Курилов А.Ф. Теплотехнічні вимірювання і прилади: навч. пос. / А.Ф. Курилов, В.М. Козін – Суми: Сумський державний університет, 2015. – 189 с.

## **ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 2 ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ ВЕЛИЧИН**

**Тема 3.** Озайомлення з залежністю питомої теплоємності від температури калориметром із адіабатною оболонкою

**Форми контролю:** розв'язування задач

**Завдання для самостійної роботи:**

1. Опрацюйте конспект лекцій та рекомендовану літературу для обговорення теоретичних питань теми на практичному занятті.

2. Розв'яжіть тестові завдання.

**Які манометри використовують в якості зразкових**

- A. вантажопоршневі
- B. діфманометри
- C. рідинні
- D. електричні

**Як називаються прилади тиску з двосторонньою шкалою з межами вимірювання  $\pm 20$  кПа**

- A. тягонапороміри
- B. тягоміри
- C. напоромери
- D. манометрами

**Какие преобразователи используют в электрических манометрах**

- A. тензометрические
- B. термоэлектрические
- C. фотоэлектрические
- D. индукционные

**Які перетворювачі використовують в електричних манометрах**

- A. тензометричні
- B. термоелектричні
- C. фотоелектричні
- D. індукційні

**Тиск-це відношення**

- A.  $P = F/S$
- B.  $P = QS$

- C. P= FS
- D. P= QF

**Прилад для вимірювання надлишкового тиску**

- A. манометри
- B. вольтметри
- C. амперметри
- D. пірометри

**Прилад для вимірювання вакууму**

- A. вакуумметри
- B. пірометри
- C. манометри
- D. напоромери

**Прилад для вимірювання невеликого надлишкового тиску**

- A. напоромери
- B. тягоміри
- C. пірометри
- D. вакуумметри

3. Задачі для самостійного розв'язування.

1. Мілівольтметр має рівномірну шкалу, розділену на 50 інтервалів. Нижня межа вимірювання  $U_n = -10\text{мВ}$ , верхній  $U_v = +10\text{мВ}$ . Визначити ціну поділки шкали і чутливість мілівольтметра.

**Рекомендована література:**

1. Денісов А.К. Теплотехнічні вимірювання та прилади: навч. посіб. / А.К. Денісов, С.А. Денісов. – Рівне : НУВГП, 2013. – 184 с.
2. Співак О.Ю. Теплотехнічні вимірювання та прилади: навч. посіб. / О.Ю. Співак – Вінниця: ВНТУ, 2014. – 137 с.
3. Курилов А.Ф. Теплотехнічні вимірювання і прилади: навч. пос. / А.Ф. Курилов, В.М. Козін – Суми: Сумський державний університет, 2015. – 189 с.

**Тема 4.** Ознайомлення з принципом дії роторного насоса.

**Форми контролю:** розв'язування задач.

**Завдання для самостійної роботи:**

1. Опрацюйте конспект лекцій та рекомендовану літературу для обговорення теоретичних питань теми на практичному занятті.



2. Розв'яжіть тестові завдання.

**Робочим органом гідравлічної машини є**

- A. гідравлічний двигун
- B. турбіни
- C. усі відповіді вірні
- D. електродвигун

**Гідравлічна машина – це**

- A. агрегат
- B. система
- C. установка
- D. комплекс

**До гідравлічних машин відносяться**

- A. насоси
- B. гідродвигуни і гідропередачі
- C. усі відповіді вірні
- D. клапани та передачі

**Насос являє собою машину для**

- A. для перетворення енергії потоку рідкого середовища в енергію вихідної ланки
- B. створення потоку рідкого середовища
- C. передачі та перетворення енергії за допомогою рідкого середовища
- D. створення потоку рідкого середовища в густе

**Насоси за принципом дії і конструкцією діляться на дві основні групи**

- A. динамічні та об'ємні
- B. відцентровані та осьові
- C. насоси тертя та інерції
- D. прості та складні

**До об'ємних насосів відносять**

- A. вихрові
- B. вібраційні
- C. поршневі
- D. осьові

**До динамічних насосів відносять**

- A. роторні
- B. поршневі
- C. вихрові
- D. горизонтальні

**Насоси й гідродвигуни застосовують в**

- A. гідропередачах
- B. турбінах
- C. силових установках
- D. комплексних енергетичних установках

**Основними робочими параметрами, які характеризують гідравлічні машини та режими їх роботи - є**

- A. напір (або тиск),
- B. подача (для насоса) або витрата (для гідродвигуна)
- C. усі відповіді вірні
- D. тиск та подача

**Центробіжний насос – насос, у якому рух рідини та необхідного напору складаються за рахунок центробіжної сили, що виникає при дії**

- A. робочого колеса на рідину
- B. лопатей на рідину
- C. правильна відповідь відсутня
- D. робочого колеса на рідину, що потрапляє у двигун

3. Задачі для самостійного розв'язування.

1. Визначте похибку манометра з пневматичним вихідним сигналом (0,02 ... 0ДМПа) і межею вимірювання 0 ... 0,6 МПа, якщо при тиску 0,45МПа значення вихідного сигналу склало 0,084МПа..

**Рекомендована література:**

- 1. Денісов А.К. Теплотехнічні вимірювання та прилади: навч. посіб. / А.К. Денісов, С.А. Денісов. – Рівне : НУВГП, 2013. – 184 с.
- 2. Співак О.Ю. Теплотехнічні вимірювання та прилади: навч. посіб. / О.Ю. Співак – Вінниця: ВНТУ, 2014. – 137 с.
- 3. Курилов А.Ф. Теплотехнічні вимірювання і прилади: навч. пос. / А.Ф. Курилов, В.М. Козін – Суми: Сумський державний університет, 2015. – 189 с.

**Тема 5. Ознайомлення з засобами вимірювання тиску.**

**Форми контролю:** розв'язування задач.

**Завдання для самостійної роботи:**

- 1. Опрацюйте конспект лекцій та рекомендовану літературу для обговорення теоретичних питань теми на практичному занятті.
- 2. Розв'яжіть тестові завдання.

**При вимірі тиску газу манометр знаходиться відносно осі трубопроводу**

- A. вище
- B. уздовж
- C. нижче
- D. паралельно

**Манометри призначені для вимірювання**

- A. середніх і великих надлишкових тисків
- B. середніх надлишкових і малих залишкових тисків
- C. великих залишкових тисків
- D. малих залишкових тисків

**Абсолютний тиск**

- A. відлік від абсолютного нуля
- B. дорівнює відносному
- C. сума надлишкового та атмосферного тиску
- D. дорівнює барометричному

**Види тиску**

- A. абсолютний, надмірний, атмосферний і вакуум
- B. відносний, абсолютний, допустимий
- C. відносний, надмірний, абсолютний
- D. змінний, барометричний, відносний

**Одиниці виміру тиску**

- A. Паскаль, кгс/см<sup>2</sup>, 1мм. рт.ст, 1мм. в. ст
- B. Ампер, дкг/м<sup>3</sup>, 3мм. рт.ст, Па. с
- C. Вольт, м<sup>3</sup>/кг, кгс/см<sup>2</sup>, 2мм. рт.ст, рад/с
- D. Ватт, кгс/мм<sup>2</sup>, рад/с<sup>2</sup>, Н/м<sup>2</sup>, кгс/м<sup>2</sup>

**Прилад, призначений для вимірювання різниці двох тисків**

- A. диференціальний манометр
- B. барометр
- C. вакуумметри
- D. пірометри

**Манометри встановлюються**

- A. горизонтально
- B. незалежно від заповнення
- C. вертикально
- D. в залежності від заповнення

**Диференціальний манометр застосовується для**

- A. перетворення перепаду тиску в електричний сигнал
- B. вимірювання розрядження

- C. вимірювання витрати
- D. вимірювання тиску

3. Задачі для самостійного розв'язування.

1. Визначте перепад тиску, який створюється напірними трубками, якщо потік води рухається зі швидкістю 0,1 м / с, щільність води  $\rho = 985$  кг / м<sup>3</sup>, коефіцієнт трубки  $\zeta = 0,07$ .

2. Як зміняться показання рівнеміра, що відградуєвано при тиску 0,1 МПа, якщо тиск насичення в барабані підніметься до 10 МПа?

### **Рекомендована література:**

1. Денісов А.К. Теплотехнічні вимірювання та прилади: навч. посіб. / А.К. Денісов, С.А. Денісов. – Рівне : НУВГП, 2013. – 184 с.
2. Співак О.Ю. Теплотехнічні вимірювання та прилади: навч. посіб. / О.Ю. Співак – Вінниця: ВНТУ, 2014. – 137 с.
3. Курилов А.Ф. Теплотехнічні вимірювання і прилади: навч. пос. / А.Ф. Курилов, В.М. Козін – Суми: Сумський державний університет, 2015. – 189 с.

## **Тема 6. Ознайомлення з засобами вимірювання рідини**

**Форми контролю:** розв'язування задач

**Завдання для самостійної роботи:**

1. Опрацюйте конспект лекцій та рекомендовану літературу для обговорення теоретичних питань теми на практичному занятті.

2. Розв'яжіть тестові завдання.

**При вимірі тиску рідини манометр знаходиться відносно осі трубопроводу**

- A. вище
- B. уздовж
- C. нижчих
- D. паралельно

**У рідинних приладах в якості заспокоювача застосовують**

- A. звуження каналів
- B. спеціальні пластини
- C. індукційні заспокоювачі
- D. повітряні заспокоювачі

**Які перетворювачі використовують в електричних манометрах**

- A. тензометричні
- B. термоелектричні
- C. фотоелектричні
- D. індукційні

**Для яких рідких середовищ електроди ємнісних рівнемірів покривають ізоляцією**

- A. для провідних
- B. для вузьких
- C. для плівкоутворюючих
- D. для агресивних

**Принцип дії ультразвукових рівнемірів заснований**

- A. на ефекті відображення ультразвукових хвиль від межі розділу рідини і газу
- B. на ефекті заломлення ультразвукових хвиль
- C. на ефекті поглинання ультразвукових хвиль
- D. на ефекті посилення ультразвукових хвиль

**Для контролю рівня рідини застосовуються рівнеміри**

- A. візуальні
- B. стандартні
- C. статичні
- D. астатические

**В качестве рабочей жидкости используются**

- A. фреон
- B. фенол
- C. ацетон
- D. хлористый метил

3. Задачі для самостійного розв'язування.

1. По трубі діаметром  $D = 100$  мм рухається потік рідини з середньою швидкістю  $v = 1,5$  м / с. Визначте масову витрату рідини, якщо її щільність  $\rho = 990$  кг / м.

2. Витрата води у трубопроводі діаметром  $D = 80$  мм вимірюється діафрагмою з отвором діаметром  $d = 58$  мм. Температура води  $150^{\circ}\text{C}$ , тиск води  $2$  МПа, перепад тиску на діафрагмі  $0,04$  МПа. Визначте, як зміниться дійсне значення витрати, якщо температура води стане  $20^{\circ}\text{C}$ . Діаметр трубопроводу, коефіцієнт витрати і перепад тиску на діафрагмі вважаємо невідомими  $K_t = 1,0023$

3. Витрата води, що протікає по трубопроводу  $D = 200$  мм, становить  $G=100$  т/год. Відносна площа діафрагми  $m=0,5$ , тиску води  $P = 10$  МПа,

температура  $t = 200^{\circ}\text{C}$ . Визначте значення перепаду тиску на пристрої звуження потоку.

### **Рекомендована література:**

1. Денісов А.К. Теплотехнічні вимірювання та прилади: навч. посіб. / А.К. Денісов, С.А. Денісов. – Рівне : НУВГП, 2013. – 184 с.
2. Співак О.Ю. Теплотехнічні вимірювання та прилади: навч. посіб. / О.Ю. Співак – Вінниця: ВНТУ, 2014. – 137 с.
3. Курилов А.Ф. Теплотехнічні вимірювання і прилади: навч. пос. / А.Ф. Курилов, В.М. Козін – Суми: Сумський державний університет, 2015. – 189 с.

## Список використаної літератури:

1. Денісов А.К. Теплотехнічні вимірювання та прилади: навч. посіб. / А.К. Денісов, С.А. Денісов. – Рівне : НУВГП, 2013. – 184 с.
2. Співак О.Ю. Теплотехнічні вимірювання та прилади: навч. посіб. / О.Ю. Співак – Вінниця: ВНТУ, 2014. – 137 с.
3. Теплотехнічні вимірювання та прилади: лабораторний практикум для студентів, що навчаються за напрямом підготовки 6.050604 "Енергомашинобудування" / М.Т. Малафаєв, М.А. Чеканов; Харківський держ. ун-т харчування та торгівлі. – Харків: ХДУХТ, 2018. – 74 с.
4. Курилов А.Ф. Теплотехнічні вимірювання і прилади: навч. пос. / А.Ф. Курилов, В.М. Козін – Суми: Сумський державний університет, 2015. – 189 с.
5. Мурин Г.А. «Теплотехнічні вимірювання». М., «Енергія»1968. – 584с.
6. Кованько В.В. Занальнотехнічні вимірювання і прилади: навч. посіб. / В.В. Кованько, В.В. Древецький, А.О. Христюк. – Рівне : НУВГП, 2013. – 189 с.
7. Поліщук Є.С., Дорожовець М.М., Яцук В.О. та ін. Метрологія та вимірювальна техніка: Підручник / Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець, В.О. Яцук, В.М. Ванько, Т.Г. Бойко; За ред. Проф. Є.С. Поліщука. – Львів: Видавництво «Бескид Біт», 2003. – 544 с.
8. Козак Ф.В., Гаєва Л.І., Негрич В.В. Лабораторний практикум з дисциплін Теоретичні основи теплотехніки, Термодинаміка, теплопередача і ТСУ, Енергетичні установки. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010. – 93 с.

Навчальне видання

*Омельченко Олександр Володимирович,  
Цвіркун Людмила Олександрівна*

Кафедра загальноінженерних дисциплін та обладнання

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ  
ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ  
ТЕПЛОТЕХНІЧНІ ВИМІРЮВАННЯ ТА ПРИЛАДИ**

Формат 60×84/8. Ум. др. арк. 2.

Донецький національний університет  
економіки і торгівлі  
імені Михайла Туган-Барановського  
50042, Дніпропетровська обл.,  
м. Кривий Ріг, вул. Курчатова, 13.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої  
справи ДК № 4929 від 07.07.2015 р.